УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ

КРЫМСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА имени В. И. ВЕРНАДСКОГО. БИОЛОГИЯ. ХИМИЯ

Научный журнал

Том 12 (78), № 2

Журнал «Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия» являеется историческим правопреемником журнала «Ученые записки Таврического университета», который издается с 1918 г.

Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского
Симферополь, 2026

ISSN 2413-1725

Свидетельство о регистрации СМИ – ПИ № ФС77-61791 от 18 мая 2015 года.
Выдано Федеральной службой по надзору сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций.

Учредитель – ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского»
Печатается по решению Научно-технического совета Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского, протокол № 2 от 24 марта 2026 г.
Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, отрасль науки 1.4.1. – неорганическая химия, 1.4.2. – аналитическая химия, 1.4.3. – органическая химия, 1.4.4. – физическая химия, 1.4.9. – биоорганическая химия, 1.4.15. – химия твердого тела, 1.5.5. – физиология человека и животных, 1.5.9. – ботаника, 1.5.15. – экология, 1.5.20 – биологические ресурсы, 1.5.24. – нейробиология, дата включения – 12.07.2017, а также в систему «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ)
Адрес учредителя и издателя: 295007, Республика Крым, г. Симферополь, пр-т Академика Вернадского, д. 4.

Редакционная коллегия журнала «Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия»:

Главный редактор – Чуян Елена Николаевна, д. б. н., проф.
Ответственный секретать – Туманянц К. Н., к. б. н., доц.
Технический редактор – Ярмолюк Н. С., к. б. н., доц.

Раздел «Биология»:

1. Буков Юрий Алек сандрович, д. б. н., проф.
2. Бушов Юрий Валентинович, д. б. н., проф.
3. Гончаров Николай Васильевич, д. б. н., г. н. с.
4. Диатроптов Михаил Евгеньевич, д. б. н., с. н. с.
5. Ивашов Анатолий Васильевич, д. б. н., проф.
6. Котов Сергей Федорович, к. б. н., доц.
7. Митрофанова Ирина Вячеславовна, д. б. н., доц.
8. Новоселов Владимир Иванович, д. б. н., проф.
9. Павленко Владимир Борисович, д. б. н., проф. (редактор раздела «Биология»)
10. Перов Сергей Юрьевич, д. б. н., в. н. с.
11. Плугатарь Юрий Владимирович, д. б. н., член-корр. РАН
12. Погодина Светлана Владимировна, д. б. н., доц.
13. Солдатов Алесандр Александрович, д. б. н., проф.

Раздел «Химия»:

14. Гришковец Владимир Иванович, д. х. н., проф. (редактор раздела «Химия»)
15. Гусев Алексей Николаевич, д. х. н., доц.
16. Еременко Игорь Леонидович, академик РАН
17. Земляков Александр Евгеньевич, д. х. н., проф.
18. Кискин Михаил Александрович, д. х. н., в. н. с.
19. Кукушкин Вадим Юрьевич, член-корр. РАН
20. Шульгин Виктор Федорович, д. х. н., проф.
21. Яковишин Леонид Александрович, д. х. н.

Адрес редакции: 295007, г. Симферополь, пр-т Академика Вернадского, 4, корп. Б, ауд. 328
Подписано в печать 27.05.2025. Формат 70x100/16. Заказ № НП/126. Тираж 50. Цена «Бесплатно».
Дата выхода в свет «__» _____ 2026 г.
Отпечатано в Издательском доме ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского»
Адрес типографии: 295051, г. Симферополь, бул. Ленина, 5/7
http://sn-biolchem.cfuv.r

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

ОБЗОРНЫЕ СТАТЬИ

Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского
Биология. Химия. Том 12 (78). 2026. № 2. С. 3–27.

УДК 612.215

DOI 10.5281/ZENODO.20783765

РОЛЬ РЕСПИРАТОРНОГО МИКРОБИОМА В ПАТОГЕНЕЗЕ ВИРУСНЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ ДЫХАТЕЛЬНЫХ ПУТЕЙ

Волкова К. Е.[1], Сорокин О. В.[2], Нефедова Ж. В.[3], Панасенко Л. М.[3], Суботялов М. А.[1,4]

[1]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный педагогический университет» Министерства просвещения Российской Федерации, Новосибирск, Россия
[2]ООО «Ведагенетика», Новосибирск, Россия
[3]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Новосибирск, Россия
[4]Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Новосибирск, Россия
E-mail: subotyalov@yandex.ru

Статья анализирует влияние респираторного микробиома на развитие вирусных инфекций дыхательных путей. Рассмотрены механизмы взаимодействия бактериальных сообществ с вирусами, включая иммуномодуляцию, изменение эпителиального барьера и конкуренцию за ресурсы. Показана роль дисбиоза в повышении восприимчивости к инфекциям и развитии осложнений. На примере астмы и пневмонии продемонстрирована связь между изменением состава микробиома и тяжестью заболеваний. Освещена защитная роль комменсальных бактерий (*Dolosigranulum pigrum, Corynebacterium spp., Staphylococcus epidermidis*), подавляющих патогены через выработку антимикробных веществ и иммуномодуляцию. Обсуждаются современные подходы к коррекции микробиома, включая применение пробиотиков, бактериальных лизатов и перспективы использования микробиомных маркеров для персонализированной терапии.
Ключевые слова: респираторный микробиом, вирусные инфекции, дисбиоз, иммуномодуляция, комменсальные бактерии, астма, пневмония, микробиом-таргетированная терапия.

ВВЕДЕНИЕ

Современные исследования все чаще обращают внимание на ключевую роль респираторного микробиома – сложного сообщества микроорганизмов, населяющих дыхательные пути – в поддержании здоровья дыхательной системы. В норме этот

тонко сбалансированный микробный ландшафт выполняет важнейшие функции: защищает от патогенов, модулирует иммунные реакции, поддерживает целостность слизистых оболочек. Однако нарушения этого баланса (дисбиоз) могут иметь далеко идущие последствия, повышая восприимчивость к респираторным вирусным инфекциям и усугубляя течение хронических заболеваний легких.

Механизмы взаимодействия между микробиомом и респираторными вирусами представляют особый научный интерес. С одной стороны, комменсальные бактерии способны подавлять вирусную активность через стимуляцию врожденного иммунитета, конкуренцию за рецепторы и ресурсы, выработку противовирусных метаболитов. С другой стороны, некоторые условно-патогенные микроорганизмы могут усиливать вирусную инфекцию, разрушая эпителиальный барьер и изменяя локальные воспалительные реакции. Эти сложные взаимодействия особенно ярко проявляются при таких заболеваниях, как бронхиальная астма и пневмония, где микробиомные нарушения часто предшествуют клиническим проявлениям и влияют на тяжесть течения.

Особого внимания заслуживает группа «защитных» комменсалов – *Dolosigranulum pigrum, Corynebacterium spp., Staphylococcus epidermidis*. Эти микроорганизмы демонстрируют выраженную антагонистическую активность против респираторных патогенов, что открывает перспективы для разработки новых терапевтических стратегий. В то же время их защитный потенциал может существенно снижаться под воздействием антибиотиков, факторов окружающей среды и хронических заболеваний, что требует тщательного изучения условий, необходимых для поддержания их функциональной активности.

В данной статье мы систематически анализируем современные данные о роли респираторного микробиома в патогенезе вирусных инфекций, уделяя особое внимание механизмам микробно-вирусных взаимодействий, изменениям микробиома при хронических заболеваниях легких и перспективам терапевтической модуляции микробных сообществ. Особый акцент сделан на клиническом значении этих исследований для разработки новых подходов к профилактике и лечению респираторных заболеваний, что особенно актуально в эпоху роста антибиотикорезистентности и поиска альтернативных методов терапии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Был проведен тщательный обзор литературы, в основном опубликованной в период с 2020 по 2025 год. Мы использовали базу данных PubMed, применяя такие ключевые термины, как «микробиом верхних дыхательных путей», «микробиом нижних дыхательных путей», «антибиотикотерапия», «микробиом», «дисбиоз», «комменсальные бактерии», «иммуномодуляция», «вирусные инфекции», «астма», «пневмония».

ВЛИЯНИЕ РЕСПИРАТОРНОЙ МИКРОБИОТЫ НА ПАТОГЕНЕЗ РЕСПИРАТОРНЫХ ВИРУСНЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ

Дыхательная система, находясь в постоянном контакте с окружающей средой, особенно уязвима к инфекциям ВДП (ИВДП), которые чаще всего поражают детей

и пожилых людей [1]. ИВДП могут быть вызваны вирусами или бактериями, однако вирусные инфекции являются основной причиной острых респираторных заболеваний. Хотя способность респираторных вирусов вызвать последующие бактериальные коинфекции хорошо известна, современные данные свидетельствуют о том, что может происходить обратное [1].

Дисбиоз дыхательных путей, характеризующийся доминированием патобионтов (*S. pneumoniae, H. influenzae, S. aureus, M. Catarrhalis)* и снижением разнообразия комменсальной микрофлоры, может не только быть следствием вирусной инфекции, но и предрасполагать к более тяжелому течению вирусных заболеваний. Патобионты – это бактерии, которые обычно обнаруживаются у здоровых людей, не имеющих симптомов, но при определённых условиях могут стать патогенными. Повышенное содержание патобионтов часто приводит к снижению разнообразия микробиоты, что, как предполагается, способствует ослаблению врождённого эпителиального барьера и усилению воспаления в ответ на внешние раздражители, включая респираторные вирусы [1].

Несколько механизмов могут объяснить связь между бактериальным дисбактериозом и вирусными инфекциями: нарушение мукоцилиарного клиренса за счет бактериальных ферментов, выделяемых патобионтами (например, эластаза); повышение экспрессии вирусных рецепторов на эпителиальных клетках; изменение TLR-опосредованного иммунного ответа [1]. Эти процессы создают благоприятные условия для вирусной инвазии, обеспечивая альтернативные пути проникновения вирусов и снижая эффективность врожденной иммунной защиты. Поддержание баланса респираторного микробиома может быть важной стратегией профилактики и контроля респираторных вирусных инфекций.

Недавние исследования выявили ключевые различия в функциональных характеристиках легочного микробиома у инфицированных и здоровых пациентов. Установлено, что бактерии у больных демонстрируют повышенную экспрессию генов, связанных с подвижностью (хемотаксис, жгутиковый аппарат) и метаболической адаптацией, что свидетельствует о процессе естественного отбора микроорганизмов, способных выживать в изменяющихся условиях дыхательных путей. Эти адаптированные бактерии, проникая в нижние дыхательные пути (НДП), продуцируют иммуномодулирующие соединения, существенно влияющие на течение вирусной инфекции посредством модификации мукоцилиарного клиренса, регуляции местного иммунного ответа и изменения вирусной репликации. Поэтому эти бактерии могут оказывать значительное влияние на терапевтическое состояние, как положительное, так и отрицательное, инфицированных организмов [2].

Специфическая иммунологическая толерантность, обеспечиваемая микробиомом, может предотвратить повреждение тканей в результате повышенной воспалительной реакции в случае вирусного респираторного заболевания. В одном из исследований на данную тему была доказана важность здорового респираторного микробиома для способности организма противостоять вирусу гриппа на примере мышей. Колонизация комменсальных бактерий в верхних дыхательных путях (ВДП) SPF-мышей позволила значительно уменьшить изменения в лёгких, связанные с инфекциями [2]. Изменяя фенотип реакции моноцитов и формируя

фенотип активации менее разрушительных макрофагов, эта колонизация снизила летальность при гриппозной инфекции. Кроме того, у мышей, получавших комбинацию антибиотиков, «естественным образом» денатурирующих их микробиом, наблюдалась более высокая заболеваемость при заражении пандемическим вирусом A (H1N1) в 2009 году, что приводило к значительной гипоксии и потере веса. С тяжестью этих повреждений были связаны две характеристики: снижение способности дендритных клеток к миграции, которая необходима для успешного иммунного ответа, и снижение количества тканеспецифических Т-лимфоцитов, которые помогают поддерживать высокую локальную вирусную нагрузку в течение длительного времени [2].

Жизнеспособные микробы, составляющие «полезный» микробиом, по-видимому, не являются строго необходимыми, поскольку липосахариды, введенные здоровому хозяину с измененным микробиомом, могут восстановить эффективный адаптивный иммунный ответ в экспериментах на мышиной модели. Согласно механистической концепции, микробиом стимулирует лейкоциты как локально, так и системно, что также активирует несколько рецепторов распознавания молекулярных паттернов, вырабатываемых патогенами (молекулярные паттерны, ассоциированные с патогенами, или PAMPs) [2]. Это также позволяет предположить, что микробиом играет важную роль в патогенезе вирусных респираторных инфекций. По аналогии с терапией желудочно-кишечного тракта, респираторный микробиом также можно модулировать. Например, введение кишечной палочки в дыхательные пути мышей снижало локальное воспаление, играющее ключевую роль в патогенезе респираторных инфекций, что ограничивало клинические симптомы. Клинические испытания также показали, что прием *Lactobacillus rhamnosus* уменьшал частоту и тяжесть обострений муковисцидоза, хотя эти данные требуют подтверждения в более масштабных исследованиях [2].

Некоторые авторы, тем не менее, показали, что временное снижение воспаления дыхательных путей за счет введения бактериальных антигенов может быть перспективным при лечении гриппозных инфекций. Например, мыши, предварительно обработанные аэрозолями бактериальных лизатов с липосахаридами, демонстрировали более эффективный вирусный клиренс и сниженное повреждение тканей, что улучшало их выживаемость. Но эти данные остаются спорными, поскольку воспаление при гриппе считается основной причиной клинических проявлений, а попытки модулировать его иммунномодуляторами не дали однозначных результатов. Вероятно, контроль воспаления эффективен лишь на ранних стадиях инфекции, так как его характер меняется по мере прогрессирования болезни. Аналогичным образом активация TLR-2, 6 и 9 с помощью предварительной обработки синтетическими агонистами позволила снизить титр вируса, обнаруженного при заражении вирусами парагриппа в образцах дыхательных путей, не уменьшая при этом симптомы бронхиальной гиперреактивности. Наконец, введение инактивированных токсинов *E. coli* продемонстрировало свою эффективность в обеспечении защиты от РСВ-инфекции и вирусов гриппа, а также введение *L. rhamnosus* до контакта с РСВ. Эти лактобактерии помогают защититься от чрезмерного воспаления во время

инфекции, изменяя как выработку многочисленных провоспалительных медиаторов (интерферона и интерлейкинов), так и активацию дендритных клеток посредством экспрессии CD103 и CD11b [1].

Респираторный микробиом играет важную роль в патогенезе вирусных инфекций, модулируя иммунный ответ и воспалительные процессы. Экспериментальные данные показывают, что воздействие на микробиом (например, с помощью бактериальных лизатов, липополисахаридов) может усиливать противовирусную защиту, снижать повреждение тканей и улучшать исходы инфекций. Однако влияние микробиоты зависит от стадии заболевания, типа вируса и характера иммунной реакции, что требует дальнейших исследований для разработки целенаправленных терапевтических стратегий.

ИЗМЕНЕНИЯ МИКРОБИОМА ПРИ ЗАБОЛЕВАНИЯХ (АСТМА, ПНЕВМОНИЯ)

Микробиом дыхательных путей отличается динамичным составом, где микроорганизмы могут переходить из комменсального состояния в патогенное и обратно в зависимости от условий и наличия коинфекций. Например, *Streptococcus pneumoniae,* обычно вызывающий пневмонию, в норме колонизирует носоглотку, а *Moraxella spp.*, считающаяся симбионтом человека, может быть причиной инфекций среднего уха и носовых пазух, обострений ХОБЛ [3]. Дисбиоз носоглотки и ротовой полости не только усугубляет респираторные заболевания, но и сам усиливается под их воздействием, создавая порочный круг, играющий ключевую роль в патологии легких и ЛОР-органов [4].

Рост патогенных видов *Streptococcus* и *Haemophilus* (например, *S. pneumoniae, H. influenzae*) в раннем возрасте связан с повышенным риском возникновения хрипов, приступов кашля, а также детской астмы и пневмонии. Бактериальный дисбиоз может дополнительно вызывать воспаление и повышать восприимчивость к рецидивирующей острой симптоматической вирусной инфекции, а у детей, чувствительных к аллергенам, связан с тяжелыми обострениями астмы (повышен уровень *Veillonella* и *Prevotella*, а также выработка хемокинов) [5].

Респираторный эпителий (играет роль в активации врожденного иммунитета) экспрессирует широкий спектр молекулярных паттернов, ассоциированных с патогенами (PAMP): нуклеотидные олигомеризационные домены (NOD)-подобные рецепторы и толл-подобные рецепторы (TLR), которые распознают бактерии и высвобождают противомикробные пептиды (β-дефензины). Хотя воспаление необходимо для устранения инфекции, патогенные грамотрицательные бактерии могут вызывать чрезмерное воспаление, которое нарушает функцию эпителиального барьера. Отчасти это можно объяснить повышенным количеством ацильных групп в их молекуле липополисахарида (ЛПС), которая лучше активирует TLR4 [3].

Патогенные микробы используют различные стратегии для изменения реакции организма, что позволяет им и другим патогенам колонизировать организм (например, золотистый стафилококк вырабатывает протеазы, которые могут расщеплять гемагглютинин и поддерживать репликацию гриппа). Вирусные

инфекции также могут напрямую нарушать целостность и функцию эпителиального барьера, что способствует прикреплению и проникновению бактериальных патогенов и наоборот [5].

Таким образом, изменения респираторного микробиома играют ключевую роль в развитии и прогрессировании заболеваний дыхательной системы, формируя сложные взаимодействия между комменсальными и патогенными микроорганизмами, иммунным ответом и состоянием эпителиального барьера. Далее рассмотрим, как именно меняется микробный состав и его функциональная активность при астме и пневмонии, а также какие последствия это имеет для клинического течения и терапии этих заболеваний.

1. МБ при астме

Астма – хроническое заболевание дыхательных путей, характеризующееся либо эозинофильным воспалением (сопровождающимся сужением дыхательных путей, избыточной выработкой слизи и повышением уровня цитокинов 2 типа, стимулирующих IgE-опосредованные аллергические реакции), либо нейтрофильным воспалением с низкой активностью Th2-иммунного ответа. В зависимости от иммунного профиля астму классифицируют на 2 эндотипа: эозинофильная (T2), которая в свою очередь, бывает аллергической и неаллергической и нейтрофильная (не T2), которая делится на нейтрофильную, малогранулоцитарную, смешанную гранулоцитарную [6, 7]. Астму можно назвать наиболее распространенным хроническим инфекционным заболеванием в детском возрасте, причем до 80 % обострений в школьном возрасте и 50 % у взрослых связаны с вирусными инфекциями, особенно у пациентов с Th2-опосредованным подтипом [5, 8]. Биологическое действие современных моноклональных антител и кортикостероидов эффективно при аллергической астме, однако у пациентов с неаллергической эозинофильной формой воспаление может сохраняться даже на фоне терапии. Хотя точные причины развития астмы остаются не до конца ясными, ключевую роль играет сочетание генетической предрасположенности и факторов окружающей среды, включая влияние респираторного микробиома [9].

Аллергическое воспаление T2-типа опосредуется антигенспецифическими T2-клетками, которые вырабатывают IL-4, IL-5, IL-9 и IL-13, что приводит к IgE дегрануляции тучных клеток и базофилов, опосредованной IgE-зависимой дегрануляции тучных клеток, эозинофилии и гиперреактивности бронхов. Эти процессы лежат в основе бронхоспазма, избыточной секреции слизи и ремоделирования дыхательных путей. Помимо классического Th2-пути, важную роль играют врожденные лимфоидные клетки 2-го типа (ILC2), которые под действием эпителиальных цитокинов (IL-33, IL-25, TSLP) IL-5 и IL-13 усиливают эозинофильное воспаление. При этом IL-4, хотя и не всегда секретируемый ILC2, критически важен для активации Th2-клеток. Интересно, что у взрослых с поздней эозинофильной астмой часто наблюдается неаллергический фенотип, ассоциированный с хроническим риносинуситом и назальными полипами [6, 10].

Неаллергическая астма диагностируется при отсутствии IgE-сенсибилизации к распространенным аллергенам, подтвержденном кожными пробами и

лабораторными тестами. Ее патогенез изучен хуже, чем аллергической формы, и может включать реакции на неустановленные аллергены (например, грибковые), хронические инфекции, аутоиммунные механизмы, нейтрофильное воспаление или активацию IL-17-зависимых путей. Биомаркерами нейтрофильной астмы являются YKL-40 (хитиназоподобный белок) и IL-17, ассоциированные с тяжелым течением, ожирением и относительной резистентностью к стероидам. При малогранулоцитарной астме отмечаются сниженные уровни выдыхаемого FeNO, эозинофильного катионного белка (ECP) и IL-8 в индуцированной мокроте, при этом почти у 15 % пациентов сохраняется плохой контроль симптомов несмотря на отсутствие явного воспаления. Как и нейтрофильная, так и Th2/Th17-опосредованная астма (с сопутствующей эозинофилией, бронхообструкцией и стериодорезистентностью) плохо поддаются стандартной терапии ингаляционными кортикостероидами (ИКС). У пациентов со смешанным гранулоцитарным фенотипом повышены IL-17, ECP, FeNO, а применение макролидов может улучшить состояние за счет снижения IL-8 и нейтрофильной инфильтрации [6].

Отдельную роль играет микробиом дыхательных путей: *Streptococcus pneumoniae* и *Haemophilus influenzae* усиливают выработку IL-8 через NF-κB-зависимый механизм, а *Staphylococcus aureus* провоцирует Th2-ответ, высвобождая IL-33 и активируя ILC2, что ведет к дегрануляции тучных клеток, синтезу IgE и эозинофильному воспалению. В то же время бактерии рода *Proteus* связаны с Th17-опосредованным воспалением и обратной корреляцией с бронхиальной эозинофилией, подчеркивая сложное взаимодействие микробиома и иммунных механизмов при разных фенотипах астмы [6].

Раньше связь между бактериями и приступами астмы считалась маловероятной из-за низкой диагностической ценности посевов мокроты и слабого эффекта антибиотикотерапии. Однако современные серологические и ПЦР-исследования выявили роль *Streptococcus pneumoniae* и *Chlamydia pneumoniae* в провоцировании острых приступов. Анализ микробиоты бронхоальвеолярного лаважа (БАЛ), трахеальных мазков и мокроты показал, что у астматиков наблюдается значительное увеличение доли протеобактерий по сравнению со здоровыми людьми. В ходе культивирования образцов из дыхательных путей было обнаружено, что доля астмы у детей с бактериями (*Moraxella catarrhalis*, *Haemophilus influenzae*, *Streptococcus pneumoniae)* значительно увеличилась, что было связано с тяжестью и острым обострением астмы. Секвенирование 16S рРНК подтвердило повышенное содержание патогенных протеобактерий, включая *Haemophilus influenzae*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Klebsiella pneumoniae* в дыхательных путях пациентов с астмой [11].

Хотя большинство исследований микробиома дыхательных путей проводилось на взрослых, изучение микробиома дыхательных путей при детской астме в последние годы значительно продвинулось вперед. Несмотря на то, что в патогенезе астмы задействованы как верхние, так и нижние дыхательные пути, исследование НДП у детей затруднено из-за необходимости проведения бронхоскопии. Поэтому многие работы сосредоточены на более доступных ВДП, хотя становится очевидной взаимосвязь между микробиомами обоих отделов. Исследования демонстрируют

различия не только между здоровыми людьми и астматиками, но и между пациентами с разной степенью тяжести заболевания, что подчеркивает важность комплексного изучения респираторного микробиома [12].

Ранние исследования с участием 43 пациентов (астматиков, больных ХОБЛ и здоровых людей) выявили значительное преобладание протеобактерий в бронхоальвеолярных смывах и бронхиальных мазках у пациентов с астмой по сравнению с контрольной группой, где доминировали *Bacteroides* [13]. Это исследование не только опровергло представление о стерильности дыхательных путей, но и впервые продемонстрировало дисбиоз при детской астме. Последующие популяционные когортные исследования новорожденных установили связь между особенностями назального микробиома в раннем возрасте и риском развития астмы. В частности, повышенное бактериальное разнообразие, включая *Firmicutes: Aerococcaceae, Streptococcus; Proteobacteria: Haemophilus, Oxalobacteraceae, Moraxella; Veillonella и Prevotella,* в носоглотке месячных младенцев ассоциировалось с последующим диагнозом астмы [10].

Дальнейшие наблюдения показали, что специфические изменения микробиома могут служить прогностическими маркерами: преобладание *Oxalobacteraceae*, *Neisseriaceae* при снижении количества *Pasteurellaceae* коррелировало с хрипами у детей до 2 лет, тогда как постоянное содержание *Moraxella* и увеличение *Haemophilus* в течение первого года жизни предсказывали развитие астмы к 7 годам [10, 14]. Эти данные подтвердились в крупном исследовании 327 детей 6–12 лет, где у городских астматиков выявили повышенное содержание *Moraxella* по сравнению со здоровыми сверстниками. Напротив, более высокие уровни лактобактерий в носоглотке (в 2 месяца) и ротоглотке (в 2 года) демонстрировали протективный эффект [9, 15, 16].

Хотя некоторые работы отмечали при астме изменения в ротоглоточном микробиоме (более высокий уровень содержания *Haemophilus*, *Veillonella* и более низкий уровень *Streptococcus*, *Fusobacterium, Capnocytophaga, Lactobacillus,* а также наличие *Actinomyces, Atopobium, Corynebacterium, Flavobacterium, Staphylococcus, Neiseriaceae, Porpheromonas, Gemella, Lachnospiraceae, Leptotrichia, Pasteurellaceae),* эти находки не были универсальными, что указывает на возможную менее выраженную роль данной микробиоты в патогенезе астмы по сравнению с назальной [10]. Такие расхождения между исследованиями подчеркивают необходимость дальнейшего изучения пространственно-временной динамики респираторного микробиома и его клинической значимости [17].

В других исследованиях, направленных на изучение микробиома дыхательных путей и развития астмы, участвовали дети, у родителей которых в анамнезе была астма. В одних работах ранняя колонизация носоглотки *Streptococcus pneumoniae*, *Haemophilus influenzae*, *Moraxella catarrhalis* (но не *Staphylococcus aureus*) ассоциировалась с развитием астмы к 5 годам, тогда как другие исследования показали связь назальной колонизации *Staphylococcus aureus* в первые 6 месяцев жизни с персистирующей астмой вплоть до 18-летнего возраста. Эти расхождения могут объясняться возрастными различиями участников или экологическими особенностями различных ниш дыхательных путей. У школьников с астмой

отмечается преобладание протеобактерий, включая *Moraxella*, *Psychrobacter*, виды *E. coli* и *M. catarrhalis* [10].

У детей с неконтролируемой астмой, требующей системных кортикостероидов или госпитализаций, выявлены специфические изменения респираторного микробиома: повышенное содержание *Haemophilus* и *Staphylococcus* в НДП [18], увеличение *Streptococcus* в носовой полости [19], а также обогащение *Bacteroides*, *Faecalibacterium*, *Roseburia, Proteus* и *Capnocytophaga* при тяжелых формах [9]. Характерный микобиом при астме включает *Aspergillus*, *Cladosporium* и *Penicillium* spp. [20] Типичный бактериальный профиль при астме характеризуется увеличением протеобактерий (*H. parainfluenzae*) и уменьшением комменсалов (*Prevotella, Streptococcus и Veillonella*) [3, 5, 21]. Колонизация *Haemophilus*, *Moraxella* и *Neisseria* коррелирует с эозинофилией, повышенным IgE и риском раннего развития астмы.

Анализ 16S рРНК микробиома трахеи при атопической астме выявил повышенное содержание *Haemophilus*, *Fusobacterium*, *Neisseriaceae*, *Sphingomonas* и *Porphyromonas* при снижении *Bacteroides* и *Lactobacillus*, что может влиять на метаболизм короткоцепочных жирных кислот (ограничение их биодоступности за счет повышения метаболизма бутирата и пропионата). Формируется порочный круг: дисбиоз усиливает воспаление и иммунный дисбаланс, что способствует развитию аллергической астмы через активацию Th2-путей, а хроническое воспаление, в свою очередь, поддерживает патологический микробный состав [22]. Некоторые бактерии могут модулировать ответ на терапию, влияя на сигнальные пути иммунных клеток. У пациентов с хронической астмой часто обнаруживается персистенция *Mycoplasma pneumoniae* и *Chlamydia pneumoniae*, что указывает на взаимосвязь между респираторными инфекциями и аллергической сенсибилизацией [6, 8]. Интересно, что при Th2-ассоциированной астме наблюдается обеднение микробного разнообразия (меньше бактерий и грибковых сообществ), тогда как нейтрофильные формы характеризуются повышенным содержанием микроорганизмов в НДП [5].

У взрослых людей также изучалась связь между микробиомом дыхательных путей и астмой. У астматиков отмечается увеличение численности протеобактерий (включая *Pseudomonas*, *Alkanindiges hongkongensis*) при снижении содержания *Neisseri*a и *Moraxella*. Среди *Firmicutes* в дыхательных путях астматиков чаще встречаются *Lactobacillus* и *Dialister invisus*, тогда как количество *Streprococcus* и *Veillonella* уменьшено. В назальном микробиоме повышено содержание *Bacteroidetes* (особенно *Prevotella buccalis)*, а среди *Actinobacteria* обнаружена связь *Gardnerella vaginalis* с обострениями астмы при одновременном снижении *Corynebacterium* [10].

Люди с астмой имеют повышенную распространенность проблем со здоровьем полости рта (кариес, эрозия зубов, заболевания пародонта и кандидоз полости рта). Ухудшение здоровья полости рта при астме может быть вызвано либо патологической активацией иммунного и воспалительного процессов, либо побочным эффектом лекарств от астмы, либо взаимодействием этих двух факторов. Некоторые препараты от астмы изменяют секрецию слюны, снижают скорость

слюноотделения и повышают концентрацию глюкозы в сыворотке, что нарушает баланс взаимодействия между бактериальными и иммунологическими факторами и приводит к заболеваниям полости рта. Аналогичным образом, заболевания полости рта изменяют микробиом полости рта и вызывают местное и системное воспаление. Вызванные воспалительными и иммунологическими реакциями изменения эпителия и ремоделирование бронхов, а также аспирация патогенных колонизаторов, обнаруженных в пародонтальных карманах и на поверхности кариозных зубов, могут влиять на течение респираторных заболеваний, таких как астма и бронхит. Была обнаружена связь периодонтита или обилия *Prevotella intermedia* в поддесневой биопленке с тяжестью астмы [23]. Однако полная картина роли микробиома полости рта в развитии астмы до сих пор неизвестна. Два отдельных исследования, проведённых в США, выявили взаимосвязь между астмой и кариесом или сильной потерей зубов [24]. Более того, следует дополнительно изучить возможное обратное побочное влияние осложнений полости рта, опосредованных астмой, или воспаления на астму или другие респираторные осложнения.

Важные наблюдения были сделаны исследователями, которые установили связь между увеличением доли протеобактерий и ухудшением контроля астмы через активацию Th17-опосредованного воспаления. Было обнаружено, что большее количество протеобактерий связано с ухудшением контроля астмы и обострениями из-за индукции генов, связанных с Th17. Изучили состояние 111 пациентов с хроническим риносинуситом, у 46 из которых была сопутствующая астма. Они обнаружили, что у пациентов, которые часто обращались в отделения неотложной помощи из-за обострения астмы, относительное количество протеобактерий было выше [7].

Обострения астмы, определяемые как ухудшение симптомов, сопровождающееся снижением функции легких по сравнению с исходным уровнем, могут прерывать периоды стабильного течения заболевания. У детей в период обострений отмечается повышенное содержание *Streptococcus* и *Staphylococcus* в носоглотке, тогда как состав ротоглоточного микробиома остается относительно стабильным [7]. Интересно, что особенности назального микробиома в период ремиссии могут предсказывать дальнейшее течение болезни. Дети с преобладанием *Corynebacterium* и *Dolosigranulum* демонстрируют лучший контроль над астмой и реже нуждаются в экстренной терапии, тогда как доминирование *Moraxella* и *Haemophilus* ассоциируется с повышенным риском инфекций и последующих обострений. Микробиом дыхательных путей во время лечения астмы напрямую связан с развитием обострений. Отсутствие *Corynebacterium, Acinetobacter*, сниженное количество *Haemophilus, Dolosigranulum*, *Staphylococcus,* повышенное количество *Moraxella* во время лечения заболевания связано с развитием обострений. Динамика микробиома носоглотки также показала снижение уровня *Corynebacterium* и *Dolosigranulum* и увеличение количества профилей с преобладанием *Moraxella* во время обострения. После обострения микробиота большинства детей восстановилась, и в ней стали преобладать *Moraxella*, *Corynebacterium* и *Dolosigranulum*. Аналогичным образом другое исследование

выявило снижение уровня *Moraxella* в носу и повышение уровня *Staphylococcus* в носу в период обострения и выздоровления. Подводя итог, можно сказать, что верхние дыхательные пути с преобладанием *Corynebacterium* и *Dolosigranulum* в микробиоме часто связаны с контролем астмы и меньшим количеством обострений [9].

Хотя детская астма распространена во всех этнических группах, бремя заболевания непропорционально велико среди пуэрториканцев (19,2 %) и афроамериканцев (12,7 %) по сравнению с американцами белой расы (8 %) и американцами мексиканской национальности (6,4 %) [14]. Этнические различия в показателях смертности от астмы ещё более значительны: показатели смертности от астмы среди детей и взрослых в странах с арабским языком почти в 8,3 раза выше соответственно, чем в странах с английским языком. Из-за сложности получения образцов из носа для сравнения бактериального разнообразия в одной и той же демографической группе был проведён анализ слюны детей из стран с арабским языком, страдающих астмой и не страдающих ею. Анализ слюны у арабских детей с астмой выявил повышенное содержание патогенных бактерий, особенно протеобактерий, при снижении доли *Streptococcus* и *Veillonella* по сравнению со здоровыми сверстниками. Интересно, что корреляции с представителями родов *Moraxella*, *Neisseria* или *Haemophilus* обнаружено не было. Однако тип, к которому относятся эти роды, – протеобактерии – был представлен в большем количестве в случаях заболевания (27,7 %), чем в контрольной группе (25,4 %). Ключевыми факторами риска развития астмы остаются аллергии, респираторные инфекции, пассивное курение и низкий социально-экономический статус [14].

В целом, астма характеризуется увеличением количества патогенов в легочном микробиоме, что приводит к рецидивирующему воспалению и стимуляции/обострению иммунной дисфункции организма. Многочисленные исследования подтверждают связь между колонизацией дыхательных путей *Streptococcus pneumoniae, Moraxella catarrhalis* и *Haemophilus influenzae* в раннем возрасте и последующим развитием астмы, хрипов и частых обострений. Эти патогены процветают в условиях воспаления, создавая порочный круг. Напротив, молочнокислые бактерии (*Lactobacillus*, *Dolosigranulum*) и *Corynebacterium* демонстрируют защитные свойства, модулируя воспалительные реакции через продукцию короткоцепочных жирных кислот (например, бутират). Эксперименты на мышах показали, что бутират способен нормализовать уровень IgE и снижать восприимчивость к астме. Кроме того, синергизм между *D. pigrum* и *Corynebacterium* может подавлять рост *S. pneumoniae* и контролировать респираторные вирусы, что объясняет их протективную роль при астме. Эти данные подчеркивают важность микробного баланса в патогенезе заболевания и открывают новые возможности для терапевтических вмешательств.

Исследования убедительно демонстрируют, что респираторный микробиом играет ключевую роль в развитии и течении астмы. Уже в раннем возрасте формируются специфические микробные паттерны, связанные с риском возникновения заболевания: провоспалительные бактерии *(Moraxella catarrhalis, Streptococcus pneumoniae, Haemophilus influenzae)* ассоциируются с хрипами и

последующим развитием астмы, тогда как защитные микроорганизмы (*Dolosigranulum pigrum, Corynebacterium, Lactobacillus)* способствуют стабильному течению болезни. Эти же бактериальные сообщества влияют на риск респираторных инфекций и ХОБЛ, подчеркивая их универсальную роль в здоровье дыхательных путей [7].

Хотя респираторный микробиом играет ключевую роль в изучении астмы, нельзя недооценивать влияние кишечного микробиома на развитие этого заболевания через ось «кишечник–лёгкие». В последнее время растет интерес к взаимодействию между микробиомами дыхательных путей и кишечника как в целом, так и в контексте астмы. Эти вопросы выходят за рамки данного обзора, однако подробнее они освещены в других публикациях. Современные исследования также расширяют понимание роли вирусов и грибов, которые наряду с бактериями являются важной частью микробиома и могут прямо или косвенно влиять на течение астмы. Будущие исследования должны быть направлены на изучение событий раннего возраста, связанных с респираторной микробиотой, развитием острых инфекций и последующим возникновением хронических заболеваний, таких как астма и ХОБЛ. Это может стать значимым изменяемым фактором, способствующим долгосрочному улучшению здоровья дыхательной системы [5, 12, 25].

2. МБ при пневмонии

Пневмония – это воспаление легочных альвеол, сопровождающееся их заполнением жидкостью или гноем, что приводит к кашлю, лихорадке и дыхательной недостаточности. Пневмония может быть опасной для жизни младенцев, маленьких детей, людей пожилого возраста, пациентов с ослабленным иммунитетом, она является основной причиной смерти детей в возрасте до пяти лет во всем мире и основной инфекционной причиной смерти пожилых людей [26]. *Streptococcus pneumoniae, Hemophilus influenzae* – основные возбудители внебольничной пневмонии, *Staphylococcus aureus* – внутрибольничной. Интересно, что состав носоглоточного микробиома у больных пневмонией и здоровых людей схож, однако у пациентов с пневмонией преобладают *S. pneumoniae, H. influenzae* и *M. catarrhalis,* в то время как у здоровых лиц микробиом более разнообразен [27].

Полость рта – ближайший резервуар респираторных патогенов, и плохая гигиена полости рта связана с повышенным риском развития пневмонии у пожилых людей [4, 28]. Уход за полостью рта снижает количество бактерий в полости рта и предотвращает риск развития пневмонии, связанной с искусственной вентиляцией легких, у пациентов в критическом состоянии, что указывает на роль микробиома полости рта в развитии пневмонии [4]. У пациентов в отделении интенсивной терапии обнаруживается более высокий уровень зубного налёта с большим количеством потенциальных респираторных патогенов по сравнению со здоровыми людьми (такой зубной налет увеличивает риск развития пневмонии в 9,6 раза!) [29]. Метанализ, проведенный Jeronimo L. S. и соавт., выявил связь между периодонтитом и внутрибольничной пневмонией [30]. В легочном аспирате пациентов обнаруживаются пародонтальные патогены, включая *P. gingivalis,*

F. nucleatum, Prevotella oralis, Campylobacter gracilis, Fusobacterium necrophorum и *Aggregatibacter actinomycetemcomitans.* Плохая гигиена полости рта способствует росту анаэробных бактерий, а клинические исследования подтверждают, что регулярный уход за зубами снижает микробную нагрузку и риск респираторных инфекций. В частности, у пациентов с недостаточной гигиеной в легких выявляются облигатные и факультативные анаэробы, такие как *Porphyromonas gingivalis, Bacteroides grucilus, Eikenella corrodens, Fusobacterium nucleutum, Fusobacterium necrophorum, Peptostreptococcus, Clostridium* и *Actinomyces* [4].

Исследования микробиома у ВИЧ-инфицированных пациентов в Уганде и США выявили значительные изменения в составе оральной и легочной микрофлоры на фоне антимикробной терапии при острой пневмонии, проявляющиеся снижением видового разнообразия и дисбиозом. Анализ 16S рРНК позволил разделить образцы из НДП таких пациентов на несколько групп: один с доминированием *Pseudomonadaceae*, другой – с преобладанием *Streptococcaceae* или *Prevotellaceae*. Микробиом, богатый *Pseudomonas*, может подавлять вирулентность потенциальных патогенов и способствовать восстановлению микробиома лёгких до здорового состояния, тогда как преобладание *Streptococcaceae* или *Prevotellaceae*, напротив, создает условия для персистенции патогенных микроорганизмов за счет усиления их вирулентности или изменения питательного статуса альвеолярной среды [25].

Особую опасность представляет аспирационная пневмония – госпитальная форма заболевания с высокой летальностью, особенно среди пожилых людей. Ее развитие связано с нарушением клиренса дыхательных путей у лиц с неврологическими патологиями (деменция, инсульт), что приводит к попаданию желудочного и ротоглоточного содержимого в легкие. Для снижения риска аспирационной пневмонии также необходимо следить за гигиеной полости рта, причем интересно, что сама пневмония может ухудшать состояние оральной микрофлоры. У пожилых пациентов ношение зубных протезов во время сна вызывает колонизацию микробиома полости рта и повышает риск аспирации этих колонизированных микробиомов в легкие, что удваивает риск развития пневмонии [31]. Профессиональный уход за полостью рта, осуществляемый стоматологами-гигиенистами, был признан эффективным при лечении респираторных инфекций у пожилых людей. Таким образом, мы видим, что роль микробиома полости рта в развитии аспирационной пневмонии высока. Для диагностики и лечения пневмонии, вызванной дисбалансом микробиома полости рта, у уязвимых групп пациентов, таких как младенцы, дети, пожилые люди и пациенты с ослабленным иммунитетом, необходимо определить профиль микрофлоры полости рта [4].

Взаимодействие между легочным микробиомом и пневмонией представляет собой сложный двунаправленный процесс. Экспериментальные данные на животных моделях показывают, что стерильное повреждение легких провоцирует бактериальный дисбаланс, при этом трансплантация измененной микрофлоры из поврежденных легких здоровым особям вызывает более выраженное воспаление. У пациентов с ХОБЛ и муковисцидозом снижение α-разнообразия микробиоты коррелирует с неблагоприятным прогнозом, формируя порочный круг: воспаление изменяет микробный состав, который, в свою очередь, поддерживает

патологический процесс. Особую роль играет миграция желудочной микрофлоры при применении ингибиторов протонной помпы, повышающая риск пневмонии за счет снижения клиренса желудочного микробиома и усиления миграции бактерий в легкие [26].

Очевидно, что микробиом тесно связан с прогнозом для пациентов в критическом состоянии. Возникновение и прогрессирование пневмонии также влияет на состав микробиома и гомеостаз. Независимо от причины повреждения лёгких может запуститься воспалительный каскад, приводящий к повышению концентрации катехоламинов в альвеолах. Это способствует росту и вирулентности отдельных представителей бактериального сообщества, в результате чего альвеолярное воспаление сохраняется в течение длительного времени. Таким образом, регулируя цитокины и метаболиты, микробиом лёгких способствует воспалению, которое приводит к прогрессированию пневмонии. Этот механизм регуляции сложен и двунаправлен, он затрагивает множество заболеваний и влияет на состав микробиома лёгких. Взаимодействие между микробиомом лёгких и пневмонией требует тщательного изучения, чтобы контролировать прогрессирование воспаления и улучшить прогноз для пациентов с пневмонией.

Исследования выявили особый тип микробиома легких, характеризующийся преобладанием *Prevotella* и *Veillonella*, который ассоциируется с повышенным содержанием нейтрофилов и лимфоцитов в НДП, что свидетельствует о наличии субклинического воспаления [32]. Последующие работы продемонстрировали, что колонизация легких оральными комменсалами, такими как *Prevotella melaningogenica* и *Veillonella parvula*, обеспечивает защиту от вторичного инфицирования *S. pneumoniae* у мышей на протяжении двух недель [32]. Элиминация *S. pneumoniae* сопровождалась активацией провоспалительных сигнальных путей с последующим Th17-ответом, преимущественно обусловленным действием *V. parvula*. Дальнейшие исследования показали, что усиленное очищение от *S. pneumoniae* в течение 24 часов после заражения связано с повышенной активностью нейтрофилов, требующей участия рецептора TLR2 и цитокина TNFα, тогда как противовоспалительный IL-10 модулировал этот процесс. Важно отметить, что аналогичные иммунные пути (TLR-сигнализация и продукция IL-10) были выявлены в легких людей с преобладанием *Prevotella* и *Veillonella*, причем уровни TNFα и IL-10 положительно коррелировали с содержанием *Prevotella* и улучшением легочной функции у реципиентов после трансплантации. Эти данные позволяют предположить, что субклиническое воспаление, вызванное оральными анаэробами, может играть защитную роль против пневмококковой инфекции.

Хотя заманчиво предположить, что эти комменсалы дыхательных путей защищают от заражения или проникновения патогенов, причинно-следственная связь в большинстве этих случаев не установлена. Однако накапливающиеся доказательства свидетельствуют о том, что виды *Corynebacterium* напрямую конкурируют с патогенами ВДП. *Corynebacterium accolens* вырабатывает свободные жирные кислоты, которые подавляют рост *S. pneumoniae*, а бесклеточная среда *Corynebacterium striatum* снижает адгезию *S. aureus* к эпителиальным клеткам. Эти результаты подтверждаются наблюдением, что живая, но не инактивированная

Corynebacterium pseudodiptheriticum снижает количество RSV и *S. pneumoniae* в лёгких у крыс с коинфекцией [26]. В носовой полости и носоглотке грамположительные бактерии *Corynebacterium* и *Dolosigranulum* неизменно связаны со снижением риска колонизации пневмококками и заражения у детей и взрослых. Для *S. pneumoniae* отрицательная корреляция между колонизацией и количеством *Corynebacterium* была воспроизведена in vitro, поскольку отработанная среда из культур *Corynebacterium accolens* подавляла рост *S. pneumoniae* с помощью липазы LipS1. Используя мышиную модель, было обнаружено, что экспрессия LipS1 *C. accolens* способствовала улучшению защиты от инфекции *S. pneumoniae* в лёгких.

Респираторный микробиом играет ключевую роль в патогенезе, профилактике и исходе пневмонии. Исследования демонстрируют сложное двустороннее взаимодействие: с одной стороны, дисбиоз легочной и оральной микробиоты способствует развитию инфекции, с другой – отдельные комменсальные бактерии (*Prevotella, Veillonella, Corynebacterium*) могут оказывать защитное действие, подавляя патогены через конкуренцию, модуляцию иммунного ответа (TLR2, TNFa, IL-10) или продукцию антимикробных метаболитов (липаза LipS1). Особое значение имеет гигиена полости рта, снижающая риск пневмонии у уязвимых групп (пожилые люди). Перспективным направлением является изучение ранних изменений микробиома для прогнозирования течения болезни и разработки персонализированных подходов, включая коррекцию микробиома для профилактики и терапии респираторных инфекций.

РОЛЬ КОММЕНСАЛЬНЫХ БАКТЕРИЙ В ПОДДЕРЖАНИИ ЗДОРОВОЙ МИКРОБИОТЫ ДЫХАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Комменсальные бактерии дыхательных путей, включая *D. pigrum*, *Corynebacterium* spp., *S. epidermis*, *S. mitis/oralis* и *H. Haemolyticus,* играют ключевую роль в защите от респираторных инфекций. Многочисленные исследования демонстрируют их способность подавлять патогены (*S. pneumoniae*, *S. aureus*, *M. catarrhalis*, *H. Influenzae)* через прямые (антимикробные метаболиты, конкуренция за ресурсы) и косвенные (иммуномодуляция) механизмы. Например, *Corynebacterium accolens* продуцирует жирные кислоты, ингибирующие пневмококки, а *C. pseudodiphtheriticum* усиливает противовирусный ответ (IFN-γ, IL-10), снижая тяжесть RSV-инфекции. *D. Pigrum* и *Corynebacterium spp.* ассоциируются со снижением частоты отитов, риносинуситов и колонизации *S. aureus*, что подтверждено клиническими и лабораторными данными [1].

Dolosigranulum pigrum и *Corynebacterium* spp.

Ряд исследований свидетельствует о защитной роли бактерий родов *Dolosigranulum* и *Corynebacterium* в респираторном тракте, демонстрируя их способность снижать колонизацию патогенов и частоту респираторных инфекций. Эти комменсалы реализуют свои защитные функции через два основных механизма: прямое подавление патогенов посредством выработки антимикробных веществ (например, свободных жирных кислот у *C. accolens*) и конкуренцию за

питательные ресурсы, а также опосредованное воздействие через модуляцию иммунного ответа хозяина [1].

Эпидемиологические данные показывают обратную корреляцию между наличием этих бактерий и различными респираторными патологиями. В частности, у детей, резистентных к острому отиту, отмечается значительное преобладание *D. Pigrum* и *Corynebacterium spp*. в носоглотке по сравнению с часто болеющими детьми. Аналогичные закономерности наблюдаются при дифтерии, где *C. pseudodiphtheriticum* и *D. Pigrum* доминируют в микробиоме устойчивых к инфекции детей. Многочисленные исследования подтверждают, что снижение численности этих комменсалов ассоциировано с повышенным риском респираторных инфекций, вирусных заболеваний, хронического риносинусита, муковисцидоза и колонизации *S. pneumoniae* и *S. Aureus*. Таким образом, существует множество наблюдений, указывающих на то, что *Corynebacterium* и/или *Dolosigranulum spp*. в респираторном микробиоме могут быть полезными [1, 2].

Экспериментальные данные раскрывают конкретные механизмы антагонистического действия: *C. accolens* подавляет рост *S. pneumoniae* и *S. aureus*, *C. pseudodiphtheriticum* ингибирует *M. Catarrhalis* и *S. aureus*. Кроме того, было показано, что *D. Pigrum* демонстрирует способность угнетать размножение *S. aureus* и *S. pneumoniae,* причем в последнем случае требуется присутствие продуктов метаболизма *Corynebacterium*. Дополнительные исследования выявили способность *Corynebacterium striatum* подавлять экспрессию генов вирулентности у *S. aureu*s, что подчеркивает многофакторность защитного действия этих комменсальных микроорганизмов [1].

Помимо прямого антагонизма с патогенами, бактерии рода *Corynebacterium spp* проявляют значительное иммуномодулирующее действие. Клинические наблюдения и эксперименты на животных моделях демонстрируют их способность стимулировать продукцию IFN-γ – ключевого цитокина, активирующего противовирусную защиту Т-клеток и естественных клеток-киллеров. Это подтверждается исследованиями, где интраназальное введение *C. Pseudodiptheriticum* усиливало резистентность к RSV-инфекции у мышей, что объясняет обратную корреляцию между обилием *Corynebacterium* в микробиоме и частотой вирусных заболеваний ВДП [1].

Схожие иммунорегуляторные свойства выявлены у *D. pigrum* и *C. pseudodiphtheriticum*: определенные штаммы этих видов при назальном введении мышам индуцировали синтез противовирусных IFN-β и IFN-γ, а также противовоспалительного IL-10. Важно отметить, что применение *D. pigrum* не только снижало маркеры лёгочного повреждения, но и повышало устойчивость к RSV. В условиях in vitro этот же штамм усиливал экспрессию IFN-β и IL-6 в клетках бронхиального эпителия (Calu-3), что коррелировало с подавлением репликации SARS-CoV-2 и уменьшением цитопатического эффекта. Эти данные подчеркивают значимую роль респираторных комменсалов в формировании противовирусного иммунитета и поддержании тканевого гомеостаза [1].

Streptococcus salivaruis/oralis* и *Staphylococcus epidermis

S. salivarius и *S. oralis* – это комменсальные α-гемолитические стрептококки, которые обнаруживаются в носоглотке здоровых людей. Эти бактерии продуцируют бактериоцины (например, Colcin V) и создают кислую среду, что существенно (до 60 %) подавляет формирование биопленок *S. aureus*, *S. pneumoniae* и *M. catarrhalis*, демонстрируя хорошую переносимость в интраназальных исследованиях [1].

Аналогичный защитный потенциал выявлен у отдельных штаммов *S. epidermis,* секретирующих внеклеточную сериновую протеазу (Esp). Этот фермент разрушает структурные белки биопленок *S. aureus,* повышая их уязвимость к антимикробным пептидам организма-хозяина, таким как β-дефензин-2. Клинически значимый эффект подтверждается в исследованиях с добровольцами, где инокуляция Espпродуцирующего *S. epidermidis* устраняла персистенцию *S. aureus*, что открывает перспективы для разработки новых терапевтических подходов. Дополнительно *S. epidermidis* проявляет иммуномодулирующие свойства, усиливая продукцию IFN-γ и подавляя репликацию вируса гриппа А в экспериментальных моделях, что требует дальнейшего изучения *in vivo* для оценки эффективности против сочетанных бактериально-вирусных инфекций.

Hemophilic bacillus

H. haemolyticus – это комменсальная бактерия, которая фенотипически похожа на *H. influenzae* и исторически ошибочно идентифицировалась как таковая. Исследования демонстрируют ее способность не только конкурентно снижать адгезию *H. haemolyticus* к эпителиальным клеткам, но и продуцировать гемофилин – уникальное соединение, блокирующее доступ патогена к жизненно важным молекулам гема. Этот двойной механизм действия, сочетающий пространственную конкуренцию и биохимическое ингибирование, делает *H. influenzae* перспективным кандидатом для пробиотической терапии респираторных инфекций [1].

Комменсальные бактерии дыхательных путей играют ключевую роль в поддержании здоровья респираторной системы. Они защищают от патогенов за счет выработки антимикробных веществ, конкуренции за ресурсы и модуляции иммунного ответа. Эти микроорганизмы поддерживают баланс микробиома, предотвращая избыточный рост вредных бактерий. Особую ценность представляют аутохтонные штаммы комменсальных бактерий, которые демонстрируют наиболее выраженные защитные свойства, что открывает новые перспективы для их использования в пробиотической профилактике респираторных инфекций, микробиом-таргетированной терапии, снижении антибиотикорезистентности и комплексной коррекции дисбиотических нарушений. Таким образом, комменсальная микробиота дыхательных путей представляет собой сложную и высокоэффективную биологическую систему защиты, которая интегрирует антимикробные, иммунорегуляторные и экологические функции. Поддержание ее естественного баланса должно стать приоритетным направлением в современных стратегиях профилактики и лечения заболеваний дыхательной системы, предлагая

альтернативу традиционным антимикробным подходам и способствуя сохранению здоровья респираторного тракта на долгосрочной основе [1].

ЗНАЧИМОСТЬ ИЗУЧЕНИЯ РЕСПИРАТОРНОГО МИКРОБИОМА

Анализ состава и функций респираторного микробиома открывает новые возможности для прогнозирования риска развития бактериальных, вирусных и грибковых заболеваний дыхательных путей, что крайне важно для их своевременной профилактики и лечения. Хотя исследования в этой области продолжаются, уже получены убедительные данные о клинической значимости таких исследований. В частности, изучение носоглоточного микробиома позволяет разрабатывать эффективные стратегии противодействия пневмонии и инфекциям верхних дыхательных путей [33]. Отдельного внимания заслуживает роль микробиома в механизмах передачи иммунной защиты через грудное молоко, что создает перспективы для разработки инновационных подходов к профилактике респираторных патологий [34]. Эти направления исследований имеют фундаментальное значение для совершенствования методов диагностики, лечения и профилактики заболеваний дыхательной системы.

Анализ респираторного микробиома открывает новые перспективы для клинической практики. Во-первых, микробные профили могут служить биомаркерами для диагностики и персонализированного лечения. Например, специфические изменения в ротоглоточном микробиоме коррелируют с развитием атопических заболеваний и риском обострений, что позволяет создавать неинвазивные диагностические инструменты для детей с хрипами и астмой [29].

Современный подход к диагностике респираторных заболеваний предполагает переход от выявления отдельных патогенов к комплексному анализу всего микробиома пациента с помощью методов полногеномного секвенирования. Это открывает новые возможности для более точного и рационального лечения. В последние годы появились «синдромные диагностические панели», позволяющие оперативно выявлять широкий спектр микроорганизмов непосредственно из клинических образцов. Перспективные исследования показывают, что полногеномное секвенирование, выявляющее экспоненциальный рост ключевых патогенов, обладает более высокой чувствительностью по сравнению с традиционными культуральными методами. Комбинация этих технологий в будущем может существенно улучшить процесс принятия клинических решений. Создание персонализированных микробных профилей позволит: дифференцировать здоровое состояние от патологического, выявлять устойчивость к терапии и диагностировать специфические формы дисбактериоза. Развитие методов полногеномного секвенирования и клинического прогнозирования открывает новые горизонты для персонализированной медицины респираторных заболеваний [3].

Во-вторых, микробные сигнатуры становятся мишенями для терапии. Макролиды (азитромицин, эритромицин) демонстрируют эффективность в снижении частоты обострений при астме, ХОБЛ и бронхоэктатической болезни. Их действие объясняется не только иммуномодулирующими свойствами, но и влиянием на микробиом: эффективность лечения зависит от доминирующих

таксонов у конкретного пациента. Например, азитромицин особенно полезен для детей с высоким бактериальным разнообразием и специфическими носоглоточными бактериями. Ключевым открытием стало обнаружение, что макролиды опосредуют противовоспалительный эффект через микробные метаболиты (гликолевая кислота, индол-3-ацетат), которые подавляют провоспалительные цитокины (TNF-α, IL-12, IL-13, CXCL-1). Эти данные подчеркивают потенциал микробиом-ориентированной терапии и важность идентификации биомаркеров для отбора пациентов, которым целесообразно назначение антимикробных препаратов. Таким образом, изучение респираторного микробиома открывает путь к персонализированному лечению респираторных заболеваний.

В-третьих, перспективным направлением является целенаправленная коррекция микробного дисбаланса с использованием либо бактериальных компонентов, либо живых симбионтов. Иммуномодулирующий подход включает применение бактериальных лизатов (MV130 и OM85), содержащих инактивированные патогены (*H influenzae, M catarrhalis* и *S pneumoniae*). Доказана их эффективность в профилактике вирусных инфекций и аллергической астмы в экспериментальных моделях, а клинические исследования подтвердили снижение частоты респираторных инфекций и астматических проявлений у детей [3].

Комменсальные бактерии могут способствовать насыщению метаболической ниши, предотвращая вторжение и приживление потенциальных патогенов за счет активации иммунных реакций организма. Раннее воздействие комменсальных микробов может привести к долгосрочной иммуномодуляции, предотвращая аутоиммунные заболевания и повышая устойчивость к аллергенам [29]. Так, используется применение живых пробиотических штаммов (*Lactobacillus, D. pigrum, Corynebacterium*), которые конкурентно подавляют патогены и модулируют иммунный ответ. Доклинические исследования демонстрируют их противовоспалительное действие и защиту от коинфекций (PCB+*S.pneumoniae*), а первые клинические испытания подтверждают иммуностимулирующий и противовирусный эффект местных форм с лактобакериями.

Совершенствование микробиологических методов открывает возможности для классификации пациентов по степени тяжести заболеваний и специфическим микробным профилям, позволяющим прогнозировать клинические исходы. Яркими примерами такого подхода уже сейчас являются: шкала «Feverpain», оценивающая вероятность стрептококковой инфекции ротоглотки на основе симптоматики, и прогностическая модель, определяющая риск госпитализации в педиатрическое отделение интенсивной терапии на основе клинических характеристик и выявленных патогенов [3]. Эти инструменты демонстрируют потенциал микробиом-ориентированного подхода в клинической практике.

Современные исследования микробиома дыхательных путей, охватывающие бактериальные, архейные и грибковые компоненты, открывают новые возможности для понимания механизмов развития респираторных заболеваний, однако для полной реализации их клинического потенциала требуются дополнительные исследования. Особого внимания заслуживают три ключевых направления: изучение сложных взаимодействий между бактериями и археями, включая их

метаболические связи и синтрофные отношения; исследование роли микобиома в развитии астмы и атопических заболеваний, особенно в детском возрасте; а также анализ значения назальной микробиоты как важного индикатора состояния нижних дыхательных путей. Пандемия COVID-19 особенно ярко подчеркнула необходимость изучения этнических и социально-экономических аспектов микробиома, поскольку назальная микробиота играет ключевую роль в модуляции иммунного ответа и может объяснять различия в восприимчивости к инфекционным заболеваниям. Кроме того, эпигенетические изменения, вызванные влиянием микробиоты, представляют собой перспективное направление для разработки новых терапевтических подходов, а взаимодействие экологических факторов (таких, как загрязнение воздуха) с микробными сообществами может значительно увеличивать риски развития заболеваний у уязвимых групп населения. В этом контексте особенно перспективными представляются разработка персонализированных диагностических панелей на основе индивидуальных микробных профилей, создание стратегий коррекции дисбиотических нарушений (включая применение пробиотиков и бактериальных лизатов), а также совершенствование методов стратификации пациентов по микробиомным маркерам риска. Таким образом, комплексное изучение респираторного микробиома, учитывающее все его компоненты (бактерии, археи и грибы) в сочетании с анализом социально-экологического контекста, позволит разработать инновационные подходы к профилактике и лечению заболеваний дыхательной системы, что особенно важно для педиатрической практики и уязвимых групп населения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ современных данных убедительно демонстрирует ключевую роль респираторного микробиома в патогенезе вирусных заболеваний дыхательных путей. Установлено, что сбалансированный микробиом выполняет защитную функцию, препятствуя вирусной инвазии через несколько механизмов: конкуренцию за рецепторы, стимуляцию местного иммунитета, продукцию антимикробных веществ и поддержание целостности эпителиального барьера. Особое значение имеют комменсальные штаммы *Corynebacterium, Dolosigranulum u Staphylococcus epidermidis*, проявляющие выраженную антагонистическую активность в отношении респираторных патогенов.

В то же время, дисбиотические изменения микробного сообщества создают предпосылки для более тяжелого течения вирусных инфекций и развития осложнений. Это особенно ярко проявляется при хронических заболеваниях дыхательной системы – астме и пневмонии, где нарушения микробиоты ассоциированы с повышенной частотой обострений и снижением эффективности стандартной терапии. Полученные данные открывают новые перспективы для разработки инновационных подходов к профилактике и лечению респираторных заболеваний, основанных на коррекции микробного дисбаланса.

Перспективными направлениями дальнейших исследований представляются:

1. углубленное изучение молекулярных механизмов взаимодействия между комменсальным микробиомом и респираторными вирусами;
2. разработка методов персонализированной коррекции микробиома с учетом индивидуальных особенностей пациента;
3. создание новых пробиотических препаратов на основе аутохтонных штаммов респираторных комменсалов;
4. изучение возможностей комбинированной терапии, сочетающей традиционные противовирусные препараты с модуляцией микробиома.

Реализация этих направлений позволит существенно улучшить стратегии профилактики и лечения респираторных вирусных инфекций, особенно у пациентов с хроническими заболеваниями легких. Дальнейшее изучение сложных взаимоотношений в системе «микробиом–вирус–организм» открывает новые горизонты для персонализированной медицины и создания инновационных терапевтических подходов.

Список литературы

1. Nesbitt H. Manipulation of the Upper Respiratory Microbiota to Reduce Incidence and Severity of Upper Respiratory Viral Infections: A Literature Review / H. Nesbitt, C. Burke, M. Haghi // Front Microbiol. – 2021. – Vol. 12. – P. 713703.
2. Crestez A. M. Oral Cavity Microbiome Impact on Respiratory Infections Among Children / A. M. Crestez, A. Nechita, M. P. Daineanu [et al.] // Pediatric Health Med Ther. – 2024. – Vol. 15. – P. 311–323.
3. Flynn M. The microbiome of the nasopharynx / M. Flynn, J. Dooley // J Med Microbiol. – 2021. – Vol. 70, No 6. – P. 001368.
4. Pathak J. L. The role of oral microbiome in respiratory health and diseases / J. L. Pathak, Y. Yan, Q. Zhang [et al.] // Respir Med. – 2021. – Vol. 185. – P. 106475.
5. Perdijk O. The microbiome: an integral player in immune homeostasis and inflammation in the respiratory tract / O. Perdijk, R. Azzoni, B. J. Marsland // Physiol Rev. – 2024. – Vol. 104, No 2. – P. 835–879.
6. Losol P. The Role of Upper Airway Microbiome in the Development of Adult Asthma / P. Losol, J. P. Choi, S. H. Kim [et al.] // Immune Netw. – 2021. – Vol. 21, No 3. – P. e19.
7. Valverde-Molina J. Microbiome and Asthma: Microbial Dysbiosis and the Origins, Phenotypes, Persistence, and Severity of Asthma / J. Valverde-Molina, L. García-Marcos // Nutrients. – 2023. – Vol. 15, No 3. – P. 486.
8. Zhao L. The Human Respiratory Microbiome: Current Understandings and Future Directions / L. Zhao, J. L. Luo, M. K. Ali [et al.] // Am J Respir Cell Mol Biol. – 2023. – Vol. 68, No 3. – P. 245–255.
9. van Beveren G. J. The respiratory microbiome in childhood asthma / G. J. van Beveren, H. Said, M. A. van Houten [et al.] // J Allergy Clin Immunol. – 2023. – Vol. 152, No 6. – P. 1352–1367.
10. Losol P. Association of upper airway bacterial microbiota and asthma: systematic review / P. Losol, H. S. Park, W. J. Song [et al.] // Asia Pac Allergy. – 2022. – Vol. 12, No 3. – P. e32.
11. Guo M. Y. The Role of Respiratory Flora in the Pathogenesis of Chronic Respiratory Diseases / M. Y. Guo, H. K. Chen, H. Z. Ying [et al.] // Biomed Res Int. – 2021. – Vol. 2021. – P. 6431862.
12. Shah R. The airway microbiome and pediatric asthma / R. Shah, S. Bunyavanich // Curr Opin Pediatr. – 2021. – Vol. 33, No 6. – P. 639–647.
13. Hilty M. Disordered microbial communities in asthmatic airways / M. Hilty, C. Burke, H. Pedro [et al.] // PLoS One. – 2010. – Vol. 5, No 1. – P. e8578.
14. Peace O. Respiratory and Neurological Disease across Different Ethnic Groups Is Influenced by the Microbiome / O. Peace, K. Rachakonda, M. Kress [et al.] // Microorganisms. – 2021. – Vol. 9, No 9. – P. 1965.

15. Baehren C. The Relevance of the Bacterial Microbiome, Archaeome and Mycobiome in Pediatric Asthma and Respiratory Disorders / C. Baehren, E. Buedding, A. Bellm [et al.] // Cells. – 2022. – Vol. 11, No 8. – P. 1287.
16. Depner M. Bacterial microbiota of the upper respiratory tract and childhood asthma / M. Depner, M. J. Ege, M. J. Cox // J Allergy Clin Immunol. – 2017. – Vol. 139. – P. 826–834.e13.
17. Dzidic M. Oral microbiota maturation during the first 7 years of life in relation to allergy development / M. Dzidic, T. R. Abrahamsson, A. Artacho // Allergy. – 2018. – Vol. 73. – P. 2000–2011.
18. Hilty M. Disordered microbial communities in asthmatic airways / M. Hilty, C. Burke, H. Pedro // PLoS One. – 2010. – Vol. 5. – P. e8578.
19. Chun Y. Integrative study of the upper and lower airway microbiome and transcriptome in asthma / Y. Chun, A. Do, G. Grishina // JCI Insight. – 2020. – Vol. 5. – P. e133707.
20. Garaci E. Bacteria and fungi of the lung: allies or enemies? / E. Garaci, M. Pariano, E. Nunzi [et al.] // Front Pharmacol. – 2024. – Vol. 15. – P. 1497173.
21. Thorsen J. Asthma and wheeze severity and the oropharyngeal microbiota in children and adolescents / J. Thorsen, J. Stokholm, M. A. Rasmussen // Ann Am Thorac Soc. – 2022. – Vol. 19. – P. 2031–2043.
22. Nesbitt H. Manipulation of the Upper Respiratory Microbiota to Reduce Incidence and Severity of Upper Respiratory Viral Infections: A Literature Review / H. Nesbitt, C. Burke, M. Haghi // Front Microbiol. – 2021. – Vol. 12. – P. 713703.
23. Lopes M. P. Prevotella intermedia and periodontitis are associated with severe asthma / M. P. Lopes, A. A. Cruz, M. T. Xavier // J Periodontol. – 2019. – Vol. 91. – P. 46–54.
24. Shah P. D. Association between asthma and severe tooth loss in the adult population of the United States / P. D. Shah, V. M. Badner // J Asthma. – 2020. – P. 1–12.
25. Li R. Lung microbiome: new insights into the pathogenesis of respiratory diseases / R. Li, J. Li, X. Zhou // Signal Transduct Target Ther. – 2024. – Vol. 9, No 1. – P. 19.
26. Clark S. E. Commensal bacteria in the upper respiratory tract regulate susceptibility to infection / S. E. Clark // Curr Opin Immunol. – 2020. – Vol. 66. – P. 42–49.
27. Korkmaz H. Effect of Antibiotic Exposure on Upper Respiratory Tract Bacterial Flora / H. Korkmaz, Y. Çetinkol, M. Korkmaz [et al.] // Med Sci Monit. – 2022. – Vol. 28. – P. e934931.
28. Paju S. Oral biofilms, periodontitis, and pulmonary infections / S. Paju, F. A. Scannapieco // Oral Dis. – 2007. – Vol. 13. – P. 508–512.
29. Scannapieco F. A. A randomized trial of chlorhexidine gluconate on oral bacterial pathogens in mechanically ventilated patients / F. A. Scannapieco, J. Yu, K. Raghavendran // Crit Care. – 2009. – Vol. 13. – P. R117.
30. Jeronimo L. S. Association between periodontitis and nosocomial pneumonia: a systematic review and meta-analysis of observational studies / L. S. Jeronimo, L. G. Abreu, F. A. Cunha // Oral Health Prev Dent. – 2020. – Vol. 18. – P. 11–17.
31. Iinuma T. Denture wearing during sleep doubles the risk of pneumonia in the very elderly / T. Iinuma, Y. Arai, Y. Abe // J Dent Res. – 2015. – Vol. 94. – P. 28s–36s.
32. Drigot Z. G. Insights into the role of the respiratory tract microbiome in defense against bacterial pneumonia / Z. G. Drigot, S. E. Clark // Curr Opin Microbiol. – 2024. – Vol. 77. – P. 102428.
33. Flynn M. The microbiome of the nasopharynx / M. Flynn, J. Dooley // J Med Microbiol. – 2021. – Vol. 70, No 6. – P. 001368.
34. Verhasselt V. Antibodies in breast milk: Pro-bodies designed for healthy newborn development / V. Verhasselt, J. Tellier, R. Carsetti [et al.] // Immunol Rev. – 2024. – Vol. 328, No 1. – P. 192–204.

THE ROLE OF RESPIRATORY MICROBIOME IN THE PATHOGENESIS OF VIRAL RESPIRATORY DISEASES

Volkova K. E.[1], Sorokin O. V.[2], Nefedova Zh. V.[3], Panasenko L. M.[3], Subotyalov M. A.[1,4]

[1]Novosibirsk State Pedagogical University, Novosibirsk, Russia
[2]LLC "Vedagenetics", Novosibirsk, Russia
[3]Novosibirsk State Medical University, Novosibirsk, Russia
[4]Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia
E-mail: subotyalov@yandex.ru

This article presents a comprehensive systematic review dedicated to the critically important role of the respiratory tract microbiome in maintaining respiratory health and the development of pathological conditions. The central thesis of the work is that the respiratory microbiome is not a passive community but an active participant in immune defense, and its imbalance (dysbiosis) is a key factor in the pathogenesis of a wide spectrum of diseases.

The article analyzes the complex mechanisms of interaction between commensal microorganisms and respiratory viruses. It emphasizes that a healthy microbiome serves as a powerful protective barrier through direct and indirect mechanisms: competition with pathogens for resources and receptors; activation of Toll-like receptors (TLRs) and other pattern recognition receptors; enhanced production of interferons (IFN-β, IFN-γ); synthesis of bacteriocins and fatty acids; and maintenance of epithelial barrier integrity. In contrast, dysbiosis dominated by opportunistic species not only loses these protective functions but also exacerbates the course of infections.

Special attention is paid to changes in the microbiome in chronic diseases. In bronchial asthma, specific microbial signatures have been identified, characterized by a predominance of Proteobacteria (Haemophilus, Moraxella) and a reduction in protective commensals (Corynebacterium, Dolosigranulum, Lactobacillus), which directly correlates with the severity of the condition and the frequency of exacerbations. In pneumonia, the fundamental role of the oral microbiome as a reservoir for pathogens is underscored, while the paradoxical protective role of some oral commensals (Prevotella, Veillonella) in modulating the immune response is highlighted.

The concluding part formulates promising directions for translational medicine: microbiome-targeted therapy using bacterial lysates and probiotics; the development of personalized diagnostic panels based on individual microbial profiles; and the implementation of whole-genome sequencing methods for a comprehensive assessment of the microbial community.

The conducted analysis convincingly proves that the respiratory microbiome is an integral component of the immune system of the respiratory tract, and its targeted modulation opens revolutionary prospects for developing new strategies for the prevention, diagnosis, and treatment of respiratory diseases in the context of global rising antibiotic resistance.

***Keywords*:** respiratory microbiome, viral infections, dysbiosis, immunomodulation, commensal bacteria, asthma, pneumonia, microbiome-targeted therapy.

References

1. Nesbitt H., Burke C., Haghi M. Manipulation of the Upper Respiratory Microbiota to Reduce Incidence and Severity of Upper Respiratory Viral Infections: A Literature Review, *Front Microbiol*, **12**, 713703 (2021).
2. Crestez A. M., Nechita A., Daineanu M. P., Busila C., Tatu A. L., Ionescu M. A., Martinez J. D., Debita M. Oral Cavity Microbiome Impact on Respiratory Infections Among Children, *Pediatric Health Med Ther*, **15**, 311 (2024).
3. Flynn M., Dooley J. The microbiome of the nasopharynx, *J Med Microbiol*, **70**, 001368 (2021).
4. Pathak J. L., Yan Y., Zhang Q., Wang L., Ge L. The role of oral microbiome in respiratory health and diseases, *Respir Med*, **185**, 106475 (2021).
5. Perdijk O., Azzoni R., Marsland B. J. The microbiome: an integral player in immune homeostasis and inflammation in the respiratory tract, *Physiol Rev*, **104**, 835 (2024).
6. Losol P., Choi J. P., Kim S. H., Chang Y. S. The Role of Upper Airway Microbiome in the Development of Adult Asthma, *Immune Netw*, **21**, e19 (2021).
7. Valverde-Molina J., García-Marcos L. Microbiome and Asthma: Microbial Dysbiosis and the Origins, Phenotypes, Persistence, and Severity of Asthma, *Nutrients*, **15**, 486 (2023).
8. Zhao L., Luo J. L., Ali M. K., Spiekerkoetter E., Nicolls M. R. The Human Respiratory Microbiome: Current Understandings and Future Directions, *Am J Respir Cell Mol Biol*, **68**, 245 (2023).
9. van Beveren G. J., Said H., van Houten M. A., Bogaert D. The respiratory microbiome in childhood asthma, *J Allergy Clin Immunol*, **152**, 1352 (2023).
10. Losol P., Park H. S., Song W. J., Hwang Y. K., Kim S. H., Holloway J. W., Chang Y. S. Association of upper airway bacterial microbiota and asthma: systematic review, *Asia Pac Allergy*, **12**, e32 (2022).
11. Guo M. Y., Chen H. K., Ying H. Z., Qiu F. S., Wu J. Q. The Role of Respiratory Flora in the Pathogenesis of Chronic Respiratory Diseases, *Biomed Res Int,* **2021**, 6431862 (2021).
12. Shah R., Bunyavanich S. The airway microbiome and pediatric asthma, *Curr Opin Pediatr*, **33**, 639 (2021).
13. Hilty M., Burke C., Pedro H., Cardenas P., Bush A., Bossley C., Davies J., Ervine A., Poulter L., Pachter L., Moffatt M. F., Cookson W. O. Disordered microbial communities in asthmatic airways, *PLoS One*, **5**, e8578 (2010).
14. Peace O., Rachakonda K., Kress M., Villalta F., Rachakonda G. Respiratory and Neurological Disease across Different Ethnic Groups Is Influenced by the Microbiome, *Microorganisms*, **9**, 1965 (2021).
15. Baehren C., Buedding E., Bellm A., Schult F., Pembaur A., Wirth S., Ehrhardt A., Paulsen F., Postberg J., Aydin M. The Relevance of the Bacterial Microbiome, Archaeome and Mycobiome in Pediatric Asthma and Respiratory Disorders, *Cells*, **11**, 1287 (2022).
16. Depner M., Ege M. J., Cox M. J. Bacterial microbiota of the upper respiratory tract and childhood asthma, *J Allergy Clin Immunol*, **139**, 826 (2017).
17. Dzidic M., Abrahamsson T. R., Artacho A. Oral microbiota maturation during the first 7 years of life in relation to allergy development, *Allergy*, **73**, 2000 (2018).
18. Hilty M., Burke C., Pedro H. Disordered microbial communities in asthmatic airways, *PLoS One*, **5**, e8578 (2010).
19. Chun Y., Do A., Grishina G. Integrative study of the upper and lower airway microbiome and transcriptome in asthma, *JCI Insight*, **5**, e133707 (2020).
20. Garaci E., Pariano M., Nunzi E., Costantini C., Bellet M. M., Antognelli C., Russo M. A., Romani L. Bacteria and fungi of the lung: allies or enemies?, *Front Pharmacol*, **15**, 1497173 (2024).
21. Thorsen J., Stokholm J., Rasmussen M. A. Asthma and wheeze severity and the oropharyngeal microbiota in children and adolescents, *Ann Am Thorac Soc*, **19**, 2031 (2022).
22. Nesbitt H., Burke C., Haghi M. Manipulation of the Upper Respiratory Microbiota to Reduce Incidence and Severity of Upper Respiratory Viral Infections: A Literature Review, *Front Microbiol*, **12**, 713703 (2021).

23. Lopes M. P., Cruz A. A., Xavier M. T. Prevotella intermedia and periodontitis are associated with severe asthma, *J Periodontol*, **91**, 46 (2019).
24. Shah P. D., Badner V. M. Association between asthma and severe tooth loss in the adult population of the United States, *J Asthma*, 1 (2020).
25. Li R., Li J., Zhou X. Lung microbiome: new insights into the pathogenesis of respiratory diseases, *Signal Transduct Target Ther*, **9**, 19 (2024).
26. Clark S. E. Commensal bacteria in the upper respiratory tract regulate susceptibility to infection, *Curr Opin Immunol*, **66**, 42 (2020).
27. Korkmaz H., Çetinkol Y., Korkmaz M., Çalgın M. K., Kaşko Arıcı Y. Effect of Antibiotic Exposure on Upper Respiratory Tract Bacterial Flora, *Med Sci Monit*, **28**, e934931 (2022).
28. Paju S., Scannapieco F. A. Oral biofilms, periodontitis, and pulmonary infections, *Oral Dis*, **13**, 508 (2007).
29. Scannapieco F. A., Yu J., Raghavendran K. A randomized trial of chlorhexidine gluconate on oral bacterial pathogens in mechanically ventilated patients, *Crit Care*, **13**, R117 (2009).
30. Jeronimo L. S., Abreu L. G., Cunha F. A. Association between periodontitis and nosocomial pneumonia: a systematic review and meta-analysis of observational studies, *Oral Health Prev Dent*, **18**, 11 (2020).
31. Iinuma T., Arai Y., Abe Y. Denture wearing during sleep doubles the risk of pneumonia in the very elderly, *J Dent Res*, **94**, 28S (2015).
32. Drigot Z. G., Clark S. E. Insights into the role of the respiratory tract microbiome in defense against bacterial pneumonia, *Curr Opin Microbiol*, **77**, 102428 (2024).
33. Flynn M., Dooley J. The microbiome of the nasopharynx, *J Med Microbiol*, **70**, 001368 (2021).
34. Verhasselt V., Tellier J., Carsetti R., Tepekule B. Antibodies in breast milk: Pro-bodies designed for healthy newborn development, *Immunol Rev*, **328**, 192 (2024).

Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского
Биология. Химия. Том 12 (78). 2026. № 2. С. 28–41.

УДК 612.01:577.175.823
DOI 10.5281/ZENODO.20784533

СЕРОТОНИН: ХИМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА, БИОСИНТЕЗ И МНОГОГРАННАЯ БИОЛОГИЧЕСКАЯ РОЛЬ В РЕГУЛЯЦИИ ФУНКЦИЙ ОРГАНИЗМА

Кашина Ю. В., Манилова О. Ю., Коловская В. О., Чередник И. Л., Кашина Ю. О., Бранчукова П. В.

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Краснодар, Россия
E-mail: ManilovaOU@yandex.ru

Сложный и многофакторный характер действия серотонина имеет мультиорганный физиологический механизм. Комплексность продемонстрирована тем, что серотонин и серотониновые рецепторы выполняют важные функции во многих системах органов человека за пределами центральной нервной системы, включая регуляцию эндокринных и метаболических процессов, желудочно-кишечного тракта и дыхательной системы, сердечно-сосудистой системы и гемостаза. Целью данной статьи являлся обзор последних данных зарубежной и отечественной литературы о широком спектре биологического действия серотонина в организме человека. Таким образом, большой спектр биологической значимости серотонина в физиологии, обозначает, что этот энтерамин является актуальным лекарственным средством в терапии для восполнения серотониновой недостаточности.
Ключевые слова: серотонин, нейромедиатор, рецепторы, эффекты серотонина.

ВВЕДЕНИЕ

С момента открытия молекулы 5-гидрокситриптамина в первой половине прошлого века продолжается изучение физиологических функций, в которых участвует этот индоламин, изучаться его участие в различных сигнальных путях, а также его роль в развитии некоторых заболеваний или патологий. За последние два десятилетия опубликовано много обзорных статей, посвященных серотонинергической системе и ее функциям. К ним относятся работы авторов Каркусова М. Д., Шур В. Ю., Самотруева М. А., Мажитова М. В., Иванова Е. С., Нигматуллина Р. Р., Безбрязов А. В., Бородулина И. И., Каракулова Ю. В. и др. Однако некоторые статьи посвящены частным аспектам, недостаточно подробно охватывают всю широту эффектов и возможных клинических применений. Несмотря на существование ряда обзорных статей, общей тенденции к глубокому изучению всей совокупности процессов, обусловленных серотонином, пока мало. Необходимы комплексные обзоры, объединяющие разнообразные аспекты физиологии и патологии, затрагивающие широкий спектр областей, включая биохимию, неврологию и другие клинические направления.

Проанализированы 220 литературных источников из электронных баз данных Pubmed, Pubmed Central, eLIBRARY.RU, а также платформ Google Scholar, SprigerLink и Elsevier за период с 2010 по 2025 год. Был выполнен поиск на русском и английском языках с использованием следующих ключевых слов и их комбинаций: «серотонин», «рецепторы к серотонину», «эффекты серотонина», «серотонин и метаболизм». Тексты статей анализировались полностью с выявлением их значимости в контексте возможности комплексного раскрытия обсуждаемой темы. Исключались повторяющиеся публикации, литературные источники старше 20 лет. После применения критериев исключения в данный обзор были включены 30 наиболее значимых работ, позволяющие всесторонне раскрыть отдельные аспекты физиологических особенностей серотонина.

СТРУКТУРА, СИНТЕЗ И ВЫДЕЛЕНИЕ СЕРОТОНИНА

Серотонин (5-гидрокситриптамин, 5-НТ) представляет собой биогенный амин, выполняющий ключевые регуляторные функции, как в центральной нервной системе, так и в периферических тканях. Структурно данное соединение является производным триптофана и характеризуется наличием индольного кольца с гидроксильной группой в пятом положении и аминоэтильным радикалом, что определяет его молекулярную формулу $C_{10}H_{12}N_2O$. Такая структурная организация обеспечивает серотонину уникальные биохимические свойства и широкий спектр физиологической активности [1, 2].

Биосинтез серотонина осуществляется посредством двух последовательных ферментативных реакций. Первоначально аминокислота триптофан подвергается гидроксилированию под действием триптофангидроксилазы (TPH) с образованием промежуточного метаболита – 5-гидрокситриптофана (5-HTP). Данная реакция, являющаяся лимитирующей стадией всего синтетического пути, требует присутствия кофактора тетрагидробиоптерина и молекулярного кислорода. В организме млекопитающих обнаружены два изофермента TPH: TPH1, преимущественно экспрессирующийся в энтерохромаффинных клетках кишечника, и TPH2, характерный для серотонинергических нейронов центральной нервной системы [3].

На втором этапе биосинтеза происходит декарбоксилирование 5-HTP, катализируемое ароматической L-аминокислотной декарбоксилазой (AADC). Эта реакция зависит от наличия пиридоксальфосфата – коферментной формы витамина B_6. Следует подчеркнуть, что пространственное распределение синтеза серотонина в организме отличается значительной гетерогенностью: около 90 % общего пула этого соединения продуцируется в желудочно-кишечном тракте, тогда как на долю церебрального синтеза приходится не более 10 %.

После синтеза серотонин накапливается в секреторных везикулах благодаря действию везикулярного транспортера моноаминов VMAT2. В нейронах процесс экзоцитоза серотонина в синаптическую щель инициируется деполяризацией мембраны и зависит от притока ионов кальция. Высвобожденный нейромедиатор взаимодействует с разнообразными постсинаптическими рецепторами, относящимися к семи известным семействам, каждое из которых обладает

характерными фармакологическими свойствами и особенностями внутриклеточной сигнализации [4, 5].

Терминация серотонинергической передачи преимущественно осуществляется посредством обратного захвата нейромедиатора через специфический мембранный транспортер SERT. Внутриклеточная судьба серотонина может развиваться по двум направлениям: либо повторное включение в везикулы для последующего высвобождения, либо катаболизм под действием моноаминоксидазы А (МАО-А) с образованием конечного метаболита 5-гидроксииндолуксусной кислоты (5-HIAA), экскретируемого с мочой [6].

Периферические эффекты серотонина отличаются значительным полиморфизмом. В желудочно-кишечном тракте он регулирует моторную и секреторную активность, в тромбоцитах участвует в процессах свертывания крови, а в печени модулирует углеводный обмен. Нарушения серотонинергической передачи лежат в патогенезе различных клинических состояний, включая аффективные расстройства, тревожные синдромы, функциональные заболевания кишечника и мигрень, что подчеркивает важность фундаментальных исследований в данной области для развития современной медицины [7, 8].

ФИЛОГЕНЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭВОЛЮЦИИ СЕРОТОНИНЕРГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Серотонин (5-гидрокситриптамин) занимает особое положение среди биогенных аминов благодаря своей исключительной эволюционной консервативности и функциональной универсальности. Данный нейромедиатор и гормон демонстрирует выраженную филогенетическую преемственность, прослеживаемую от прокариотических организмов до млекопитающих, что свидетельствует о его фундаментальной роли в регуляции физиологических процессов [9].

На ранних этапах биологической эволюции серотонин появился как важный регуляторный фактор у прокариотических организмов. Биохимические исследования подтверждают участие этого амина в процессах роста и стресс-адаптации у различных бактериальных видов. У эукариотических одноклеточных, в частности у инфузорий рода Paramecium, серотонин приобретает сигнальные функции, модулируя поведенческие реакции и локомоторную активность. В растительных организмах данное соединение участвует в регуляции онтогенетических процессов и формировании защитных реакций против патогенов [10, 11].

У многоклеточных беспозвоночных наблюдается постепенное усложнение серотонинергической системы. У представителей типа кишечнополостных этот амин регулирует сократительную функцию мышечных элементов и координирует трофическое поведение. Более сложная организация серотонинергической регуляции отмечается у плоских и кольчатых червей, где она участвует в контроле двигательной активности и репродуктивных процессов. Особого внимания заслуживает роль серотонина у моллюсков, в частности у рода Aplysia, где он опосредует процессы нейропластичности, связанные с обучением и формированием памяти.

У членистоногих серотонинергическая система достигает нового уровня сложности, регулируя широкий спектр поведенческих реакций, таких как охота. Важно отметить, что именно у этих организмов впервые появляются специализированные серотонинергические нейроны, представляющие собой эволюционный прообраз аналогичных структур у позвоночных.

У позвоночных животных происходит дальнейшее усложнение серотонинергической регуляции. У рыб данный нейромедиатор участвует в контроле агрессивного поведения, репродуктивных функций и стресс-реактивности. У амфибий и рептилий его роль расширяется за счет включения в процессы терморегуляции и сезонной адаптации [12].

Наивысшего развития серотонинергическая система достигает у млекопитающих, где она реализует двойственную функцию: выступает как нейромедиатор в ЦНС и как гормон в периферических тканях. Особенностью организации этой системы у млекопитающих является преимущественный синтез серотонина (около 90 % от общего количества) в энтерохромаффинных клетках желудочно-кишечного тракта, тогда как остальная часть продуцируется нейронами ядер шва ствола мозга [13].

Филогенетический анализ рецепторного аппарата серотонинергической системы выявляет закономерное усложнение в ходе эволюции. У беспозвоночных идентифицированы прототипы современных 5-HT1, 5-HT2 и 5-HT7 рецепторов. У позвоночных происходит значительная диверсификация рецепторного спектра, включая появление ионотропного 5-HT3 рецептора. Особый эволюционный интерес представляет транспортер серотонина (SERT), который впервые появляется у низших позвоночных и достигает максимальной функциональной эффективности у млекопитающих.

Проведенный филогенетический анализ серотонинергической системы подтверждает ее исключительную эволюционную консервативность. От простейших регуляторных функций у одноклеточных организмов серотонин прошел сложный путь эволюционного развития, превратившись у высших позвоночных в сложную регуляторную систему, контролирующую множество физиологических и поведенческих процессов. Изучение эволюционных аспектов серотонинергической системы имеет принципиальное значение не только для понимания фундаментальных закономерностей эволюции нейрохимических систем, но и для разработки новых подходов к терапии заболеваний, связанных с нарушениями серотонинергической передачи [14].

РЕГУЛЯЦИЯ, ИНГИБИРОВАНИЕ, МЕТАБОЛИЗМ СЕРОТОНИНА

Метаболизм серотонина в организме человека осуществляется несколькими путями: он подвергается окислительному дезаминированию посредством активности фермента моноаминоксидазы (МАО), связывается с серной и глюкуроновой кислотами, проходит процессы ацетилирования и метилирования либо сочетает все перечисленные механизмы одновременно. Распределение ферментов, задействованных в указанных процессах, неоднородно среди органов и тканей организма. Подавляющую долю разрушения серотонина обеспечивает

фермент моноаминоксидаза (МАО), содержащий флавиновые кофакторы. Фермент локализуется, главным образом, на внешней поверхности мембраны митохондрий и катализирует окислительное удаление аминогруппы у ряда моноаминов, приводя к образованию соответствующих альдегидов, выделению свободного аммиака и синтезу перекиси водорода. Выделяют две разновидности моноаминоксидазы – МАО-А и МАО-В, каждая из которых характеризуется уникальными особенностями: избирательностью к субстратам, тканевым распределением и восприимчивостью к специфическим ингибиторным веществам.

Моноаминоксидаза класса А обладает выраженным аффинитетом к таким соединениям, как серотонин, адреналин, норадреналин, мелатонин и гистамин, в то время как МАО группы В демонстрирует повышенную активность относительно бензиламина, фенилэтиламина и дофамина. МАО-А наиболее распространена в гепатоцитах, клетках слизистых оболочек желудочно-кишечного тракта и ткани плаценты. Что касается МАО-В, этот энзим чаще всего выявляют в тромбоцитах крови. При этом обе формы фермента широко распространены в нервных структурах, присутствуя как в самих нейронах, так и в астроцитарных.

Последствием процесса окислительного удаления аминогруппы у серотонина является формирование вещества 5-гидроксииндолацетальдегида, способного впоследствии проходить дальнейшие модификации: оно может подвергнуться окислению, превращаясь в продукт 5-гидроксииндолуксусной кислоты (5-ГИУК), либо расщепляться, образуя соединение 5-гидрокситриптол.

Самой важной среди перечисленных реакций выступает процесс, катализируемый ферментом альдегиддегидрогеназой, использующей NAD в качестве вспомогательного соединения. Данный энзим обнаружен практически повсеместно, включая ткани мозга и печени. Альтернативный механизм распада 5-гидроксииндолацетальдегида до 5-гидрокситриптофола обеспечивается действием альдегидредуктазы, которая активируется при участии кофермента NADH.

Формирование 5-гидрокситриптофола составляет лишь около 1 % всех метаболических преобразований серотонина в здоровом организме. Однако при патологии печени либо алкоголизме отмечается изменение направления обменных процессов: уменьшается синтез 5-гидроксииндолуксусной кислоты (5-HIAA) и возрастает образование 5-гидрокситриптофола. Конъюгаты серотонина с серной или глюкуроновой кислотами являются менее значимым путем его трансформации. Такие вещества зафиксированы в составе мочи у лиц без патологий.

Экскреция серотонина и 5-гидроксииндолуксусной кислоты (5-HIAA) главным образом осуществляется почками в несвязанном виде, в отличие от 5-гидрокситриптофола, который выводится преимущественно в конъюгированной форме. Употребление пищи, богатой серотонином, увеличивает содержание серотониновых конъюгатов в моче. Образование мелатонина в эпифизе обеспечивается двумя специализированными ферментами, которые осуществляют преимущественное ацетилирование и последующее метилирование исходного серотонина [15].

Мелатонин представляет собой биологически активное вещество, играющее ключевую роль в организации циркадных ритмов организма, функционировании

репродуктивной системы и управлении поведением. Нехватка выработки мелатонина и нарушения циклических колебаний активности характерны для пациентов с диагностированными депрессиями.

Серотонин-N-ацетилтрансфераза функционирует как в головном мозге, так и в печёночных клетках. Тем не менее, именно в шишковидной железе её активность регулируется строгими временными рамками, обусловливая значительное повышение концентрации мелатонина в крови ночью. Последующее звено образования мелатонина инициируется ферментом гидроксииндол-О-метилтрансферазой, обеспечивающим присоединение метильной группы к молекуле N-ацетилсеротонина посредством донорного субстрата S-аденозилметионина.

Практически весь объем серотонина (примерно 95 %), присутствующего в человеческом организме, сосредоточен в энтерохромаффинных клетках пищеварительного тракта. Его высвобождение в кишечную полость и кровь стимулируется воздействием нервных импульсов симпатического и парасимпатического отделов, изменениями внутрипросветного давления кишечника и колебаниями уровня pH. Тем не менее, учитывая сосудосуживающее свойство серотонина, повышение его уровня в кровяной плазме может представлять потенциальную угрозу, так как провоцирует усиление сосудистого тонуса. Организм располагает рядом защитных механизмов, направленных на оперативное удаление серотонина из плазмы крови или снижение его активности. Можно отметить следующие процессы: захват серотонина клетками тромбоцитов, взаимодействие с белковыми транспортными системами плазмы крови, а также биохимический распад серотонина в тканях печени и легких [16].

Находящийся в плазменной фракции крови серотонин интенсивно накапливается тромбоцитами благодаря специализированному транспортному механизму. Помимо активной транспортировки, существует дополнительный способ попадания серотонина внутрь тромбоцитов – простая диффузия, реализуемая при повышенных концентрациях серотонина в плазме (более 20 нмоль на 109 клеток). Печень также активно выводит и перерабатывает значительную долю циркулирующего серотонина, превращая его в процессе окисления в соединение 5-гидроксииндолуксусную кислоту (5-HIAA).

Легкие обеспечивают крайне быстрое и эффективное удаление серотонина, находящегося в кровяном русле. Своеобразием лёгочной ткани является способность устранять из сосудистого русла более 90 % экзогенно введённого серотонина путём однофазного прохождения крови через неё, обеспечивая его абсорбцию и последующее окислительное расщепление эндотелиоцитами, преимущественно до формирования производного 5-гидроксииндолуксусной кислоты. Средства, подавляющие активность моноаминоксидазы типа А, блокируют процесс окислительной дезаминизации серотонина в лёгочных структурах, однако общий темп утилизации данного амина остаётся неизменным. Таким образом, первостепенную роль в процессе устранения серотонина из легких играет именно фаза его адсорбции эндотелиальными клеточными элементами.

В сравнении с эффективностью нейтрализации серотонина в легких и печени, его накопление тромбоцитами характеризуется значительно меньшей скоростью. Время, необходимое тромбоцитам для захвата половины свободной фракции серотонина, колеблется в пределах 60–120 секунд. Стандартные уровни 5-гидрокситриптамина (5-НТ) и 5-гидроксииндолуксусной кислоты (5-ГИУК) в крови находятся в диапазоне наномолярных значений. Удаление указанных веществ из плазмы крови реализуется преимущественно почечными канальцами с использованием механизмов транспорта органических катионных и анионных молекул (OCTS, OATS).

Рецепторы серотонина занимают центральное место в реализации многочисленных физиологических действий, инициируемых серотонином в организме. Данные рецепторы относятся к классу GPCR-рецепторов, взаимодействующих с G-белком, подразделяются на семь типов (от 5-HT_1 до 5-HT_7), отличающихся специфичностью действия и инициирующих разнообразные цепочки передачи сигналов внутри клетки с участием вторичных мессенджеров.

Основные классы рецепторов серотонина:

Рецепторы 5-НТ: 7 типов с подтипами; постсинаптические, кроме 5-НТ1В и 5- НТ1D (пресинаптические).

• Рецепторы 5-НТ1 подавляют активность аденилатциклазы и процесс экзоцитоза нейромедиаторов. Благодаря этому снижается секреция глутамата, что приводит к угнетающему эффекту, а уменьшение выделения гамма-аминомасляной кислоты (ГАМК) наоборот усиливает возбуждение;

• 5-НТ2-рецепторы стимулируют активность фосфолипазы С, фермента, чья работа приводит к образованию вторичного посредника (ВтП), вызывающего закрытие калиевых каналов;

• 5-НТ3-рецепторы являются ионотропными и оснащены натриевым каналом; особенно много их встречается в гиппокампе;

• Рецепторы 5-НТ4-5-НТ7 стимулируют активность аденилатциклазы, причем встречаются они намного реже, сосредоточиваясь преимущественно в области базальных ганглиев и корковых зонах больших полушарий мозга [17].

ЭФФЕКТЫ СЕРОТОНИНА

Серотонин – являясь одним из древнейших медиаторов ЦНС, носит название «гормона хорошего настроения» и «гормона счастья», но осуществляет свою функциональную активность и на периферии. Выполняет многогранную биологическую роль в организме человека, которую можно представить в виде нескольких основных направлений. Высокое содержание серотонина в ЦНС находится в среднем мозге и гипоталамусе, а также частях мозга, контролирующих поведение, социальные взаимоотношения и осуществляющих принятие решений. Понятие социального поведения – ряд процессов, связанных с распознаванием сородичей, коммуникацией, кооперацией, соперничеством и эмпатией. Все эти нейробиологические функции контролируются сетью мозговых структур, имеющих общее название «социальный мозг». В эту сеть входит префронтальная кора, миндалина, передняя поясная кора и часть полосатого тела. Серотонин тонко

модулирует функциональную активности этой сети, контролируя воспринимаемые человеком социальные стимулы и его реакцию на них [18].

Самая известная роль в ЦНС – контроль настроения и эмоций. Достаточный уровень серотонина в мозге обеспечивает чувство благополучия, счастья и спокойствия, снижение агрессивного импульсивного поведения и тревожности. Снижение активности серотонинергической системы коррелирует с возникновением агрессии и нарушением социального поведения. Серотонин активирует «сигнал остановки» в префронтальной области, что помогает человеку выбрать стратегически другую поведенческую реакцию и подумать о последствиях своего агрессивного действия. Серотонин тормозит активность миндалины, тем самым снижает реакцию человека на угрожающие социальные стимулы, такие как испуганные или сердитые лица. Нарушение выработки серотонина способствует социальной тревожности. Серотонин влияет на активность передней поясной коры, которая контролирует такие процессы, как социальные конфликты, переживание человеком отвержения или несправедливого отношения [19].

Серотонин регулирует эмоциональную стабильность, ощущение спокойствия и благополучия, усиливает кооперативное взаимодействие, помогает справляться со стрессом и негативными эмоциями, смещает социальное восприятие в позитивную сторону, являясь "сдерживающим" фактором. Считается, что в патогенезе депрессии существенную роль играет снижение активности серотонина в ЦНС и в лечении данной проблемы используют селективные ингибиторы обратного захвата серотонина (СИОЗС), способные повысить концентрацию данного нейромедиатора в синаптической щели [20, 21]. Совместно с дофамином и норадреналином осуществляет активацию системы вознаграждения и получения удовольствия.

Участие серотонина в регуляции циркадных ритмов и фазы быстрого сна (фазы сновидений) связано с тем, что он является предшественником мелатонина. Высокий дневной уровень серотонина обеспечивает бодрствование, а ночью помогает уснуть, преобразовываясь в эпифизе в мелатонин [22].

Пищевое поведение и аппетит так же находятся под контролем серотонина. Известно, что снижение данного медиатора приводит к перееданию, булимии и как следствие – ожирению [23].

При активации в гипоталамусе рецепторов к серотонину подается сигнал о насыщении и снижается аппетит. Тяга к углеводной пище является подсознательным действием для увеличения уровня серотонина, так как способствуют секреции инсулина и доставки предшественника серотонина – триптофана в головной мозг [24].

Ряд научных исследований демонстрируют важную роль серотонина в формировании памяти. Нейромедиатор способен напрямую влиять на разные виды памяти в зависимости от места локализации его рецепторов. Рецепторы 5-HT1A связаны с декларативной памятью, их активность снижается при старении и болезни Альцгеймера. Рецепторы 5-HT2C в гиппокампе отвечают за синаптическую пластичность, важную для формирования памяти. Различные группы рецепторов в гиппокампе (контролируют обучение, пространственную навигацию, в префронтальной коре – рабочую память, внимание). Влияние на эмоциональную

память серотонина заключается в аверсивном обучении (обучении страху). Данную функцию контролируют рецепторы серотонина, расположенные в миндалине, гиппокампе и префронтальной коре. Серотонин способен уменьшить восприятие негативной информации и неудачи, одновременно положительно влияя на различные типы памяти, т.е. серотонин через регуляцию эмоционального фона влияет на процессы обучения [25, 26].

Серотонин входит в состав столового уровня нисходящей антиноцицептивной (обезболивающей) системы мозга, блокируя через нейроны спинного мозга передачу болевых импульсов от рецепторов периферии к головному мозгу, что предотвращает перевозбуждение ноцицептивной системы. С этим связано эффективное действие антидепрессантов в лечении хронических болевых синдромов [27, 28].

Известно, что 95 % серотонина синтезируется за пределами ЦНС, где данный нейромедиатор регулирует множество функций в периферических системах и органах. Если ранее считалось, что серотонин оказывает только центральное действие, то за последние десять лет произошел paradigm shift в данном вопросе: существует концепция местных серотонинергических систем в различных органах, состоящих и из серотонин-продуцирующих и серотонин-чувствительных клеток, где серотонин использует механизмы аутокринной и паракринной регуляции. Данные механизмы обеспечивают местное действие серотонина, минуя системный кровоток. В надпочечниках серотонинергическая система регулирует секрецию гормонов как коркового, так и мозгового вещества. Хромаффинные клетки мозгового вещества надпочечников способны захватывать серотонин из межклеточной жидкости, используя SERT-транспортер, а также паракринно осуществляют регуляцию стрессорного ответа. Данный механизм является универсальным и встречается в других органах: поджелудочной железе, печени, тимусе, красном костном мозге, молочной железе [29].

Следует отметить, что многогранность влияния серотонина обусловлена связью более 15 его подтипов рецепторов с внутриклеточными системами сигнализации. Регуляция сердечно-сосудистой системы осуществляется активацией различных подтипов рецептора: 5-HT1, 5-HT2, 5-HT3, 5-HT4, 5-HT7. При стимуляции 5-HT2 происходит тахикардия, вазоконстрикция и как следствие, повышение артериального давления. Активация 5-HT1A снижает активность симпатических влияний, вызывая брадикардию. Повышенное раздражение 5-HT2 рецепторов может активировать апоптоз кардиомиоцитов, вызывая сердечную недостаточность.

Серотонин влияет на гомеостаз глюкозы секрецию бета-клетками поджелудочной железы инсулина. При нарушении в данной системе возникает инсулинорезистентность, а затем сахарный диабет 2 типа. Серотонин регулирует моторику кишечника, при нарушении его синтеза наблюдается функциональная кишечная непроходимость. Регулируя внутриклеточный метаболизм и ингибируя свободно-радикальное окисление, серотонинергическая система способна оказывать прорегенераторные и цитопротекторные эффекты. Это лежит в основе применения серотонина адипината, как ранозаживляющего и корректирующего микроциркуляторные нарушения препарата.

Физическая нагрузка повышает уровень серотонина, который обеспечивает как центральное, так и периферическое утомление, влияет на активность спинальных мотонейронов, метаболизм и структуру мышечной ткани. Исследования на животных показали, что отсутствие серотонина в скелетных мышцах негативно сказывается на физической работоспособности [30].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, серотонин (5-гидрокситриптамин, 5-НТ) является ключевым нейромедиатором и гормоном в организме. Является модулятором сложного социального поведения, настроения, памяти, тревоги и депрессии. Его периферические эффекты имеют многогранное действие, регулируя работу сердечно-сосудистой, эндокринной, пищеварительной и мышечной систем. Дальнейшие исследования серотонинергической нейромедиаторной системы будут способствовать созданию новых лекарственных препаратов для лечения широкого спектра заболеваний.

Список литературы

1. Каркусова М. Д. Биологические эффекты серотонина: обзорная статья / М. Д. Каркусова // Вестник новых медицинских технологий. – 2022. – Вып. 16(6). – С. 133–139.
2. Рогачевская О. А. Два типа клеточных биосенсоров серотонина / О. А. Рогачевская, А. П. Черкашин, Е. Е. Копылова, М. Ф. Быстрова // Биологические мембраны. – 2023. – Т. 40, №1. – С. 55–60.
3. Blume C. Effects of light on human circadian rhythms, sleep and mood / C. Blume, C. Garbazza, M. Spitschan // Somnologie (Berl). – 2019. – №23 (3). – P. 147–156.
4. Башинджагян М. А. Серотониновые рецепторы ЦНС / М. А. Башинджагян, А. А. Яковлева, В. И. Павлова [и др.] // VI Международная (76 Всероссийская) научно-практическая конференция «Актуальные вопросы современной медицинской науки и здравоохранения». – Екатеринбург, 2021. – С. 926–931.
5. Jones L. A. The ever-changing roles of serotonin / L. A. Jones, E. W. Sun, A. M. Martin [et al.] // Int J Biochem Cell Biol. – 2020. – № 125. – P. 105.
6. Körtési T. Exploring the Tryptophan Metabolic Pathways in Migraine-Related Mechanisms / T. Körtési, E. Spekker, L. Vécsei // Cells. – 2022. – № 11(23). – P. 3795.
7. Прошина Е. А. Исследование полиморфизма 5-HTTLPR гена транспортера серотонина / Е. А. Прошина, А. В. Бочаров, А. Н. Савостьянов [и др.] // Журнал высшей нервной деятельности им. И. П. Павлова. – 2021. – Т. 71, № 6. – С. 803–819.
8. Смирнов С. В. Биохимия и патохимия серотонина в патогенезе мигрени: аспекты медикаментозной терапии / С. В. Смирнов, М. А. Постников, О. Ю. Кузнецова [и др.] // Прикладные информационные аспекты медицины. – 2025. – Т. 28, №1. – С. 98–108.
9. Parajulee A. Structural studies of serotonin receptor family / A. Parajulee, K. Kim // BMB Rep. – 2023. – № 56(10). – P. 527–536.
10. Кашина Ю. В. Роль генов серотонинергической медиаторной системы в формировании регуляторно-адаптивных возможностей человека / Ю. В. Кашина, В. М. Покровский, И. Л. Чередник // Журнал медико-биологических исследований. – 2023. – 11(1). – С. 23–33.
11. Садыкова Д. И. Роль серотонинергической системы в развитии заболеваний сердца и сосудов у детей / Д. И. Садыкова, Р. Р. Нигматуллина, Г. Н. Афлятумова // Казанский медицинский журнал. – 2015. – Т. 96, № 4. – С. 665–669.
12. De Deurwaerdère P. Serotonin/dopamine interaction: Electrophysiological and neurochemical evidence / P. De Deurwaerdère, A. Chagraoui, G. Di Giovanni // Prog Brain Res. – 2021. – Vol. 261. – P. 161–264.

13. Bamalan O.A. Serotonin / O. A. Bamalan, M. J. Moore, Al. Y. Khalili // Physiology. – 2023. – № 11(23). – P. 3795.
14. Kanova M. Serotonin-Its Synthesis and Roles in the Healthy and the Critically Ill / M. Kanova, P. Kohout // Int J. Mol. Sci. – 2021. – № 3. – P. 4837.
15. Шатова О. П. Роль метаболитов триптофана в обмене веществ и патогенезе ожирения / О. П. Шатова, А. А. Заболотнева, И. Е. Микин [и др.] // Профилактическая медицина. – 2022. – № 25(10). – С. 97–103.
16. Шур В. Ю. Серотонин: биологические свойства и перспективы клинического применения / В. Ю. Шур, М. А. Самотруева, М. В. Мажитова [и др.] // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 7–3. – С. 621–629.
17. Moncrieff J. The serotonin theory of depression: a systematic umbrella review of the evidence / J. Moncrieff, R. E. Cooper, T. Stockmann [et al.] // Mol Psychiatry. – 2023. – №28 (8). – P. 3243–3256.
18. Бородулина И. И. Взаимосвязь эмоциональных расстройств и уровня серотонина крови у пациентов с системным головокружением / И. И. Бородулина, Ю. В. Каракулова // Современные проблемы науки и образования. – 2023. – № 1, 12(1). – С. 23–33.
19. Pourhamzeh M. The Roles of Serotonin in Neuropsychiatric Disorders / M. Pourhamzeh, F. G. Moravej, M. Arabi [et al.] // Cell Mol Neurobiol. – 2022. – № 42(6). – P. 1671–1692.
20. Садыкова Д. И. Роль серотонинергической системы в развитии заболеваний сердца и сосудов у детей / Д. И. Садыкова, Р. Р. Нигматуллина, Г. Н. Афлятумова // Казанский медицинский журнал. – 2015. – Т. 96, № 4. – С. 665–669.
21. Tortora F. The Role of Serotonin in Fear Learning and Memory / F. Tortora, A. L Hadipour, S. Battaglia [et al.] // A Systematic Review of Human Studies. Brain Sci. – 2023. – № 13(8). – P. 1197.
22. Guzel T. The Role of Serotonin Neurotransmission in Gastrointestinal Tract and Pharmacotherapy / T. Guzel, D. Mirowska-Guzel // Molecules. – 2022. – №3, 27(5). – P. 1680.
23. Wang Y. Advances in the microbial synthesis of the neurotransmitter serotonin / Y. Wang, Y. Chen, A. Zhang [et al.] // Appl Microbiol Biotechnol. – 2023. – № 107(15). – P. 4717–4725.
24. Мельникова В. И. Серотонин и надпочечники: регуляция функций, регуляция развития / В. И. Мельникова, Н. С. Бондаренко // Онтогенез. – 2023. – Т. 54, № 1. – С. 317.
25. Золотухин М. М. Роль серотонина в организме человека / М. М. Золотухин, Е. М. Дорошенко, А. В. Наумов [и др.] // Журнал Гродненского государственного медицинского университета. – 2025. – Т. 23, № 4. – С. 303–310.
26. Wyler S. C. Serotonergic Control of Metabolic Homeostasis / S. C. Wyler, C. C. Lord, S. Lee [et al.] // Front Cell Neurosci. – 2017. – № 20. – P. 277.
27. Чагина Е. А. Патогенетическая роль антиноцицептивной системы в механизмах облегчения восприятия болевых сигналов и механизмы анальгетического обезболивания / Е. А. Чагина, В. Ю. Бурая // Научное обозрение. Медицинские науки. – 2023. – № 1. – С. 43–48.
28. Tang J. A Comprehensive Review of Nutritional Influences on the Serotonergic System / J. Tang, L. Krushelnycky, A. Shaqo [et al.] // Adv Nutr. – 2025. – № 16(11). – P. 1524.
29. Cheng Y. The effects of restraint stress and orthodontic tooth movements on the intestinal epithelial structure and metabolic function in rats / Y. Cheng, Y. Li, Z. Fan [et al.] // PLoS One. – 2025. – № 27, 20(2). – P.19–20.
30. Иванова Е. С. Механизмы влияния серотонина на физическую работоспособность: описательный обзор / Е. С. Иванова, Р. Р. Нигматуллина, А. В. Безбрязов // Журн. мед.-биол. исследований. – 2023. – Т. 11, № 4. – С. 483–491.

SEROTONIN: CHEMICAL STRUCTURE, BIOSYNTHESIS, AND MULTIFACETED BIOLOGICAL ROLE IN REGULATING BODY FUNCTIONS

Kashina Yu. V., Manilova O. Y., Kolovskaya V. O., Cherednik I. L., Kashina Y. O., Branchukova P. V.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kuban State Medical University" of the Ministry of Health of the Russian Federation, Krasnodar, Russia
E-mail: ManilovaOU@yandex.ru

Introduction. Since the discovery of the 5-hydroxytryptamine molecule in the first half of the last century, the physiological functions in which this indolamine is involved have been studied, as well as its involvement in various signaling pathways and its role in the development of certain diseases or pathologies. Over the past two decades, many review articles have been published on the serotonergic system and its functions. These include the works of authors Karkusov M. D., Shur V. Yu., Samotruev M. A., Mazhitov M. V., Ivanova E. S., Nigmatullina R. R., Bezbryazov A. V., Borodulina I. I., Karakulova Yu. V., and others. However, some articles focus on specific aspects and do not provide a comprehensive overview of the effects and potential clinical applications. Despite the existence of a number of review articles, there is still a lack of a general trend towards a deep understanding of the entire range of serotonin-related processes. Comprehensive reviews are needed that combine various aspects of physiology and pathology, covering a wide range of fields.

Results. Serotonin (5-hydroxytryptamine, 5-HT) is a biogenic amine that performs key regulatory functions in both the central nervous system and peripheral tissues. Structurally, this compound is a derivative of tryptophan and is characterized by an indole ring with a hydroxyl group in the fifth position and an aminoethyl radical, which gives it the molecular formula $C_{10}H_{12}N_2O$. This structural organization provides serotonin with unique biochemical properties and a wide range of physiological activities.

Serotonin (5-hydroxytryptamine) occupies a special position among biogenic amines due to its exceptional evolutionary conservatism and functional versatility. This neurotransmitter and hormone demonstrates a pronounced phylogenetic continuity that can be traced from prokaryotic organisms to mammals, indicating its fundamental role in regulating physiological processes.

The metabolism of serotonin in the human body is carried out in several ways: it undergoes oxidative deamination through the activity of the enzyme monoamine oxidase (MAO), binds to sulfuric and glucuronic acids, undergoes acetylation and methylation processes, or combines all of these mechanisms simultaneously. The distribution of enzymes involved in these processes is heterogeneous among the organs and tissues of the body.

Serotonin, being one of the oldest mediators of the central nervous system, is known as the "good mood hormone" and the "happiness hormone," but it also plays a functional role in the periphery. Serotonin has a multifaceted biological role in the human body, which can be divided into several main areas. The highest levels of serotonin in the central

nervous system are found in the midbrain and hypothalamus, as well as in the parts of the brain that control behavior, social interactions, and decision-making.

Conclusion. Thus, serotonin (5-hydroxytryptamine, 5-HT) is a key neurotransmitter and hormone in the body. It modulates complex social behavior, mood, memory, anxiety, and depression. Its peripheral effects have a multifaceted action, regulating the cardiovascular, endocrine, digestive, and muscular systems. Further research on the serotonergic neurotransmitter system will contribute to the development of new medications for the treatment of a wide range of diseases.

***Keywords*:** serotonin, neurotransmitter, receptors, serotonin effects.

References

1. Karkusova M. D. Biological Effects of Serotonin: A Review Article, *Bulletin of New Medical Technologies*, **16** (6), 133 (2025). *(in Russ.).*
2. Rogachevskaya O. A., Cherkashin A. P., Kopylova E. E., Bystrova M. F., Two types of serotonin cellular biosensors, *Biological membranes*, **40** (1), 55 (2023). *(in Russ.).*
3. Blume C., Garbazza C., Spitschan M. Effects of light on human circadian rhythms, sleep and mood, *Somnologie (Berl)*, **23** (3), 147 (2019).
4. Bashindzhagyan M. A., Yakovleva A. A., Pavlova V. I., Kropacheva E. M., Bakhtin V. M., Izmozherova N.V. CNS serotonin receptors, *VI International (76 All-Russian) Scientific and Practical Conference "Current Issues of Modern Medical Science and Healthcare"*, **77** (2), 926 (2021). *(in Russ).*
5. Jones L. A., Sun E. W., Martin A. M., Keating D. J., The ever-changing roles of serotonin, *Int J Biochem Cell Biol.,* **8** (125), 1057 (2020).
6. Körtési T., Spekker E., Vécsei L., Exploring the Tryptophan Metabolic Pathways in Migraine-Related Mechanisms, *Cells,* **11** (23), 3795 (2022).
7. Proshinaa E. A., Bocharova A. V., Savostyanova A. N., Knyazev G. G., Study of the 5-HTTLPR polymorphism of the serotonin transporter gene, *I. P. Pavlov Journal of Higher Nervous Activity,* **71** (6), 803 (2021). *(in Russ.).*
8. Smirnov S. V., Postnikov M. A., Kuznetsova O. Yu., Kashkina Yu. A., Biochemistry and pathochemistry of serotonin in the pathogenesis of migraine: aspects of drug therapy, *Applied information aspects of medicine*, **28** (1), 98 (2025). *(in Russ.).*
9. Parajulee A., Kim K., Structural studies of serotonin receptor family, *BMB Rep*, **56** (10), 527 (2023).
10. Kashina Yu. V., Pokrovskiy V. M., Cherednik I. L., The Role of Serotoninergic Mediator System Genes in the Formation of Human Regulatory and Adaptive Capabilities, *Journal of Medical and Biological Research,* **11** (1), 233 (2023). *(in Russ.).*
11. Sadykova D. I., Nigmatullina R. R., Aflyatumova G. N., The role of the serotonergic system in the development of heart and vascular diseases in children, *Kazan Medical Journal*, **96** (4), 665 (2015). *(in Russ.).*
12. De Deurwaerdère P., Chagraoui A., Di Giovanni G., Serotonin/dopamine interaction: Electrophysiological and neurochemical evidence, *Prog Brain Res.,* **26** (1), 161 (2021).
13. Bamalan O. A., Moore M. J., Al Khalili Y. Physiology, Serotonin, *Stat Pearls Publishing,* **2** (23), 30 (2025).
14. Kanova M., Kohout P., Serotonin-Its Synthesis and Roles in the Healthy and the Critically Ill, *Int J Mol Sci*, **22** (9), 48 (2021).
15. Shatova O. P., Zabolotneva A. A., Mikin I. E., Bril D. V., Shestopalov A. V., Roumiantsev S. A., The role of tryptophan metabolites in metabolism and pathogenesis of obesity. *Russian Journal of Preventive Medicine,* **25** (10), 97 (2022). *(in Russ.).*
16. Shur V. Yu., Samotrueva M. A., Mazhitova M. V., Trizno N. N., Fayziev R. M., Petrenko L. V., Shur Yu. V., Serotonin: Biological Properties and Clinical Applications, *Basic research*, **7** (3), 629 (2014). *(in Russ.).*

17. Moncrieff J., Cooper R. E., Stockmann T., Amendola S., Hengartner M. P., Horowitz M. A., The serotonin theory of depression: a systematic umbrella review of the evidence, *Mol Psychiatry*, **28** (8), 3256 (2023).
18. Borodulina I. I., Karakulova Yu. V., Relationship between emotional disorders and blood serotonin levels in patients with systemic vertigo, *Modern problems of science and education*, **12**(1), 33 (2023). *(in Russ.).*
19. Pourhamzeh M., Moravej F. G., Arabi M., Shahriari E., Mehrabi S., Ward R., Ahadi R., Joghataei M. T., The Roles of Serotonin in Neuropsychiatric Disorders, *Cell Mol Neurobiol*, **42** (6), 167 (2022).
20. Sadykova D. I., Nigmatullina R. R., Aflyatumova G. N., The role of the serotonergic system in the development of heart and vascular diseases in children, Kazan Medical Journal, **96** (4), 665 (2015). *(in Russ.).*
21. Tortora F., Hadipour A. L., Battaglia S., Falzone A., Avenanti A., Vicario C. M., The Role of Serotonin in Fear Learning and Memory: A Systematic Review of Human Studies, *Brain Sci*, **13** (8), 119 (2023).
22. Guzel T., Mirowska-Guzel D., The Role of Serotonin Neurotransmission in Gastrointestinal Tract and Pharmacotherapy, *Molecules*, **27** (5), 168 (2022).
23. Wang Y., Chen Y., Zhang A., Chen K., Ouyang P. Advances in the microbial synthesis of the neurotransmitter serotonin*, Appl Microbiol Biotechnol*, **107** (15), 471 (2023).
24. Melnikova V. I., Bondarenko N. S., Serotonin and the Adrenals: Regulation of Functions and Development, *Ontogenesis*, **54** (1), 317 (2023). *(in Russ.).*
25. Zolotukhin M. M., Doroshenko Ye. M., Naumov A. V., Smirnov V. Yu., Role of serotonin in the human body, *Journal of the Grodno State Medical University*, **23** (4), 303 (2025). *(in Russ.).*
26. Wyler S. C., Lord C. C., Lee S., Elmquist J. K., Liu C., Serotonergic Control of Metabolic Homeostasis, *Front Cell Neurosci*, **20** (11), 277 (2017) .
27. Chagina E. A., Buraya V. Yu., Pathogenetic role of the antinociceptive system in the mechanisms of facilitating the perception of pain signals and the mechanisms of analgesic anesthesia, *Medical Sciences*, **1** (43), 48 (2023). *(in Russ.).*
28. Tang J., Krushelnycky L., Shaqo A., Cho C. E., A Comprehensive Review of Nutritional Influences on the Serotonergic System, *Adv Nutr*., **16** (11), 100 (2025).
29. Cheng Y., Li Y., Fan Z., Wang N., Wang M., Li Y., Liu C., Li H., Yan F., The effects of restraint stress and orthodontic tooth movements on the intestinal epithelial structure and metabolic function in rats, *PLoS One*, **20** (2), 27 (2025).
30. Ivanova E. S., Nigmatullina R. R., Bezbryazov A. V., The Effects of Serotonin on Physical Performance: A Descriptive Review, *Journal of Medical and Biological Research*, **11** (4), 483 (2023). *(in Russ.).*

Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского
Биология. Химия. Том 12 (78). 2026. № 2. С. 42–53.

УДК 612.82; 159.91; 572.1/4

DOI 10.5281/ZENODO.20786898

ЗЕРКАЛЬНЫЕ НЕЙРОНЫ В ЭВОЛЮЦИИ ЧЕЛОВЕКА

Светлик М. В., Бушов Ю. В.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», Томск, Россия
E-mail: bushov@bio.tsu.ru

В кратком обзоре анализируется роль зеркальных нейронов в эволюции человека. Обсуждаются вопросы, связанные с происхождением этих нейронов, с их участием в интерпретации действий и намерений, в формировании речи и языка, в распознавании эмоций, в детекции корректных и ошибочных действий.
Ключевые слова: зеркальные нейроны, эволюция человека.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение роли зеркальных нейронов в эволюции человека, в формировании его когнитивных способностей является актуальной междисциплинарной проблемой, представляющий большой интерес для широкого круга специалистов: нейробиологов, психофизиологов, антропологов и др. Вместе с тем ряд вопросов, касающихся происхождения этих нейронов, их роли в эволюции человека, в различных когнитивных процессах, остаются во многом нерешенными.

В настоящем обзоре предпринята попытка анализа роли зеркальных нейронов в эволюции человека, в формировании его когнитивных способностей. В ходе анализа использовались литературные данные и результаты собственных исследований.

В обзор включены статьи, найденные в доступных базах данных https://cobalt.colab.ws/, https://scohlar.google.com/ и elibrary.ru по ключевым словам «зеркальные нейроны», «происхождение зеркальных нейронов», «зеркальные нейроны в эволюции человека», «mirror neurons», «the origin of mirror neurons», «mirror neurons in human evolution» за период с 2000 по 2025 годы.

Проведенный анализ литературных источников показал, что в опубликованных ранее обзорах, посвященных зеркальным нейронам, обсуждаются методы изучения и функции этих нейронов [1–3], их роль в патогенезе некоторых нервно-психических расстройств (аутизм, шизофрения и др.) [4–6]. Однако, вопросы, касающиеся происхождения и роли зеркальных нейронов в эволюции человека, практически не рассматриваются. Настоящий обзор восполняет этот пробел.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЗЕРКАЛЬНЫХ НЕЙРОНОВ

В настоящее время отсутствует единая точка зрения на происхождение зеркальных нейронов. Одни исследователи отводят важную роль в происхождении этих нейронов ассоциативному обучению, другие – наследственным факторам.

На основе анализа литературы и результатов собственных исследований, нами предложена гипотеза о важной роли социализации, наследственных факторов, нейрогенеза и обучения в происхождении зеркальных нейронов [7].

Предполагается, что появление зеркальных нейронов у птиц и млекопитающих явилось результатом филогенетической адаптации этих животных к условиям проживания в социуме, сопровождалось перестройками в генетическом аппарате и оказало положительное влияние на их выживание. В пользу предложенной гипотезы свидетельствуют следующие факты.

В настоящее время зеркальные нейроны обнаружены у социальных животных: летучих мышей, крыс, певчих птиц, макаки и человека, которые образуют устойчивые сообщества [8].

С помощью метода околоинфракрасной спектроскопии доказано наличие зеркальных нейронов у шести- и семимесячных младенцев [9]. Эти данные свидетельствуют о том, что базовый набор зеркальных нейронов имеется у человека уже на ранних этапах постнатального онтогенеза и указывают на важную роль наследственных факторов в происхождении этих нейронов.

В ходе исследований, связанных с наблюдением и произнесением слов на родном (русском) и неродном (английском) языках, нами обнаружена более выраженная активация «коммуникативных» зеркальных нейронов у билингвов по сравнению с монолингвами. Предполагается, что это связано с ростом числа этих нейронов у билингвов при освоении неродного языка [10]. Это подтверждают результаты МРТ-исследований, которые показали, что трехмесячный курс обучения иностранному языку сопровождается у учащихся увеличением толщины коры в нижней лобной извилине левого полушария, где расположены «коммуникативные» зеркальные нейроны [11].

Приведенные данные подтверждают гипотезу о важной роли социализации, наследственных факторов, нейрогенеза и обучения в происхождении зеркальных нейронов.

Можно ожидать, что зеркальные нейроны имелись уже у человека умелого (*Homo habilis*), жившего примерно 2,3–1,65 млн. лет назад, способного изготавливать простейшие каменные орудия, и этот навык передавался из покаления в поколение.

Изучение особенностей строения черепа у хабилисов показало, что по сравнению с австралопитековыми у них возникают специфические выпуклости в областях, где у современных людей находятся речевые центры Брока и Вернике [12]. Эти данные могут служить доказательством того, что хабилисы общались между собой с помощью языка жестов, так как звуковая речь появилась у наших предков значительно позже. Вероятно, освоение хабилисами языка жестов, а также навыками орудийной деятельности происходило, как и у современных антропоидов, при участии зеркальных нейронов.

ЗЕРКАЛЬНЫЕ НЕЙРОНЫ В ПОНИМАНИИ ДЕЙСТВИЙ И НАМЕРЕНИЙ

Важную роль в социальном поведении современного человека и других социальных животных играет способность понимать действия и намерения других членов группы. По мнению исследователей [13], зеркальные нейроны могут служить нейрональной основой для интерпретации действий и намерений других людей. Предполагается, что это может обеспечиваться копированием мозгом наблюдателя действий другого человека. Однако, не все исследователи согласны с этой точкой зрения, полагая, что понимание намерений другого человека не может осуществляться на уровне отдельных нейронов [14].

И действительно, проведенные нами томографические исследования показали, что, сами по себе, зеркальные нейроны не обеспечивают понимание действий и намерений, хотя и участвуют в этих процессах [15].

В частности, оказалось, что наблюдение за выполнением транзитивных и речевых действий сопровождается активацией не только тех зон коры, где расположены «двигательные» и «коммуникативные» зеркальные нейроны, но и других зон коры, а также базальных ганглиев и мозжечка. Предполагается, что зеркальные нейроны лишь обеспечивают взаимодействие между префронтальной корой, сенсорными и двигательными зонами коры, а также местами хранения в мозге двигательных программ (базальные ганглии и мозжечок). Взаимодействие этих структур, вероятно, и обеспечивает понимание действий и намерений других.

ЗЕРКАЛЬНЫЕ НЕЙРОНЫ В ЭВОЛЮЦИИ РЕЧИ И ЯЗЫКА

Совместная трудовая деятельность, очевидно, невозможна без развитой системы коммуникации. Эту функцию в человеческих сообществах выполняет язык. С другой стороны, язык, устная и письменнаая речь, обеспечивают передачу умений и знаний. По мнению исследователей, важную роль в происхождении речи и языка сыграли зеркальные нейроны. Предполагается, что эти нейроны обеспечили переход от языка жестов к звуковой речи [16]. По понятным причинам проверить это предположение не представляется возможным. Вместе с тем, современные исследования, связанные с изучением формирования билингвизма, подтверждают важную роль зеркальных нейронов в изучении языка.

В частности, проведенные нами исследования показали, что наблюдение за оператором, который произносил эмоциональные и неэмоциональные слова на родном (русском) и неродном (английском) языках, а также произнесение тех же слов испытуемым, сопровождается у билингвов (мужчин и женщин) более выраженной, чем у монолингвов (мужчин и женщин), депрессией мю-ритма [10].

Предполагается, что освоение второго языка сопровождается у билингвов ростом числа «коммуникативных» зеркальных нейронов в соответствующих зонах коры за счет нейрогенеза.

Сравнительные данные, касающиеся строения черепа ископаемых гоминид, а также современных антропоидов и человека, указывают на то, что звуковая речь появляется у ранних сапиенсов – неандертальцев (*Homo sapiens neanderthalensis*, жившего около 130–28 тыс. лет назад), хотя отдельные признаки,

свидетельствующие о наличии звуковой речи, имеются уже у гейдельбергского человека, жившего около 800–130 тыс. лет назад [17].

Появление у наших предков речи и языка, вероятно, оказало влияние на формирование и других когнитивных способностей и, в частности, мышления и сознания. На существование связи между речью, мышлением и сознанием указывали в своих трудах Л. С. Выготский [18] и П. В. Симонов [19].

Согласно популярной гипотезе «лингвистической относительности» Сепира-Уорша, язык может оказывать существенное влияние на мышление, восприятие, познание и другие когнитивные процессы. Однако, результаты проверки этой гипотезы оказались крайне противоречивыми [20].

В связи с этим, нами были предприняты исследования, направленные на изучение влияния билингвизма на когнитивные способности учащихся [21].

Проведенные исследования позволили обнаружить статистически значимые различия между монолингвами и билингвами по эмоциональной шкале эмпатии. В частности, установлено, что женщины-билингвы отличаются от женщин-монолингвов более высоким уровнем эмпатии ($p = 0,014$, критерий Манна-Уитни).

Полученные данные свидетельствуют в пользу гипотезы «лингвистической относительности» Сепира-Уорша, так как уровень эмпатии является важным компонентом эмоционального интелекта [22], от которого зависит профессиональная успешность индивида в разных видах деятельности.

Предполагается, что повышение уровня эмпатии и эмоционального интеллекта у лиц, изучающих иностранный язык, может быть связано с ростом числа «эмоциональных» зеркальных нейронов.

Таким образом, зеркальные нейроны сыграли очень важную роль в эволюции речи и языка. В свою очередь появление звуковой речи у сапиенсов, вероятно, послужило основой для развития у них и их потомков мышления и сознания.

ЗЕРКАЛЬНЫЕ НЕЙРОНЫ В РАСПОЗНАВАНИИ ЭМОЦИЙ

Важную роль в социальном поведении современного человека и его предков, очевидно, играли, так называемые «эмоциональные» зеркальные нейроны, которые активируются при переживании собственных эмоций и при наблюдении за эмоциями других.

Эти нейроны локализуются в передней поясной коре, миндалине и инсулярной коре [8, 23, 24]. Считается, что указанные нейроны обеспечивают распознавание эмоций и играют важную роль в механизмах эмпатии.

Предполагается, что существуют два механизма распознавания эмоций: первый – автоматический, реализуется при участии зеркальных нейронов; второй контролируется сознанием [25]. В последнем случае участие зеркальных нейронов остается под вопросом.

Согласно современным представлениям эмоциональное поведение человека является результатом взаимодействия базовых нейросетей мозга, которые образуют нейрофизиологическую основу эмоционального интеллета и обеспечивают распознавание эмоций [26].

В ходе томографических исследований нами обнаружены существенные отличия в активации мозговых структур у мужчин и женщин, правшей при произнесении эмоционального и неэмоционального слов. В частности, оказалось, что произнесение эмоционального слова «Боль» сопровождается у мужчин и женщин более выраженной активаций инсулярной коры, чем произнесение неэмоционального слова «Раз» [27].

Так, если у мужчин при произнесении слова «Раз» в инсулярной коре справа активируются 477 вокселов, то при произнесении слова «Боль» – 938 вокселов.

Если при произнесении слова «Раз» у женщин в инсулярной коре справа активируются 282 воксела, то при произнесении слова «Боль» – 421 воксел.

Таким образом, произнесение эмоционального слова сопровождается у мужчин и женщин, правшей более выраженной, чем при произнесении неэмоционального слова, активацией инсулярной коры справа, где локализуются «эмоциональные» зеркальные нейроны. Характер активации этой области мозга отличается у мужчин и женщин.

ЗЕРКАЛЬНЫЕ НЕЙРОНЫ В ДЕТЕКЦИИ ОШИБОК

Огромную роль в развитии человеческой цивилизации сыграло обучение. В ходе обучения приобретались полезные навыки, необходимые для изготовления орудий труда, приемы охоты, рыбной ловли и т.д. Считается, что важную роль в процессах обучения играли зеркальные нейроны [25]. Очевидно, что эффективность обучения существенно зависит от способности обучающегося распознавать собственные ошибки, ошибки других и вносить необходимы коррективы в свою деятельность.

Большой интерес в этом плане представляет изучение взаимодействий между мозговым «детектором ошибок» и системой зеркальных нейронов, так как эти взаимодейстрвия оказались вне поля зрения исследователей [28].

С этой целью нами были предприняты исследования, направленные на изучение активности зеркальных нейронов у мужчин и женщин при выполнении корректных и ошибочных действий, связанных с узнаванием коротких интервалов времени.

Испытуемым предлагалась задача на узнавание эталона (светлый квадрат со стороной 3,5 см, появляющийся на 300 мс в центре экрана монитора). Предварительно эталон не менее 10 раз предъявляется испытуемому для запоминания, затем совместно с девиантными стимулами, которые отличаются от эталона в большую и меньшую сторону на 150 мс. Стимулы предъявляются многократно (не менее 50 раз) в случайном порядке с межстимульным интервалом 5–7 с. Предварительные эксперименты показали, что при такой разнице между эталоном и девиантными стимулами испытуемый различает эталон в 70–90 % случаев.

В соответствии с инструкцией испытуемый нажимает на клавишу «Пробел» средним и указательным пальцами ведущей руки при предъявлении эталона и пропускает сигналы другой длительности. ЭЭГ регистрировали с помощью электроэнцефалографа «Энцефалан–131-03» в лобных, центральных, височных, теменных и затылочных отведениях по системе «10–20 %».

При обработке ЭЭГ-данных использовали электромагнитную томографию низкого разрешения (LORETA), подсчитывали оценки спектральной мощности мю-ритма на коротких (2 с), лишенных артефактов, отрезках записи ЭЭГ за 2 с до стимула (этап «Фон»), при выполнении корректного действия, при пропуске целевого стимула, а также при ошибочном нажатии на клавишу компьютера.

При оценке статистической значимости различий использовали многомерный статистический анализ и t-критерий Стьюдента. Различия считались статистически значимыми при $p<0,05$. С целью «нормализации» исследуемых показателей использовали преобразование Фишера.

Обнаружены статистически значимые различия в активации зеркальных нейронов при выполнении корректных и ошибочных действий, связанных с узнаванием коротких интервалов времени, зависимость этих различий от пола испытуемых.

Проведенные исследования, в частности, показали, что у мужчин при корректном нажатии на клавишу компьютера отмечается депрессия мю-ритма в 4, 40 и 44 полях Бродмана (ПБ), что указывает на активацию «двигательных» зеркальных нейронов [8, 23, 24, 29] и отсутствует в 6 и 45 ПБ. Наряду с этим, у них отмечается депрессия мю-ритма в 24 и 32 ПБ, что указывает на активацию «эмоциональных» зеркальных нейронов [8, 23, 29] и отсутствует в 33 ПБ.

У женщин, в отличие от мужчин, депрессия мю-ритма отмечается в 6 и 40 ПБ, где локализуются «двигательные» зеркальных нейроны и практически отсутствует в 4, 38, 44 и 45 ПБ. Депрессия мю-ритма также наблюдается в 24 ПБ, где локализуются «эмоциональные» зеркальные нейроны и отсутствует в 32 и 33 ПБ.

Оказалось, что у мужчин при ошибочном нажатии на клавишу компьютера депрессия мю-ритма наблюдается в 24 и 32 ПБ и отсутствует в 33 ПБ, где расположены «эмоциональные» зеркальные нейроны. Помимо этого, у мужчин отмечается депрессия мю-ритма в 40 ПБ, что указывает на активацию «двигательных» зеркальных нейронов.

У женщин, в отличие от мужчин, при ошибочном нажатии на клавишу компьютера в ответ на предъявление девиантного стимула наблюдается депрессия мю-ритма в 24 ПБ, где расположены «эмоциональные» зеркальные нейроны, а также в 38 и 40 ПБ, где находятся «двигательные» зеркальные нейроны.

У мужчин при пропуске целевого стимула депрессия мю-ритма отмечается в 4, 6 и 38 ПБ, где локализуются «двигательные» зеркальные нейроны. В то время как у женщин, депрессия мю-ритма отмечается в 38, 40 и 45 ПБ, где локализуются «двигательные» зеркальные нейроны, а также в 32 ПБ, где локализуются «эмоциональные» зеркальные нейроны.

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что зеркальные нейроны избирательно реагируют на корректные и ошибочные действия и фактически выступают как часть мозговой системы детекции ошибок.

ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ СОВРЕМЕННОГО ЭТАПА ЭВОЛЮЦИИ ЧЕЛОВЕКА

Известно, что физический тип человека остается практически неизменным в течение последних 40 тыс. лет.

Вместе с тем, эволюция человека продолжается.

Анализ имеющихся литературных данных позволяет выделить следующие основные тенденции развития современного человека.

Современные антропологические исследования свидетельствуют о том, что за последние 25 тысяч лет головной мозг человека уменьшился на 5 % с 1,500 до 1,425 $см^3$ (у мужчин) и эта тенденция сохраняется [30].

Имеются данные о том, что в развитых странах мира, где ведется статистика заболеваний, в последние десятилетия отмечается рост численности детей, страдающих аутизмом [31], что связывают с дисфункцией зеркальных нейронов [32].

Некторые исследователи высказывают опасение, что растущая цифровизация, внедрение систем искусственного интеллекта, неспособность современного человека воспринимать и обрабатывать растущие потоки информации могут оказать негативное влияние на когнитивные функции человека (память, внимание, восприятие, скорость принятия решений и др.) [33].

Группа авторов на основе анализа литературы и результатов собственных исследований приходят к выводу о том, что наблюдаемое в последние десятилетия снижение интеллекта у молодежи связано с информационной перегрузкой и цифровой зависимостью, а у взрослых – с хроническим стрессом и возрастными изменениями когнитивных функций [34].

Эти негативные тенденции ставят перед современной наукой чрезвычайную по сложности задачу – научиться управлять эволюцией человека, с тем чтобы со временем он не превратился в субтильное существо с маленьким мозгом, большими глазами и укороченной пищеварительной системой [30].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, накопленные к настоящему времени данные указывают на важную роль зеркальных нейронов в эволюции человека и формировании его когнитивных способностей. Появление этих нейронов у предков современного человека, вероятно, явилось результатом длительной филогенетической адаптации к социальному окружению.

Предполагается, что решающую роль в происхождении этих нейронов сыграли социализация, наследственные факторы, нейрогенез и обучение. Эти нейроны обеспечили успешную социальную адаптацию и выживание наших предков. Благодаря этим нейронам, наши предки получили возможность понимать действия и намерения других членов группы, их эмоциональное состояние.

Эти нейроны сыграли важную роль в эволюции речи и языка, в развитии мышления и сознания, в приобретении новых умений и навыков.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность сотрудникам кафедры физиологии человека и животных Томского государственного университета: ассистенту А. А. Скрябиной, аспиранту М. В. Мошкиной, магистранту Е. В. Вавилиной, а такде сотрудникам НИЦ «Курчатовский институт» – к.б.н., доценту В. Л. Ушакову, инженеру-исследователю С. И. Картапшову, научному сотруднику В. А. Орлову, чей труд способствовал выполнению настоящего исследования.

Список литературы

1. Косоногов В. Зеркальные нейроны: краткий научный обзор / В. Косоногов. – Ростов н/Д.: Феникс, 2009. – 24 с.
2. Махин С. А. Система «зеркальных нейронов»: актуальные достижения и перспективы ЭЭГ-исследований / С. А. Махин // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология и химия. – 2012. – Т. 25 (64), № 1. – С. 142.
3. Базян А. С. Зеркальные нейроны, физиологическая роль, особенности функционирования и эмоционально насыщенная когнитивная карта мозга / А. С. Бзян // Успехи физиологических наук. – 2019. – Т. 50, № 2. – С. 42.
4. Зайцева Ю. С. Зеркальные клетки и социальная когниция в норме и при шизофрении / Ю. С. Зайцева // Социальная и клиническая психиатрия. – 2013. – Т. 23, № 2. – С. 96.
5. Лущекина Е. А. Расстройства аутистического спектра. Обзор современных экспериментальных исследований / Е. А. Лущекина, В. Б. Стрелец // Журнал высшей нервной деятельности имени И. П. Павлова. – 2014. – Т. 64, № 6. – С. 585.
6. Рагимова А. А. Исследование функционирования зеркальных нейронов в норме и при нейропсихиатрических состояниях: систематический обзор литературы / А. А. Рагимова, Г. С. Перевознюк, Б. А. Волель, Д. С. Петелин, Д. С. Пономарева, М. И. Соломатин, А. А. Бятов, М. Феурра // Неврологический вестник. – 2024. – Т. 56, № 3. – С. 272.
7. Бушов Ю. В. О происхождении зеркальных нейронов / Ю. В. Бушов, М. В. Светлик, А. А. Скрябина // Вестник психофизиологии. – 2025. – № 2. – С. 103.
8. Rizzolatti G. The mirror mechanism: a basic principle of brain function / G. Rizzolatti, C. Sinigaglia // Nature Reviews Neuroscience. – 2016. – Vol. 17, No 12. – P. 757.
9. Якобони М. Отражаясь в людях: Почему мы понимаем друг друга / Марко Якобони; [Пер. с англ. Л. Мотылев] – М.: ООО "Юнайтед Пресс", 2011. – 366 с.
10. Скрябина А. А. Активность зеркальных нейронов у монолингвов и билингвов при наблюдении и произнесении слов на родном и неродном языках / А. А. Скрябина, М. В. Светлик, Ю. В. Бушов // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского Биология и химия. – 2024. – Т. 10 (76), № 3. – С. 207.
11. Mårtensson J. Growth of language-related brain areas after foreign language learning / J. Mårtensson, J. Eriksson, N. C. Bodammer, M. Lindgren, M. Johansson, L. Nyberg and M. Lövdén // Neuroimage. – 2012. – Vol. 63, No 1. – P. 240.
12. Tobias P. V. The sculls, endocasts and teeth of *Homo habilis* / P. V. Tobias // Olduvai Gorge: Vol. 4. Cambridge: Cambridge Univ. Press. – 1991. XXXV. – 921 p.
13. Skoyles J. R. Gesture Language Origins and Right Handedness / J. R. Skoyles // Psychology. – 2000. – No 11. – P. 24.
14. Churchland P. S. Braintrust: What neuroscience tells us about morality / P.S. Churchland. – Princeton: Princeton University Press. 2011. – 288 p.
15. Бушов Ю. В. Роль зеркальных нейронов в интерпретации действий и намерений / Ю. В. Бушов, В. Л. Ушаков, М. В. Светлик, С. Н. Карташов, В. А. Орлов // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2021. – № 56. – С. 86.
16. Rizzolatti G. Language and mirror neurons / G. Rizzolatti, L. Craighero. – Oxford Handbook of Psycholinguistics. Oxford: Oxford University Press, 2007. – P. 771.

17. Бурлак С. Происхождение языка: Факты, исследования, гипотезы / Светлана Бурлак. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Альпина нон-фикшн, 2019. – 609 с.
18. Выготский Л. С. Мышление и речь / Л. С. Выготский. – М.: Лабиринт, 1999. – 352 с.
19. Симонов П. В. Лекции о работе головного мозга. Потребностно-информационная теория высшей нервной деятельности / П.В. Симонов. – М.: Издательство «Институт психологии РАН», 1998. – 98 с.
20. Терешенко Т. В. Гипотеза лингвистической относительности: теоретический анализ и экспериментальные данные / Т. В. Терещенко, О. А. Гончаров // Психологический журнал Международного университета природы, общества и человека. – 2014. – № 2. – С. 11.
21. Скрябина А. А. Влияние билингвизма на индивидуально-психологические особенности учащихся / А. А. Скрябина, М. В. Светлик, Ю. В. Бушов // Вестник психофизиологии. – 2024. – № 3. – С. 120.
22. Никитина О. А. Эмоциональный интеллект: понятие, структура, генезис / О. А. Никитина, А. Р. Никитина // Психология и педагогика служебной деятельности. – 2024. – № 3. – С. 58.
23. Farina E. Mirror neurons and their relationship with neurodegenerative disorders / E. Farina, F. Borgnis, T. Pozzo // Journal of Neuroscience Research. – 2020. – Vol. 98, No 6. – P. 1070.
24. Bonini L. Mirror neurons 30 years later: implications and applications / L. Bonini, C. Rotunno, E. Arcuri, V. Gallese // Trends in cognitive sciences. – 2022. – Vol. 26, No 9. – P. 767.
25. Риццолатти Д. Зеркала в мозге: О механизмах совместного действия и сопереживания / Д. Риццолатти, К. Синигалья – М.: Языки славянских культур, 2012. – 208 с.
26. Чипеева Н. А. Нейрофизиологические механизмы эмоционального интеллекта / Н. А. Чипеева // Психология. Психофизиология. – 2023. – Т. 16, № 3. – С. 65.
27. Бушов Ю. В. Зеркальные нейроны в восприятии времени и речевых процессах / Ю. В. Бушов, В. Л. Ушаков, М. В. Светлик, С. Н. карташов, В. А. Орлов. — 2 -ое изд. перераб. и доп. – Москва: РУСАЙНС. 2021. – 212 с.
28. Мошкина М. В. Зеркальные нейроны и мозговой «детектор ошибок» в распознавании корректных и ошибочных действий / М. В. Мошкина, В. Е. Вавилина, Ю. В. Бушов // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского Биология. Химия. – 2025. – Том 11 (77), № 2. – С. 145.
29. Hari E. Ayna nöron sistemi ve fonksiyonlarina klinik yaklaşim / E. Hari, C. Cengiz, F. Kılıç, E. Yurdakoş // Journal of Istanbul Faculty of Medicine. – 2021. – Vol. 84, No 3. – C. 430.
30. Дробышевский Станислав Достающее звено. Книга вторая. Люди / Станислав Дробышевский – Москва: Издательство АСТ. CORPUS. 2019. – 592 с.
31. Никуличев Ю. В. Глобальное здоровье: Аналит. обзор / Ю. В. Никуличев. – М.: РАН. ИНИОН. Центр науч.-информ. исслед. глобал. и регионал. Проблем. Отд. пробл. европ. безопасности, 2018. – 68 с.
32. Рамачандран В. С. Разбитые зеркала: теория аутизма / В. С. Рамачандран, Л. М. Оберман // Аутизм и нарушения развития. – 2008. – Т. 6, № 3. – С. 1.
33. Лызь Н. А. Влияние цифровизации на когнитивные процессы: обзор причин и последствий / Н. А. Лызь, Е. В. Гладкая // Вестник Пермского университета. Философия. Психология. Социология. – 2025. – Вып. 3. – С. 396.
34. Горбунова Т. П. Проблема снижения интеллекта / Т. П. Горбунова, Т. М. Тонджу, А. Э. Цатурян, М. В. Дробышевская // Медицинское образование, наука, практика: Сборник статей X Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов, 22-23 апреля 2025 г. Т. 1. – Екатеринбург, 2025. – С. 292.

MIRROR NEURONS IN HUMAN EVOLUTION

Svetlik M. V., Bushov Yu. V.

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "National Research Tomsk State University", Tomsk, Russia
E-mail: bushov@bio.tsu.ru

The study of the role of mirror neurons in human evolution and the formation of cognitive abilities is a pressing interdisciplinary problem of great interest to a wide range of specialists: anthropologists, psychologists, psychophysiologists, neurobiologists, etc. At the same time, a number of questions regarding the origin of these neurons and their role in various cognitive processes remain largely unresolved. In the present study, using the results of our own research, an attempt is made to analyze the role of mirror neurons in human evolution and the formation of our cognitive abilities. Analytical Review. In this brief review, using the results of our own research, issues related to the origin of mirror neurons are discussed. A hypothesis is proposed regarding the crucial role of socialization, hereditary factors, neurogenesis, and learning in the origin of these neurons. The role of mirror neurons in the interpretation of actions and intentions is analyzed. It is shown that, by themselves, mirror neurons do not ensure the understanding of actions and intentions, although they participate in these processes. It is assumed that these neurons act as an intermediary and ensure interaction between the prefrontal cortex, sensory, motor, and associative areas of the cortex, as well as the storage sites of motor programs in the brain (basal ganglia and cerebellum). The result of the interaction of these structures is likely the understanding of the actions and intentions of others. The role of mirror neurons in speech processes and, in particular, in the development of bilingualism is discussed. It is shown that when observing and pronouncing words in their native (Russian) and non-native (English) languages, bilinguals exhibit more pronounced activation of "communicative" mirror neurons than monolinguals. It is hypothesized that this is due to the fact that learning a foreign language is accompanied by an increase in the number of "communicative" mirror neurons in bilinguals due to neurogenesis. The impact of bilingualism on students' cognitive abilities is analyzed. A comparison of boys and girls (monolingual and bilingual) revealed statistically significant between-group differences on the emotional empathy scale. In particular, it was found that bilingual women differed from monolingual women in their higher levels of empathy ($p = 0.014$, Mann-Whitney test). The obtained data support the Sapir-Warsh "linguistic relativity" hypothesis, since the level of empathy is an important component of emotional intelligence, which determines an individual's professional success in various activities. It is assumed that increased empathy and emotional intelligence in individuals learning a foreign language may be associated with an increase in the number of "emotional" mirror neurons. This article examines the role of mirror neurons in human emotional behavior, specifically during the observation and pronunciation of emotional and non-emotional words. It is shown that observing an operator pronouncing emotional and non-emotional words and the subject pronouncing the same words is accompanied by a depression of the mu rhythm at certain frequencies and, most often, an increase in the level of cortical connections at

this rhythm frequency. The nature of these changes significantly depends on gender, brain lateralization, mu rhythm frequency, the emotional significance of the word, and the type and stage of the activity. The role of mirror neurons in the execution of correct and erroneous actions is analyzed. Statistically significant differences in mirror neuron activation were found during the execution of correct and erroneous actions related to the recognition of short time intervals, and these differences depend on the gender of the subjects. The obtained data indicate that mirror neurons selectively respond to correct and erroneous actions and, in fact, act as part of the brain's error detection system.

The accumulated evidence to date points to the important role of mirror neurons in human evolution and the development of cognitive abilities.

***Keywords*:** mirror neurons, human evolution.

References

1. Kosonogov V. *Zerkal`ny`e nejrony`: kratkij nauchny`j obzor*, (Rostov-na-Donu: Phoenix, 2009), p. 24.
2. Maxin S. A. Sistema «zerkal`ny`x nejronov»: aktual`ny`e dostizheniya i perspektivy` E`E`G-issledovanij, *Uchenye Zapiski Krymskogo Federal'nogo Universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Biologiya i Khimiya,* **25(64)**, 142 (2012).
3. Bazyan A. S. Zerkal`ny`e nejrony`, fiziologicheskaya rol`, osobennosti funkcionirovaniya i e`mocional`no nasy`shhennaya kognitivnaya karta mozga, *Uspexi fiziologicheskix nauk,* **50(2)**, 42 (2019).
4. Zajceva Yu. S. Zerkal`ny`e kletki i social`naya kogniciya v norme i pri shizofrenii, *Social`naya i klinicheskaya psixiatriya,* **23(2),** 96 (2013).
5. Lushhekina E. A., Strelecz V. B. Rasstrojstva autisticheskogo spektra. Obzor sovremenny`x e`ksperimental`ny`x issledovanij, *Zhurnal vy`sshej nervnoj deyatel`nosti imeni I. P. Pavlova,* **64(6)**, 585 (2014).
6. Ragimova A. A., Perevoznyuk G. S., Volel` B. A., Petelin D. S., Ponomareva D. S., Salamatin M. I., Byatov A. A., Feurra M. Issledovanie funkcionirovaniya zerkal`ny`x nejronov v norme i pri nejropsixiatricheskix sostoyaniyax: sistematicheskij obzor literatury, *Nevrologicheskij vestnik,* **56(3)** 272 (2024).
7. Bushov Yu. V., Svetlik M. V., Skryabina A. A. O proisxozhdenii zerkal`ny`x nejronov, *Vestnik psixofiziologii,* **2**, 103 (2025).
8. Rizzolatti G., Sinigaglia C., The mirror mechanism: a basic principle of brain function, *Nature Reviews Neuroscience*, **17(12)**, 757 (2016).
9. Yakoboni M. *Otrazhayas` v lyudyax: Pochemu my` ponimaem drug druga*, per. s angl. L. Moty`lev (Moskva: OOO Yunajted Press, 2011), p. 366.
10. Skryabina A. A., Svetlik M. V., Bushov Yu. V. Aktivnost` zerkal`ny`x nejronov u monolingvov i bilingvov pri nablyudenii i proiznesenii slov na rodnom i nerodnom yazy`kax, *Uchenye Zapiski Krymskogo Federal'nogo Universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Biologiya i Khimiya,* **10(3)**, 207 (2024).
11. Mårtensson J., Eriksson J., Bodammer N. C., Lindgren M., Johansson M., Nyberg L. and Lövdén M. Growth of language-related brain areas after foreign language learning, *Neuroimage,* **63(1)**, 240 (2012).
12. Tobias P. V. *The sculls, endocasts and teeth of Homo habilis, Olduvai Gorge*, (Cambridge: Cambridge University Press, 1991) p. 921.
13. Skoyles J. R., Gesture Language Origins and Right Handedness, *Psychology*, **11,** 24 (2000).
14. Churchland P. S. *Braintrust: What neuroscience tells us about morality*, (Princeton: Princeton University Press, 2011) p. 288.
15. Bushov YU. V., Ushakov V. L., Svetlik M. V., Kartashov S. I., Orlov V. A., Rol' zerkal'nykh neironov v interpretatsii deistvii i namerenii, *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Biologiya*, **56,** 86 (2021).
16. Rizzolatti G., Craighero L. *Language and mirror neurons, Oxford Handbook of Psycholinguistics*. (Oxford: Oxford University Press, 2007) p. 771.
17. Burlak S. *Proisxozhdenie yazy`ka: Fakty`, issledovaniya, gipotezy*, 2-e izd., pererab. i dop., (Moskva: Al`pina non-fikshn, 2019), p. 609.

18. Vy`gotskij L. S. *My`shlenie i rech`*, (Moskva: Labirint, 1999), p. 352.
19. Simonov P. V. *Lekcii o rabote golovnogo mozga. Potrebnostno-informacionnaya teoriya vy`sshej nervnoj deyatel`nosti*, (Moscow: Izdatel`stvo «Institut psixologii RAN», 1998), p. 98.
20. Tereshenko T. V., Goncharov O. A. Gipoteza lingvisticheskoj otnositel`nosti: teoreticheskij analiz i e`ksperimental`ny`e danny`e, *Psixologicheskij zhurnal Mezhdunarodnogo universiteta prirody`, obshhestva i cheloveka,* **2,** 11 (2014).
21. Skryabina A. A, Svetlik M. V., Bushov Yu. V. Vliyanie bilingvizma na individual`no-psixologicheskie osobennosti uchashhixsya, *Vestnik psixofiziologii,* **3,** 120 (2024).
22. Nikitina O. A., Nikitina A. R. E`mocional`ny`j intellekt: ponyatie, struktura, genezis, *Psixologiya i pedagogika sluzhebnoj deyatel`nosti,* **3,** 58 (2024).
23. Farina E., Borgnis F., Pozzo T., Mirror neurons and their relationship with neurodegenerative disorders, *Journal of Neuroscience Research,* **98(6)**, 1070 (2020).
24. Bonini L., Rotunno C., Arcuri E., Gallese V., Mirror neurons 30 years later: implications and applications, *Trends in Cognitive Sciences,* **26(9)**, 767 (2022).
25. Rizzolatti D., Sinigal'ya K. *Zerkala v mozge: o mekhanizmakh sovmestnogo deistviya i soperezhivaniya*, per. s angl. O. A. Kurakovoi, M. V. Falikman (Yazyki slavyanskikh kul'tur, Moskva, 2012), p. 208.
26. Chipeeva N. A. Nejrofiziologicheskie mexanizmy` e`mocional`nogo intellekta, *Psixologiya. Psixofiziologiya,* **16(3)** 65 (2023).
27. Bushov Yu. V., Ushakov V. L., Svetlik M. V., Kartashov S. N., Orlov V. A. *Zerkal`ny`e nejrony` v vospriyatii vremeni i rechevy`x processax*, 2-e izd., pererab. i dop., (Moskva: RUSAJNS, 2021), p. 212.
28. Moshkina M. V., Vavilina V. E., Bushov Yu. V. Zerkal`ny`e nejrony` i mozgovoj «detektor oshibok» v raspoznavanii korrektny`x i oshibochny`x dejstvij, *Uchenye Zapiski Krymskogo Federal'nogo Universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Biologiya i Khimiya,* **11(2)**, 145 (2025).
29. Hari E., Cengiz C., Kılıç F., Yurdakoş E., Ayna nöron sistemi ve fonksiyonlarina klinik yaklaşim, *Journal of Istanbul Faculty of Medicine*, **84(3)**, 430 (2021).
30. Droby`shevskij Stanislav *Dostayushhee zveno. Kniga vtoraya. Lyudi*, (Moskva: Izdatel`stvo AST. CORPUS, 2019), p. 592.
31. Nikulichev Yu. V. *Global`noe zdorov`e: Analit. Obzor*, (Moskva: RAN. INION. Centr nauch.-inform. issled. global. i regional. Problem. Otd. probl. evrop. Bezopasnosti, 2018), p. 68.
32. Ramachandran V. S., Oberman L. M. Razbity`e zerkala: teoriya autizma, *Autizm i narusheniya razvitiya,* **6(3)** 1 (2008).
33. Ly`z` N. A., Gladkaya E. V. Vliyanie cifrovizacii na kognitivny`e processy`: obzor prichin i posledstvij, *Vestnik Permskogo universiteta. Filosofiya. Psixologiya. Sociologiya,* **3**, 396 (2025).
34. Gorbunova T. P., Tondzhu T. M., Czaturyan A. E`., Droby`shevskaya M. V. Problema snizheniya intellekta, Medicinskoe obrazovanie, nauka, praktikain the sbornik statej *"X Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii molody`x ucheny`x i studentov, 22-23 aprelya 2025 g",* Vol. 1, Ekaterinburg (2025) p. 292.

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского
Биология. Химия. Том 12 (78). 2026. № 2. С. 54–65.

УДК 502.3/.7

DOI 10.5281/ZENODO.20787035

АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЛЕЧЕБНОЙ ГРЯЗИ ОЗЕРА УТИНОЕ И ЭССОВСКИХ МИНЕРАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ КАМЧАТСКОГО КРАЯ

Виниченко Л. А., Рогатых С. В.

ФГБОУ ВО «КамГУ им. Витуса Беринга», Камчатский край, Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация
E-mail: vinichenkola@kamgu.ru

В статье показаны результаты сравнительного химического и минералогического анализа донных отложений месторождения «Озеро Утиное» и отложений вблизи выхода Эссовских минеральных источников Камчатского края. Результаты исследований показывают, что в озере Утином происходят неблагоприятные процессы, ведущие к изменению кондиций донных отложений. Пелоид, формирующийся в местах выхода Эссовских минеральных источников, можно отнести к сопочным грязям. Содержащиеся в питающих водах мышьяк и метаборная кислота определяются в нем в высоких концентрациях, однако являются частью биологически активного комплекса. Описанные донные отложения по-прежнему имеют рекреационный потенциал и требуют дальнейшего изучения.
Ключевые слова: донные отложения, гидротермальные месторождения, химический состав, пелоид.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение донных отложений водоёмов как депонирующей среды является важным инструментом для понимания динамики экологических процессов и состояния окружающей среды. Химический состав пелоида можно расценивать как индикатор природных и антропогенных воздействий на водоём. На Камчатке, уникальном своими природными ресурсами регионе, такие исследования особенно актуальны, так как помогают оценить влияние вулканической активности, климатических изменений и хозяйственной деятельности человека на водные экосистемы. Полученные при этом данные будут способствовать формированию мониторинга загрязнений, природоохранных стратегий, рационального пользования ресурсами в условиях повышенной туристической активности в регионе. Ранее гидротермальные ресурсы Камчатки нерегулярно изучались с точки зрения санитарного неблагополучия, геохимических составляющих, эколого-географического мониторинга [1–6].

Цель данного исследования – анализ и актуализация сведений о текущем

состоянии месторождения пелоидов озера Утиное в сравнении с пелоидом Эссовских минеральных источников и определение дальнейшей стратегии изучения этих объектов в бальнеологических целях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом для исследования послужили донные отложения озера Утиное, расположенного в 62 км южнее г. Петропавловска-Камчатского, в 1,5 км к северу от п. Паратунка. Отбор произведен 18. 05. 2025 в трех точках почвенным буром, точки были выбраны с учетом различной закономерности их распределения и перемещения по водоему.

Дополнительно были взяты три образцы пелоида в месте выхода вод минеральных источников в окраине села Эссо Быстринского района Камчатского края, используемого населением и туристами в оздоровительных целях (рис. 1). Материал был исследован по тем же критериям, что и пелоид озера Утиное.



Рис. 1. Расположение точек отбора исследуемых проб пелоида полуострова Камчатка: озеро Утиное Елизовского района, Эссовское месторождение минеральных вод Быстринского района.

Была проведена количественная характеристика макро- и микрокомпонентного состава поровых растворов донных отложений по результатам расчета состава

водных вытяжек с учетом влажности образцов. Для анализа проб были использованы спектрофотометр атомно-абсорбционный «ThermoElectron SOLAAR M», ионометр «Hanna», ионометр «Итан», спектофотометр «UVmini-1240 (Shimadzu), весы аналитические SHINKO HT-220E (Shimadzu).

Дополнительно был проведен анализ минерального состава кристаллической матрицы пелоида по данным рентгеновской дифрактометрии и инфракрасной спектроскопии. Дифрактограммы были записаны на рентгеновском дифрактометре XRD Max XRD700, в диапазоне 4–60 °2Θ, с шагом 0,1 °2Θ, скорость сканирования 2 гранд/мин, что эквивалентно выдержке в точке 3 с. Инфракрасные спектры записаны с помощью ИК спектрометра с преобразованием Фурье, в диапазоне 400–4000 $см^{-1}$, с разрешением 4 $см^{-1}$, число сканов 100. Пример дифрактограммы показан на рис. 2. Образцы для записи инфракрасных спектров растирали с бромидом калия и прессовали в таблетки.

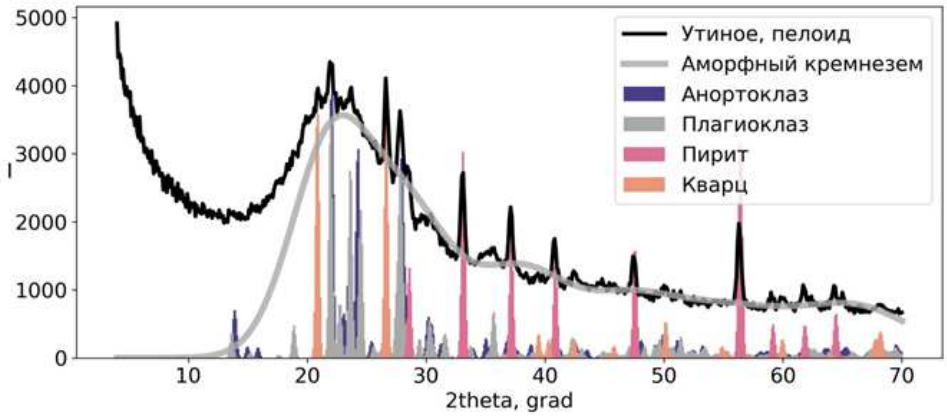


Рис. 2. Дифрактограмма пелоида месторождения озера Утиное. Пелоид практически целиком состоит из аморфного кремнезема, присутствуют полевые шпаты и заметные количества пирита.

Полученные сведения сравнивались между собой и с результатами мониторинга, проводимого авторами в 2012–2015 гг.

Исследование выполнено в рамках Межведомственной программы комплексных научных исследований Камчатского полуострова и сопредельных акваторий, реализуемой ФГБОУ ВО «КамГУ им. Витуса Беринга», с использованием оборудования ЦКП «Камчатский центр элементного, минерального, изотопного анализа» Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Геологоразведочными работами Отдела геологии и лицензирования по Камчатскому краю (Камчатнедра) разведано и учтено Государственным балансом запасов полезных ископаемых 463 месторождений различных полезных

ископаемых, в том числе одно месторождение лечебной грязи – пелоид озера Утиное [7]. До настоящего времени подсчет и актуализация сведений о запасах донных отложений этого месторождения не проводились. По состоянию на 2012 г. территориальным балансом запасов полезных ископаемых Камчатского края балансовые (эксплуатационные) запасы грязи месторождения учитывались в количестве 56 422 м^3 [8]. Месторождение числится в нераспределенном фонде недр.

Исследования пелоидного месторождения озера Утиное в 1990–2012 годах показывают постепенное природное задерновывание и осушение некоторых участков, приводящее к дальнейшему сокращению запасов (рис. 3). В питающие озеро ручьи также идет неконтролируемый сброс канализационных стоков с прилегающих баз отдыха, что приводит к росту органики в нем.

Пелоид озера Утиное имеет слабокислую реакцию среды, представлен темно-бурой пластичной массой с большим количеством растительных остатков. Влажность пелоида определяется как 88 %, что выше данных 2014 г. (69–79 %). Это может свидетельствовать о заиливании донных отложений ввиду поступления органического вещества и биогенных элементов со стоками. Зольность составляет в среднем 66 % (81 % в 2014 г.), количество органики 34 % против 19 % соответственно. Величина окислительно-восстановительного потенциала грязей ранее имела устойчивое отрицательное значение, колеблясь от –128 до +50 мВ, что свидетельствовало о протекании в грязи восстановительных процессов и высокой биологической активности грязи [9, 10]. Сейчас окислительно-восстановительный потенциал определяется как +32 мВ. Данный пелоид практически целиком состоит из аморфного кремнезёма, присутствуют полевые шпаты и заметные количества пирита. Высокое содержание коллоидного кремнезёма также определяется по данным инфракрасной спектрометрии. Озеро сформировалось, вероятно, под слоем вулканического песка (обсидиана), то есть подстилающие породы – вулканического происхождения.

Большое количество аморфного кремнезёма можно объяснить, во-первых, активными процессами биогенного осадкообразования, связанных с ростом диатомовых водорослей, которые используют кремнезём в качестве скелетных структур. В благоприятных условиях при достаточном количестве питательных веществ диатомовые водоросли могут доминировать в биогеохимическом цикле, что приводит к накоплению кремнезёма в осадках. Во-вторых, значительное содержание кремнезёма может указывать на вынос кремнистых минералов из горных пород и повышенную эрозию, что актуально для регионов с вулканической и гидротермальной активностью. Стоит сказать, что озеро Утиное на 10–40 % питается кремниевыми водами Паратунского гидротермального месторождения, что также влияет на химический состав донных отложений [11].

Заметные количества обнаруженного нами пирита могут объясняться активностью сульфатредуцирующих бактерий. При заиливании водоема в донных отложениях создаются анаэробные условия. Образующийся в результате разложения органических остатков сероводород реагирует с осажденным гидроксидом железа, что приводит к образованию пирита и характерному цвету пелоида.

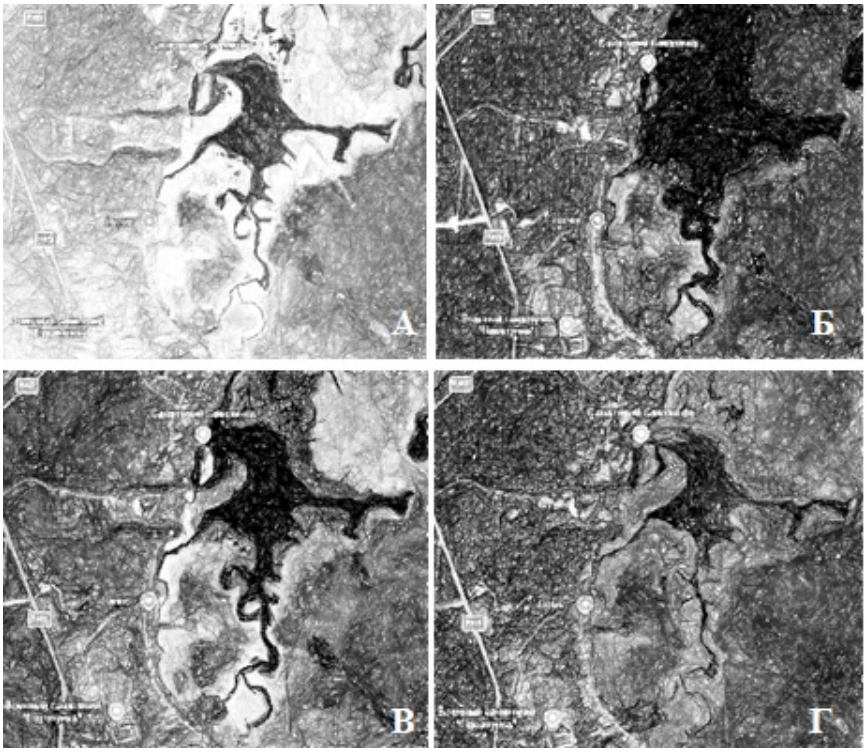


Рис. 3. Спутниковые снимки озера Утиное: А – 2017 г., Б – 2020 г., В – 2022 г., Г – 2024 г. Видно уменьшение площади озера из-за задерновывания и осушения. Данные с ресурса Google Earth.

Отложения месторождения Эссо характеризуется как минерализованные, нейтральные, хлоридно-сульфатные, натриево-кальциевые. Влажность – 57 %. Содержат пирит в небольших количествах, при этом концентрация сульфат-ионов выше. Это свидетельствует о более низкой активности сульфатредукторов и, косвенно, о меньшем содержании органики. Взятый образец в основном состоит из аморфного кремнезема и полевых шпатов. Методом ИК-спектрометрии нами определены следовые количества глинистых минералов, монтмориллонита и каолинита. Известно, что тонкодисперсная глинистая фракция образуется из неглинистых силикатных минералов в ходе гидротермальных процессов (реакции с водой в условиях высоких температур и давления), что характерно для точки отбора в районе Эссо, – отложения там формируются при непосредственном участии термальных вод [12].

По своим свойствам термальная вода Эссовского месторождения наиболее близка к угличскому типу (по ГОСТ Р 54316–2011. Воды минеральные питьевые. XVIII. Хлоридно-сульфатная кальциево-натриевая). Этим объясняется и более высокое содержание Na^+ и Ca^{2+} в отложениях из Эссо. Содержание мышьяка и метаборной кислоты (токсикологических компонентов) в термальной воде Эссовского месторождения, питающей месторождение пелоида, превышает ПДК

(0,05 мг/л и 0,5 мл/л соответственно) в несколько раз, что сказывается на составе пелоида [4]. Проведенный нами химический анализ (табл. 1) также свидетельствует о повышенной концентрации борной кислоты в пробах водной вытяжки из пелоида Эссовского месторождения.

Таблица 1

Результаты химического анализа водных вытяжек из двух образцов пелоида

Определяемый компонент, мг/л	Пелоид Эссо	Пелоид озера Утиное
Li^+	< 0,1	< 0,1
NH_4^+	15,0	35,6
Na^+	275	105
K^+	16,8	11,7
Ca^{2+}	101	88
Mg^{2+}	9,3	14,0
Fe^{2+}	< 0,1	< 0,1
Fe^{3+}	< 0,1	< 0,1
Сумма катионов	416,89	254,68
HCO_3^-	925	441
CO_3^{2-}	-	-
Cl^-	134	157
SO_4^{2-}	125	91
F^-	15,3	< 0,15
NO_2^-	0,387	0,650
NO_3^-	4,95	6,14
PO_4^{3-}	12,4	4,61
Сумма анионов	1216,99	700,39
Сумма ионов	1633,89	955,08
pH	7,05	6,88
Кремний (в виде H_4SiO_4)	192	111
Метаборная кислота H_3BO_3	21,2	< 0,5
Алюминий	< 0,04	< 0,04
Ртуть	< 0,00002	< 0,00002
Мышьяк	0,89	0,0475
Стронций	< 0,25	< 0,25
Никель	< 0,005	< 0,005
Кадмий	< 0,00005	< 0,00005

Однако, сравнивая результаты анализа самого пелоида (табл. 2) и водных вытяжек из него, можно заметить, что концентрация мышьяка в пелоиде озера Утиное выше, чем его концентрация в пробах пелоида Эссо. Это свидетельствует о том, что отложения Эссо содержат растворимые соединения мышьяка.

Таблица 2

Результаты химического анализа дух образцов пелоида – озера Утиное и Эссовского месторождения в сравнении с ПДК / ОДК

Определяемый компонент	Пелоид Эссо	Пелоид озера Утиное	Величина ПДК / ОДК (мг/кг) с учетом фона (кларка) химических веществ в почве [15]
Na_2O, %	1,53	1,93	–
MgO, %	1,09	1,36	–
Al_2O_3,%	12,25	13,90	–
SiO_2, %	59,72	56,25	–
P_2O_5, %	0,30	0,17	–
K_2O, %	1,26	1,17	–
CaO, %	4,39	4,05	–
TiO_2, %	0,79	0,75	–
MnO, %	0,08	0,09	–
Fe_2O_3, %	5,83	5,84	–
Потери при прокаливании	15	37	–
S, %	0,78	0,71	–
Cl, %	0,00	0,00	–
Sc, мг/кг	16	19	–
V, мг/кг	87	86	–
Cr, мг/кг	55	52	0,05 / –
Co, мг/кг	33	32	–
Ni, мг/кг	20	20	– / 80
Cu, мг/кг	24	22	– / 132
Zn, мг/кг	108	127	– / 220
Ga, мг/кг	27	26	–
As, мг/кг	24	38	– / 10
Rb, мг/кг	27	45	–
Sr, мг/кг	385	957	–
Y, мг/кг	17	19	–
Zr, мг/кг	154	158	–
Nb, мг/кг	5	5	–
Ba, мг/кг	533	532	–
La, мг/кг	19	27	–
Ce, мг/кг	82	73	–
Pb, мг/кг	219	217	– / 130

По имеющимся рекомендациям при оценке содержания элементов в пелоидах используются ПДК для почв соответствующего региона. В целом санитарно-гигиеническое состояние вулканических почв Камчатки признано благополучным

[13]. Содержания подвижных форм всех контролируемых элементов (Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn и Cd) в почвах Камчатки значительно ниже ПДК.

В число элементов, встречающихся в надкларковых концентрациях в разных районах почвенных провинций Камчатки, входят Sc, V, Cr, Mn, Co, Cu, Zn, Ag и P; наиболее низкие содержания в почвах характерны для B,Y, Zr, Nb, Mo, Sn, Ba, Pb. В 2022–2024 годах тяжелые металлы в почвах не обнаруживались [7]. Однако в проанализированных донных отложениях валовое содержание Co, As, Pb превышает установленные для почв нормативы.

На формирование донных отложений и почв, распределение в них компонентов влияют разные факторы. В донных отложениях, как депонирующей среде, концентрация элементов часто выше. В связи с этим авторы поддерживают необходимость разработки нормативов для донных отложений. Например, в ходе исследования озёр северной Фенноскандии по регрессионным зависимостям между концентрациями металлов в воде и поверхностных слоях донных отложений и значениям $ПДК_{РБХЗ}$ Даувальтером В. А. были установлены величины концентраций металлов в донных отложениях, которые могут быть предложены в качестве ПДК для пресноводных донных отложений (в мкг/г сух. веса): Ni – 200, Cu – 30, Zn – 200, Mn – 400, Pb – 500, Cd – 1,5, Al – 25 000 (2,5 %) [14].

Далее нами отмечено высокое содержание гидрокарбонатов в донных отложениях озера Утиное при отсутствии CO_3^{2-}, в отложениях Эссо концентрация HCO_3^- выше более, чем в 2 раза. Наибольшая часть карбонатов поступает в водоём с термальной водой и в процессе эрозии. В слабокислой и нейтральной среде малорастворимые карбонаты превращаются в растворимые гидрокарбонаты. Также их высокое содержание может свидетельствовать о поступлении загрязняющих веществ, длительное время аккумулирующихся в донных отложениях.

Соединения азота в пелоиде озера Утиное достигают 4 %, что свидетельствует о высоком содержании органического вещества. Отложения Эссо также богаты органикой, но в меньшей степени (в виде соединений азота – 2 %).

Высокие значения потери при прокаливании могут также объясняться поступлением органического материала в результате антропогенной деятельности и высокой продуктивностью органического материала в самом водоёме.

В состав гидрофильного коллоидного комплекса обоих образцов входят мельчайшие глинистые и силикатные (песчаные) частицы с диаметром меньше 0,1 мк, сернистое железо, продукты разрушения мельчайших силикатных частиц (SiO_2, Fe_2O_3, Al_2O_3, MnO, TiO_2), адсорбированные ионы (Na^+, Mg^{2+}, K^+, Ca^{2+}, Br^-, SO_4^{2-}).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя изменения физико-химических показателей за прошедшие годы, можно предположить, что озеро Утиное по-прежнему подвержено воздействию сточных вод, привносящих органическое вещество антропогенного происхождения, задернованность ведёт к обилию растительной органики. Гранулометрические особенности кристаллической матрицы пелоида озера Утиное (развитая поровая структура аморфного кремнезёма и высокая площадь удельной поверхности) вместе

с высоким содержанием органического материала приводят к аккумулированию металлов. Данный факт совместно с большим наличием сульфатов способствует деятельности автохтонных микроорганизмов и формированию пиритов, сероводорода, но при этом меняются условия формирования и свойства донных отложений, вмешиваясь в естественные биогеохимические процессы. Месторождение пелоида озера Утиное имеет высокий бальнеологический потенциал при условии повышения санитарно-экологического благополучия с помощью ее активации и отвода канализационных стоков, сейчас существует риск потери кондиций лечебной грязи ввиду нерационального природопользования и отсутствия систематического мониторинга состояния водоема.

Пелоид, формирующийся в местах выхода Эссовских минеральных источников, относится к сопочным грязям, согласно имеющимся критериям. Он характеризуется влажностью в пределах 57 %, вязкой структурой, серым оттенком, насыщен сульфатами, содержит относительно небольшое количество органического вещества [16]. Большее содержание растворимых форм мышьяка говорит о том, что в пелоиде он – природный биологически активный и доступный, а не привнесен извне. Этот химический элемент участвует во многих важных процессах в организме, его связь с другими элементами способна как активизировать биохимические процессы, так и угнетать, в зависимости от дозы. Растворимая форма определяет сниженную токсичность элемента и потенциальную биологическую активность при строго контролируемых концентрациях [17]. Пелоид Эссо не может быть отнесен к условно-безопасным природным образованиям. Он является компонентом региональной геохимической аномалии, и любые планы его хозяйственного, рекреационного или бальнеологического использования должны в обязательном порядке опираться на предварительную всестороннюю оценку рисков. По международной классификации пелоидов [18] можно предположить, что пелоид Эссо – это неорганическая грязь термальных источников, формирующаяся в местах активной вулканической деятельности в результате оседания минеральных веществ на дне термального источника.

По результатам минералогического анализа пелоидов можно сделать вывод, что коллоидный комплекс сапропеля озера Утиное и глины в Эссо схож, что говорит о подобной пластичности. Это одно из главных свойств лечебной грязи, определяющего ее бальнеологическое значение: пластичность обеспечивает прилегание пелоида к коже (создавая удобные аппликации для глубокого прогревания тканей), равномерное распределение и удержание массы на теле человека, что важно для эффективного теплового воздействия и проникновения минеральных компонентов через поры кожи.

Учитывая бальнеологическую ценность отложений озера Утиное и Эссовского месторождения, экологический мониторинг этих объектов необходим, терапевтические эффекты пелоидов требуют дальнейшего углублённого изучения. Также необходима разработка актуальных нормативов и критериев оценки донных отложений и их рекреационного потенциала.

Список литературы

1. Завадская А. В. Природные комплексы гидротермальных систем Камчатки как объекты рекреации и туризма / А. В. Завадская, Е. И. Голубева // География и природные ресурсы. – 2013. – № 4. – С. 46–51.
2. Жарков Р. В. Физические и химические особенности сапропелевых грязей некоторых пресноводных озер Елизовского района Камчатского края (Россия) / Р. В. Жарков, Д. Н. Козлов, Б. И. Челнокова // Геосистемы переходных зон. – 2019. – Т. 3, № 4. – С. 438–447.
3. Кудряшов В. А. Перспектива создания курортно-санаторного кластера на Эссовском гидротермальном месторождении Быстринского района Камчатского края / В. А. Кудряшов, Т. А. Кудряшова // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. – 2025. – Т. 102, № 5. – С. 39–47.
4. Кудряшов В. А. Перспективы комплексного рационального использования ресурсов гидротермальных месторождений Камчатского края / В. А. Кудряшов // Маркшейдерия и недропользование. – 2025. – Т. 25, № 1. – С. 16–24.
5. Погорелов А. Р. Перспективы развития Паратунской курортной зоны (Камчатский край) / А. Р. Погорелов // Вестник физиотерапии и курортологии. – 2019. – Т. 25, № 4. – С. 122–125.
6. Леонова Н. Б. Современное состояние и перспективы использования целебных ресурсов Камчатки / Н. Б. Леонова, И. М. Микляева, Н. В. Рябова, С. М. Малхазова // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2018. – № 6. – С. 10–17.
7. Доклад о состоянии окружающей среды в Камчатском крае в 2024 году. – Петропавловск-Камчатский : Министерство природных ресурсов и экологии Камчатского края, 2025. – 397 с.
8. Мурадов С. В. Экологические и микробиологические особенности формирования и состояния месторождений лечебных грязей: дисс… д-ра биол. наук. / С. В. Мурадов. – Томск, 2014. – 237 с.
9. Гафарова Л. Ф. Микробиологический анализ торфяной лечебной грязи месторождения Таборли-3 / Л. Ф. Гафарова, У. Курди, Г. Ю. Яковлева, А. И. Колпаков, О. Н. Ильинская // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. – 2025. – Вып. 1. – С. 21–31.
10. Мурадов С. В. Физико-химические и микробиологические основы тестирования токсических факторов термоминеральных вод / С. В. Мурадов, Т. П. Белова, С. В. Рогатых // Водные ресурсы. – 2020. – Т. 47, № 4. – С. 380–390.
11. Мурадов С. В. Влияние эксплуатации геотермального месторождения на экологическое состояние лечебной грязи / С. В. Мурадов, Л. А. Мудранова, А. И. Хоменко, С. В. Рогатых // Проблемы региональной экологии. – 2014. – № 3. – С. 99–103.
12. Frolova Yu. V. The formation of clay minerals in volcanogenic rocks during hydrothermal litho-genesis. / Frolova Yu. V., Chernov M. S. // Clays-2015: Materials and Abstracts of Third All-Russian Meeting. – Moscow, 2015. – P. 70–72.
13. Литвиненко Ю. С. Химическая трансформация почв Камчатки после поступления в них продуктов вулканических извержений / Ю. С. Литвиненко, Л. В. Захарихина // Сибирский экологический журнал. – 2017. – Т. 24, № 6. – С. 772–788.
14. Даувальтер В. А. Геоэкология донных отложений озер / В. А. Даувальтер. – Мурманск: Изд-во МГТУ, 2012. – 242 с.
15. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 № 2 «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21» [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/573500115 (дата обращения: 12.02.2026).
16. Бахман В. И. Методика анализа лечебных грязей (пелоидов) / В. И. Бахман, К. А. Овсянникова, А. Д. Вадковская. – М.: ЦНИИКиФ, 1965. – 140 с.
17. Парнякова Л. Л. Минеральные природные мышьяковистые воды в курортной медицине / Л. Л. Парнякова, Е. А. Гурьевская, И. В. Семенова [и др.] // Микроэлементы в медицине. – 2025. – Т 26, № 2. – С. 20–30.
18. Герасименко М. Ю. Пелоидотерапия в лечебно-реабилитационных и профилактических программах. Клинические рекомендации / М. Ю. Герасименко, П. В. Астахов, Н. Г. Бадалов [и др.] // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. – 2018. – Т. 17, № 1. – С. 40–48.

ANALYSIS OF THE INDICATORS OF THERAPEUTIC MUD DEPOSITS OF LAKE UTINOE AND ESSO IN KAMCHATKA

Vinichenko L. A., Rogatykh S. V.

Vitus Bering Kamchatka State University, Petropavlovsk-Kamchatskiy, Kamchatka, Russian Federation
E-mail: vinichenkola@kamgu.ru

The chemical composition of the peloid can be regarded as an indicator of natural and anthropogenic impacts on the reservoir. The authors present the results of a comparative chemical and mineralogical analysis of the bottom sediments of the Lake Utinoye deposit, which provides therapeutic mud to the Paratunka resort area of the Kamchatka, and sediments near the outlet of Esso mineral springs. A quantitative characteristic of the macro- and micro-component composition of the pore solutions of bottom sediments is given based on the results of calculating the composition of water extracts, taking into account the moisture content of the samples. Additionally, the mineral composition of the peloid crystal matrix was analyzed according to X-ray diffractometry and infrared spectroscopy. The information obtained was compared with each other and with the results of monitoring conducted by the authors in 2012–2015. The investigated deposit "Lake Utinoye" is located in the undistributed subsoil fund. The last comprehensive monitoring of the lake's bottom sediments was conducted in 2012–2015. Since then, the situation has changed under the influence of natural factors and anthropogenic pressure. The authors suggest, given the negative trend of 1990–2012, that the blackening and draining of lake sites leads to a further reduction in reserves.

Comprehensive studies of Esso springs deposits have not been conducted. At the same time, both peloids continue to be used by the population for recreational purposes, which underscores the need to update data and conduct new research. The research results show that unfavorable processes occur in Utinoye lake, leading to changes in the conditions of bottom sediments. Peloid, which is formed in the places of the Esso mineral springs, is a type of hill mud. According to the international classification of peloids, it is an inorganic mud of thermal springs that forms in areas of active volcanic activity as a result of the settling of minerals at the bottom of a thermal spring. The arsenic and metaboric acid contained in the waters feeding it are determined in high concentrations in the sample. But they are not considered toxic, as they are in a soluble, biologically accessible form. In addition, the concentration of arsenic in the peloid of Utinoye lake is higher. Here it acts as an important balneological component. Mineralogical analysis has shown that the colloidal complex of sapropel from Utinoye lake and clay in the village of Esso is similar, which indicates similar plasticity. It is shown that Utinoye lake was probably formed under a layer of volcanic sand (obsidian), that is, the underlying rocks are of volcanic origin.

Despite the existing recommendations and standards, the total content of Co, As, and Pb in the analyzed bottom sediments exceeds the maximum permissible concentrations established for soils. The formation of bottom sediments and soils, as well as the distribution of components in them, is influenced by various factors. In bottom sediments,

as a depositing medium, the concentration of elements is often higher. Therefore, the authors support the need to develop standards for bottom sediments.

The analyzed sediments still have recreational potential and require further study. The data obtained contribute to the formation of pollution monitoring, environmental protection strategies, and rational use of resources in conditions of increased tourist activity in the region.

Keywords: bottom sediments, hydrothermal deposits, chemical composition, peloid.

References

1. Zavadskaya A. V., Golubeva E. I., Natural complexes of hydrothermal systems of Kamchatka as objects of recreation and tourism, *Geography and natural resources*, (**4**), 46 (2013). (*in Russ*.)
2. Zharkov R. V., Kozlov D. N., Chelnokova B. I., Physical and chemical characteristics of sapropelic muds of some freshwater lakes of the Elizovsky district of Kamchatka Krai (Russia), *Geosystems of transition zones*, **3** (4), 438 (2019). (*in Russ*.)
3. Kudryashov V. A., Kudryashova T. A., Prospects for the creation of a resort and sanatorium cluster at the Essovskoye hydrothermal field in the Bystrinsky district of Kamchatka Krai, *Issues of balneology, physiotherapy and therapeutic physical culture*, **102** (5), 39 (2025). (*in Russ*.)
4. Kudryashov V. A. Prospects for the integrated rational use of resources of hydrothermal deposits in Kamchatka Krai, *Mine surveying and subsoil use*, **25** (1), 16 (2025). (*in Russ*.)
5. Pogorelov A. R. Prospects for the development of the Paratunka resort area (Kamchatka Krai), *Bulletin of Physiotherapy and Balneology*, **25** (4), 122 (2019). (*in Russ*.)
6. Leonova N. B., Miklyaeva I. M., Ryabova N. V., Malkhazova S. M., Current state and prospects for the use of healing resources of Kamchatka, *Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography,* (**6**), 10 (2018). (*in Russ*.)
7. *Report on the state of the environment in Kamchatka Krai in 2024*, 397 p. (Petropavlovsk-Kamchatsky, 2025). (*in Russ*.)
8. Muradov S. V. *Ecological and microbiological features of the formation and state of therapeutic mud deposits*, Dissertation for academic degree of doctor of biological science, 237 p. (Tomsk, 2014). (*in Russ*.)
9. Gafarova L. F., Kurdi U., Yakovleva G. Yu., Kolpakov A. I., Ilyinskaya O. N. Microbiological analysis of therapeutic peat mud from the Taborli-3 deposit, *Bulletin of Perm University. Series: Biology*, **(1)**, 21 (2025). (*in Russ*.)
10. Muradov S. V., Belova T. P., Rogatykh S. V. Physicochemical and microbiological principles of testing toxic factors of thermal mineral waters, *Water resources*, **47** (4), 380 (2020). (*in Russ*.)
11. Muradov S. V., Mudranova L. A., Khomenko A. I., Rogatykh S. V. The impact of exploitation of a geothermal field on the ecological state of therapeutic mud, *Regional environmental issues*, (**3**), 99 (2014). (*in Russ*.)
12. Frolova Yu. V., Chernov M. S., The formation of clay minerals in volcanogenic rocks during hydrothermal litho-genesis, *Clays-2015: Materials and Abstracts of Third All-Russian Meeting* (Moscow, 2015), p. 70–72.
13. Litvinenko Yu. S., Zakharikhina L. V. Chemical transformation of Kamchatka soils after the entry of volcanic eruption products into them, *Siberian Ecological Journal*, **24** (6), 772 (2017). (*in Russ*.)
14. Dauvalter V. A. *Geoecology of bottom sediments of lakes*, 242 p. (MSTU, Murmansk, 2012). (*in Russ*.)
15. *Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation of January 28, 2021 No. 2 "On approval of sanitary rules and regulations SanPiN 1.2.3685-21"*, https://docs.cntd.ru/document/573500115 (Accessed February 12, 2026). (*in Russ.*).
16. Bakhman V. I., Ovsyannikova K. A., Vadkovskaya A. D. *Methodology for the analysis of therapeutic muds (peloids)*. 140 p. (Moscow, TsNIIKiF, 1965). (*in Russ*.)
17. Parnyakova L. L., Guryevskaya E. A., Semenova I. V. [et al.] Mineral natural arsenic waters in spa medicine, *Microelements in medicine*, **26** (2), 20 (2025). (*in Russ*.)
18. Gerasimenko M. Yu., Astakhov P. V., Badalov N. G. [et al.] Peloidotherapy in treatment, rehabilitation and preventive programs. Clinical recommendations, *Physiotherapy, balneology and rehabilitation*, **17** (1), 40 (2018). (*in Russ*.).

Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского
Биология. Химия. Том 12 (78). 2026. № 2. С. 66-74.

УДК 612.014.46:577.352.3
DOI 10.5281/ZENODO.20787632

ВЛИЯНИЕ ИЗОЛИРОВАННОГО И КОМБИНИРОВАННОГО ДЕЙСТВИЯ НИЗКОИНТЕНСИВНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КРАЙНЕ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ НА РЕДОКС-ДИНАМИКУ РАНОЗАЖИВЛЕНИЯ У КРЫС

Джелдубаева Э. Р., Ярмолюк Н. С., Борисенко Д. А.,
Ковальчук И. О., Туманянц К. Н.

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского», Симферополь, Республика Крым, Российская Федерация
E-mail: delviza@mail.ru

Работа посвящена оценке влияния изолированного и комбинированного действия низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ и умеренного ЭМЭ на динамику редокс-показателей NADH и FAD в процессе ранозаживления у крыс. Наиболее значимые изменения отмечены при комбинированном воздействии КВЧ-излучения и электромагнитного экранирования, что проявлялось максимальным снижением NADH, устойчивым уменьшением FAD и повышением редокс-индекса на всех этапах наблюдения. Показано, что электромагнитные факторы, особенно при комбинированном воздействии, оказывают существенное влияние на редокс-гомеостаз, способствуя ускорению метаболической перестройки и оптимизации регенераторных процессов.
Ключевые слова: электромагнитное экранирование, острая кожная рана, ранозаживление, NADH и FAD.

ВВЕДЕНИЕ

Процесс ранозаживления представляет собой сложный многоэтапный процесс регенерации, включающий воспаление, пролиферацию и ремоделирование тканей, сопровождающийся активными метаболическими и окислительно-восстановительными реакциями [1]. Одним из ключевых факторов, определяющих эффективность данного процесса, является состояние клеточного энергетического обмена и баланс окислительно-восстановительных систем, в которых важную роль играют коферменты NADH и FAD [2, 3].

Нарушение редокс-гомеостаза и избыточное образование активных форм кислорода приводят к развитию окислительного стресса, замедлению регенерации и формированию труднозаживаемые хронических ран [4]. В этой связи особый интерес представляет поиск факторов, способных модулировать метаболические процессы и повышать адаптационный потенциал тканей в условиях повреждения.

В последние годы активно изучается влияние физических факторов, в частности электромагнитных полей, на процессы регенерации. Показано, что

низкоинтенсивное электромагнитное излучение (ЭМИ) способно оказывать стимулирующее действие, влияя на пролиферацию клеток, микроциркуляцию и активность ферментных систем [5, 6]. В частности, воздействие низкоинтенсивного ЭМИ крайне высокого диапазона (КВЧ) изменяет проницаемость клеточных мембран, активность митохондрий и уровень энергетического обмена, что имеет значение для ускорения заживления ран [7].

В то же время влияние умеренного электромагнитного экранирования (ЭМЭ) на биологические системы изучено значительно меньше. Показано, что данный фактор может оказывать как стимулирующее, так и ингибирующее влияния на метаболические процессы в зависимости от их интенсивности и условий воздействия [8].

Несмотря на значительный объём исследований, остаётся недостаточно изученным вопрос о комплексном влиянии низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ и умеренного ЭМЭ на показатели окислительно-восстановительного обмена раневого процесса. Особенно актуальным является изучение изменений редокс-показателей – уровней NADH и FAD как чувствительных индикаторов метаболической активности клеток.

В связи с этим целью данной работы явилась оценка влияния изолированного и комбинированного действия низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ и умеренного ЭМЭ на динамику редокс-показателей NADH и FAD в процессе ранозаживления у крыс.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Эксперимент выполнен на 40 половозрелых самцах крыс линии *Wistar* с массой тела 250–300 г. Содержание животных осуществлялось в стандартных условиях вивария в соответствии с требованиями ГОСТ 33216-2014 и действующими рекомендациями по работе с лабораторными животными. Все этапы исследования проводились с соблюдением норм биоэтики и требований законодательства Российской Федерации, включая положения ГОСТ 31887-2012 «Принципы надлежащей лабораторной практики (GLP)». Эксперимент был одобрен локальным этическим комитетом ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского» (протокол № 5, 2022 г.).

Животные были рандомизированы и разделены на четыре равные группы по 10 особей в каждой. У всех крыс моделировали кожную рану путем нанесения линейного разреза длиной 3 см в области холки с формированием полнослойного кожного дефекта, фиксированного шиной, по методике Masson–Meyers и соавт. [9].

Первая группа (контрольная) содержалась в стандартных условиях вивария без дополнительных воздействий на протяжении всего периода наблюдения (14 суток).

Во второй (КВЧ) и четвертой (ЭМЭ+КВЧ) группах применялось воздействие низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ с использованием аппарата «КВЧ. РАМЕД-ЭКСПЕРТ – 01» (Институт технической механики НАНУ, г. Днепр). Использовали длину волны 7,1 мм (частота 42,3 ГГц) при плотности потока мощности 0,1 мВт/см². Облучение проводили ежедневно в утренние часы, воздействуя на затылочно-воротниковую область в течение 30 минут [10] на протяжении 14 дней.

Животные третьей (ЭМЭ) и четвертой (ЭМЭ+КВЧ) групп находились в условиях гипомагнитной среды, создаваемой с помощью экранирующей камеры

размером 2×3×2 м, выполненной из двухслойного железа типа «Динамо». Коэффициент ослабления магнитного поля, определённый феррозондовым магнитометром, составлял 4,375 для вертикальной и 20,0 для горизонтальной компонент.

Оценку параметров окислительного метаболизма проводили с использованием лазерного диагностического комплекса «ЛАЗМА МЦ» (модификация ЛАЗМА-МЦ-III, ООО НПП «ЛАЗМА», Москва). Исследования выполнялись непосредственно в области раневого дефекта. В допплеровском канале использовали лазер с длиной волны 1064 нм, а для регистрации флуоресценции – источники излучения с длинами волн 365 и 450 нм. Передача и регистрация сигнала осуществлялись через оптоволоконный зонд диаметром 3 мм. При проведении измерений особое внимание уделяли минимизации давления зонда на кожу во избежание искажения результатов.

С помощью флуоресцентной спектроскопии определяли [11]:

- индекс тканевого содержания восстановленной формы NADH, отн. ед.;
- индекс содержания окисленной формы FAD, отн. ед.;
- редокс-индекс (РИ), рассчитываемый по формуле:

$$РП = FAD / (FAD + NADH).$$

Данный показатель отражает соотношение окислительных и восстановительных процессов в тканях и коррелирует с активностью митохондриального дыхания и интенсивностью окислительного фосфорилирования [2, 12].

Регистрация параметров проводилась на 1-е, 3-и, 7-е и 14-е сутки после моделирования раны с целью оценки динамики метаболических изменений в процессе заживления.

Статистическую обработку результатов выполняли с использованием программ GraphPad Prism 8 и MS Excel 2010. Проверку распределения данных осуществляли с помощью критерия Шапиро–Уилка. В связи с преобладанием ненормального распределения применяли непараметрический критерий Краскела–Уоллиса с последующим множественным сравнением по тесту Данна. Полученные данные представлены в виде медианы (Me) и интерквартильного диапазона 25-й и 75-й процентили (Q1; Q3). Различия считались статистически значимыми при уровне значимости $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ полученных данных показал, что в процессе ранозаживления у крыс наблюдаются выраженные изменения показателей окислительно-восстановительного обмена, отражённые в динамике уровней NADH и FAD, как в контрольной группе, так и при воздействии различных электромагнитных факторов.

Так, в первой группе животных (К) отмечено постепенное снижение уровня NADH с 7,85 (7,00; 8,53) отн. ед. на первые сутки до 2,77 (2,16; 2,83) отн. ед. на 14 сутки, что соответствует естественному течению раневого процесса и показывает снижение интенсивности метаболической активности по мере перехода к фазе ремоделирования. Динамика показателя FAD характеризовалась увеличением показателя с 1,43 (0,82; 2,19) отн. ед. на первые сутки до максимума 1,73 (1,24; 2,28)

отн. ед. на седьмые сутки с последующим снижением до 0,7602 (0,75; 1,39) отн.ед. на 14 сутки (рис. 1), что отражает пик энергетического обмена в фазу пролиферации.

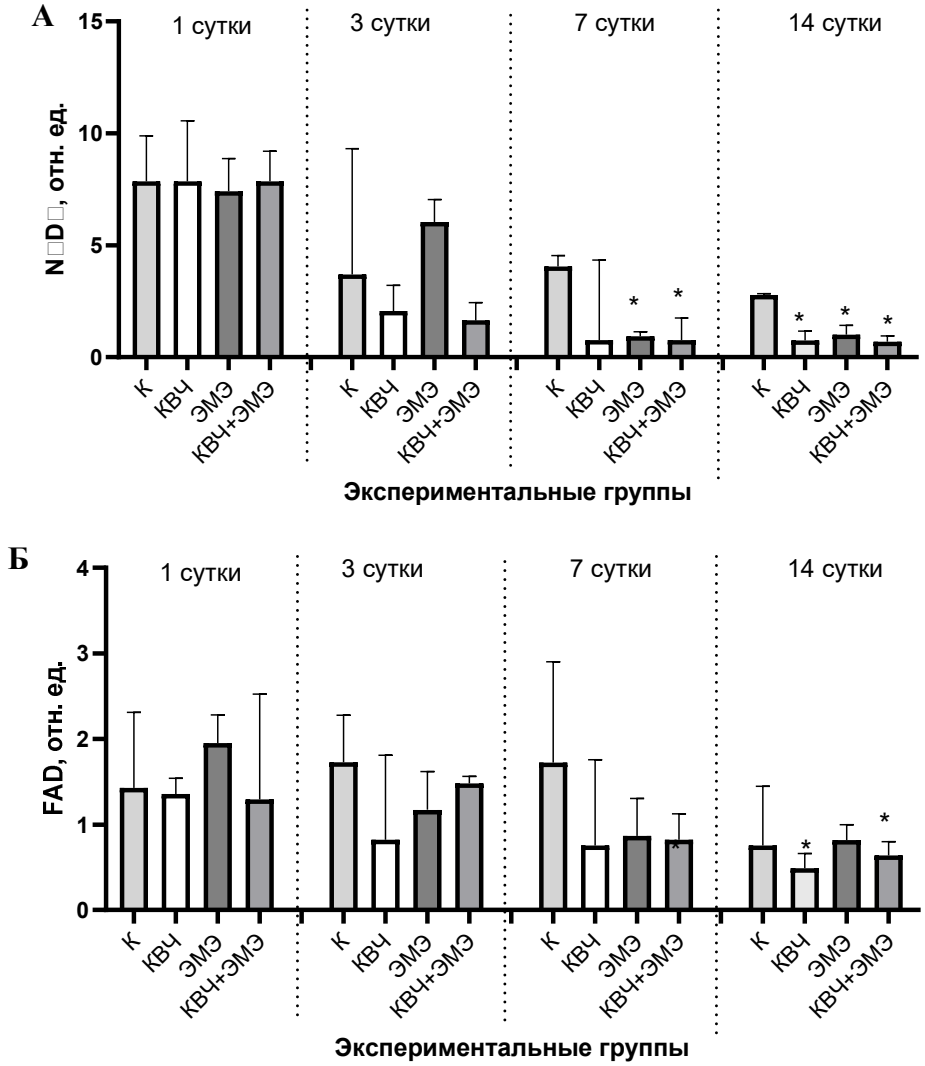


Рис. 1. Изменение показателей NADH (А) и FAD (Б) у крыс в контроле (К), под влиянием низкоинтенсивного электромагнитного излучения крайне высокой частоты (КВЧ) и умеренного электромагнитного экранирования (ЭМЭ) в процессе ранозаживления крыс.

Примечание: * – достоверность ($p<0,05$) полученных данный по критерию Краскела–Уоллиса в сравнении с данными в контрольной группе.

При воздействии низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ у животных второй группы (КВЧ) наблюдалось более выраженное снижение уровня NADH уже на ранних сроках: на третьи сутки показатель составил 2,05 (0,91, 2,62) отн. ед., что более чем в 2,6 раза ($p<0,05$) ниже контрольного значения (см. рис. 1). На 7 и 14 сутки значения сохранялись на низком уровне (0,76 и 0,74 отн. ед. соответственно), что свидетельствует о существенном изменении метаболических процессов. Также зарегистрировано снижение уровня FAD на всех сроках наблюдения. Уже на 3 сутки показатель составил 0,82 (0,62; 0,90) отн. ед., а к 14-м суткам снизился до 0,49 (0,47; 0,63) отн. ед., что почти в 2 раза ($p<0,05$) ниже контрольного значения.

В третьей группе крыс (ЭМЭ), подвергнутых воздействию умеренного ЭМЭ, на третьи сутки уровень NADH практически не отличался от контроля (6,04 (5,22; 6,95) отн. ед.), однако на 7-е сутки наблюдалось резкое снижение до 0,93 (0,47; 1,05) отн. ед., с сохранением низких значений на 14-е сутки. В динамике FAD также наблюдалось снижение показателя в разные сутки наблюдения: до 0,87 (0,72; 0,96) отн. ед. на седьмые сутки и 0,82 (0,66; 0,92) отн. ед. на 14 сутки (см. рис. 1).

Наиболее выраженные изменения выявлены у крыс четверной группы (ЭМЭ+КВЧ) при комбинированном воздействии КВЧ и ЭМЭ. Уже на третьи сутки уровень NADH снижался до 1,64 (1.16; 2.21) отн. ед., а к 14 суткам достигал минимального значения – 0,69 (0.67; 0.74) отн. ед., что является наименьшим показателем среди всех экспериментальных групп. На седьмые сутки показатель FAD составил 0,87 (0,67; 0,95) отн. ед., а на 14-е сутки – 0,64 (0,57; 0,79) отн. ед., что значительно ниже контрольных значений (см. рис. 1).

Таким образом, во всех экспериментальных группах наблюдается более выраженное снижение уровня NADH по сравнению с контролем, наиболее выраженные изменения обоих показателей отмечаются при комбинированном воздействии низкоинтенсивного ЭМЭ КВЧ и ЭМЭ.

Для оценки направленности окислительно-восстановительных процессов при ранозаживлении был рассчитан РИ. В первой группе животных отмечалось постепенное увеличение РИ с 0,176 на 1 сутки до максимального значения 0,337 на седьмые сутки, с последующим незначительным снижением до 0,301 на 14-е сутки. Такая динамика соответствует физиологическому усилению окислительных процессов в фазе пролиферации.

При воздействии КВЧ наблюдалось более раннее увеличение РИ. На 7 и 14 сутки значения оставались повышенными (0,344 и 0,392 соответственно), что свидетельствует об ускорении перехода к окислительному типу метаболизма.

В третьей группе животных (ЭМЭ) РИ на первые-третьи сутки оставался на уровне контроля, однако на седьмые сутки отмечался резкий подъём до 0,547 – максимального значения среди всех групп. На 14-е сутки показатель сохранялся на высоком уровне (0,440), что может указывать на выраженный сдвиг в сторону окислительных процессов.

При комбинированном воздействии ЭМИ КВЧ и ЭМЭ у животных четвертой группы РИ увеличивался уже на третьи сутки до 0,451 и оставался высоким на протяжении всего периода наблюдения (0,448 на седьмые сутки и 0,471 на

14 сутки), что свидетельствует о стойком смещении метаболизма в сторону окислительного типа.

Полученные результаты показывают, что в контрольной группе раневой процесс сопровождался закономерной перестройкой окислительно-восстановительного обмена: уровень NADH последовательно снижался к 14-м суткам, тогда как FAD возрастал к седьмым суткам с последующим снижением к 14-м суткам. Известно, что активные формы кислорода и связанные с ними окислительно-восстановительные процессы необходимы для нормального заживления, умеренный редокс-сдвиг поддерживает миграцию клеток, ангиогенез и ремоделирование тканей, тогда как избыточный окислительный стресс замедляет репарацию [4, 13].

Воздействие низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ сопровождалось более ранним и более выраженным снижением NADH, стойким снижением FAD и повышением редокс-индекса по сравнению с контролем. Это указывает на ускоренную метаболическую перестройку ткани и более ранний переход к окислительному типу обмена. Показано, что низкоинтенсивные миллиметровые волны изменяют активность пролиферации клеток, активность ферментов, состояние мембран и регуляцию клеточного метаболизма, активации процессов, связанных обеспечением клеточной пролиферации [6, 7].

При умеренном ЭМЭ метаболическая реакция имела иной характер: в ранние сроки показатели NADH были близки к контролю, но к седьмым суткам возникал наиболее резкий сдвиг редокс-индекса в сторону окислительного типа метаболизма. Такая реакция указывает о фазозависимой перестройке клеточного ответа на изменение электромагнитного фона. В литературе показано, что ослабление внешнего электромагнитного воздействия способно изменять реактивность биологических систем [5].

Наиболее выраженные изменения выявлены при комбинированном воздействии низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ и ЭМЭ. Это указывает на синергическое влияние двух факторов на тканевой метаболизм, т.е. более быстрое включение окислительно-зависимых механизмов регенерации и сокращение длительности ранней воспалительной фазы.

Таким образом, полученные данные согласуются с представлениями о том, что редокс-показатели NADH и FAD являются чувствительными маркерами тканевого метаболизма при заживлении ран, а электромагнитные факторы способны существенно модифицировать их динамику.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование показало, что процесс ранозаживления у крыс сопровождается закономерной динамикой окислительно-восстановительных показателей, отражающей фазность регенеративного процесса.

Установлено, что воздействие низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ приводит к более раннему и выраженному снижению NADH, снижению уровня FAD и увеличению

редокс-индекса, что свидетельствует об ускоренной метаболической перестройке тканей и более раннем переходе к окислительному типу обмена.

При воздействии умеренного электромагнитного экранирования выявлена фазозависимая реакция: в ранние сроки показатели сохранялись на уровне контроля, однако в последующем наблюдался выраженный сдвиг редокс-баланса окислительных процессов.

Наиболее значимые изменения отмечены при комбинированном воздействии КВЧ-излучения и электромагнитного экранирования, что проявлялось максимальным снижением NADH, устойчивым уменьшением FAD и повышением редокс-индекса на всех этапах наблюдения. Это свидетельствует о синергическом эффекте данных факторов и их способности усиливать метаболическую активность тканей в зоне повреждения.

Таким образом, полученные результаты показывают, что электромагнитные факторы, особенно при комбинированном воздействии, оказывают существенное влияние на редокс-гомеостаз, способствуя ускорению метаболической перестройки и оптимизации регенераторных процессов.

Работа выполнена на оборудовании ЦКП научным оборудованием «Экспериментальная физиология и биофизика» ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского» в рамках инициативной темы № 126060421664-2 «Закономерности и механизмы адаптации организма к факторам разной природы»

Список литературы

1. Singer A. J. Cutaneous wound healing / Singer A. J., Clark R. A. F. // New England Journal of Medicine. – 1999. – Vol. 341, № 10. – P. 738–746.
2. Chance B. Hydroperoxide metabolism in mammalian organs / Chance B., Sies H., Boveris A. // Physiological Reviews. – 1979. – Vol. 59, № 3. – P. 527–605.
3. Vander Heiden M. G. Understanding the Warburg effect: the metabolic requirements of cell proliferation / Vander Heiden M. G., Cantley L. C., Thompson C. B. // Science. – 2009. – Vol. 324, № 5930. – P. 1029–1033.
4. Schäfer M. Oxidative stress in normal and impaired wound repair / Schäfer M., Werner S. // Pharmacological Research. – 2008. – Vol. 58, № 2. – P. 165–171.
5. Markov M. S. Pulsed electromagnetic field therapy: history, state of the art and future / Markov M. S. // The Environmentalist. – 2007. – Vol. 27, № 4. – P. 465–475.
6. Funk R. H. W. Electromagnetic effects – From cell biology to medicine / Funk R. H. W., Monsees T., Özkucur N. // Cells Tissues Organs. – 2009. – Vol. 189, № 1–4. – P. 70–75.
7. Pakhomov A. G. Current state and implications of research on biological effects of millimeter waves / Pakhomov A. G., Akyel Y., Pakhomova O. N., Stuck B. E., Murphy M. R. // Bioelectromagnetics. – 1998. – Vol. 19, № 7. – P. 393–413.
8. Novoselova E. G. Effects of low-level electromagnetic radiation on immune system / Novoselova E. G., et al. // Bioelectrochemistry and Bioenergetics. – 1999. – Vol. 48, № 1. – P. 71–76.
9. Masson-Meyers D. S. Experimental models and methods for cutaneous wound healing assessment. / Masson-Meyers D. S., Andrade T. A. M., Caetano G. F., et al. // International Journal of Experimental Pathology. – 2020 – 101(1–2) – P. 21–37.
10. Чуян Е. Н. Изменение кожной микроциркуляции в ответ на воздействие низкоинтенсивного электромагнитного излучения миллиметрового диапазона / Е. Н. Чуян, Н. С. Трибрат, Э. Р. Джелдубаева // Медицина труда и промышленная экология. – 2020. – Т. 60, № 9. – С. 605–609. – DOI: 10.31089/1026-9428-2020-60-9-605-609.

11. Крупаткин А. И. Лазерная допплеровская флоуметрия микроциркуляции крови: руководство для врачей. / А. И. Крупаткин, В. В. Сидоров. – М.: Медицина, 2005. – 254 с.
12. Skala M. C. In vivo multiphoton fluorescence lifetime imaging of protein-bound and free NADH in normal and precancerous epithelia / Skala M. C., Riching K. M., Gendron-Fitzpatrick A., et al. // Journal of Biomedical Optics. – 2007. – Vol. 12(2). – 024014.
13. Jones K. H. Optical redox ratio differentiates metabolic changes associated with wound healing / K. H. Jones, et al. // Scientific Reports. – 2019. – Vol. 9. – Article 18105. DOI: 10.1038/s41598-019-54404-2

THE EFFECT OF ISOLATED AND COMBINED EXPOSURE TO LOW-INTENSITY ELECTROMAGNETIC RADIATION OF ULTRAHIGH FREQUENCY AND ELECTROMAGNETIC SHIELDING ON THE REDOX DYNAMICS OF WOUND HEALING IN RATS

Dzheldubaeva E. R., Yarmolyuk N. S., Borisenko D. A., Kovalchuk I. O., Tumanyants K. N.

V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Crimea, Russia
E-mail: delviza@mail.ru

The wound healing process is a complex, multi-stage regenerative process involving inflammation, proliferation, and tissue remodeling, accompanied by active metabolic and redox reactions [1]. One of the key factors determining the effectiveness of this process is the state of cellular energy metabolism and the balance of redox systems, in which the coenzymes NADH and FAD play an important role [2, 3].

Despite a significant body of research, the combined effects of low-intensity UHF electromagnetic radiation and moderate EME on wound healing parameters remain understudied. Of particular relevance is the study of changes in redox parameters—NADH and FAD levels–as sensitive indicators of cellular metabolic activity.

Therefore, the aim of this study was to evaluate the effects of isolated and combined low-intensity UHF electromagnetic radiation and moderate EME on the dynamics of NADH and FAD redox parameters during wound healing in rats.

The study showed that wound healing in rats is accompanied by a consistent pattern of changes in redox parameters, reflecting the phased nature of the regenerative process.

It was found that exposure to low-intensity UHF electromagnetic radiation leads to an earlier and more pronounced decrease in NADH, a reduction in FAD levels, and an increase in the redox index, indicating accelerated tissue metabolic restructuring and an earlier transition to oxidative metabolism.

When exposed to moderate electromagnetic shielding, a phase-dependent reaction was revealed: in the early stages, the indicators remained at the control level, but subsequently a pronounced shift in the redox balance of oxidative processes was observed.

The most significant changes were observed with combined exposure to UHF radiation and electromagnetic shielding, manifested by a maximum decrease in NADH, a sustained reduction in FAD, and an increase in the redox index at all observation stages.

This demonstrates the synergistic effect of these factors and their ability to enhance tissue metabolic activity in the damaged area.

Thus, the obtained results show that electromagnetic factors, especially when combined, have a significant impact on redox homeostasis, contributing to the acceleration of metabolic restructuring and optimization of regenerative processes.

***Keywords*:** electromagnetic shielding, acute skin wound, wound healing, NADH and FAD.

References

1. Singer A. J., Clark R. A. F. Cutaneous wound healing, *New England Journal of Medicine*, **341**, **10**, 738 (1999).
2. Chance B., Sies H., Boveris A. Hydroperoxide metabolism in mammalian organs, *Physiological Reviews*, **59**, **3**, 527 (1979).
3. Vander Heiden M. G., Cantley L. C., Thompson C. B. Understanding the Warburg effect: the metabolic requirements of cell proliferation, *Science*, **324**, **5930**, 1029 (2009).
4. Schäfer M., Werner S. Oxidative stress in normal and impaired wound repair, *Pharmacological Research*, **58**, **2**, 165 (2008).
5. Markov M. S. Pulsed electromagnetic field therapy: history, state of the art and future, *The Environmentalist*, **27**, **4**, 465 (2007).
6. Funk R. H. W., Monsees T., Özkucur N. Electromagnetic effects – From cell biology to medicine, *Cells Tissues Organs*, **189**, **1–4**, 70 (2009).
7. Pakhomov A. G., Akyel Y., Pakhomova O. N., Stuck B. E., Murphy M. R. Current state and implications of research on biological effects of millimeter waves, *Bioelectromagnetics*, **19**, **7**, 393 (1998).
8. Novoselova E. G., et al. Effects of low-level electromagnetic radiation on immune system, *Bioelectrochemistry and Bioenergetics,* **48**, **1**, 71 (1999).
9. Masson-Meyers D. S., Andrade T. A. M., Caetano G. F., et al. Experimental models and methods for cutaneous wound healing assessment, *International Journal of Experimental Pathology,* **101(1–2)**, 21 (2020).
10. Chuyan E. N., Tribrat N. S., Dzheldubaeva E. R. Changes in skin microcirculation in response to exposure to low-intensity millimeter-wave electromagnetic radiation, *Occupational Medicine and Industrial Ecology*, **60**, **9**, 605 (2020).
11. Krupatkin A. I., Sidorov V. V. *Laser Doppler flowmetry of blood microcirculation: a manual for physicians,* 254 p. (Moscow: Meditsina, 2005).
12. Skala M. C., Riching K. M., Gendron-Fitzpatrick A., et al. In vivo multiphoton fluorescence lifetime imaging of protein-bound and free NADH in normal and precancerous epithelia, *Journal of Biomedical Optics*, **12(2)**, 024014. (2007).
13. Jones K. H. et al. Optical redox ratio differentiates metabolic changes associated with wound healing, *Scientific Reports,* **9**, Article 18105 (2019). DOI: 10.1038/s41598-019-54404-2

Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского
Биология. Химия. Том 12 (78). 2026. № 2. С. 75–85.

УДК 577.322.5
DOI 10.5281/ZENODO.20787712

МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ МАКРОМОЛЕКУЛЯРНОГО КРАУДИНГА КРАУДИНГА В ЦИТОПЛАЗМЕ ЭРИТРОЦИТОВ

Дроганова А. В., Бычкова Е. А., Громова Н. В., Кузьмина А. А., Ревин В. В.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва», Саранск, Республика Мордовия, Россия
E-mail: bychkovazhenya21@yandex.ru

В исследовании использовали кровь доноров, из которой выделяли суспензию эритроцитов методом центрифугирования. Структурные изменения анализировали методом лазерной интерференционной микроскопии. В ходе исследования полимеры были протестированы на способность вызывать гемолиз и агрегацию эритроцитов. Было обнаружено, что ПЭГ 8000 и декстран 40 кДа с с концентрациями 200 и 300 мг/мл не выдержали испытания. Инкубация эритроцитов в среде с декстраном (100 мг/мл) приводит к снижению среднего объёма клеток и их общего объёма на 20,9 % и 7,2 % соответственно по сравнению с контролем, а также к возрастанию фазового диаметра. При использовании полиэтиленгликоля (ПЭГ) в концентрации 100 мг/мл отмечается рост фазовой высоты эритроцитов на 6 % при неизменном объёме и уменьшении фазового диаметра. Макромолекулярный краудинг отражает реальные условия внутрисосудистой среды крови. Использование ПЭГ и декстрана как модельных краудеров позволяет изучать структурные изменения эритроцитов, в том числе агрегацию и целостность мембран.
Ключевые слова: молекулярный краудинг, эритроцит, гемолиз, лазерный интерферометр.

ВВЕДЕНИЕ

Живые системы отличаются тем, что внутри клеток создается плотная среда из макромолекул и низкомолекулярных соединений. Их концентрация может достигать 50-400 мг/мл, что занимает до 40% объема клетки. Из-за этого доступное пространство внутри клетки уменьшается. Это явление, называемое «молекулярным краудингом», оказывает значительное влияние на биохимические реакции, изменяя реакционную способность и пространственное распределение молекул, участвующих в этих процессах [1–3].

Влияние высоких концентраций макромолекул является результатом стерических взаимодействий, интересующих нас биомолекул с краудинг-агентами, которые химически инертны по отношению к исследуемому белку или нуклеиновой кислоте. Они занимают значительную часть объема раствора, оставляя биомолекулам лишь ограниченное пространство, поэтому часто используется термин «эффект исключенного объёма». Например, плазма крови содержит примерно 80 г/л белка; концентрация достаточно высокая, чтобы вызвать значительные эффекты краудинга [4, 5].

Для экспериментального моделирования условий макромолекулярного краудинга *in vitro* используются химически инертные, незаряженные полимеры различного происхождения и молекулярной массы. Эти агенты, известные как краудинг-агенты, воспроизводят ключевой физический параметр цитоплазмы – высокую суммарную концентрацию макромолекул (50–400 г/л), что приводит к эффекту исключенного объема и существенно влияет на термодинамику и кинетику биохимических процессов.

Декстраны – разветвленные полисахариды на основе глюкозы, получаемые синтезом с помощью *Leuconostoc mesenteroides*. Диапазон молекулярных масс (от 1 до 2000 кДа) позволяет исследовать влияние размера эксклюдирующей частицы.

Полиэтиленгликоли (ПЭГ) – линейные гибкоцепные полимеры. Диапазон молекулярных масс: от 0,2 до 35 кДа.

Фиколлы – синтетические сополимеры сахарозы и эпихлоргидрина.

Характеристика – нейтральные, жесткие, сферические гидрофильные частицы. Идеальны для изучения чисто объемных эффектов краудинга на скорость ферментативных реакций, константы ассоциации и укладку белков.

Поливинилпирролидоны (ПВП) – синтетические полимеры с пирролидоновыми боковыми группами. Характеристика: высокая гидрофильность и биосовместимость. Основное применение: в качестве осмотически активных агентов и стабилизаторов белков в растворах. Реже используются в фундаментальных исследованиях краудинга по сравнению с фиколлом и декстраном из-за потенциальных слабых специфических взаимодействий.

Биологические макромолекулы (например, бычий сывороточный альбумин – БСА). Характеристика – заряженные, глобулярные белки, способные к специфическим и неспецифическим взаимодействиям [6].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения исследования использовали донорскую кровь, полученную с Мордовской республиканской станции переливания крови города Саранск. В качестве объекта исследования выступали эритроциты, выделенные из периферической крови человека. Все этапы работы были выполнены в соответствии с этическими принципами Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации (WMA Declaration of Helsinki). Исследование было одобрено локальным этическим комитетом Мордовского государственного университета (протокол № 12 от 17.09.2014 г.) и проводилось в рамках стандартов Надлежащей клинической практики (Good Clinical Practice).

1. Экстракция эритроцитарной фракции из цельной крови

Для получения суспензии эритроцитов цельную кровь разводили физиологическим раствором в соотношении 1:1. Полученную смесь перемешивали и подвергали центрифугированию на центрифуге модели СМ-6М (ELMI, Латвия) при 1000 g в течение 10 минут. После удаления плазмы и лейкоцитарного слоя процедуру промывания и центрифугирования повторяли дважды в идентичных условиях. Очищенную суспензию эритроцитов хранили при температуре 4 °С и

использовали для последующих экспериментов в течение 6 часов с момента приготовления [7].

2. Приготовление маточных растворов краудинг-агентов

Для дальнейшей работы в эксперименте готовили маточные растворы таких краудинг-агентов, как полиэтиленгликоль 8 кДа и декстран 40 кДа с концентрацией 30 % (300 мг/мл). Для приготовления 3,32 мл 30 % маточного раствора в физиологическом растворе разводили навеску краудинг-агента массой 1 грамм в подготовленную ёмкость.

3. Схема проведения гемолиза

Для экспериментов с гемолизом готовили серии разведений ПЭГ 8 кДа и декстрана 40 кДа различной концентрации из исходных маточных растворов с концентрациями 100, 200 и 300 мг/мл. Выбор данных концентрационных режимов обоснован необходимостью моделирования физиологических условий: концентрация ~100 мг/мл соответствует содержанию биополимеров в плазме крови, а уровень ~300 мг/мл – характерной концентрации макромолекул в цитоплазме клеток [8].

В пробирки типа Эппендорф объёмом 1,5 мл, содержащие 1 мл раствора краудинг-агента с известной концентрацией, добавляли 500 мкл суспензии эритроцитов. Затем смесь инкубировали в течение 30 минут при комнатной температуре. После инкубации пробы центрифугировали на приборе MiniSpin (Eppendorf, Германия) со скоростью 1600 оборотов в минуту в течение 10 минут. Полученные образцы фотографировали для оценки степени гемолиза. Для контроля в 1 мл физиологического раствора добавляли 500 мкл эритроцитарной массы. Количество повторов каждой тестируемой концентрации – 3.

4. Лазерная интерференционная микроскопия

Лазерная интерференционная микроскопия позволяет проводить комплексный анализ оптических и геометрических свойств микро- и наноразмерных объектов с высокой пространственной детализацией [9, 10].

Фазовое изображение объекта формируется путем наложения контрольного луча на луч, прошедший через объект. Полученное изображение затем нормируется, используя длину волны лазера и оптической разности хода. Показатели преломления эритроцитов обычно одинаковы на всей клетке, поэтому их фазовая высота (ОРХ) пропорциональна их геометрической высоте [11].

Распределение плотности ОРХ (объем), мкм^3, эритроцита рассчитывают по формуле 1.

$$V = \frac{\mathrm{OPX}_{mean}}{n_1 - n_0} \times S \ , \qquad (1)$$

где OPX_{mean} – средняя фазовая высота эритроцита, нм;

n_0 – показатель преломления среды;

n_1 – показатель преломления гемоглобина;

S – площадь клетки, мкм^2.

Плотность распределения гемоглобина (пг) внутри клетки рассчитывали по формуле 2.

$$m_{Hb} = \frac{\rho_{Hb}}{n_1 - n_0} \times \mathrm{OPX}_{mean} \times S \ , \qquad (2)$$

где ρ_{Hb} – удельная плотность гемоглобина, г/см3;

n_1 – показатель преломления гемоглобина;

n_0 – показатель преломления среды;

OPX_{mean} – средняя фазовая высота эритроцита, нм;

S – площадь клетки, мкм^2.

Морфометрические параметры эритроцитов человека исследовались с использованием лазерного интерференционного микроскопа (ЛИМ) на базе модели МИИ-4М, созданной компанией «Лаборатории Амфора» в Москве, Россия. Количество измеренных клеток – не менее 100. Обработанные изображения анализировались с помощью программного обеспечения FIJI (ImageJ, США) [12]. Обработку результатов проводили с помощью программного обеспечения MS Excel.

Для оценки статистической значимости результатов использовали t-критерий. Результаты считали достоверно различающимися при $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

1. Влияние краудинг-агентов на гемолиз эритроцитов человека

Для изучения влияния краудинг-агентов на гемолиз эритроцитов человека были приготовлены серии разведений с концентрациями ПЭГ 8000 и декстран 40, равными 100, 200 и 300 мг/мл. Далее в растворы полимеров в соотношении 1:3 была добавлена эритроцитарная масса, после чего пробы инкубировались в течение 30 минут при комнатной температуре, центрифугировали и фотографировали для оценки гемолиза (рис. 1).

Появление красного цвета в надосадочном слое обусловлено выходом гемоглобина из разрушенных эритроцитов. Анализируя состояние надосадочной жидкости, можно заключить, что целостность эритроцитов сохранялась после инкубации суспензии человеческого происхождения в растворах полиэтиленгликоля (ПЭГ) и декстрана в концентрации 100 мг/мл. Тем не менее, инкубация стабилизированных эритроцитов в растворах декстрана с концентрациями 200 и 300 мг/мл сопровождалось деградацией клеточных мембран, следствием которой стало освобождение гемоглобина и приобретение жидкостью красноватого оттенка.

На изображении можно увидеть на стенках проб с растворами ПЭГ скопления эритроцитов, данное наблюдение может говорить об агрегации эритроцитов и их дальнейшем склеивании при инкубации в растворах ПЭГ 200 и 300 мг/мл, что, вероятно, связано с влиянием осмотических эффектов и деплеционного эффекта (depletion attraction).

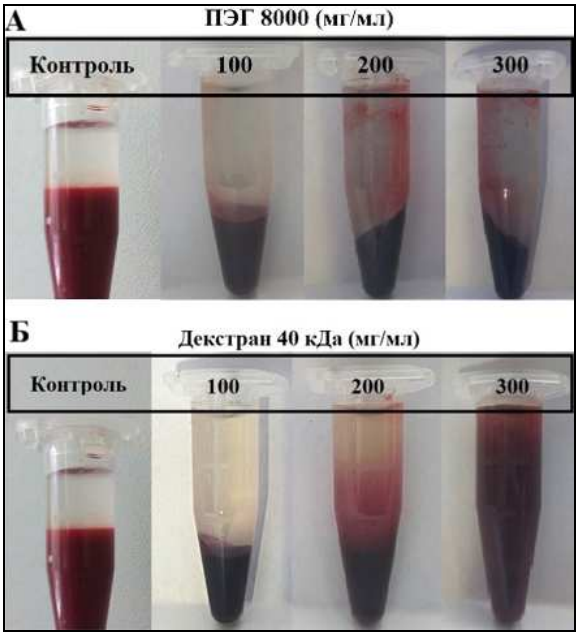


Рис. 1. Фотографическое изображение эритроцитов и супернатантов в отсутствие и присутствии ПЭГ 8000 (А) и декстрана 40 кДа (Б).

Полимеры были протестированы на их способность вызывать гемолиз и агрегацию эритроцитов. Результаты показали, что ПЭГ 8000 и декстран 40 кДа в концентрациях 200 и 300 мг/мл не прошли этот тест. Для дальнейших исследований методом ЛИМ были взяты пробы с ПЭГ в концентрациях 100, 200 и 300 мг/мл, а также проба с декстраном в концентрации 100 мг/мл.

2. Исследование морфометрических характеристик эритроцитов человека методом лазерной интерференционной микроскопии

Интерференционные изображения обрабатывались посредством специализированного программного обеспечения FIJI. Последующая статистическая обработка и анализ полученных данных выполнялись с использованием пакета прикладных программ Microsoft Office Excel 2013. В рамках проведенного эксперимента методом лазерной интерференционной микроскопии (ЛИМ) были получены соответствующие интерференционные изображения, прошедшие последующую обработку и интерпретацию в указанной программе.

На рисунке 2 представлены интерференционные изображения, обработанные в программе FIJI, контрольного образца и пробы, инкубированной с декстраном молекулярной массой 40 кДа в концентрации 100 мг/мл.

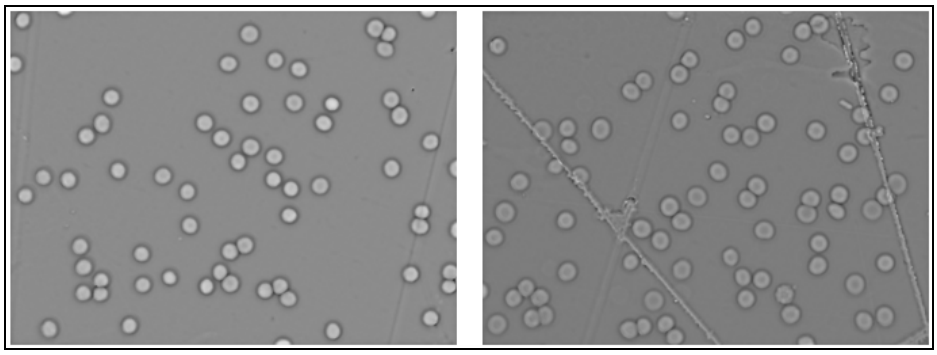


Рис. 2. Интерференционные изображения контрольного образца (слева) и пробы, инкубированной с декстраном (справа).

На рисунке 3 представлены интерференционные изображения проб, инкубированных с ПЭГ 8 кДа в концентрации 100, 200 и 300 мг/мл.

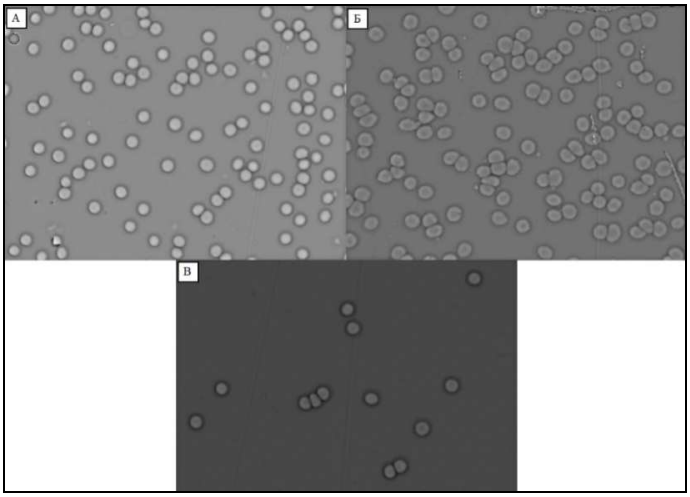


Рис. 3. Интерференционные изображения проб, инкубированных в ПЭГ в концентрации 100 мг/мл (А), 200 мг/мл (Б) и 300 мг/мл (В).

На изображении (В) видно небольшое количество эритроцитов, что связано с их повышенной агрегацией при инкубации в растворе ПЭГ с концентрацией 300 мг/мл. На изображении (Б) также наблюдается агрегация клеток при инкубации в растворе ПЭГ с концентрацией 200 мг/мл.

Лазерная интерференционная микроскопия (ЛИМ) даёт возможность создавать трёхмерные модели эритроцитов, позволяя детально исследовать их внутреннее содержимое и поперечное сечение. На рисунке 4 представлены 3D-модели и поперечные профили эритроцитов из контрольной группы, а также эритроцитов, обработанных раствором декстрана с молекулярной массой 40 кДа в концентрации 100 мг/мл.

Анализ 3D-моделей продемонстрировал, что интактные эритроциты и образцы, обработанные раствором декстрана с молекулярной массой 40 кДа и концентрацией 100 мг/мл, сохраняли круглую форму. Внутри клеток структуры распределялись равномерно, а мембрана имела гладкую поверхность. Профиль клеток соответствовал дискоцитам, с двумя плечами и одним пеллором.

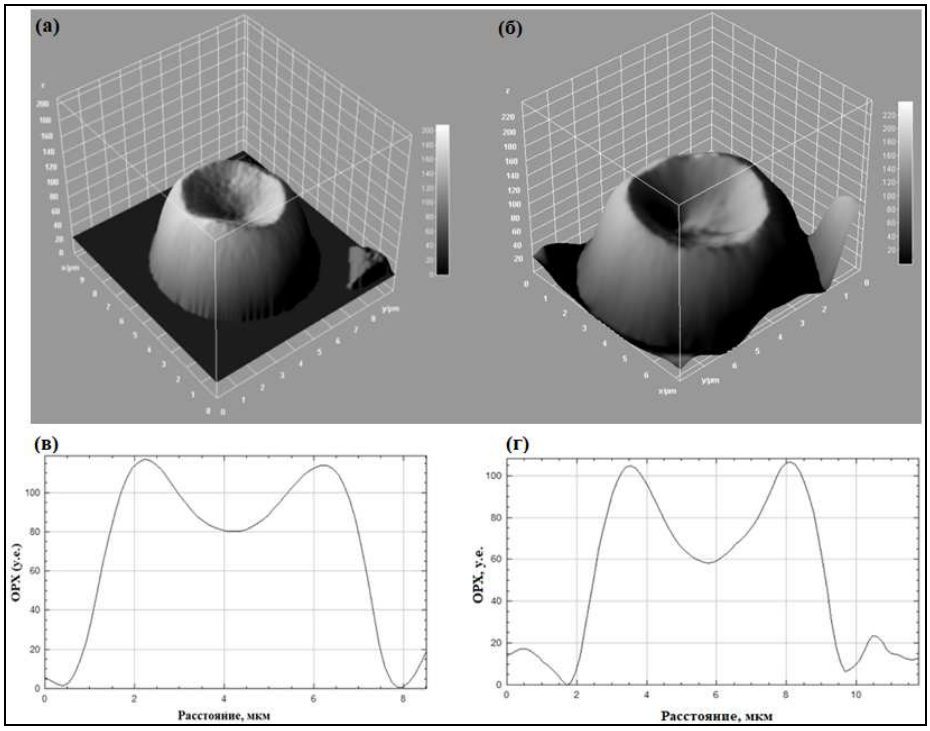


Рис. 4. 3D модель и профиль эритроцитов: а, в – 3D модель и профиль эритроцита контрольного образца; б, г – 3D модель и профиль эритроцита при инкубации с декстраном.

На рисунке 5 изображены 3D-модель и профиль эритроцитов, инкубированных с ПЭГ молекулярной массой 8 кДа в концентрацях 100 и 200 мг/мл.

На основе трёхмерных моделей установлены характерные морфологические изменения эритроцитов под действием ПЭГ. В среде с полимером (100 мг/мл) наблюдалась тенденция к сферизации клеток с одновременным сглаживанием пеллоры. При более высокой концентрации (200 мг/мл) морфологическая картина кардинально менялась, доминирующими признаками становились деформация поверхности и появление выступающих структур, придававших клеткам неправильную, шероховатую форму.

Далее были изучены оптико-геометрические показатели эритроцитов при действии разных агентов *in vitro*: ОРХ, площадь клетки (S), объем клетки (V),

плотность распределения гемоглобина (m_{Hb}). Полученные данные представлены в таблице 1.

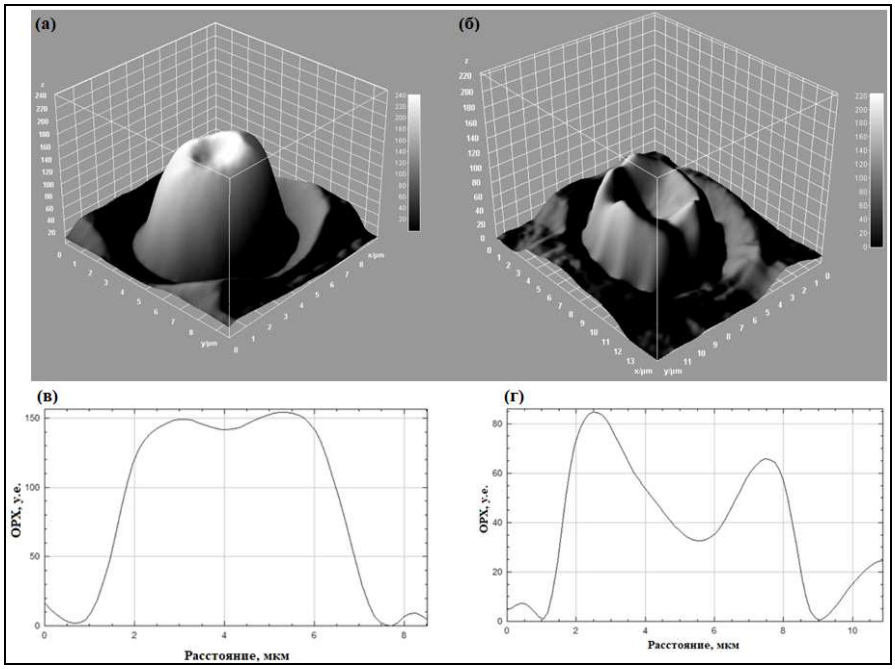


Рис. 5. 3D модель и профиль эритроцитов при инкубации с ПЭГ 100 мг/мл (а, в) и 200 мг/мл (б, г).

Таблица 1

Морфология и ОРХ эритроцитов человека

Показатель	Фазовый диаметр, мкм	$ОРХ_{ср}$, нм	$S_{ср}$, мкм^2	$V_{ср}$, мкм^3	m_{Hb}, пг
Интактные	7,51±0,07	96±1,42	32,28±0,64	41,33±1,06	15,35±0,4
Декстран, 100 мг/мл	7,77±0,08	75,98±1,12	37,91±0,77	38,34±0,8	14,23±0,3
ПЭГ, 100 мг/мл	7,39±0,07	102,39±1,35	30,46±0,74	41,63±1,22	15,46±0,45

Анализ воздействия полимеров выявил разнонаправленное влияние на морфометрические параметры эритроцитов. Инкубация в растворе декстрана (100 мг/мл) вызывала статистически значимое снижение средней фазовой высоты (ОРХср) на 20,9 % и уменьшение клеточного объёма (V) на 7,2 % относительно

контрольной группы. В отличие от этого, обработка ПЭГ в той же концентрации (100 мг/мл) приводила к увеличению фазовой высоты на 6 % при сохранении исходного объёма клеток ($p \leq 0,05$).

В присутствии декстрана фазовый диаметр возрастал на 3 %, тогда как под действием ПЭГ наблюдалось его незначительное уменьшение на 1,2 % по сравнению с контролем ($p \leq 0,05$). Данные результаты, вероятно, свидетельствует о перераспределении Гб в цитоплазме и десорбции мембраносвязанного Гб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование гемолитической и агглютинационной активности полимеров показало, что при концентрации 100 мг/мл ни ПЭГ, ни декстран не вызывали гемолиза эритроцитов человека. Однако при повышении концентрации полимеров проявлялись различные эффекты – повышенные концентрации декстрана индуцировали гемолиз, а высокие концентрации ПЭГ приводили к агрегации эритроцитов.

Нами были изучены оптико-геометрические показатели эритроцитов при действии разных краудинг-агентов *in vitro*. Наблюдается понижение величины оптической разности хода и объёма клеток эритроцитов относительно контроля при инкубации в декстране с концентрацией 100 мг/мл. В условиях инкубации с ПЭГ в концентрации 100 мг/мл было зафиксировано увеличение фазовой высоты эритроцитов, в то время как их объём оставался на уровне контрольных значений. Что касается фазового диаметра, то под воздействием декстрана данный показатель возрастал относительно контроля, тогда как в присутствии ПЭГ отмечалось его снижение.

Результаты исследования показали, что целостность эритроцитов не была нарушена после инкубации суспензии эритроцитов человека в растворах ПЭГ и декстрана в концентрации 100 мг/мг. Инкубация СЭ в растворах декстрана 200 и 300 мг/мл привела к высвобождению гемоглобина и окраске супернатанта в красный цвет.

Полученные данные подчеркивают важность изучения молекулярного краудинга, который отражает реальные условия внутрисосудистой среды крови. Использование ПЭГ и декстрана как модельных краудеров позволяет изучать структурные изменения эритроцитов, в том числе агрегацию и целостность мембран. Полученные результаты могут быть использованы при разработке инфузионных растворов, кровезаменителей и биомедицинских моделей, а также для более точной оценки влияния макромолекулярной среды на клетки крови в клинической практике. Статья может быть полезна специалистам, занимающимся вопросами гематологии, биохимии, биофизики и клинической медицины.

Список литературы

1. Чеботарева Н. А. Влияние молекулярного краудинга на ферменты гликогенолиза / Н. А. Чеботарева // Успехи биологической химии. – 2007. – Т. 47. – С. 233–258.
2. Rivas G. Macromolecular crowding in vitro, in vivo, and in between / G. Rivas, A. P. Minton // Trends in Biochemical Sciences. – 2016. – Vol. 41, No 11. – P. 970–981.
3. Zimmerman S. B. Estimation of macromolecule concentrations and excluded volume effects for the cytoplasm of Escherichia coli / S. B. Zimmerman, S. O. Trach // Journal of Molecular Biology. – 1991. – Vol. 222, No 3. – P. 599–620.

4. Ellis R. J. Macromolecular crowding: obvious but underappreciated / R. J. Ellis // Trends in Biochemical Sciences. – 2001. – Vol. 26, No 10. – P. 597–604.
5. Ferreira L. A. Role of solvent properties of aqueous media in macromolecular crowding effects / L. A. Ferreira, P. P. Madeira, L. Breydo [et al.] // Journal of Biomolecular Structure and Dynamics. – 2016. – Vol. 34, No 1. – P. 92–103.
6. Miklos A. C. Protein crowding tunes protein stability / A. C. Miklos, M. Sarkar, Y. Wang [et al.] // Journal of the American Chemical Society. – 2011. – Vol. 133, No 18. – P. 7116–7120.
7. Мороз В. В. Изменения структуры поверхности мембран эритроцитов при длительном хранении донорской крови / В. В. Мороз, А. М. Голубев, А. М. Черныш // Общая реаниматология. – 2012. – Т. 8, № 3. – С. 5–12.
8. Chapanian R. Enhancement of biological reactions on cell surfaces via macromolecular crowding / R. Chapanian, D. H. Kwan, I. Constantinescu [et al.] // Nature Communications. – 2014. – Vol. 5. – P. 1–12.
9. Белоглазова Ю. А. Бесклеточный одиночный анализ жизнеспособности с использованием лазерной интерференционной микроскопии / Ю. А. Белоглазова, А. С. Никитюк, А. С. Воронина // Biology Basel. – 2021. – Т. 10, № 7. – С. 1–16.
10. Игнатьев П. С. Лазерная интерференционная микроскопия для нанобиотехнологий / П. С. Игнатьев, К. В. Индукаев, П. А. Осипов // Biology Basel. – 2013. – Т. 47, № 1. – С. 32–35.
11. Слатинская О. В. Исследование конформации и распределения гемоглобина при функционировании эритроцита : специальность 1.5.2 «Биофизикая» : диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Слатинская Ольга Владимировна ; Московский Государственный Университет имени М. В. Ломоносова. Москва, 2023. – 253 с.
12. Schindelin J. Fiji: an open-source platform for biological-image analysis / J. Schindelin, I. Arganda-Carreras, E. Frise [et al.] // Nature Methods. – 2012. – Vol. 9, No 7. – P. 676–682.

METHODS FOR STUDYING MACROMOLECULAR CROWDING IN THE CYTOPLASM OF RED BLOOD CELLS

Droganova A. V., Bychkova E. A., Gromova N. V., Kuzmina A. A., Revin V. V.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «National Research Ogarev Mordovia State University», Saransk, Russia
E-mail: bychkovazhenya21@yandex.ru

Introduction – the relevance of the study is due to the fact that macromolecular crowding reflects the actual conditions of the intravascular blood environment. Using PEG and dextran as model crowders allows for the study of structural changes in red blood cells, including aggregation and membrane integrity. The aim of the study is a comprehensive investigation of the impact of macromolecular crowding on the condition of human red blood cells.

Materials and methods. A suspension of human RBCs was isolated from donor blood via standardized centrifugation and washing. Structural and morphological changes in individual RBCs were quantitatively analyzed using Laser Interference Microscopy (LIM). This label-free, high-resolution technique allows for the precise, real-time measurement of key cellular parameters, including optical path difference (OPDmean, correlating with intracellular dry mass density), cell volume, phase diameter, and phase height. RBCs were incubated in isotonic solutions containing varying concentrations (0–300 mg/mL) of the crowding agents.

Results. In the course of the study, the polymers were tested for their ability to induce hemolysis and erythrocyte aggregation, and it was found that PEG 8000 and 40 kDa dextran at concentrations of 200 and 300 mg/mL in samples failed this test. When incubating RBCs in dextran (100 mg/mL), a decrease in OPDmean and cell volume by 20.9 % and 7.2 % relative to the control, as well as an increase in phase diameter, was observed. In the presence of PEG (100 mg/mL), an increase in the phase height of RBCs by 6 % was observed with unchanged volume and a decrease in phase diameter.

Discussion and conclusion. This study demonstrates that macromolecular crowding, simulated by inert polymers, exerts a profound and chemically specific influence on RBC morphology beyond simple osmotic effects. The divergent effects of dextran (inducing dehydration and flattening) and PEG (promoting shape change without volume loss) underscore the critical role of the crowding agent's physicochemical properties. These findings have direct translational implications for the rational design of infusion solutions and blood substitutes, the development of accurate in vitro biomimetic models of blood, and the refined interpretation of RBC morphology in clinical pathologies associated with altered plasma composition. The work provides essential quantitative data for specialists in hematology, biochemistry, biophysics, and clinical medicine, establishing a foundation for further research into the role of molecular crowding in RBC pathophysiology and storage biology.

***Keywords*:** molecular crowding, erythrocyte, hemolysis, laser interferometer.

References

1. Chebotareva N. A. The effect of molecular crowding on glycogenolysis enzymes, *Advances in Biological Chemistry,* **47**, 233 (2007).
2. Rivas G., Minton A. P. Macromolecular crowding in vitro, in vivo, and in between, *Trends in Biochemical Science,* **41**, **11**, 970 (2016).
3. Zimmerman S. B., Trach S. O. Estimation of macromolecule concentrations and excluded volume effects for the cytoplasm of *Escherichia coli, Journal of Molecular Biology,* **222**, **3**, 599 (1991).
4. Ellis R. J. Macromolecular crowding: obvious but underappreciated, *Trends in Biochemical Sciences,* **26**, **10**, 597 (2001).
5. Ferreira L. A. Madeira P. P., Breydo L. [et al.] Role of solvent properties of aqueous media in macromolecular crowding effects, *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*, **34**, **1**, 92 (2016).
6. Miklos A. C., Sarkar M., Wang Y. [et al.] Protein crowding tunes protein stability, *Journal of the American Chemical Society,* **133**, **18**, 7116 (2011).
7. Moroz V. V., Golubev A. M., Chernysh A. M. Changes in the surface structure of erythrocyte membranes during long-term storage of donor blood, *General Reanimatology,* **8**, **3**, 5 (2012).
8. Chapanian R., Kwan D. H., Constantinescu I. [et al.] Enhancement of biological reactions on cell surfaces via macromolecular crowding, *Nature Communications*, **5**, 1 (2014).
9. Beloglazova Yu. A., Nikityuk A. S., Voronina A. S. Cell-free single-cell viability analysis using laser interference microscopy, *Biology Basel*, **10**, **7**, 1 (2021).
10. Ignatiev P. S., Indukaev K. V., Osipov P. A. Laser interference microscopy for nanobiotechnology, *Biology Basel*, **47**, **1**, 32 (2013).
11. Slatinskaya O. V. *Investigation of hemoglobin conformation and distribution during erythrocyte functioning*: Speciality 1.5.2 «Biophysics» : Dissertation for the degree of Candidate of Biological Sciences, 253 (Lomonosov Moscow State University. Moscow, 2023). – 253 p.
12. Schindelin J., Arganda-Carreras I., Frise E. [et al.] Fiji: an open-source platform for biological-image analysis, *Nature Methods*, 9, 7, 676 (2012).

Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского
Биология. Химия. Том 12 (78). 2026. № 2. С. 86–110.

УДК 631.8:631.4(292.471)
DOI 10.5281/ZENODO.20787820

СОВРЕМЕННОЕ АГРОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПАХОТНЫХ ЗЕМЕЛЬ В ПРЕДГОРНОМ КРЫМУ С УЧЕТОМ ВЫРАЩИВАЕМЫХ КУЛЬТУР

Кобечинская В. Г., Бенескриптов А. В.

Институт биохимических технологий, экологии и фармации (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский Федеральный университет им. В.И. Вернадского», Симферополь, Республика Крым, Россия
E-mail: valekohome@mail.ru

В предгорной зоне Крыма в целом прослеживается общая тенденция ухудшения плодородия почв сельскохозяйственных угодий. Данные, полученные в конце прошлого столетия, когда проводилось сплошное изучение состояния почвенного покрова, устарели. В 2024 г. было обследовано 324 га, с которых было отобрано 35 объединенных образцов и выполнено сравнение полученных показателей с архивными материалами за 2019 г. В отобранных почвенных пробах, взятых под однолетними и многолетними культурами, выявлено снижение основных агрохимических характеристик: подвижных форм соединений фосфора и калия, органического вещества, pH, основных микроэлементов – меди, кобальта, цинка, марганца и рост в почвах наиболее токсичных тяжелых металлов – кадмия и свинца. Рекомендуется увеличить дозы внесения фосфорных и органических удобрений, актуальным становится также внесение калийных удобрений, что не проводилось ранее.
Ключевые слова: агроэкологическое состояние, пахотные земли, агрохимические показатели, ухудшение плодородия, предгорный Крым.

ВВЕДЕНИЕ

Земли Симферопольского района представляют интерес в плане изучения агроэкологического состояния, так как они находятся в длительном агрогенном использовании. Данные, полученные в конце прошлого столетия, когда проводилось сплошное обследование состояния почвенного покрова, устарели. Точное знание современного состояния почв даст возможность вовремя принимать меры, направленные на сохранение почвенного плодородия и улучшения экологической ситуации.

Изучение почв полуострова Крым с учетом физико-географических особенностей территории происходило с момента присоединения Крыма к Российской империи (вторая половина XVIII века) и почти до конца XIX века происходил сбор информации. В конце этого века начинается научное исследование почвенного покрова данного региона. Он изучался многими почвоведами, в том числе В. В. Докучаевым, П. К. Костычевым, Н. Н.Клепининым, Л. И. Прасоловым, И. Н. Антиповым-Каратаевым и другими [1, 2].

В. В. Докучаев первым описал и доказал широкое распространение черноземов на территории центрально-равнинного Крыма, которые он назвал зоной чернозема «симферопольского типа». Ученый создал первую почвенную карту Крымского полуострова (1881 г.), на которой были изображены участки с примерно одинаковым содержанием гумуса. Одна из глав его фундаментального труда «Русский чернозем» посвящена именно почвам Крыма [3]. П. А. Костычев, организатор первой отечественной агрохимической лаборатории и автор первого отечественного учебника по почвоведению, уделил внимание и почвам виноградников Южного берега Крыма. В 1892 году он опубликовал работу, в которой выделил шиферные почвы в этой части полуострова [2]. В 1935 году была опубликована книга Н. Н. Клепинина «Почвы Крыма», в которой давалась не только подробная характеристика почв полуострова, но и описывались факторы зонального размещения почв, приводилась классификация основных типов и их разновидностей [4]. В послевоенный период к публикациям в области антропогенных изменений структуры почвенного покрова равнинного и горного Крыма можно отнести работы Кочкина М. А. [5], Половицкого И. Я., Гусева П. Г. [6], Драган Н. А. [7] и многих др.

В настоящее время мониторинг за состоянием почв Крыма занимаются такие организации, как ФГБУН «Ордена Трудового Красного Знамени Никитский ботанический сад – национальный центр РАН» (лаборатория агроэкологии), ФГБУН «Всероссийский национальный научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия «Магарач» РАН», ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма», ФГАОУ ВО «КФУ имени В. И. Вернадского», ФГБУ «Центр агрохимической службы «Крымский».

На охрану земель направлен ряд федеральных законов РФ. Федеральный закон от 10. 01. 2002 г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» определяет правовые основы государственной политики в области охраны окружающей среды в целом, в том числе и почвенного покрова [8]. Порядок проведения мониторинга плодородия почв сельскохозяйственного назначения определяет Федеральный закон от 16. 07. 1998 г. № 101-ФЗ «О государственном регулировании обеспечения плодородия почв сельскохозяйственного назначения» [9]. Статья 13 Федерального закона «О развитии сельского хозяйства» от 29. 12. 2006 г. № 264-ФЗ регулирует государственную поддержку мероприятий по повышению плодородия и охране сельскохозяйственных земель [10]. В Федеральном законе от 24.07.2002 г. №101-ФЗ «Об обороте земель сельскохозяйственного назначения» прописаны основания для изъятия земельного участка, в том числе, если использование участка приводит к снижению плодородия и причиняет вред окружающей среде [11]. Для более эффективной защиты земель сельскохозяйственного назначения вводятся подзаконные акты регионов. Так, в 2020 году в Крыму был принят закон РК от 30.10.2020 н. № 123-ЗРК «Об особо ценных продуктивных сельскохозяйственных угодьях на территории Республики Крым» [12].

Местом проведения исследований является Симферопольский район РК. К сожалению, здесь четко прослеживается нарушение агротехники эксплуатации

пахотных земель с полным отказом от севооборотов и длительном выращивании одних и тех же культур, особенно в фермерских хозяйствах.

Агроэкологическое состояние почв – это совокупность показателей, позволяющих оценить степень пригодности земельных участков для выращивания культур и производства растениеводческой продукции определенного качества [13]. Для её характеристики используют агрохимические (содержание основных элементов питания – подвижных форм фосфора и калия, запасы минерального азота в метровом слое, содержание гумуса, pH, содержание подвижных форм микроэлементов) и экологические показатели (содержание тяжелых металлов, остаточных количеств пестицидов и др.) [14].

Только на основании объективных данных о современном агроэкологическом состоянии возможна разработка мер, направленных на сохранение и воспроизведение плодородия почв. Поэтому актуальным являются вопросы объективной оценки направленности и интенсивности снижения плодородия почв во временных параметрах с учетом зональных особенностей предгорного Крыма, что и было целью нашей работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Площадь Симферопольского района (1752,5 км^2), что составляет 6,7 % территории полуострова. Протяженность с запада на восток – 70 км, с севера на юг – 60 км. Объект изучения – пахотные земли Симферопольского района под однолетними и многолетними культурами. По состоянию на 01.01.2024 площадь сельскохозяйственных угодий данной территории составляет 97,0 тыс. га, из них пашня – 66,3 тыс. га, площадь садов – 1,89 тыс. га, виноградников – 3,12 тыс. га [15].

В 2024 г. нами было обследовано 324 га, с которых было отобрано 35 объединенных образцов и выполнено сравнение полученных показателей с архивными материалами за 2019 г.

Первичные данные по содержанию агроэкологических показателей почв в пахотных землях Симферопольского района в 2019 и 2024 годах обрабатывались статистически с определением среднего содержания приведенного показателя по участку и рассчитана стандартная ошибка средней величины с помощью программ «Statistica-10», «Microsoft Excel 2016».

Симферопольский район характеризуется богатым разнообразием почв, обусловленным сочетанием различных геологических, гидрологических и климатических факторов, которые проявляются как в горизонтальной, так и в вертикальной зональности почвенного покрова. Согласно классификации почв, их доминирующим типом в данном районе являются черноземы и их разновидности. В северной части района встречаются черноземы южные солонцеватые, в западной и юго-западной и южных частях преобладают черноземы карбонатные, маломощные щебенчато-каменистые и дерново-карбонатные почвы. Также в этом районе распространены в долинах рек луговые и лугово-черноземные, темно-бурые и бурые лесные почвы [7, 16, 17].

Карбонатные черноземы образовались на древних делювиальных отложениях. Они имеют хорошо выраженный гумусовый горизонт, его мощность в среднем

составляет 30–45 см. Содержание органического вещества на целине может достигать 4,8 % [6]. Черноземы мицеллярно-карбонатные характеризуются среднемощным гумусовым профилем, на пашне гумус – 2,6–2,9 % (на залежи – 4,5 %).

Всего выбрано 9 участков: на 5-ти из них выращивались однолетние культуры (пшеница озимая, лен, ячмень озимый и подсолнечник), 3 участка были заняты многолетними культурами (плодовые деревья – черешня, виноград винный – сорт «Алиготе» и столовый сорт «Кардинал»), контрольный участок – целинная типчаково-ковыльная степь. Карта-схема отбора почвенных проб на территории Симферопольского района приведена на рисунке 1.

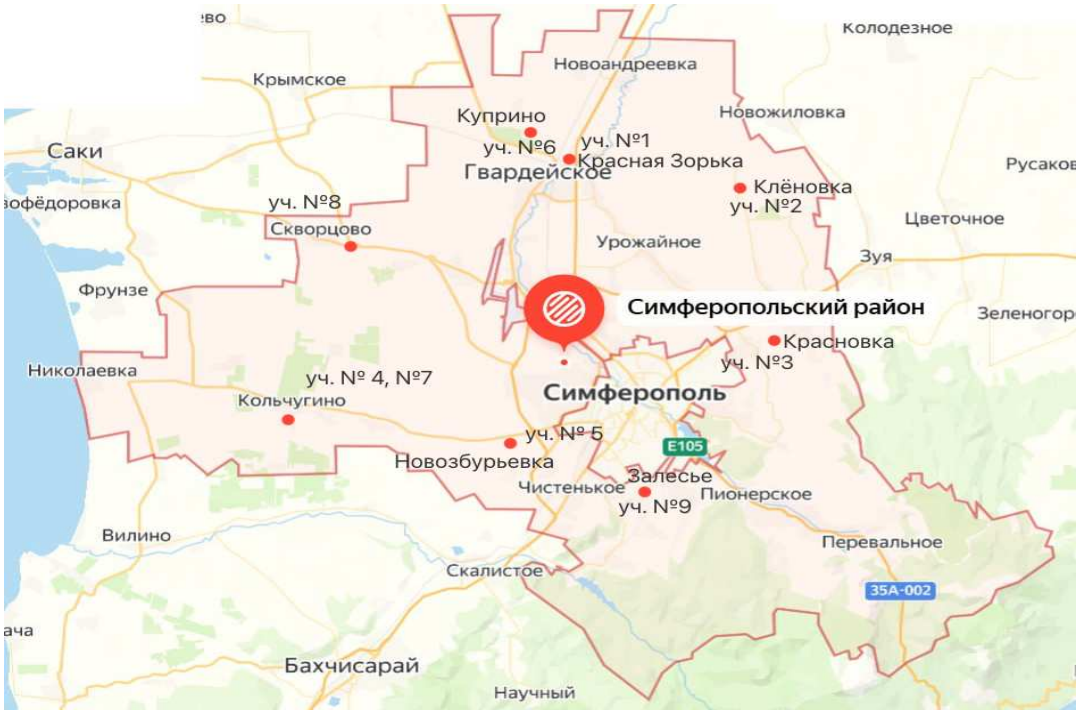


Рис. 1. Карта-схема отбора почвенных проб на территории Симферопольского района.

Примечание: Однолетние культуры: уч. № 1 – пшеница, уч. № 2 – пшеница; уч. № 3 – лен; уч. № 4 – ячмень; уч. № 5 – подсолнечник. Многолетние культуры: уч. № 6 – сад (черешня); уч. № 7 – виноград (винный сорт Алиготе), уч. № 8 – виноград (столовый сорт Кардинал). Участок № 9 – контрольный (целинная типчаково-ковыльная степь).

Объединенные пробы брались с верхнего горизонта на глубину 0–25 см. Каждая из них отбиралась с элементарного участка площадью 10 га и состояла из 10 точечных проб, заложенных по диагонали. Масса каждой объединенной пробы – 500 г. Общее количество точечных проб – 350 шт. В таблице 1 отображены места отбора их с привязкой к населенным пунктам.

Таблица 1

Площадь обследуемых участков и количество отобранных проб пахотных земель Симферопольского района

№ участка	Место отбора (возле населенного пункта)	Площадь участка, га	Кол-во объединенных проб	Наименование выращиваемой культуры
Однолетние культуры				
1	с. Красная Зорька	48,0 га	5	пшеница озимая
2	с. Кленовка	45,0 га	5	пшеница озимая
3	с. Красновка	38,0 га	4	лен
4	с. Кольчугино	50,0 га	5	ячмень озимый
5	с. Новозбурьевка	38,4 га	4	подсолнечник
Многолетние культуры				
6	с. Куприно	35,0 га	4	черешня
7	с. Кольчугино	49,0 га	4	виноград «Алиготе»
8	с. Скворцово	15,8 га	2	виноград «Кардинал»
Фоновый контрольный участок				
9	с. Залесье	4,8 га	2	целинная типчаково-ковыльная степь

В отобранных пробах проводилось определение содержания гумуса, pH почвенного раствора, содержания подвижного фосфора и обменного калия, микроэлементов (медь, кобальт, цинк, марганец) и тяжелых металлов (свинец, кадмий).

Приведём краткую агроклиматическую характеристику Симферопольского района с учетом пятилетнего периода исследований. Он расположен в пределах равнинного степного и предгорного Крыма, захватывая также горную часть на юге, на западе имеет выход к Черному морю, перепад высот 200–700 м. н.у.м. На территории района расположены притоки бассейна реки Салгир, река Бештерек, река Кизил-Коба и бассейн реки Западный Булганак. Имеются 3 водохранилища: Симферопольское, Партизанское и Аянское [18].

Климат Симферопольского района умеренно-континентальный. Весна, как правило, затяжная, начинается в середине февраля и заканчивается в середине мая. Заморозки на почве возможны до мая. Лето – длительное, жаркое, сухое (с середины мая и до конца сентября), осень – теплая и долгая. Зима – короткая и мягкая, но изменчивая, погода нестабильная, период похолодания сменяется периодом потепления, когда температура воздуха может достигать + 10 – + 12 градусов, но с декабря наблюдаются устойчивые ночные заморозки [19, 20]. Среднегодовые температуры воздуха за годы исследований колебались от 12 ^{0}C (2023 г.) до 13,8 ^{0} C (2024 г). Самая высокая среднемесячная температура была в августе, реже в июле – +23,2 – +25,2 °C. Осень, в целом, теплее весны на 2–3 градуса. Продолжительность безморозного периода 180–200 дней. Среднее

количество часов солнечного сияния высокое – 2469 час/год. Среднегодовой уровень осадков варьируется в широких пределах в зависимости от года: от 368 мм в 2020 г. до 703 мм в 2021 г. На вегетационный период приходится в среднем 350 мм осадков. Четко прослеживается динамика – повышение среднегодовой температуры воздуха и уменьшение среднегодового количества осадков в период с 2019 по 2024 год, то есть климат становится более жарким и засушливым, что будет сказываться на спектре выращиваемых культур с учетом дефицита влаги в весенне-летний период.

Для почвенных исследований на базе лаборатории Центра агрохимической службы «Крымский» использовались следующие методы и оборудование. Гумус почвы определялся по п. 6.1 ГОСТа 26213-2021 фотометрическим методом, основанном на окислении органического вещества хромовой смесью с последующим количественным определением эквивалентного содержания трёхвалентного хрома на спектрофотометре [21], pH почвенного раствора определялся потенциометрическим методом на иономере в водной вытяжке почвы при соотношении почвы и воды 1:5 [22]. Определение подвижных форм фосфора и калия в почве проводилось по методу Мачигина в соответствии с ГОСТом 26205-91. Этот метод основан на извлечении подвижных соединений фосфора и калия раствором углекислого аммония с массовой долей растворенного вещества 1 % при соотношении почвы к извлекающему раствору 1:20 [23]. В полученной вытяжке на пламенном фотометре определялось содержание подвижного калия, соединения подвижного фосфора переводились в фосфорно-молибденовое комплексное соединение, имеющее синюю окраску, которое количественно определялось на спектрофотометре. Определение подвижных форм микроэлементов и тяжелых металлов производилось атомно-абсорбционным методом в вытяжке почвы, приготовленной с использованием в качестве экстрагента ацетатно-аммонийного буферного раствора с pH – 4,8 [24]. Для проведения анализов были использованы следующие средства измерения: весы электронные Scout Pro SPU-202, весы лабораторные RADWAG AS 60/220/ X, иономер лабораторный И-160МИ, спектрофотометр ПЭ-5300ВИ, пламенный фотометр PFP7, пламенный фотометр BWB-XP, атомно-абсорбционный спектрофотометр Квант 2МТ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим динамику изменения основных агрохимических показателей плодородия почв в пахотных землях Симферопольского района за 2024 г. на 9 пробных участках.

На рисунке 2 четко видна тенденция падения гумуса во всех агропробах, кроме контрольного. Для исследования были выбраны участки с разным содержание гумуса: от 2,59 % (участок № 4) до 4,97 % (участок № 3) в 2019 г.

В формировании почвенного плодородия важная роль принадлежит гумусу, запасы и состав которого определяют многие агрохимические свойства почв [25]. Чем больше запасы гумуса в почве, тем богаче она азотом, серой, фосфором и другими питательными веществами. Органическое вещество почвы влияет на множество процессов, включая ионный обмен, кислотно-щелочные и окислительно-

восстановительные реакции, на растворимость минеральных компонентов, облегчая их усвоение растениями, а также способствуют стабилизации температурного режима [26].

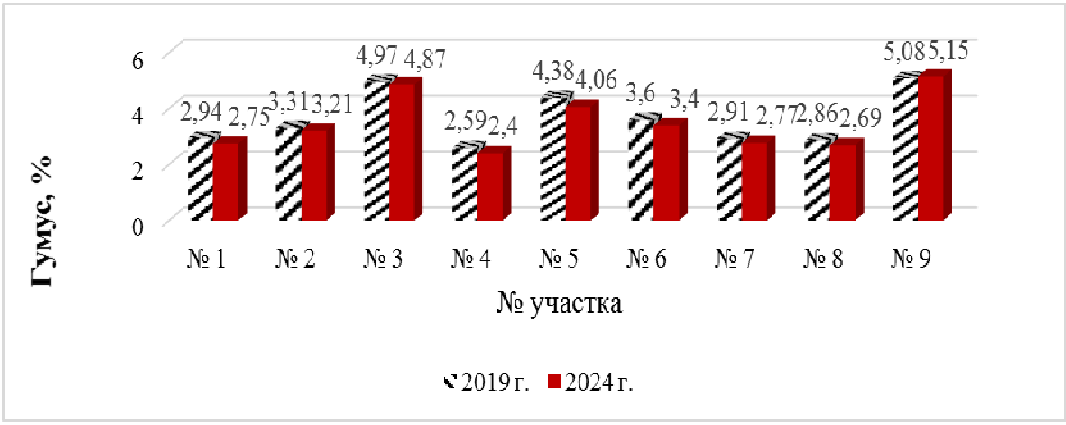


Рис. 2. Обеспеченность гумусом почв Симферопольского района в 2019 и 2024 годах.

Примечание: Однолетние культуры: уч. № 1 – пшеница, уч. № 2 – пшеница; уч. № 3 – лен; уч. № 4 – ячмень; уч. № 5 – подсолнечник. Многолетние культуры: уч. № 6 – сад (черешня); уч. № 7 – виноград (винный сорт Алиготе), уч. № 8 – виноград (столовый сорт Кардинал). Участок № 9 – контрольный (целинная типчаково-ковыльная степь).

Высокое содержание гумуса отмечается в почвах участков № 3 и № 5, оно составило в 2024 году 4,87 % и 4,06 % соответственно. Это объясняется длительным и систематическим внесением на этих участках органических удобрений. Минимальное содержание гумуса в 2024 году было на участке № 4 – 2,40 % (здесь не менялась выращиваемая культура 4 года). В почвах под виноградниками и плодовым садом снижение произошло на 0,14–0,20 %, под однолетними культурами – 0,19–0,32 % за период исследований.

Таким образом, видно, что процессу дегумификации подвержены все участки, причем под однолетними культурами в большей степени, что связано не только с выносом органического вещества растениями, но и с высокой интенсивностью использования почвы. В почве контрольного участка гумуса в пробах выше 5 % и с течением времени оно только увеличивается. Для поддержания имеющегося уровня содержания гумуса рекомендуется проводить внесение органических удобрений из расчета 10 т/га.

Реакция среды почвы [27] оказывает большое влияние на поступление питательных веществ в растения и, следовательно, на их рост и развитие (рис. 3).

В почвах Симферопольского района подстилающими породами являются известняки, поэтому pH на всех участках слабощелочное и колеблется от 8,0 до 8,3. Исключение составляет участок № 3, где значение pH почвенного раствора немного ниже – 7,8. Это объясняется длительным систематическим внесением на данном

участке больших доз органических удобрений и регулярным поливом. За период с 2019 года по 2024 год лишь на 2-х из 9 участках наблюдается незначительное увеличение значения pH. Сохранение этого показателя объясняется также таким свойством почв, как буферность.

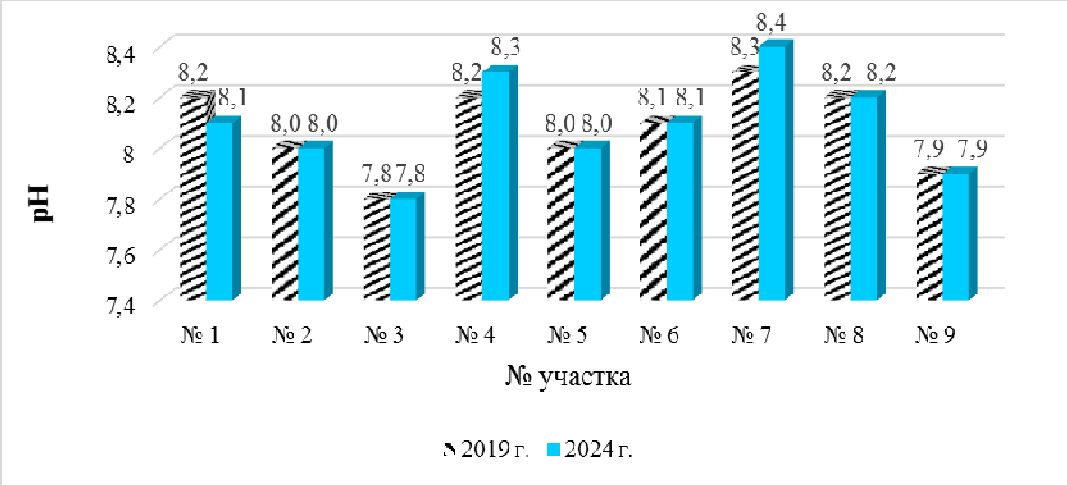


Рис. 3. pH почв Симферопольского района в 2019 г. и 2024 г.

Примечание: Однолетние культуры: уч. № 1 – пшеница, уч. № 2 – пшеница; уч. № 3 – лен; уч. № 4 – ячмень; уч. № 5 – подсолнечник. Многолетние культуры: уч. № 6 – сад (черешня); уч. № 7 – виноград (винный сорт Алиготе), уч. № 8 – виноград (столовый сорт Кардинал). Участок № 9 – контроль (целинная типчаково-ковыльная степь).

Для жизни растений крайне важен фосфор, так как он входит в состав следующих органических соединений: нуклеиновых кислот (РНК и ДНК), которые участвуют в синтезе белков, росте и размножении растений, передаче наследственной информации; АТФ (накопление энергии); нуклеотидов (коферментов, катализирующих окисление веществ); нуклеопротеидов (рост и развитие растений); фосфатидов (важная роль в процессах проникновения и обмена веществ в клетках растений); витаминов, гормонов, ферментов, определяющих направление и скорость биохимических процессов в растениях; фитина (запасное вещество семян и плодов), способствуя их формированию, а также стимулирует развитие корневой системы.

Недостаток фосфора приводит к нарушению азотного обмена; изменению круговорота сахаров в растениях; замедлению роста и развития растений, созревания семян, у ряда растений снижается морозоустойчивость, его избыток в почве приводит к снижению усвоения железа и цинка [28]. В почве фосфор содержится как в органической, так и в минеральной форме, но преобладает минеральная. Растения усваивают этот элемент в виде дигидрофосфат-ионов ($H_2PO_4^-$) и гидрофосфат-ионов (HPO_4^{2-}) [29].

На исследованных участках содержание подвижных соединений фосфора в почве существенно различается (рис. 4). Следует отметить, что на участках под виноградом и плодовыми деревьями содержание фосфора снизилось значительно меньше, на 2–4 мг/кг, в то время как на участках, где выращивалась пшеница и другие однолетние культуры от 3,6 (участок № 2) до 9 мг/кг (участок № 5) более значительно.

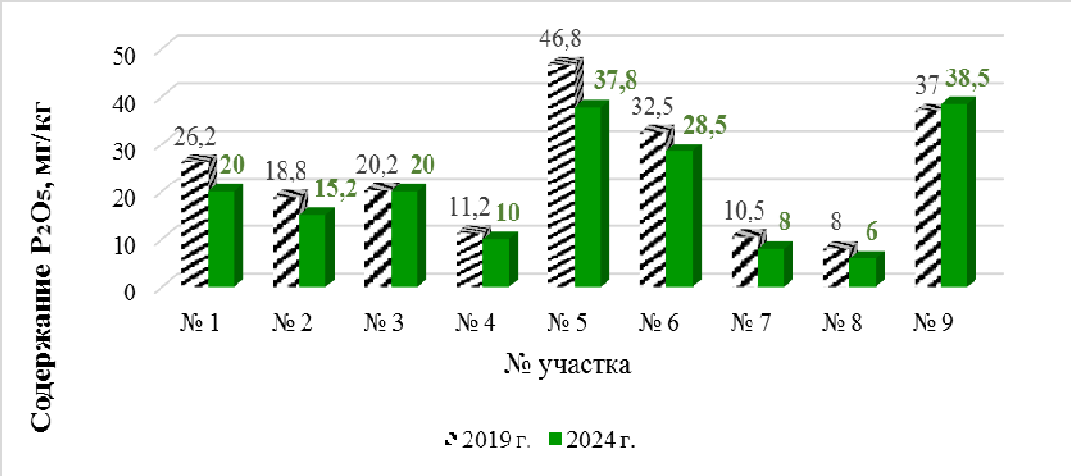


Рис. 4. Динамика обеспеченности почв Симферопольского района подвижными соединениями фосфора в 2019 и 2024 годах.

Примечание: Однолетние культуры: уч. № 1 – пшеница, уч. № 2 – пшеница; уч. № 3 – лен; уч. № 4 – ячмень; уч. № 5 – подсолнечник. Многолетние культуры: уч. № 6 – сад (черешня); уч. № 7 – виноград (винный сорт Алиготе), уч. № 8 – виноград (столовый сорт Кардинал). Участок № 9 – контроль (целинная типчаково-ковыльная степь).

Проведенный анализ данных говорит о том, что в Симферопольском районе при интенсивном ведении сельского хозяйства внесение фосфорных удобрений весьма незначительно и недостаточно. Так, на участке № 4 содержание подвижного фосфора упало до критического значения (10 мг/кг). Если не увеличить применение фосфорных удобрений, то урожай зерновых составит не более 10–15 ц/га [30], что уже является не рентабельным. Следовательно, внесение фосфорных удобрений под однолетние культуры требуется на четырех из пяти участков, как и под многолетние культуры (участки № 7 и 8 виноградники). При содержании в почве подвижного фосфора менее 20,0 мг/кг наступает фосфорное голодание растений, в результате которого плохо усваивается растениями азот [28]. На контрольном участке содержание подвижных соединений фосфора повышенное и в 2024 году в сравнении с 2019 годом, наблюдается рост данного показателя с 37,0 до 38,5 мг/кг.

Калий относится к главным макроэлементам питания, но, в отличие от фосфора и азота, находится в растениях только в ионной форме [31]. Он стимулирует нормальное течение процессов фотосинтеза, повышает скорость усвоения азота, образование белка и снижает содержание нитратов в сельскохозяйственной продукции, усиливает азотофиксацию и способствует формированию клубеньков на

корнях бобовых культур. Играет важную роль в активации свыше шестидесяти ферментов и ферментативных систем, связанных с ростом растений. Этот элемент играет важную роль в процессах осмотической регуляции, поскольку способен быстро перемещаться между органами растений [32]. В итоге они становятся устойчивыми к переизбытку либо, наоборот, недостатку влаги, а также к перепадам температур. Данный элемент оптимизирует кислотно-щелочной баланс.

Дефицит этого элемента приводит к снижению ферментативной активности, нарушению углеводного и белкового обмена, увеличению расхода углеводов на дыхание. В результате уменьшается продуктивность растений и качество продукции. При недостатке калия сильно снижается устойчивость растений к различным заболеваниям и неблагоприятным климатическим условиям (к перепадам температур и засухе). Семена, образовавшиеся у растений в условиях калийного голодания, нередко теряют всхожесть. Избыток калия также негативно отражается на росте и развитии растений. Известно, что при избыточном содержании этого элемента в почве резко сокращается поглощение растением магния и кальция, а также микроэлементов [31].

Представляет значительный интерес проследить динамику распределения калия в почвах Симферопольского района, т.к. в прошлые периоды традиционно считалось, что калия природно много в плодородном слое почв из-за повышенного содержания глинистых фракций и поэтому его не вносили в крымские почвы [6, 7]. Сейчас следует пересмотреть это мнение, т.к. уровень содержания калия снижается и его уже следует вносить, чтобы не падала продуктивность выращиваемых культур. На рисунке 5 отражена динамика данных этого элемента на изучаемых пробных площадях.

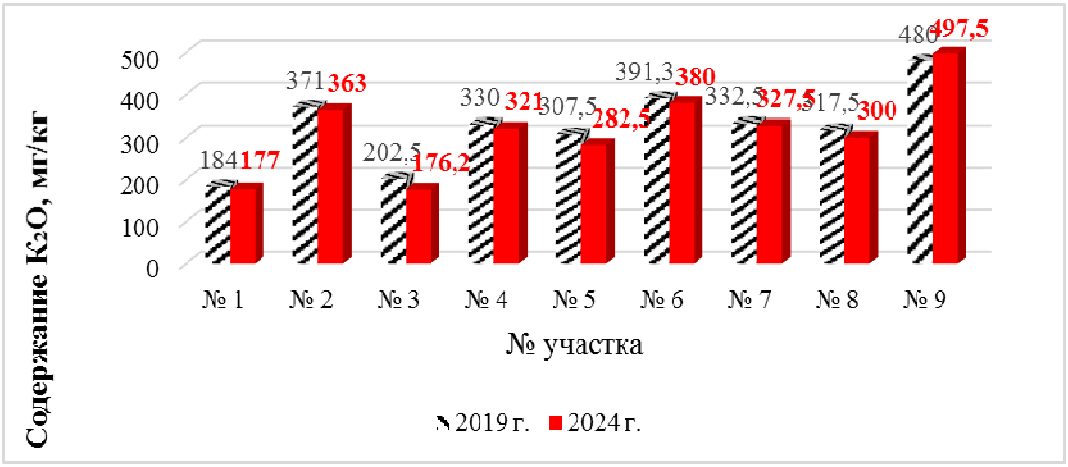


Рис. 5. Обеспеченность почв Симферопольского района подвижными соединениями калия в 2019 г. и 2024 г.

Примечание: Однолетние культуры: уч. № 1 – пшеница, уч. № 2 – пшеница; уч. № 3 – лен; уч. № 4 – ячмень; уч. № 5 – подсолнечник. Многолетние культуры: уч. № 6 – сад (черешня); уч. № 7 – виноград (винный сорт Алиготе), уч. № 8 – виноград (столовый сорт Кардинал). Участок № 9 – контроль (целинная типчаково-ковыльная степь).

В 2019 году на участке № 1 – содержание подвижных соединений калия было низким (184,0 мг/кг), на участке № 3 – среднее (202,5 мг/кг) и на шести участках – № 2, 4, 5, 6, 7, 8 – повышенное (от 307,5 до 391,3 мг/кг). На контрольном участке № 9 данный показатель был очень высоким – 480 мг/кг. В 2024 году уже на двух участках – № 1 и № 3 – содержание подвижного калия низкое (177,0 и 176,2 мг/кг соответственно); на двух участках: № 5 и № 8 – среднее (282,5 и 300,0 мг/кг соответственно) и только на четырех участках – № 2, 4, 6, 7 – повышенное (от 321,0 до 380,0 мг/кг). На контрольном участке содержание подвижных соединений калия по-прежнему очень высокое – 497,5 мг/кг. Таким образом, на всех участках, где выращиваются сельскохозяйственные культуры, наблюдается устойчивое снижение содержания подвижных форм калия, что объясняется выносом этого элемента растениями и невнесением удобрений, содержащих его.

Поэтому вопрос о необходимости внесения данных удобрений должен решаться в каждом конкретном случае, при этом должны рассматриваться не только показатели их содержания, но и учитываться виды выращиваемых культур. Например, на участке № 1, где выращивается озимая пшеница, уже давно требуется внесение калийных удобрений, т.к. данная культура отзывчива на их внесение. Содержание этого элемента в почве ниже 250 мг/кг ведёт к падению её урожайности. Напротив, на участке № 3, где выращивается лен, содержание подвижного калия также низкое (176,2 мг/кг), но при дальнейшем его выращивании можно не проводить внесение калийных удобрений, так как данная культура не требовательна к этому элементу питания, но при смене выращиваемых растений, внесение удобрений необходимо. Несмотря на то, что на участке № 5 среднее содержание подвижного калия – 282,5 мг/кг в 2024 году, также необходимо проводить внесение калийных удобрений, так как здесь выращивался подсолнечник, который является активным потребителем этого элемента питания и быстро забирает его для своего развития [32].

Таким образом, наблюдается устойчивое снижение содержания гумуса, подвижных соединений калия и фосфора, что объясняется недостаточностью внесения удобрений на фоне интенсивной эксплуатации земель. Кроме того, снижение плодородия почв связано с отказом от севооборотов и длительном выращивании одной культуры. На контрольном участке наблюдается рост агрохимических показателей плодородия.

Данные по содержанию азота мы не приводим, т.к. он легко вымывается с осадками и забирается с полей выращиваемыми растениями, отбор проб проходил осенью, поэтому показатели по азоту были бы не репрезентативны.

Проанализируем динамику изменения содержания в пахотных землях Симферопольского района основных микроэлементов – меди, кобальта, цинка, марганца. Большинство функций этих микроэлементов связано с их участием в ферментативных реакциях

Медь участвует в фотосинтезе, регулирует транспорт белков, а также повышает содержание в плодах азота и фосфора, защищает хлорофилл от разрушения. Содержание меди в растениях колеблется в среднем от 1 до 20 мг/кг сухого вещества [33, 34]. Медь необходима для деятельности ряда ферментов белкового обмена, таких

как нитритредуктаза, гипонитритредуктаза, протеаза и др. Она обеспечивает ассимиляцию нитратного азота и фиксацию азота атмосферы (рис. 6).

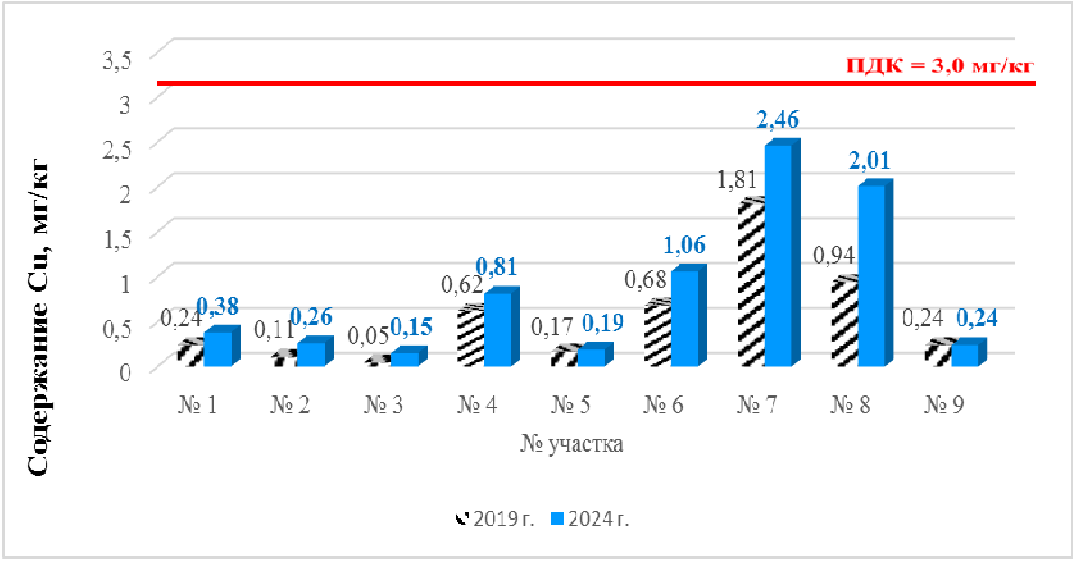


Рис. 6. Содержание подвижных форм меди в почвах Симферопольского района в 2019 г. и 2024 г.

Примечание: Однолетние культуры: уч. № 1 – пшеница, уч. № 2 – пшеница; уч. № 3 – лен; уч. № 4 – ячмень; уч. № 5 – подсолнечник. Многолетние культуры: уч. № 6 – сад (черешня); уч. № 7 – виноград (винный сорт Алиготе), уч. № 8 – виноград (столовый сорт Кардинал).Участок № 9 – контрольный (целинная типчаково-ковыльная степь).

Медь является единственным элементом, улучшающим рост растений в условиях аммиачного питания. Под влиянием Cu в растениях увеличивается содержание хлорофилла, активизируется образование белков и витаминов группы В. Она участвует в перераспределении углеводов [33]. При недостатке меди у растений задерживается рост и цветение, теряется тургор, наблюдаются хлороз и увязание.

Избыток этого элемента для растений является токсичным. Он приводит к повреждению тканей, сначала происходит замедление развития растения, а затем его гибель. Большое количество меди обычно подавляет рост корней.

На всех участках, где выращиваются сельскохозяйственные культуры, содержание меди с течением времени выросло, но следует отметить, что этот рост не одинаковый. На участках, где выращивались однолетние культуры, возрастание содержания меди составило 0,02–0,19 мг/кг за 5 лет. В почвах под виноградниками и плодовым садом рост содержания меди произошел значительно больше и составил 0,38 мг/кг на участке № 6, 0,65 мг/кг – на участке № 7 и 1,07 мг/кг – на участке № 8. Такой быстрый темп роста подвижной меди объясняется применением на этих участках медьсодержащих фунгицидов. Следует отметить, что на участке

№ 7 значение содержания меди приблизилось к предельному и, если темпы роста сохранятся, то в ближайшие 5 лет будет превышен порог токсичности для выращиваемой продукции.

Физиологическая роль кобальта связана с его участием в окислительно-восстановительных процессах, происходящих в клетках. Содержание кобальта в растениях находится в пределах от 0,02 до 11,5 мг/кг сухого вещества. Примерно половина его находится в ионной форме, около 20 % – в форме карбамидных соединений и в составе витамина B12, оставшиеся 30 % – в виде не идентифицированных стабильных органических соединений [33].

Он участвует в реакциях карбоксилирования, гидролиза пептидных связей и фосфорных эфиров, переноса фосфатных групп и в других реакциях, а также в фиксации атмосферного азота [34, 35]. Он активизирует процессы дыхания и фотосинтеза, способствуя образованию хлорофилла и замедляя его разрушение в темноте, способствует повышению содержания влаги в растениях. Данный микроэлемент отвечает за накопление алкалоидов и витаминов, за ускорение наступления фаз развития растения.

Рассмотрим динамику его распределения по учетным площадям (рис. 7).

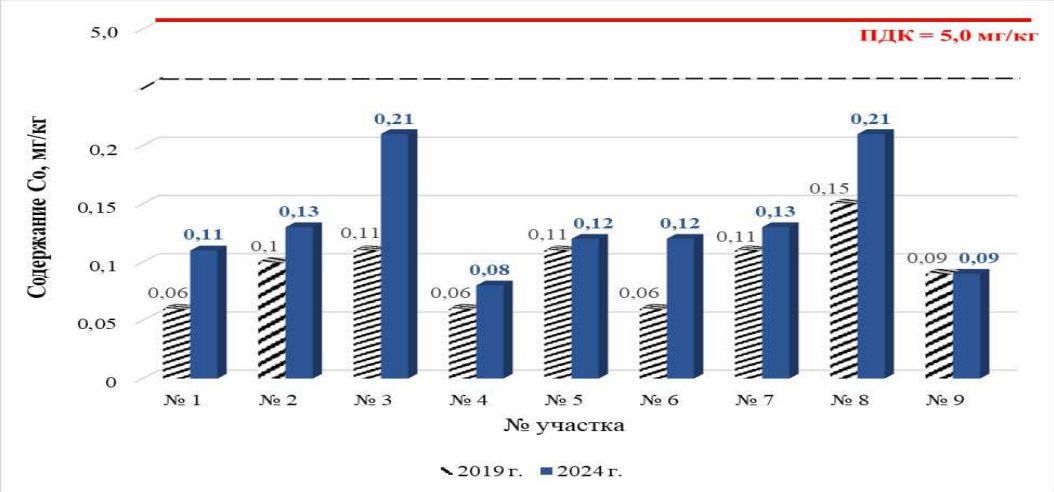


Рис. 7. Содержание подвижных форм кобальта в почвах Симферопольского района в 2019 г. и 2024 г.

Примечание: Однолетние культуры: уч. № 1 – пшеница, уч. № 2 – пшеница; уч. № 3 – лен; уч. № 4 – ячмень; уч. № 5 – подсолнечник. Многолетние культуры: уч. № 6 – сад (черешня); уч. № 7 – виноград (винный сорт Алиготе), уч. № 8 – виноград (столовый сорт Кардинал). Участок № 9 – контрольный (целинная типчаково-ковыльная степь).

Недостаток кобальта отражается на процессе N_2-фиксации, возможны нарушения в азотном метаболизме растений, может снижаться содержание в листьях хлорофилла, каротиноидов, витамина Е [36]. На фоне избытка Co наблюдается дефицит железа, что приводит к хлорозу растений. При высоких

концентрациях кобальта в почве происходит ингибирование и гибель растения [37, 38]. На всех обрабатываемых участках в 2024 году в сравнении с 2019 г. наблюдается рост содержания подвижного кобальта, но он незначителен – от 0,01мг/кг на участке № 5 до 0,1мг/кг на участке № 3. Это связано с применением удобрений, преимущественно фосфорных.

Цинк играет важную роль в ферментативных процессах и регуляции синтеза фитогормонов, влияющих на рост (рисунок 8). Таким образом, этот элемент играет большую роль в углеводном, фосфорном и белковом обмене [39]. Структурную функцию цинк выполняет в алкогольдегидрогеназе и Zn-белках, включенных в ДНК. Каталитическую функцию рассматриваемый микроэлемент выполняет в ферменте карбон-гидраза, которая участвует в процессе фотосинтеза. Так как цинк является структурным компонентом рибосом, то он тесно связан с белковым синтезом.

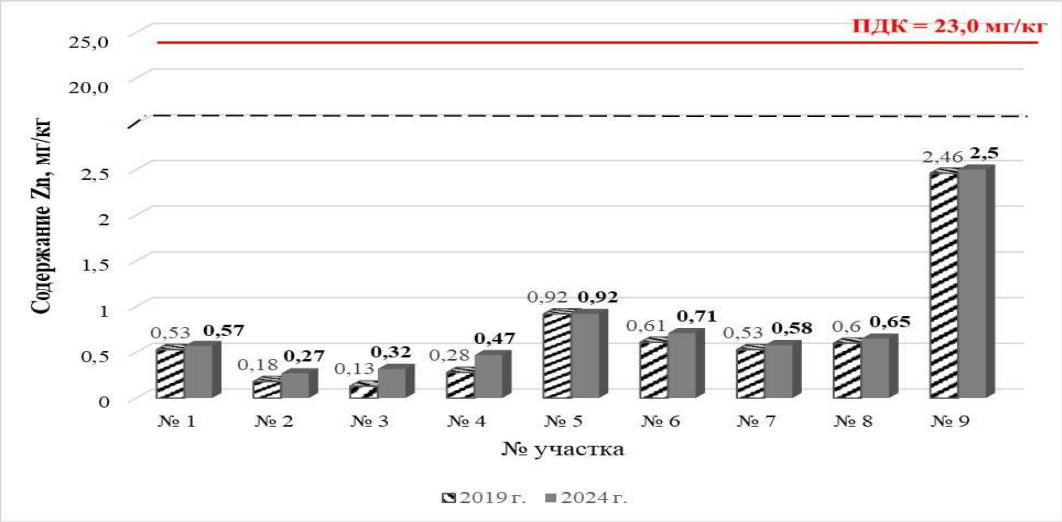


Рис. 8. Содержание подвижных форм цинка в почвах Симферопольского района в 2019 и 2024 годах.

Примечание: Однолетние культуры: уч. № 1 – пшеница, уч. № 2 – пшеница; уч. № 3 – лен; уч. № 4 – ячмень; уч. № 5 – подсолнечник. Многолетние культуры: уч. № 6 – сад (черешня); уч. № 7 – виноград (винный сорт Алиготе), уч. № 8 – виноград (столовый сорт Кардинал).Участок № 9 – контрольный (целинная типчаково-ковыльная степь).

Под влиянием цинка улучшается синтез сахаров и крахмала, увеличивается общее содержание углеводов, белковых веществ, аскорбиновой кислоты и хлорофилла, повышается засухоустойчивость, жаро- и холодостойкость растений. Кроме того, Zn влияет на проницаемость мембран [40], повышает устойчивость растений к грибковым и бактериальным заболеваниям. Он также влияет на скорость поступления калия в клетки растений.

При недостатке цинка в почвах у растений наблюдается задержка роста междоузлий, замедляется образование сахарозы, крахмала и ауксинов, нарушается процесс синтеза белков и фотосинтез, в них накапливаются небелковые соединения.

С другой стороны, цинк нарушает фотосинтетическую активность, устьичную проводимость и множество других жизненно важных метаболических функций у растений. Избыток рассматриваемого элемента замедляет их развитие и снижает структурную устойчивость, способствует хлорозу листьев. Высокие концентрации цинка вызывают окислительные повреждения, стимулируя образование активных форм кислорода, которые приводят в перекисное окисление липидов мембран и в тяжелых случаях происходит гибель растения [38].

Содержание подвижного цинка в почвах сельскохозяйственных угодий значительно ниже, чем в почве контрольного участка. Это объясняется тем, что происходит вынос цинка возделываемыми культурами. Данный элемент входит в виде добавок удобрений, за счет чего стараются восполнить его недостаток. Так как вынос разными видами растениями колеблется в больших пределах, а вносится разное количество удобрений, то наблюдается различная динамика его содержания. Так в период с 2019 г. по 2024 г. в почве участков, где выращиваются однолетние культуры, минимальный рост содержания цинка составил 0,04 мг/кг (участок № 1), максимальный – 0,19 (участках № 3 и № 4), в то время как на участках с многолетними культурами рост составил от 0,05 до 0,1 мг/кг. Это связано, во-первых, с тем, что под многолетники, как правило вносят отдельно удобрения, содержащие микроэлементы, а под однолетние культуры микроэлементы вносятся только в качестве добавок, содержащихся в удобрениях с основными элементами питания. Во-вторых, вынос подвижного цинка однолетними культурами больше в сравнении с плодовыми растениями [39].

Марганец (Mn) играет важную роль в катализаторах в качестве активатора и кофактора. Известно более 35 ферментов и ферментативных систем, активируемых Mn [38]. Марганец способен замещать в других ферментах магний и регулировать отношение Fe^{2+}/Fe^{3+}, тем самым влияя на окислительные процессы, совершающиеся с помощью железа [40]. Этот элемент играет важную роль в дыхании, которая обусловлена его каталитическим действием в сочетании с пероксидазной системой растений. Рассматриваемый элемент связан с обменом белка через регулирование активности ДНК- и РНК-полимера [41]. Способствует марганец увеличению содержания сахаров и их оттоку из листьев; важен для синтеза витаминов С, В, Е.

Дефицит марганца сказывается на многих процессах обмена веществ, снижается синтез углеводов и протеинов, уменьшается содержание хлорофилла. Следует отметить, что при любой степени недостаточности марганца в растениях угнетаются только те реакции фотосинтеза, которые связаны с образованием кислорода. При дефиците марганца отмечается слабое развитие корневой системы [42, 43].

Избыток данного элемента задерживает поступление железа в растения, при этом нарушается нормальное соотношение Fe/Mn, уменьшается содержание хлорофилла и взывает депрессию в нуклеиновом обмене [41].

На рисунке 9 отражена разногодичная динамика содержания марганца на участках в Симферопольском районе, которая демонстрирует значительный диапазон его колебаний от 8,85 мг/кг до 31,32 мг/кг в 2019 г. и от 5,15 мг/кг до 31,46 мг/кг в 2024 г.

Четкой зависимости в изменении содержания его в почвах не выявлено. Марганец – легко подвижный элемент, хорошо усваивается растениями, именно этим и объясняется более высокое содержание данного микроэлемента в почве контрольного участка в сравнении с обрабатываемыми агроценозами.

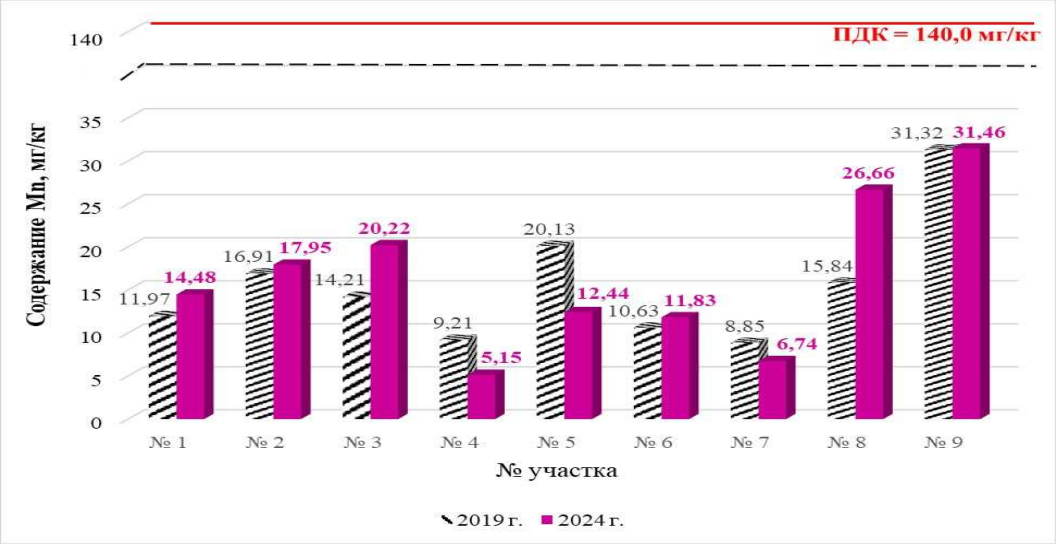


Рис. 9. Содержание подвижных форм марганца в почвах Симферопольского района в 2019 и 2024 годах.

Примечание: Однолетние культуры: уч. № 1 – пшеница, уч. № 2 – пшеница; уч. № 3 – лен; уч. № 4 – ячмень; уч. № 5 – подсолнечник. Многолетние культуры: уч. № 6 – сад (черешня); уч. № 7 – виноград (винный сорт Алиготе), уч. № 8 – виноград (столовый сорт Кардинал). Участок № 9 – контрольный (целинная типчаково-ковыльная степь).

Таким образом, на всех обрабатываемых участках за пятилетний период наблюдается устойчивый рост содержания микроэлементов. Стоит отметить, что в сравнении с пахотными землями целинная почва характеризовалась большим содержанием только марганца и цинка – 31,46 мг/кг и 2,50 мг/кг в 2024 году соответственно. Иная ситуация с кобальтом и медью, содержание которых было выше в обрабатываемых почвах.

Среди целого ряда тяжелых металлов, кадмий и свинец являются приоритетными (относятся к первому классу опасности), так как поступая в растения из почвы, а затем в организм человека и животных, не просто там накапливаются, а вызывают отравление, приводящее к тяжелым последствиям.

Следует выделить 2 основных источника поступления кадмия в почвы сельскохозяйственных угодий: минеральные удобрения, как правило, фосфорные (в особенности суперфосфат, в который Cd входит в качестве микродобавок) и отходы животноводства (в навозе в среднем содержится на кг сухой массы до 0,2 мг кадмия). В число необходимых растениям элементов кадмий не входит, но эффективно может поглощаться корневой системой и листьями. Из почвы он усваивается в форме свободного иона Cd^{2+}, находящегося в почвенном растворе. Поступление этого элемента в растения усиливается при низком pH, повышенной солености, низком содержании гумуса и глинистых веществ, цинка, оксидов железа и марганца, присутствии ионов аммония и высокой температуры [44].

Рассмотрим динамику его накопления в сравнении за 2019 и 2024 гг. по участкам (рис. 10).

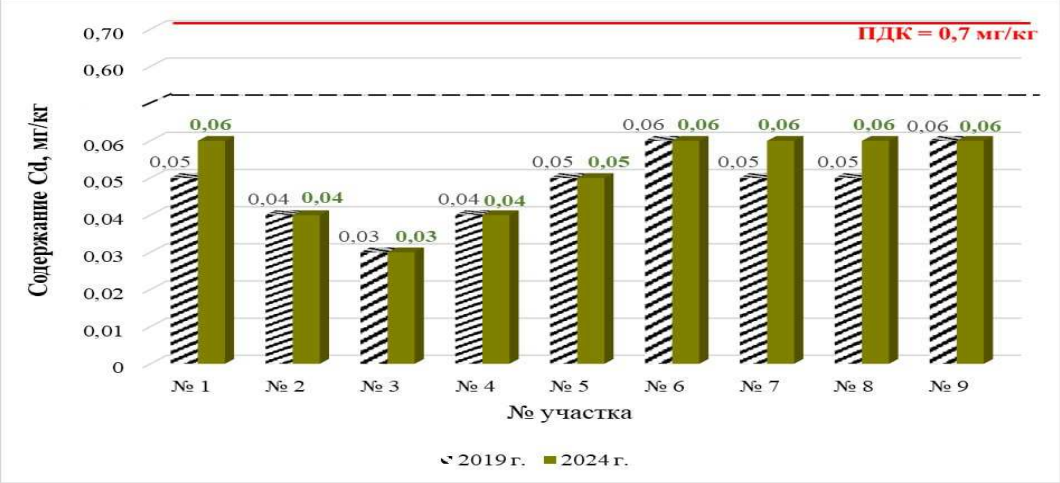


Рис. 10. Содержание подвижного кадмия в почвах Симферопольского района в 2019 и 2024 годах.

Примечание: Однолетние культуры: уч. № 1 – пшеница, уч. № 2 – пшеница; уч. № 3 – лен; уч. № 4 – ячмень; уч. № 5 – подсолнечник. Многолетние культуры: уч. № 6 – сад (черешня); уч. № 7 – виноград (винный сорт Алиготе), уч. № 8 – виноград (столовый сорт Кардинал). Участок № 9 – контрольный (целинная типчаково-ковыльная степь).

Кадмий в настоящее время считается одним из самых вредных тяжелых металлов, так как он, во-первых, является одним из наиболее подвижных тяжелых металлов (он активно поглощается растениями, довольно быстро транспортируется в их надземные части, в том числе, в плоды и семена), во-вторых, любое заметное увеличение его содержания в продуктах и кормах приводит к накоплению этого элемента в организме человека. Накаливаясь в нем, кадмий оказывает токсическое действие на почки, костную и дыхательную системы [45].

В растениях кадмий нарушает процессы фотосинтеза и транспирации, изменяет активность ферментов, подавляет синтез белков и нуклеиновых кислот, фиксацию

углекислого газа, а также затрудняет поглощение важных элементов, таких как фосфор, калий, кальций, магний, железо, медь, цинк, марганец, вызывая угнетение роста и хлороз листьев, негативно влияет на образование репродуктивных органов, тормозят прорастания семян [44].

Содержание кадмия на всех обследуемых участках, как обрабатываемых, так и контрольном, невысокое (0,03–0,06 мг/кг), значительно ниже порога токсичности (0,7 мг/кг), поэтому по данному элементу почвы Симферопольского района относительно безопасны, хотя тенденция увеличения его содержания за изученные годы четко прослеживается.

Свинец является одним из наиболее токсичных металлов. Содержание этого элемента в проанализированных пробах незначительное, но при этом наблюдается его стабильный рост (рис. 11).

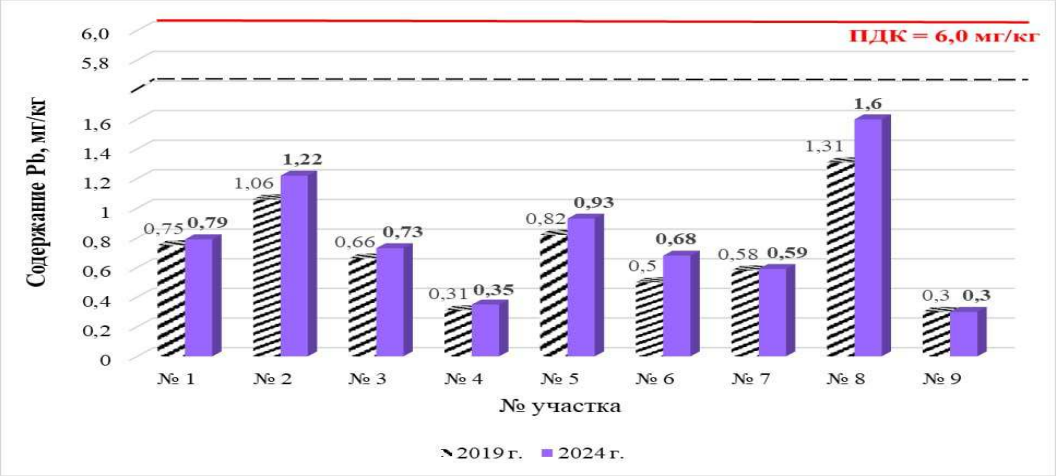


Рис. 11. Содержание подвижного свинца в почвах Симферопольского района в 2019 и 2024 годах.

Примечание: Однолетние культуры: уч. № 1 – пшеница, уч. № 2 – пшеница; уч. № 3 – лен; уч. № 4 – ячмень; уч. № 5 – подсолнечник. Многолетние культуры: уч. № 6 – сад (черешня); уч. № 7 – виноград (винный сорт Алиготе), уч. № 8 – виноград (столовый сорт Кардинал). Участок № 9 – контрольный (целинная типчаково-ковыльная степь).

Среди механизмов влияния на физиологические процессы можно выделить конкурентное вытеснение ионов некоторых металлов, участвующих в минеральном обмене растений – железа, марганца, цинка. Этот элемент также снижает доступность фосфора, калия и кальция [33].

Свинец оказывает существенное ингибирующее воздействие на многие ферменты, играющих ключевую роль в базовых метаболических процессах, включая фотосинтез, гликолиз, фосфорилирование. Также негативное влияние свинца на ферментативную активность обусловлено взаимодействием ионов металла с SH-группами белков, что приводит к их дезактивации. Этот тяжелый

металл может взаимодействовать с ДНК, нарушая ее нормальное функционирование [44].

Так, на участке № 6 увеличение составило 0,18 мг/кг; на участке № 8 – 0,29 мг/кг; на участке № 2 – 0,16 мг/кг; на участке № 5 – 0,11 мг/кг. На остальных – рост содержания свинца в верхнем почвенном горизонте колеблется от 0,01 до 0,07 мг/кг. Содержание свинца на контрольном участке самое низкое и равно 0,3 мг/кг. Содержание его варьируется от 0,35 мг/кг до 1,60 мг/кг при ПДК 6,0 мг/кг, при этом наблюдается стабильный рост. На тех участках (№ 2 и № 8), которые находятся в непосредственной близости от автодорог, рост содержания свинца значительнее.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты комплексных исследований по современному агроэкологическому состоянию пахотных почв Симферопольского района в предгорном Крыму позволяет сделать ряд выводов:

1. На всех участках, где выращиваются сельскохозяйственные культуры, наблюдается устойчивое снижение содержания гумуса, подвижных соединений калия и фосфора. Основная причина – недостаточное внесение удобрений на фоне интенсивной эксплуатации земель. Снижение плодородия почв так же связано с отказом от севооборотов и длительном выращивании монокультур на одной территории, особенно в фермерских хозяйствах.
2. Рекомендуется увеличить дозы внесения фосфорных и органических удобрений. Для поддержания имеющегося уровня содержания гумуса рекомендуется проводить внесение органических удобрений из расчета 10 т/га. Актуальным становится внесение калийных удобрений, что не проводилось ранее. Вопрос о необходимости и дозах внесения этих удобрений должен решаться в каждом конкретном случае с учетом не только показателей содержания, но и вида выращиваемых культур.
3. На всех обрабатываемых участках за пятилетний период наблюдается устойчивый рост содержания основных микроэлементов – меди, кобальта, цинка и марганца. Причем на участках под многолетними насаждениями рост содержания меди произошел значительно выше, что объясняется применением на них медьсодержащих фунгицидов. Для предотвращения накопления меди следует отказаться от их использования, заменив на железный купорос, препараты, содержащие серу и др. В сравнении с пахотными землями контрольный участок характеризовался большим содержанием только марганца и цинка – 31,46 мг/кг и 2,50 мг/кг в 2024 году соответственно.
4. Содержание кадмия на всех обследуемых участках, как обрабатываемых, так и контрольном, невысокое (0,03–0,06 мг/кг), значительно ниже порога токсичности (0,7 мг/кг) и практически не меняется. Показатели свинца варьируется от 0,35 мг/кг до 1,60 мг/кг при ПДК 6,0 мг/кг, при этом наблюдается стабильный рост. На тех участках, которые находятся в непосредственной близости от автодорог, рост содержания свинца значительнее.

Список литературы

1. Ергина Е. И. Исследования процессов почвообразования и деградации почв Крыма (историко-географический обзор) / Е. И. Ергина, Е. А. Артемова // Учёные записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. – 2024. – Том 10 (76), № 1. – С. 52–64.
2. Ена В. Г. Открыватели земли Крымской / В. Г. Ена, Ал. В. Ена, Ан. В. Ена. – Симферополь: Бизнес-Информ, 2007. – 520 с.
3. Докучаев В. В. Русский чернозём / В. В. Докучаев. – М.-Л.: АН СССР, 1948. – Т. 1. – 480 с.
4. Клепинин Н. Н. Почвы Крыма / Н. Н. Клепинин. – Симферополь: Крымиздат, 1935. – 123 с.
5. Кочкин М. А. Почвы, леса и климат горного Крыма и пути их рационального использования. Основы рационального использования почвенно-климатических условий в земледелии / М. А. Кочкин. – М.: Колос, 1972. – 303 с.
6. Половицкий И. Я. Почвы Крыма и повышение их плодородия / И. Я. Половицкий, П. Г. Гусев. – Симферополь: Таврия, 1987. – 152 с.
7. Драган Н. А. Почвенные ресурсы Крыма / Н. А. Драган. – Симферополь: Доля, 2004. – 208 с.
8. Российская Федерация. Законы. Об охране окружающей среды: почвы. Федеральный закон № 7-ФЗ: [принят Государственной думой 20 декабря 2001 года: одобрен Советом Федерации 26 декабря 2001 года]. // Собрание законодательств РФ, 2002. – № 2. – Ст. 133.
9. Российская Федерация. Законы. О государственном регулировании обеспечения плодородия земель сельскохозяйственного назначения: Федеральный закон № 101-ФЗ: [принят Государственной думой 3 июля 1998 года: одобрен Советом Федерации 9 июля 1998 года]. // Собрание законодательств РФ, 1998. – № 29. – Ст. 3399.
10. Российская Федерация. Законы. О развитии сельского хозяйства: Федеральный закон № 264-ФЗ: [принят Государственной думой 22 декабря 2006 года: одобрен Советом Федерации 27 декабря 2006 года]. // Собрание законодательств РФ, 2007. – № 51. – Ст. 27.
11. Российская Федерация. Законы. Об обороте земель сельскохозяйственного назначения: Федеральный закон №101 ФЗ: [принят Государственной думой 26 июня 2002 года: одобрен Советом Федерации 07 июля 2002года]. // Собрание законодательств РФ, 2002. – № 30. – Ст. 3018.
12. Закон Республики Крым: Об особо ценных продуктивных сельскохозяйственных угодьях на территории Республики Крым. Принят 30 октября 2020 года. № 123-ЗРК/2020. Симферополь.: URL://https:/file://C:/Users/poisk/Downloads/123%D0%97%D0%A0%D0%9A%20%20%2030102020.pdf
13. Макаров В. И. Агроэкологическая оценка земель / В. И. Макаров. – Ижевск: ФГБОУ ВПО Ижевская ГСХА, 2015. –104 с.
14. Шакиров В. З. Динамика содержания и баланс гумуса в почвах Республики Татарстан / В. З. Шакиров, С. Ш. Нуриев, А. А. Лукманов // Агрохимический вестник. – 2006. – № 3. – С. 1–6. URL:https://cyberleninka.ru/article/n/dinamika-soderzhaniya-i-balans-gumusa-v-pochvah-respubliki-tatarstan
15. Социально-экономический паспорт Симферопольского района по состоянию на 01.04.2024 // Правительство Республики Крым: официальный сайт. Дата публикации: 13.05.2024. URL: https :// simfmo.rk.gov.ru.
16. Иванченко В. И. Оценка почвенных показателей Симферопольского района для многоцелевого производства винограда / В. И. Иванченко, Е. А. Рыбалко, Н. В. Баранова и др. // Русский виноград. – 2019. – Т. 10. – С. 156–166.
17. Коба В. П. Почвенное плодородие и урожайность зерновых и зернобобовых культур в Крыму / В. П. Коба, Т. М. Сахно // АгроЭкоИнфо. – 2020. – № 2. – URL: http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2020/2/st_216pdf.
18. Водные ресурсы – основа устойчивого развития Крыма: коллективная монография / Под редакцией В. С. Паштецкого. – Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2022. – 216 с.
19. Ведь И. П. Климатический атлас Крыма / И. П. Ведь // Приложение к научно-практическому дискуссионно-аналитическому сборнику «Вопросы развития Крыма». – Симферополь: Таврия-Плюс, 2000. – 120 с.
20. Потанин Д. В. Агроклиматический атлас Республики Крым / Д. В. Потанин, М. И. Иванова, В. Я. Даниленко – Симферополь: Полипринт, 2023. – 306 с.

21. ГОСТ 26213-2021. Почвы. Методы определения органического вещества / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – Москва: Российский институт стандартизации, 2021. – 8 с.
22. ГОСТ 26423-85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, pH и плотного остатка водной вытяжки. – Москва: Стандартинформ, 2011. – 5 с.
23. ГОСТ 26205-91. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Мачигина в модификации ЦИНАО / Комитет стандартизации и метрологии СССР. Москва: Стандарты, 1992. – С. 8–10.
24. РД 52.18289-90 МУ. Методика выполнения измерений массовой доли подвижных форм металлов (меди, свинца, цинка, никеля, кадмия, кобальта, хрома, марганца) в пробах почвы атомно-абсорбционным анализом / Государственный комитет СССР по гидрометеорологии. Москва: Государственный комитет СССР по гидрометеорологии, 1990. – С. 11–25.
25. Сычёв В. Г. Современное состояние плодородия почв и основные аспекты его регулирования: монография / В. Г. Сычёв. – Москва: РАН, 2019. – 328 с.
26. Морина О. М. Почвоведение / О. М. Морина, А. М. Дербенёва, В. А. Морин. – Хабаровск: ТОГУ, 2013. – 370 с.
27. Соколова Т. А. Почвенная кислотность. Кислотно-основная буферность почв. Соединения алюминия в твердой фазе почвы и в почвенном растворе / Т. А. Соколова, И. И. Толпешта, С. Я. Трофимов. – Тула: Гриф и К, 2012. – 124 с.
28. Алимкулов С. О. Биологическая роль фосфора в жизни растений / С. О. Алимкулов, Д. К. Мурадова // Молодой ученый. – 2015. – № 10 (90). – С. 44–47. URL: https://moluch.ru/archive/90/18916/
29. Самсонова Н. Е. Основы минерального питания растений и технологии применения удобрений / Н.Е. Самсонова. – Смоленск: ФГБОУ ВО Смоленская ГСХА, 2021. – 256 с.
30. Сычевский М. Е. Тридцатипятилетняя динамика содержания подвижных фосфатов в почвах Крыма в связи с применением удобрений / М. Е. Сычевский, А. Л. Винник, В. И. Косулина // Научные труды ЮФ НУБиП Украины «Крымский агротехнологический университет». – 2006. – Вып. 96. – С. 70–74.
31. Минеральные элементы в кормах и методы их анализа: монография / В. М. Косолапов, В. А. Чуйков, Х. К. Худяков, В. Г. Косолапова. – Москва: ООО «Угрешская типография», 2019. – 272 с.
32. Журова В. Г. Изучение влияния ионов калия, кальция и магния на рост и развитие растений / В. Г. Журова, М. С. Светличная // Достижения науки и образования. – 2018. – № 14(36). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/izuchenie-vliyaniya-ionov-kaliya-kaltsiya-i-magniya-na-rost-i-razvitie-rasteniy.
33. Кабата-Пендиас А. Микроэлементы в почвах и растениях / А. Кабата-Пендиас, Х. Пандиас – Москва: МИР, 1989. – 439 с.
34. Ёрова Б. С. Роль микроэлементов в жизни растений: авторское исследование / Б. С. Ёрова, Г. М. Бекова // Вестник науки. – 2024. – № 2(71). – С. 693–697. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/rol-mikroelementov-v-zhizni-rasteniy-avtorskoe-issledovanie.
35. Ягодин Б. А. Кобальт в жизни растений / Б. А. Ягодин. – Москва: Наука, 1970. – 344 с.
36. Chatzistatis T. Physiological importance of manganese, cobalt and nickel and the improvement improvement of their uptake and utilization by plants / T. Chatzistatis // Plant Micronutrient Use Efficiency. – Amsterdam: Elsevier, 2018. – Chapter 7. – P. 123–135.
37. Hu X. Cobalt: an essential micronutrient for plant growth? / X. Hu, X. Wei, J. Ling, J. Chen // Frontiers in plant science. – 2021. – Vol. 12. – Article 768.
38. Битюцкий Н. П. Микроэлементы высших растений / Н. П. Битюцкий. – СПб: СПб. Гос. Ун-т. – 1999. – 232 с.
39. Иванищев В. В. Цинк в природе и его значение для растений / В. В. Иванищев // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2022. – № 2. – С. 35–49. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsink-v-prirode-i-ego-znachenie-dlya-rasteniy
40. Mousavi S. R. Zinc (Zn) importance for crop production / S. R. Mousavi, M. Galavi, M. Rezaei // International journal of Agronomy and Plant Production. – 2013. – № 4 (1). – P. 64–68.
41. Schmidt S. B. The biochemical properties of manganese in plants / S. B. Schmidt, S. Husted // Plants. – 2019. – Vol. 8, № 10. – P. 381–395.
42. Рогачева С. М. Влияние растворимых соединений марганца на высшие растения и оценка фитоэкстракционной способности растений / С. М. Рогачева, А. Ф. Каменец, Н. А. Шилова //

Известия Самарского научного центра РАН. – 2016. – № 53. – С. 484–488. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-rastvorimyh-soedineniy-margantsa-na-vysshie-rasteniya-i-otsenka-fitoekstraktsionnoy-sposobnosti-rasteniy
43. Alejandro S. Manganese in Plants: From Acquisition to Subcellular Allocation / S. Alejandro, B. Höller, E. Meier [et.al] // Frontiers in plant science. – 2020. – Vol. 11. – Article 30.
44. Медведев И. Ф. Тяжелые металлы в экосистемах / И. Ф. Медведев, С. С. Деревягин. – Саратов: Ракурс, 2017. – 178 с.
45. Фазлыева А. С. Влияние кадмия на здоровье населения и способы профилактики его токсических эффектов / А. С. Фазлыева, Р. А. Даукаев, Д. О. Каримов // Медицина труда и экология человека. – 2022. – № 1. – С. 220–235. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-kadmiya-na-zdorovie-naseleniya-i-sposoby-profilaktiki-ego-toksicheskih-effektov

THE CURRENT AGROECOLOGICAL STATE OF ARABLE LAND IN THE FROSTY PART OF THE CRIMEA, TAKING INTO ACCOUNT THE CROPS GRAINED

Kobechinskaya V. G., Beneskriptob A. B.

Institute of Biochemical Technologies, Ecology and Pharmacy (structural unit) of the Crimean Federal University named after V. I. Vernadsky, Simferopol, Republic of Crimea, Russia
E-mail: valekohome@mail.ru

The agroecological state of soils is a set of indicators that allow us to assess the suitability of land plots for growing crops and producing plant-based products of a certain quality. In the foothill zone of Crimea, in general, there is a general trend of deterioration of soil fertility in agricultural lands. The data obtained at the end of the last century, when a comprehensive survey of the state of the soil cover was conducted, are outdated.

The research was conducted in the Simferopol district of the Republic of Crimea. Unfortunately, there is a clear violation of agricultural practices in the use of arable land, with a complete abandonment of crop rotation and the prolonged cultivation of the same crops, especially in farms. In 2024, 324 hectares were surveyed, and 35 combined samples were collected and compared with archival data from 2019.

A total of 9 plots were selected: 5 of them were used for annual crops (winter wheat, flax, winter barley and sunflower), 3 plots were used for perennial crops (fruit trees – sweet cherry, wine grape variety Aligote and table grape variety Cardinal), and the control plot was a virgin steppe. The selected samples were analyzed for humus content, soil solution pH, mobile phosphorus and exchangeable potassium content, trace elements (copper, cobalt, zinc and manganese) and heavy metals (lead and cadmium).

In the Simferopol region, with intensive agriculture, the application of phosphorus fertilizers is very insignificant and insufficient. So, at site No. 4, the content of mobile phosphorus dropped to a critical value (10 mg/kg). If the use of phosphorous fertilizers is not increased, the grain harvest will not exceed 10–15 kg/ha, which is no longer profitable. In previous periods, it was traditionally believed that there was a natural abundance of potassium in the fertile layer of soil due to the high content of clay fractions, so it was not added to the Crimean soils. However, in recent years, there has been a steady decrease in

the content of mobile forms of potassium in all areas where agricultural crops are grown, which is attributed to the removal of this element by plants. Therefore, the need for potassium fertilizers should be determined on a case-by-case basis, taking into account not only the content of potassium, but also the types of crops being grown.

In all the plots, the copper content increased over time, but it should be noted that the increase was not uniform. In the plots where annual crops were grown, the increase in copper content was 0.02 to 0.19 mg/kg over a period of 5 years. In the soils under vineyards and orchards, the increase in copper content was significantly higher due to the use of copper-containing fungicides.

In 2024, compared to 2019, there was an increase in the content of mobile cobalt in all the cultivated areas, but it was insignificant, ranging from 0.01 mg/kg in area 5 to 0.1 mg/kg in area 3. This is due to the use of fertilizers, primarily phosphorus-based fertilizers. The content of mobile zinc in the soils of agricultural areas is significantly lower than in the soil of the control area. This is because zinc is removed by the cultivated crops. This element is added to fertilizers, which helps to compensate for its deficiency. Since the amount of this element varies greatly among different plant species, and different amounts of fertilizers are applied, the amount of this element varies accordingly. For perennial crops, fertilizers containing micronutrients are usually applied separately, while for annual crops, micronutrients are applied only as additives to fertilizers containing the main nutrients. Therefore, annual crops tend to extract more mobile zinc than fruit plants.

Manganese is a highly mobile element that is easily absorbed by plants, which explains the higher content of this micronutrient in the soil of the control plot compared to the cultivated agrocenoses. The annual dynamics of manganese content in the plots in the Simferopol region show a significant range of fluctuations, but no clear correlation has been found between the changes in manganese content in the soils of the plots.

Among a number of heavy metals, cadmium and lead are the most important, as they belong to the first hazard class. Cadmium is not an essential element for plants, but it can be effectively absorbed by the root system and leaves. The cadmium content in all the surveyed areas, both the cultivated and the control area, is low (0.03–0.06 mg/kg), significantly below the toxicity threshold (0.7 mg/kg), so the soils of the Simferopol region are relatively safe in terms of this element, although there is a clear trend of increasing its content over the years studied.

Lead has a significant inhibitory effect on many enzymes that play a key role in basic metabolic processes. In plots 2, 5, 6, and 8, the increase in lead compared to 2019 ranged from 0.11 mg/kg to 0.29 mg/kg, while in the remaining plots, the increase ranged from 0.01 mg/kg to 0.07 mg/kg. The increase in lead in the soil is more significant in areas located near highways.

Based on the data obtained, we recommend increasing the doses of phosphorus and organic fertilizers. The application of potassium fertilizers, which was not previously carried out, has become relevant. The need for and doses of these fertilizers should be determined on a case-by-case basis, taking into account not only the content levels, but also the type of crops being grown.

***Keywords*:** agroecological conditions, arable land, agrochemical indicators, deterioration of fertility, the foothill regions of Crimea.

References

1. Ergina E. I., Artemova E. I. Research on the Processes of Soil Formation and Soil Degradation in the Crimea (Historical and Geographical Review), *Scientific Notes of the Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology*, **10 (76**), 1, 52 (2024).
2. Yena V. G., Yena Al. V., Yena An. V. *Discoverers of the Crimean Land,* 520 (Simferopol: Business-Inform, 2007).
3. Dokuchaev V. V. *Russian Chernozem*, **1**, 480 (Moscow-Leningrad: USSR Academy of Sciences, 1948).
4. Klepinin N. N. *Soils of the Crimea*, 123 (Simferopol: Krymizdat, 1935).
5. Kochkin M. A. *Soils, forests, and climate of the mountainous Crimea and ways of their rational use. Fundamentals of rational use of soil and climatic conditions in agriculture*, 303 (Moscow: Kolos, 1972).
6. Polovitsky I. Y., Gusev P. G. *Soils of the Crimea and Increasing Their Fertility*, 152 (Simferopol: Tavriya, 1987).
7. Dragan N. A. *Soil Resources of Crimea*, 208 (Simferopol: Dolya, 2004).
8. Russian Federation. Laws. *On Environmental Protection: Soil.* Federal Law No. 7-FZ: [adopted by the State Duma on December 20, 2001; approved by the Federation Council on December 26, 2001]. **2**, **133** (Collection of Laws of the Russian Federation, 2002).
9. Russian Federation. Laws. *On State Regulation of Ensuring the Fertility of Agricultural Land*: Federal Law No. 101-FZ: [adopted by the State Duma on July 3, 1998: approved by the Federation Council on July 9, 1998]. **29**, **3399** (Collection of Laws of the Russian Federation, 1998).
10. Russian Federation. Laws. *On the Development of Agriculture*: Federal Law No. 264-FZ: [adopted by the State Duma on December 22, 2006: approved by the Federation Council on December 27, 2006]. **51, 27** (Collection of Laws of the Russian Federation, 2007).
11. Russian Federation. Laws. *On the circulation of agricultural land: Federal La*w No. 101-FZ: [adopted by the State Duma on June 26, 2002: approved by the Federation Council on July 7, 2002], 30, **3018** (Collection of Laws of the Russian Federation, 2002).
12. Law of the Republic of Crimea: *On Particularly Valuable Productive Agricultural Land in the Republic of Crimea*. Adopted on October 30, 2020. **123-ZRK** (Simferopol, 2020). URL://https:/file://C:/Users/poisk/Downloads/123%D0%97%D0%A0%D0%9A%20%20%2030102020.pdf
13. Makarov V. I. *Agroecological Assessment of Lands*, 104 (Izhevsk: Izhevsk State Agricultural Academy, 2015).
14. Shakirov V. Z., Nuriev V. Z., Lukmanov A. N. Dynamics of humus content and balance in soils of the Republic of Tatarstan, *Agrochemical Bulletin*. **3,** 6 (2006). URL:https://cyberleninka.ru/article/n/dinamika-soderzhaniya-i-balans-gumusa-v-pochvah-respubliki-tatarstan
15. *Social and economic passport of the Simferopol District as of 01.04.2024.* Government of the Republic of Crimea: official website (13.05.2024). URL: https :// simfmo.rk.gov.ru.
16. Ivanchenko V. I., Rybalko E. A., Baranova N. V., et. al. Assessment of Soil Indicators in the Simferopol Region for Multipurpose Grape Production, *Russian Grapes*, **10,** 156 (2019).
17. Koba V. P., Sakhno T. M. Soil Fertility and Yield of Grain and Legume Crops in Crimea, *AgroEcoInfo*, **2** (2020).
18. *Water Resources as the Basis for Sustainable Development in Crimea*: A Collective Monograph / Edited by V. S. Pashtetsky, 216 (Simferopol: IT "ARIAL", 2022).
19. Ved I. P. Klimaticheskiy Atlas of the Crimea. Appendix to the scientific and practical discussion and analytical collection "*Issues of the Crimea's Development*", 120 (Simferopol: Tavriya-Plus, 2000).
20. Potanin D. V., Ivanova M. I., Danilenko V. Y. *Agroclimatic Atlas of the Republic of Crimea*, 306 (Simferopol: Poliprint, 2023).
21. GOST 26213-2021. *Soils. Methods for Determining Organic Matter* / Interstate Council for Standardization, Metrology, and Certification. 8 (Moscow: Russian Institute of Standardization, 2021).
22. GOST 26423-85. *Soils. Methods for Determining Specific Electrical Conductivity, pH, and Dense Residue of an Aqueous Extract*, 5 (Moscow: Standartinform, 2011).
23. GOST 26205-91. *Soils. Determination of mobile phosphorus and potassium compounds by the Machigin method in the modification of TsINAO* / USSR Committee for Standardization and Metrology, 8 (Moscow: Standards, 1992).

24. RD 52.18289-90 MU. *Method for Measuring the Mass Fraction of Mobile Forms of Metals (Copper, Lead, Zinc, Nickel, Cadmium, Cobalt, Chromium, and Manganese) in Soil Samples by Atomic Absorption Analysis* / State Committee of the USSR for Hydrometeorology, 11 (Moscow: State Committee of the USSR for Hydrometeorology, 1990).
25. Sychev V. G. *The current state of soil fertility and the main aspects of its regulation*: monograph, 328 (Moscow: RAS, 2019).
26. Morina O. M., Derbeneva A. M., Morin V. A. *Soil Science*, 370 (Khabarovsk: TSU, 2013).
27. Sokolova T. A., Tolpeshta I. I., Trofimov S. Ya. *Soil acidity. Acid-base buffering of soils. Aluminum compounds in the solid phase of soil and in the soil solution,* 124 (Tula: Grif and K, 2012).
28. Alimkulov S. O., Muradova D. K. The Biological Role of Phosphorus in Plant Life. *Young Scientist*, **10 (90**), 44 (.2015), URL: https://moluch.ru/archive/90/18916/
29. Samsonova N. E. *Fundamentals of Plant Mineral Nutrition and Fertilizer Application Technology*, 256 (Smolensk: Smolensk State Agricultural Academy, 2021).
30. Sychevsky M. E., Vinnik A. L., Kosulina V. I. Thirty-five-year dynamics of mobile phosphate content in Crimean soils in connection with the use of fertilizers. *Scientific Works of the Southern Branch of the National University of Bioresources and Environmental Engineering of Ukraine "Crimean Agrotechnological University"*, **96,** 70 (2006).
31. Kosolapov V. M., Chuikov V. A., Khudyakov Kh. K., Kosolapova V. G. *Mineral elements in feed and methods of their analysis:* monograph, 272 (Moscow: «Ugreshskaya» Printing House LLC, 2019). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/izuchenie-vliyaniya-ionov-kaliya-kaltsiya-i-magniya-na-rost-i-razvitie-rasteniy.
32. Zhurova V. G., Svetlichnaya M. S. Study of the Effect of Potassium, Calcium, and Magnesium Ions on Plant Growth and Development, *Advances in Science and Education*, **14(36),** (2018). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/izuchenie-vliyaniya-ionov-kaliya-kaltsiya-i-magniya-na-rost-i-razvitie-rasteniy
33. Kabata-Pendias A., Pendias H. *Trace Elements in Soils and Plants*, 439 (Moscow: MIR, 1989).
34. Yorova B. S., Bekova G. M. The Role of Micronutrients in Plant Life: An Author's Study. *Bulletin of Science*. **2(71**), 693 (2024). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/rol-mikroelementov-v-zhizni-rasteniy-avtorskoe-issledovanie
35. Yagodin B. A. *Cobalt in the Life of Plants*, 344 (Moscow: Nauka, 1970).
36. Chatzistatis T. Physiological importance of manganese, cobalt and nickel and the improvement improvement of their uptake and utilization by plants, *Plant Micronutrient Use Efficiency*, **7**, 123 (Amsterdam: Elsevier, 2018).
37. Hu X., Wei X., Ling J., Chen J. Cobalt: an essential micronutrient for plant growth? *Frontiers in plant science*. **12,** 768 (2021).
38. Bityutskiy N. P. *Microelements of higher plants*, 232 (St. Petersburg: St. Petersburg State University Univ., 1999).
39. Ivanishchev V. V. Zinc in Nature and Its Significance for Plants. *Izvestiya TulGU. Earth Sciences*. **2,** 35 (2022). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsink-v-prirode-i-ego-znachenie-dlya-rasteniy
40. Mousavi S. R., Galavi M., Rezaei M. Zinc (Zn) importance for crop production, *International journal of Agronomy and Plant Production.* **4 (1)**, 64 (2013).
41. Schmidt S. B., Husted S. The biochemical properties of manganese in plants. *Plants*, **8, 10**, 381 (2019).
42. Rogacheva S. M., Kamenets A. F., Shilova N. A. Influence of Soluble Manganese Compounds on Higher Plants and Assessment of Plant Phytoextraction Capacity, *Izvestiya of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. **53**, 484, (2016). URL:https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-rastvorimyh-soedineniy-margantsa-na-vysshie-rasteniya-i-otsenka-fitoekstraktsionnoy-sposobnosti-rasteniy
43. Alejandro S., Höller B., Meier E., et.al. Manganese in Plants: From Acquisition to Subcellular Allocation. *Frontiers in plant science,* **11**, **30**, (2020).
44. Medvedev I. F., Derevyagin S. S. *Heavy Metals in Ecosystems*, 178 (Saratov: Rukurs, 2017).
45. Fazlyeva A. S., Daukaev R. A., Karimov D. O. The impact of cadmium on public health and methods of preventing its toxic effects, *Occupational Medicine and Human Ecology*, **1**, 220 (2022). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-kadmiya-na-zdorovie-naseleniya-i-sposoby-profilaktiki-ego-toksicheskih-effektov

Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского
Биология. Химия. Том 12 (78). 2026. № 2. С. 111–127.

УДК 574.47 (292.471)
DOI 10.5281/ZENODO.20787885

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА И ЖИЗНЕННОЕ СОСТОЯНИЕ НАСАЖДЕНИЙ СОСНЫ КРЫМСКОЙ (*PINUS NIGRA SUBSP. PALLASIANA*) В ПРЕДГОРНОМ КРЫМУ

Костромитин И. С.

Институт биохимических технологий, экологии и фармации (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский Федеральный университет им. В. И. Вернадского», Симферополь, Республика Крым, Россия
E-mail: kostromitinivanyalta@mail.ru

Было произведено исследование пространственной структуры лесозащитной полосы, состоящей из сосны крымской (*Pinus nigra* subsp. *pallasiana* (Lamb.) Holmboe), функционирующего в агроландшафте предгорного Крыма на протяжении более шести десятилетий (с 1960-х гг.). Дендрометрический анализ выявил следующие морфометрические параметры: средняя высота – 10,3 ± 0,2 м, поперечник крон – 6,9 ± 0,3 м, диаметр стволов – 26,5 ± 0,2 см. По методике В.А. Алексеева определен индекс относительного жизненного состояния (ОЖС) на уровне 70,3%, что квалифицирует насаждение как ослабленное. Показатель напряжённости роста (КОП) равен 1,87 ± 0,10 см/см². Между данными показателями выявлена достоверная статистически значимая обратная связь ($R = -0,92$, $p < 0,05$). Результаты исследований, проведённых в 2024–2025 гг., свидетельствуют о неблагоприятных эколого-биологических условиях произрастания данного вида, а также влиянии антропогенного фактора.
Ключевые слова: предгорный Крым, лесозащитные насаждения, сосна крымская, экологические условия произрастания, таксационные показатели древостоя, жизненное состояние, антропогенная нагрузка.

ВВЕДЕНИЕ

Полезащитные лесополосы, или лесозащитные полосы, представляют собой ряды деревьев и кустарников, высаженные среди пахотных земель, на пастбищах, вдоль дорог и каналов, а также на склонах и оврагах. Они играют ключевую роль в защите почвы от эрозии, уменьшая скорость ветра, что предотвращает выдувание верхнего её слоя и снижает риск пыльных бурь [1–3]. Способствуют задержанию снега на полях, что увеличивает запасы влаги в почве весной [4]. Улучшают водный режим территории, уменьшая поверхностный сток и снижая риск наводнений. Помогают поддерживать уровень грунтовых вод, что особенно важно в засушливых регионах.

Лесополосы оказывают положительное влияние на урожайность сельскохозяйственных культур, защищая поля от ветровой эрозии и улучшая микроклимат, создавая более благоприятные условия для роста растений [5, 6]. Исследования показывают, о возможном увеличении урожайности на 10–25 % на участках вблизи лесополос в сравнении с участками открытой степи [4]. Также

способствуют снижению затрат на ирригацию и удобрения. За счет улучшения водного режима и сохранения влаги в почве они уменьшают потребность в дополнительном поливе. Что крайне актуально для условий Крымского полуострова, где основным ограничивающим фактором для сельскохозяйственных культур является недостаточное количество влаги в период вегетации. Кроме того, лесополосы способствуют накоплению органического вещества в почве, улучшая её плодородие и снижая необходимость в использовании химических удобрений [7]. Способствуя увеличению биоразнообразия в агроландшафтах, создают среду обитания для множества видов растений и животных, служат убежищем для птиц, насекомых и мелких млекопитающих. Лесополосы также играют роль экологических коридоров, соединяя разрозненные природные участки и способствуя миграции видов [8]. Выполняют важные экосистемные услуги, такие как поглощение углекислого газа и производство кислорода, способствуя улучшению качества воздуха и снижению уровня загрязнения, положительно сказываясь на здоровье людей и животных [7].

Первые посадки деревьев вокруг участков пашни произведены еще в 1809 году В. Я. Ломиковским. Научные основы создания полезащитных лесополос возникли в конце XIX века в ответ на проблемы эрозии почв и ухудшения климатических условий. Они принадлежат В. В. Докучаеву и Г. Н. Высоцкому. Начало создания лесозащитных полос как масштабного проекта приходится на решение партии и правительства по хозяйственным вопросам для защиты сельскохозяйственных угодий в 1917–1930е годы. В 1929–1932 годах в СССР была создана программа по выращиванию лесозащитных насаждений, направленная на обеспечение устойчивой урожайности в засушливых регионах Ю-В СССР, в рамках которой высажена 21 тысяча гектаров лесных полос. Уже в 1933–1937 годах площадь лесопосадок достигла 278 тысяч гектаров. А государственные решения 1938, 1948 и 1967 годов последовательно закрепляли стратегический курс на развитие защитного лесоразведения. К 1974 году совокупный фонд полезащитных насаждений в СССР превысил 1,3 миллиона гектаров [4]. Исходя из данных Н. Н. Агапонова и А. И. Ковальского, начиная с 1950х годов в Крыму было создано около 75 тысяч гектар лесозащитных насаждений [9]. Из них за период с 1968 по 1998 год было заложено более 16 тысяч гектар таких насаждений [10]. Сильное влияние на это оказало широкое применение механизации, особенно государственной политики тех лет.

На сегодня, в связи с изменением форм собственности, земельные участки распаёваны, что оказывает отрицательное влияние и на лесозащитные насаждения. Большинство земельных участков в регионе принадлежат небольшим фермерским хозяйствам, которые не имеют ресурсов для создания, поддержания и ремонта лесозащитных насаждений, а государственные программы только начинают появляться. В следствие чего немалая часть таких насаждений находится в неудовлетворительном санитарном состоянии, а всего на полуострове от когда-то существующих посадок осталось менее 30 % [11, 12].

В начале 1970-х годов сосна крымская (*Pinus nigra subsp. pallasiana* (Lamb.) Holmboe [13] нашла широкое применение в агролесомелиоративных посадках. Её

использовали для создания преимущественно чистых по составу насаждений, размещенных в четыре ряда с посадочной схемой 4×1 метр [14]. Анализ публикаций, посвященных сосне крымской в системе степного и лесостепного защитного лесоразведения, охватывает множество аспектов её использования и особенностей. Основное внимание уделяется онтогенезу и морфологии [15], различным методам увеличения всхожести семян [16], закономерностям роста в различных фитоценозах [8], а также водно-минеральным особенностям произрастания древостоев [13, 16, 17]. Особое место в современных исследованиях занимают вопросы оценки состояния и эффективности полезащитных лесонасаждений с участием хвойных пород в условиях степного Крыма [1].

Однако в научной литературе существует нехватка данных о пространственной структуре и жизненном состоянии старовозрастных сосновых лесозащитных полос в условиях предгорного Крыма. Для региона этот вопрос особенно актуален и недостаточно освещен, что обусловило выбор темы данного исследования. Целью работы является комплексная оценка пространственной структуры и жизненного состояния старовозрастной лесозащитной полосы из сосны крымской (*Pinus nigra subsp. pallasiana* (Lamb.) Holmboe) в предгорном Крыму, выявление факторов, определяющих состояние древостоя, и разработка рекомендаций по оптимизации защитных насаждений региона.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Сосна крымская (Pinus *pallasiana* D. Don) – эндемичный вид Крыма и Причерноморья, характеризующийся высотой от 20 до 35 м, длинной хвоей (8–18 см) и тёмно-серой корой. Вид хорошо адаптирован к карбонатным почвам, засухоустойчив, светолюбив, что обусловливает его широкое применение в степном лесоразведении южных регионов России [13, 15, 16, 18].

В качестве объекта изучения выбрана старовозрастная защитная лесная полоса, сформированная искусственными насаждениями сосны крымской. Общая площадь насаждения, по спутниковому снимку, составляет около 1,8 га (протяжённость полосы около 810 м при средней ширине около 22 м, включая разреженные участки с выпавшими деревьями). Ранее для этого же объекта приводилась несколько меньшая величина – около 1,24 га (примерно 690 × 18 м) [20]; эта оценка, по-видимому, относится только к сохранившейся, более сомкнутой части полосы.Территориально насаждение локализовано в предгорной части Крымского полуострова, в 10 км к северо-востоку от Симферополя, на высоте порядка 170 м над уровнем моря. Согласно данным спутникового позиционирования Google, центр изучаемого участка имеет координаты 45°08'53,12" с.ш. и 34°17'24,83" в.д. По своим характеристикам данное насаждение является типичным образцом зрелых сосновых лесозащитных посадок крымского предгорья. Видовая принадлежность деревьев к сосне крымской подтверждается характерными морфологическими признаками: длинной хвоей (более 12 см), сидячими шишками и тёмно-серой глубокобороздчатой корой в нижней части ствола.

Выбор именно этого участка обусловлен рядом факторов. Помимо удобного географического расположения, существенную роль сыграло его соседство с разнообразными экосистемами: защитными посадками гледичии трехколючковой, фрагментами нетронутой степной растительности, сельскохозяйственными угодьями. Дополнительным преимуществом служит близость к транспортным путям. Совокупность этих условий формирует природно-антропогенный ландшафтный комплекс, открывающий широкие возможности для комплексных научных исследований [12].

Ранее на описываемой территории уже проводились исследования, посвящённые физико-химическим свойствам почвенного покрова, активности почвенных ферментов и сезонная динамика дыхания почвы. Полученные результаты отражены в более ранних работах [19, 20].

В границах лесополосы с восточной стороны на западную с интервалом 100 м были размечены учётные площадки для оценки таксационных показателей соснового древостоя. Полевые измерения проводились по стандартным методикам определения пространственного размещения деревьев, их высоты, диаметра стволов, размеров кроновой части и сомкнутости полога [21, 22]. Оценка жизнеспособности отдельных экземпляров осуществлялась с применением классификационной шкалы, принятой в практике лесопатологического мониторинга для характеристики ослабленных и погибающих древостоев (табл. 1) [23–25].

Таблица 1

Шкала категорий жизненного состояния деревьев

Категория	Диагностические признаки
I	Здоровые деревья: отсутствие внешних признаков ослабления.
II	Ослабленные деревья: умеренная ажурность кроны, редукция годичного прироста или повреждение до 1/3, единичное усыхание ветвей, локальные повреждения ствола или корней.
III	Сильно ослабленные деревья: ажурная крона с матовой хвоей, сильно укороченный прирост или его отсутствие, повреждение или усыхание до 2/3 хвои (ветвей), суховершинность, механические повреждения корневых лап и ствола.
IV	Усыхающие деревья: резкая ажурность, и хлоротичная осыпающаяся хвоя, повреждение более 2/3 хвои, массовое усыхание кроны, следы ксилофагов.
V	Свежий сухостой: деревья, усохшие в текущем или прошлом вегетационном периоде, с желтой или бурой хвоей либо без неё;
VI	Старый сухостой: деревья, усохшие в предшествующие годы, без хвои, с частично или полностью осыпавшейся корой и мелкими ветвями. Последние две категории (V и VI) объединялись в общую категорию «сухостой».

Примечание: категории V и VI объединялись в общую категорию «сухостой».

Оценка относительного жизненного состояния (ОЖС) древостоев лесозащитных полос проводилась с использованием расчетного индекса ОЖС, определяемого по относительной численности категорий деревьев согласно методике В. А. Алексеева [26, 27].

Расчет индекса состояния древостоев (L) в соответствии с распределением общей численности деревьев по различным категориям осуществлялся по формуле:

$$L = (100n_1 + 70n_2 + 40n_3 + 5n_4) / N \quad (1)$$

где n_1 – численность здоровых, n_2 – ослабленных, n_3 – сильно ослабленных, n_4 – отмирающих деревьев на пробной площади; N – общая численность деревьев на пробной площади, включая сухостойные.

Интерпретация значений индекса ОЖС осуществлялась следующим образом: при величине индекса в диапазоне 100-80% древостой классифицировался как здоровый, при 79–60 % – как ослабленный (поврежденный), при 59–20 % – как сильно ослабленный (сильно поврежденный), менее 20 % – как полностью разрушенный.

Коэффициент напряженности роста (КОП) рассчитывался по формуле [3]:

$$КОП = h / S \quad (2)$$

где h – высота дерева (см); S – площадь поперечного сечения ствола на высоте 1,3 м (см²).

Статистическая обработка результатов выполнялась в программной среде MS Excel с использованием общепринятых методов вариационной статистики [29].

Планирование исследований, обработка материалов и интерпретация результатов базировались на опыте аналогичных изысканий, изложенных в материалах публикаций [29, 30].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследуемая лесозащитная полоса сосны крымской (*Pinus nigra subsp. pallasiana* L.) была заложена в 1960-х годах прошлого столетия на богарных землях. Протяженность лесополосы составляет 810 метров.

По функциональному назначению она относится к категории основных, расположена в широтном направлении с востока на запад и обеспечивает защиту полей зерновых культур с южной стороны от ветровой эрозии, а также способствует задержанию снега и аккумуляции влаги.

По конструктивным особенностям лесополоса относится к продуваемому типу лесонасаждений.

Данная конструкция детерминируется, с одной стороны, биоэкологическими характеристиками главной древесной породы, с другой – зависит от способа размещения посадочных мест на лесокультурной площади.

В результате исследования горизонтальной пространственной структуры лесонасаждений из сосны крымской были определены следующие особенности. Анализ исторических данных и натурные обследования свидетельствуют о том, что лесополоса заложена по схеме четырехрядной полезащитной полосы из одной главной породы (*Pinus nigra subsp. pallasiana* L.) с шириной междурядий 3 м (рис. 1). Первоначальный шаг посадки в ряду по сохранившимся элементам древостоя точно не восстанавливается; для защитных насаждений сосны крымской в регионе он составлял около 1–1,5 м [14], что соответствует исходной густоте порядка 2200–3300 посадочных мест на гектар.



Рис. 1. Общий вид сосновой лесополосы (ориентация с востока на запад) в предгорной зоне Крыма. Справа – пшеничное поле.

В 1960-х годах в предгорном Крыму активно проводились работы по созданию лесозащитных насаждений из сосны крымской и гледичии трёхколючковой [12]. Исследуемая сосновая лесополоса территориально примыкает к гледичиевой, что указывает на их закладку в рамках единой программы лесомелиорации. Определение возраста насаждения по числу годичных колец на сохранившихся пнях сосны подтверждает время создания лесополосы 1960-ми годами прошлого столетия.

За период существования горизонтальная пространственная структура древесного агробиогеоценоза претерпела существенные изменения под влиянием эндогенных процессов развития древостоя, а также негативного воздействия естественных и антропогенных факторов. В связи с естественными и антропогенными факторами расстояние между деревьями в ряду составляет в среднем для сосновой лесополосы 4,9±0,2 метров (рис. 2).



Рис. 2. Текущее состояние схемы произрастания деревьев сосны крымской в предгорной зоне Крыма.

Изреживание древостоя обусловило снижение полноты насаждения и соответственно изменение диаметров и степени сомкнутости крон деревьев. Средний диаметр крон в целом по четырем рядам насаждения составляет 6,9±0,3 м (табл. 2). Крайние ряды насаждения характеризуются наибольшими диаметрами крон в условиях, где расстояние между стволами деревьев в ряду составляет преимущественно 3–4 м

При увеличении расстояния от 5 до 7 м диаметры крон варьируют незначительно. Между рядами с шириной междурядий в 3 м сомкнутость крон варьирует от 0,9 до 0,5, что обеспечивает реализацию продуваемого типа конструкции лесополосы.

Таблица 2

Статистические характеристики диаметра крон сосновой лесополосы

Статистические показатели	Исследуемые признаки
	Диаметр крон (м)
Среднее значение	6,9 ± 0,3
Ошибка средней, %	4,3
Медиана	7,0
Мода	7,0
Стандартное отклонение	2,1
Минимум	3,5
Максимум	11,0
Размах	7,5
Коэффициент вариации, %	30,4

Степень полноты насаждения и сомкнутости полога определяет как интенсивность светового потока, проникающего во внутреннее пространство лесополосы, так и формирование экологических ниш для внедрения в структуру древостоя других растительных видов. В целом для сосновой лесополосы задерненность почвы составляет 100 %. В затененных участках доминируют мезофильные злаки с преобладанием *Elymus repens* (L.) Gould, *Lolium pratense* (Huds.) Darbysh, *Poa nemoralis* L. и *Bromus inermis* Leyss., в более инсолированных участках – ксерофильные злаки с доминированием *Festuca rupicola* Heuff. и *Dactylis glomerata* L. в сопровождении разнотравья.

Продуваемая конструкция лесополосы детерминируется особенностями вертикальной структуры насаждения и зависит от биоэкологических характеристик сосны крымской и экологических факторов среды. Вертикальная структура древостоя определялась по высоте приземной части стволов и крон деревьев. Средняя высота древостоя составляет 10,3 ± 0,2 м (табл. 3).

Продуваемая часть конструкции насаждений сосны обеспечивается поднятием крон на высоту в среднем 4,2 ± 0,1 м при минимуме 2,5 м и максимуме 6,0 м. Протяженность кроны в среднем составляет 6,1 ± 0,3 м.

Согласно данным индекса кроны все деревья классифицируются как растения с длинной кроной. При этом индекс кроны в среднем составляет 0,59 при минимальном значении 0,45 и максимальном 0,72. Распределение деревьев по классам индекса кроны характеризуется следующим образом: 48 % деревьев находятся в интервале индекса кроны 0,55–0,64, 32 % в интервале 0,45–0,54 и 20 % – 0,65–0,74.

Таблица 3

Таксационные показатели насаждений сосны крымской по высотным характеристикам древостоя

Статистические показатели	Исследуемые признаки древостоя		
	Высота древостоя	Высота ствола от земли до первой живой ветви	Высота кроны от первой живой ветви до верхушки дерева
Среднее значение (м)	10,3 ± 0,2	4,2 ± 0,1	6,1 ± 0,3
Минимум (м)	7,5	2,5	4,0
Максимум (м)	13,5	6,0	9,5
Коэффициент вариации (%)	15,2	21,5	18,7

Таким образом, продуваемая часть конструкции насаждений сосны, представленная штамбами деревьев, в среднем по высоте составляет 4,2 ± 0,1 м при минимуме 2,5 м и максимуме 6,0 м. Дифференциация высоты штамбов по рядам варьирует от 3,8 м до 4,5 м. В данной вариабельности прослеживается влияние различий в освещенности деревьев, что инициирует естественное отмирание нижних ветвей кроны и соответственно увеличение длины приземной части стволов.

Важным конструктивным параметром продуваемой части является не только высота штамба, но и диаметр ствола на стандартной высоте 1,3 м. В целом для лесополосы средний диаметр древостоя сосны крымской составляет 26,5 ± 0,2 см при минимуме 14,3 см и максимуме 36,6 см (табл. 4). Такие значительные диаметры стволов характерны для старовозрастных сосновых насаждений и свидетельствуют о благоприятных условиях для радиального прироста в начальные десятилетия жизни древостоя.

Обобщая полученные данные по характеристикам крон и стволов деревьев, можно констатировать, что продуваемая конструкция насаждения сосны характеризуется следующими параметрами. При средней высоте древостоя 10,3 м на продуваемую часть лесополосы приходится 40,8 %, что соответствует нормативным требованиям к продуваемым лесополосам.

Таблица 4

Статистические характеристики диаметра стволов сосновой лесополосы

Статистические показатели	Диаметр ствола (см)
Среднее значение	26,5 ± 0,2
Ошибка средней, %	0,7
Медиана	26,1
Мода	25,5
Стандартное отклонение	5,9
Минимум	14,3
Максимум	36,6
Размах	22,3
Коэффициент вариации, %	22,2

Степень инсоляции оказывает существенное влияние на жизненное состояние как отдельных деревьев, так и древостоя в целом. Проведенные исследования позволили установить, что в целом состояние древостоя сосны крымской классифицируется как ослабленное, при этом индекс ОЖС составляет 70,3 % (табл. 5).

Таблица 5

Распределение деревьев по категориям относительного жизненного состояния в насаждении сосны крымской с дифференциацией по рядам

Лесополоса (ряды)	Распределение деревьев по категориям ОЖС (%)				Индекс ОЖС (%) и категория состояния
	1	2	3	4	
Насаждение в целом	32,5	45,0	15,0	7,5	70,3±2,2 (ослабленное)
I ряд (со стороны целины)	70,0	20,0	10,0	0,0	88,0±3,4 (здоровое)
II ряд (внутренний первый)	20,0	50,0	20,0	10,0	63,5±4,2 (ослабленное)
III ряд (внутренний второй)	10,0	60,0	20,0	10,0	60,5±4,2 (ослабленное)
IV ряд (со стороны пашни)	30,0	50,0	10,0	10,0	69,5±4,3 (ослабленное)

Примечание. Распределение деревьев по категориям ОЖС: 1 – здоровые; 2 – ослабленные; 3 – сильно ослабленные; 4 – усыхающие.

Индекс относительного жизненного состояния в целом для древостоя лесополосы составляет 70,3 ± 2,2 %. При этом лишь 32,5 % деревьев относятся к

категории здоровых, 45,0 % классифицируются как ослабленные, 15,0 % – как сильно ослабленные и 7,5 % – как усыхающие. Минимальное среднее значение (60,5 ± 4,2) ОЖС зафиксировано для третьего внутреннего ряда, максимальное (88,0 ± 3,4) – для первого крайнего ряда, расположенного со стороны целинной степи. Доля здоровых деревьев в I ряду превышает аналогичный показатель во II ряду на 50 %, в IV ряду на 40 % и в III ряду на 60 %.

Для верификации полученных результатов дополнительно был рассчитан коэффициент напряженности роста (КОП), который выражает отношение высоты дерева к площади его поперечного сечения.

Помимо характеристики состояния древостоев, КОП является важным критерием оценки оптимальности их густоты [23, 31]. Расчеты показали, что значение коэффициента напряженности роста древостоя сосны крымской в среднем составляет 1,87 ± 0,10 см/см² с варьированием в пределах от 0,89 до 3,45 см/см.

Вычисление КОП для отдельных рядов выявило, что наименьшим значением коэффициента 1,48 см/см² характеризуется I ряд лесополосы, расположенный со стороны целинной степи, наибольшим – III внутренний ряд с показателем 2,27 см/см² (табл. 6).

Таблица 6

Средние значения ОЖС и КОП древостоя в насаждении сосны крымской с дифференциацией по рядам

Лесополоса (ряды)	ОЖС, %	КОП, см/см²
Насаждение в целом	70,3	1,87
I ряд (со стороны целины)	88,0	1,48
II ряд (внутренний первый)	63,5	2,07
III ряд (внутренний второй)	60,5	2,27
IV ряд (со стороны пашни)	69,5	1,78
Категория «здоровые деревья»	80-100	1,58
Категория «ослабленные деревья»	79-50	2,17

Полученные данные свидетельствуют о наличии обратной корреляционной зависимости между показателями ОЖС и КОП. Снижение показателя ОЖС от I ряда (88,0 %), через IV (69,5 %) и II (63,5 %) к III (60,5 %) сопровождается увеличением КОП: 0,15–0,18–0,21–2,27 см/см² соответственно. Обратная корреляционная связь подтверждается коэффициентом корреляции $R = -0,92$ ($p<0,05$).

Сопоставление результатов исследований ОЖС и КОП позволяет сформулировать предварительное заключение о том, что для чистых насаждений сосны крымской, произрастающей на черноземных почвах предгорного Крыма, при ОЖС = 80–100 % и категории состояния древостоя «здоровый» оптимальное среднее значение КОП составляет 1,58 см/см², а для ослабленных древостоев с ОЖС = 79–50 % среднее значение КОП равно 2,17 см/см².

Комплексный анализ жизненного состояния древостоя в целом и отдельных деревьев указывает на то, что экологические условия для произрастания сосны крымской в монодоминантных насаждениях на черноземных почвах предгорий являются субоптимальными. Несмотря на то, что сосна крымская считается более засухоустойчивой породой по сравнению с сосной обыкновенной и более экономна в расходовании влаги [34], ослабленное состояние древостоя может быть обусловлено совокупностью факторов. Во-первых, недостаточным количеством атмосферных осадков в засушливые периоды. Согласно данным В. П. Исикова и Н. Н. Трикоз [35], в 2019–2020 гг. в Крыму наблюдался катастрофический дефицит осадков: осенью 2019 г. – 40 % от нормы, весной 2020 г. – 87 % от нормы на протяжении 60 дней. При влажности почвы ниже 10 % рост корней у хвойных пород прекращается полностью, что приводит к ослаблению и гибели деревьев [35]. Во-вторых, интенсивной внутривидовой конкуренцией за водные и минеральные ресурсы в условиях монодоминантных насаждений. В-третьих, выраженным антропогенным воздействием, включающим незаконные рубки отдельных деревьев, рекреационную нагрузку и возможное механическое повреждение корневых систем при обработке прилегающих агроценозов. Следует отметить, что сосна крымская обладает низкой степенью поражения корневой губкой и может рассматриваться как экологически замещающая порода сосны обыкновенной в степных и лесостепных условиях [34]. Выпадение деревьев из структуры лесопосадки носит комплексный характер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. По конструктивным особенностям лесополоса классифицируется как продуваемый тип лесонасаждения. Изначально была заложена по схеме четырехрядной полезащитной полосы из одной главной породы (*Pinus nigra subsp. pallasiana* L.) с шириной междурядий 3 м; первоначальный шаг посадки в ряду составлял около 1–1,5 м [14].
2. В настоящее время среднее расстояние между деревьями в ряду составляет 4,9 ± 0,2 метра. Средний диаметр крон по четырем рядам равен 6,9 ± 0,3 м, средний диаметр стволов – 26,5 ± 0,2 см. Вертикальная структура представлена древостоем средней высотой 10,3 ± 0,2 м, при этом на кроны приходится 6,1 ± 0,3 м длины, на приземную часть стволов – 4,2 ± 0,1 м.
3. Коэффициент напряженности роста составляет 1,87 ± 0,10 см/см² с варьированием от 0,89 до 3,45 см/см². Между показателями ОЖС и КОП установлена статистически значимая обратная корреляционная зависимость ($R = -0,92$, $p<0,05$).
4. Индекс относительного жизненного состояния в целом для древостоя лесополосы составляет 70,3 ± 2,2 %, что соответствует градации «ослабленное» насаждение. При этом лишь 32,5 % деревьев классифицируются как здоровые, 45,0 % – как ослабленные, 15,0 % – как сильно ослабленные и 7,5 % – как усыхающие.
5. Выявленное ослабленное жизненное состояние древостоя и значительная доля поврежденных деревьев указывают на субоптимальность экологических

условий для произрастания сосны крымской в монодоминантных насаждениях на черноземных почвах предгорий. Основными лимитирующими факторами выступают дефицит влагообеспеченности в засушливые периоды и значительное антропогенное воздействие.

6. Полученные результаты могут быть использованы при планировании мероприятий по реконструкции и оптимизации лесозащитных насаждений в предгорном Крыму, а также при разработке региональных программ агролесомелиорации.
7. При создании новых лесозащитных полос в условиях предгорного Крыма рекомендуется использование смешанных насаждений с участием как хвойных (сосна крымская), так и лиственных пород (дуб пушистый, гледичия трёхколючковая, скумпия кожевенная), что будет способствовать повышению биологической устойчивости и долговечности защитных насаждений.

Список литературы

1. Дубенок Н. Н. Состояние и ветрорегулирующая эффективность полезащитных лесонасаждений с участием хвойных пород в условиях степного Крыма / Н. Н. Дубенок, В. В. Танюкевич, Р. В. Салогуб, А. К. Кулик // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2017. – № 4 (48). – С. 16–21.
2. Wang F. A functional-structural Mongolian Crimean pine (*Pinus nigra subsp. pallasiana* var. *mongolica*) model integrating architecture, biomass and effects of precipitation / Wang F., Letort V., Lu Q., Bai X., Guo Y., de Reffye P., Li B. // PLoS ONE. – 2012. – Vol. 7(8). – e43531. doi:10.1371/journal.pone.0043531
3. Zheng X. Assessment of the effects of shelterbelts on crop yields at the regional scale in Northeast China / Zheng X., Zhu J. J., Xing Z. // Agricultural Systems. – 2016. – Vol. 143. – P. 49–60. doi:10.1016/j.agsy.2015.12.008
4. Никитин П. Д. Выращивание полезащитных лесных полос / П. Д. Никитин. – Москва: Колос, 1972. – 101 с.
5. Избранные труды научной школы эрозиоведения А. С. Козменко – Г. П. Сурмача в четырех томах. Т. 2. – Волгоград: ФНЦ агроэкологии РАН, 2023. – 608 с.
6. Ma Q. Appraisal of tree planting options to control desertification: Experiences from the Three-North Shelterbelt Programme / Ma Q. // International Forestry Review. – 2004. – Vol. 6. – P. 327–334.
7. Багрова Л. А. Искусственные лесозащитные насаждения в Крыму / Л. А. Багрова, Л. Я. Гаркуша // Экосистемы, их оптимизация и охрана. – Симферополь: ТНУ, 2009. – Вып. 20. – С. 134–145.
8. Jose S. Agroforestry for conserving and enhancing biodiversity / Jose S. // Agroforestry Systems. – 2012. – Vol. 85. – P. 1 Jose S. 8. doi:10.1007/s10457-012-9517-5
9. Агапонов Н. Н. Путеводитель по объектам лесной лесомелиорации горного Крыма / Н. Н. Агапонов, А. И. Ковальский. – Симферополь, 2004. – 142 с.
10. Мишнев В. Г. О значении и состоянии полезащитного лесоразведения в Крыму / В. Г. Мишнев, Н. И. Цыплаков // Экосистемы Крыма, их оптимизация и охрана. – Симферополь: ТНУ, 2001. – Вып. 11. – С. 12–14.
11. Агапонов М. Н. Захисні насадження Криму: Сучасний стан і перспективи розвитку / М. Н. Агапонов, Ю. П. Швець, О. О. Неонета, О. Ю. Астапов // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – Київ, 2010. – Вип. 152, Ч. 2. – С. 285–289.
12. Громенко В. М. Пространственная структура и жизненное состояние насаждений гледичии трехколючковой (*Gleditsia triacanthos* L.) в предгорном Крыму / В. М. Громенко, А. В. Ивашов, В. Г. Кобечинская, А. И. Алексеева // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия. – 2023. – Том 9 (75), № 1. – С. 53–68.
13. World Flora Online. Pinus nigra subsp. pallasiana (Lamb.) Holmboe [Электронный ресурс]. – URL: https://wfoplantlist.org/taxon/wfo-0000736744-2025-12 (дата обращения: 26.01.2026).

14. Манаенков А. С. Водно-минеральные особенности субстрата и засухоустойчивость древостоя сосны / А. С. Манаенков, А. К. Кулик // Лесохозяйственная информация. – 2017. – № 2(4). – С. 46–56.
15. Онтогенетический атлас растений: научное издание. Том VII / Отв. и науч. ред. проф. Л. А. Жукова. – Йошкар-Ола: Мар. гос. ун-т, 2013. – 364 с.
16. Каппер О. Г. Хвойные породы / О. Г. Каппер. – М.: Гослесбумиздат, 1954. – 303 с.
17. Song L. Sources of water used by *Pinus nigra subsp. pallasiana* var. *mongolica* trees based on stable isotope measurements in a semiarid sandy region of Northeast China / Song L., Zhu J., Li M., Zhang J., Lv L. // Agricultural Water Management. – 2016. – Vol. 164. – P. 281–290. doi:10.1016/j.agwat.2015.10.018
18. Dang H. Water use by Chinese pine is less conservative but more closely regulated than in Mongolian Crimean pine in a plantation forest, on sandy soil, in a semi-arid climate / Dang H., Zhang X., Han H., Chen S., Li M. // Frontiers in Plant Science. – 2021. – Vol. 12. – 635022. doi:10.3389/fpls.2021.635022
19. Плугатарь Ю. В. Леса Крыма: монография / Ю. В. Плугатарь. – Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2015. – 312 с.
20. Славинская А. В. Ферментативная активность почв с учетом сезонной динамики в предгорной зоне Крыма / А. В. Славинская, А. В. Ивашов, В. Г. Кобечинская, В. М. Громенко, А. И. Якубовская, И. А. Каменева, М. В. Гритчин // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия. – 2021. – Т. 7 (73), № 1. – С. 169–179.
21. Славинская А. В. Сезонная динамика выделения углекислого газа («дыхание почв») в предгорной зоне Крыма / А. В. Славинская, В. Г. Кобечинская, А. В. Ивашов, М. В. Гритчин // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия. – 2022. – Том 8 (74), № 1. – С. 177–187.
22. Анучин Н. П. Лесная таксация / Н. П. Анучин. – М.: Лесная пром-сть, 1982. – 512 с.
23. Мелехов И. С. Лесоведение / И. С. Мелехов. – М.: Лесная пром-сть, 1980. – 406 с.
24. Рожков А. А. Оценка устойчивости и состояния лесов / А. А. Рожков // Лесоведение. – 2003. – № 1. – С. 66–72.
25. Густова А. И. Оценка гидрофизических характеристик древесины для обоснования лесоводственных уходов в защитном лесоразведении / А. И. Густова, Д. К. Терехина // Аграрный вестник Урала. – 2007. – № 5(41). – С. 55–59.
26. Eichhorn J. Visual assessment of crown condition and damaging agents. Part IV / Eichhorn J., Roskams P., Potočić N., Timmermann V., Ferretti M., Mues V., Szepesi A., Durrant D., Seletković I., Schröck H.W., Nevalainen S., Bussotti F., Garcia P., Wauer A. // Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. UNECE ICP Forests Programme Coordinating Centre, Eberswalde, Germany. – 2016. – 54 p.
27. Алексеев В. А. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев / В. А. Алексеев // Лесоведение. – 1989. – № 4. – С. 51–57.
28. Ferretti M. Forest Monitoring: Methods for terrestrial investigations in Europe with an overview of North America and Asia / Ferretti M., Fischer R. // Developments in Environmental Science. – 2013. – Vol. 12. – 507 p.
29. Лакин Г. Ф. Биометрия / Г. Ф. Лакин. – М.: Наука, 1990. – 352 с.
30. Бойко Г. Е. Оценка жизненного состояния насаждений сосны крымской (Pinus nigra subsp. pallasiana (Lamb.) Holmboe) в лесопарковом массиве Симферопольского водохранилища / Г. Е. Бойко, В. М. Громенко // Экосистемы. – 2016. – Вып. 8. – С. 63–68.
31. Бойко Г. Е. Оценка таксационных показателей и жизненного состояния экспериментальных лесных культур кедра ливанского и кедра атласского в урочище Кесслерский лес / Г. Е. Бойко, В. М. Громенко // Актуальные проблемы современного лесоводства. Вторые международные чтения памяти Г. Ф. Морозова. – Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2020. – С. 82–90.
32. Dobbertin M. Tree growth as indicator of tree vitality and of tree reaction to environmental stress: a review / Dobbertin M. // European Journal of Forest Research. – 2005. – Vol. 124. – P. 319–333. doi:10.1007/s10342-005-0085-3
33. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0. – М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2014. – 768 с. [Электронный ресурс]. – URL: https://soil-db.ru (дата обращения: 05.12.2025).

34. Левин С. В. Экологические особенности произрастания сосны Палласа (крымской) при совместном выращивании с сосной обыкновенной / С. В. Левин, М. А. Семёнов, В. И. Пащенко, И. С. Левин // Лесотехнический журнал. – 2019. – № 1. – С. 44–53. doi:10.12737/article_5c92016cce31d2.57961318
35. Исиков В. П. О причинах усыхания сосны крымской и сосны пицундской в Крыму в 2020 году / В. П. Исиков, Н. Н. Трикоз // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. – 2021. – Вып. 138. – С. 50–56. doi:10.36305/0513-1634-2021-138-50-56

SPATIAL STRUCTURE AND VITALITY OF CRIMEAN PINE (*PINUS NIGRA SUBSP. PALLASIANA*) STANDS IN THE CRIMEAN FOOTHILLS

Kostromitin I. S.

Institute of Biochemical Technologies, Ecology, and Pharmacy (structural division) of the V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Republic of Crimea, Russia
E-mail: kostromitinivanyalta@mail.ru

This article is devoted to a comprehensive study of old-growth Crimean pine shelterbelts in the foothill zone of the Crimean Peninsula. The relevance of this study stems from the critical degradation of the shelterbelt system in Crimea, where less than 30 % of the originally established 75,000 hectares of shelterbelts remain, posing serious environmental risks to agricultural production and sustainable development.

The study focused on a 1.8-hectare Crimean pine shelterbelt established in the 1960s, 10 km northeast of Simferopol. The methodological framework included generally accepted forest inventory methods for determining the spatial structure of the stand, life status assessment using V. A. Alekseev's category scale, and calculation of the relative vitality index (RVI) and growth tension coefficient (GTC). It was established that over a 60-year period, the horizontal spatial structure of the stand has undergone a significant transformation: from the original four-row layout (≈3 m inter-row, ≈1–1.5 m in-row spacing, ≈2,200–3,300 trees per hectare [14]), the spacing between surviving trees has increased to 4.9±0.2 m. Taxation indicators: the average height is 10.3±0.2 m, the crown diameter is 6.9±0.3 m, and the trunk diameter is 26,5 ± 0,2 cm, varying from 14,3 to 36,6 cm. According to its structural features, the shelterbelt is of the air-ventilated type, with a trunk height of 4.2±0.1 m (40.8 % of the total height).

From an ecological perspective, the shelterbelt performs vital ecosystem functions: climate regulation, soil protection, water regulation, and habitat formation. The plantings effectively reduce wind speed, preventing wind-driven soil erosion, and promote snow retention and moisture accumulation, which is critical for Crimea's arid conditions. The shelterbelt serves as an ecological corridor for the biodiversity of agricultural landscapes.

The key result is the identified weakened vitality of the stand, with a growth tension index (GTI) of 70.3±2.2 %. Only 32.5 % of trees are classified as healthy, 45.0 % are weakened, 15.0 % are severely weakened, and 7.5 % are dying. The most depressed condition was recorded for the third inner row (GTI = 60.5 %), while the highest vitality was observed for the first outer row (GTI = 88.0 %). The growth tension coefficient was 1,87 ± 0,10 cm/cm². For the first time in the Crimean foothills, a statistically significant

inverse correlation between the OHS and COP indicators was established (R=-0.92, $p<0.05$).

The identified suboptimal forest stand condition is determined by a combination of factors: moisture deficit during dry periods, intense intraspecific competition in monodominant stands, and anthropogenic pressure (unauthorized logging, recreational use). Degradation of the shelterbelt reduces its ecological effectiveness and ability to perform its environmental functions.

The practical significance lies in the scientific justification for the need for a state program for the ecological reconstruction of Crimean forest shelterbelts. It is recommended to create mixed plantings with the participation of coniferous (Crimean pine, Crimean pine) and deciduous species (English oak, honey locust, common ash), which will ensure increased biological stability, environmental efficiency and multifunctionality of protective plantings in the context of a changing climate and increasing anthropogenic impact.

***Keywords*:** foothill Crimea, forest shelterbelts, Crimean pine, ecological conditions of growth, forest stand taxation indicators, vital status, anthropogenic load.

References

1. Dubenok N. N., Tanyukevich V. V., Salogub R. V., Kulik A. K. Sostoyanie i vetroreguliruyushchaya effektivnost' polezashchitnykh lesonasazhdenij s uchastiem khvojnykh porod v usloviyakh stepnogo Kryma, *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie*, **4 (48)**, 16 (2017).
2. Wang F., Letort V., Lu Q., Bai X., Guo Y., de Reffye P., Li B. A functional-structural Mongolian Crimean pine (*Pinus nigra subsp. pallasiana* var. *mongolica*) model integrating architecture, biomass and effects of precipitation, *PLoS ONE*, **7(8)**, e43531 (2012). doi:10.1371/journal.pone.0043531
3. Zheng X., Zhu J. J., Xing Z. Assessment of the effects of shelterbelts on crop yields at the regional scale in Northeast China, *Agricultural Systems*, **143**, 49 (2016). doi:10.1016/j.agsy.2015.12.008
4. Nikitin P. D. *Vyrashchivanie polezashchitnykh lesnykh polos*, 101 p. (Kolos, Moscow, 1972).
5. *Izbrannye trudy nauchnoj shkoly eroziovedeniya A. S. Kozmenko – G. P. Surmacha v chetyrekh tomakh*, Vol. 2, 608 p. (FNC agroekologii RAN, Volgograd, 2023).
6. Ma Q. Appraisal of tree planting options to control desertification: Experiences from the Three-North Shelterbelt Programme, *International Forestry Review*, **6**, 327 (2004).
7. Bagrova L. A., Garkusha L. Ya. Iskusstvennye lesozashchitnye nasazhdeniya v Krymu, *Ekosistemy, ikh optimizaciya i okhrana*, **20**, 134 (TNU, Simferopol, 2009).
8. Jose S. Agroforestry for conserving and enhancing biodiversity, *Agroforestry Systems*, **85**, 1 (2012). doi:10.1007/s10457-012-9517-5
9. Agaponov N. N., Koval'skij A. I. *Putevoditel' po ob''ektam lesnoj lesomelioracii gornogo Kryma*, 142 p. (Simferopol, 2004).
10. Mishnev V. G., Tsyplakov N. I. O znachenii i sostoyanii polezashchitnogo lesorazvedeniya v Krymu, *Ekosistemy Kryma, ikh optimizaciya i okhrana*, **11**, 12 (TNU, Simferopol, 2001).
11. Agaponov M. N., Shvets' Yu. P., Neoneta O. O., Astapov O. Yu. Zakhysni nasadzhennya Krymu: Suchasnyj stan i perspektyvy rozvytku, *Naukovyj visnyk Nacional'nogo universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannya Ukrayiny*, **152**, Part 2, 285 (Kyiv, 2010).
12. Gromenko V. M., Ivashov A. V., Kobechinskaya V. G., Alekseeva A. I. Prostranstvennaya struktura i zhiznennoe sostoyanie nasazhdenij gleditchii trekhkolyuchkovoj (*Gleditsia triacanthos* L.) v predgornom Krymu, *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Biologiya. Khimiya*, **9 (75), 1**, 53 (2023).
13. World Flora Online. Pinus nigra subsp. pallasiana (Lamb.) Holmboe [Electronic resource]. – URL: https://wfoplantlist.org/taxon/wfo-0000736744-2025-12 (accessed: 26.01.2026).

14. Manaenkov A. S., Kulik A. K. Vodno-mineral'nye osobennosti substrata i zasukhoustojchivost' drevostoya sosny, *Lesokhozyajstvennaya informaciya*, **2(4)**, 46 (2017).
15. Zhukova L. A. (ed.) *Ontogeneticheskij atlas rastenij: nauchnoe izdanie*, Vol. VII, 364 p. (Mar. gos. un-t, Joshkar-Ola, 2013).
16. Kapper O. G. *Khvojnye porody*, 303 p. (Goslesbumizdat, Moscow, 1954).
17. Song L., Zhu J., Li M., Zhang J., Lv L. Sources of water used by *Pinus nigra subsp. pallasiana* var. *mongolica* trees based on stable isotope measurements in a semiarid sandy region of Northeast China, *Agricultural Water Management*, **164**, 281 (2016). doi:10.1016/j.agwat.2015.10.018
18. Dang H., Zhang X., Han H., Chen S., Li M. Water use by Chinese pine is less conservative but more closely regulated than in Mongolian Crimean pine in a plantation forest, on sandy soil, in a semi-arid climate, *Frontiers in Plant Science*, **12**, 635022 (2021). doi:10.3389/fpls.2021.635022
19. Plugatar Yu. V. Lesa Kryma: ekologo-biologicheskie osobennosti' A. A. Izuchenie rosta sosny obyknovennoj (*Pinus nigra subsp. pallasiana* L.) v chistykh i smeshannykh fitocenozakh na supeschanoj pochve v usloviyakh sukhoj stepi, *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, **6**, 175 (2013).
20. Slavinskaya A. V., Ivashov A. V., Kobechinskaya V. G., Gromenko V. M., Yakubovskaya A. I., Kameneva I. A., Gritchin M. V. Fermentativnaya aktivnost' pochv s uchetom sezonnoj dinamiki v predgornoj zone Kryma, *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Biologiya. Khimiya*, **7 (73), 1**, 169 (2021).
21. Slavinskaya A. V., Kobechinskaya V. G., Ivashov A. V., Gritchin M. V. Sezonnaya dinamika vydeleniya uglekislogo gaza («dykhanie pochv») v predgornoj zone Kryma, *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Biologiya. Khimiya*, **8 (74), 1**, 177 (2022).
22. Anuchin N. P. *Lesnaya taksaciya*, 512 p. (Lesnaya prom-st', Moscow, 1982).
23. Melekhov I. S. *Lesovedenie*, 406 p. (Lesnaya prom-st', Moscow, 1980).
24. Rozhkov A. A. Ocenka ustojchivosti i sostoyaniya lesov, *Lesovedenie*, **1**, 66 (2003).
25. Gustova A. I., Terekhina D. K. Ocenka gidrofizicheskikh kharakteristik drevesiny dlya obosnovaniya lesovodstvennykh ukhodov v zashchitnom lesorazvedenii, *Agrarnyj vestnik Urala*, **5(41)**, 55 (2007).
26. Eichhorn J., Roskams P., Potočić N., Timmermann V., Ferretti M., Mues V., Szepesi A., Durrant D., Seletković I., Schröck H. W., Nevalainen S., Bussotti F., Garcia P., Wauer A. Visual assessment of crown condition and damaging agents. Part IV, *Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests*, 54 p. (UNECE ICP Forests Programme Coordinating Centre, Eberswalde, Germany, 2016).
27. Alekseev V. A. Diagnostika zhiznennogo sostoyaniya derev'ev i drevostoev, *Lesovedenie*, **4**, 51 (1989).
28. Ferretti M., Fischer R. Forest Monitoring: Methods for terrestrial investigations in Europe with an overview of North America and Asia, *Developments in Environmental Science*, **12**, 507 p. (2013).
29. Lakin G. F. *Biometriya*, 352 p. (Nauka, Moscow, 1990).
30. Bojko G. E., Gromenko V. M. Ocenka zhiznennogo sostoyaniya nasazhdenij sosny krymskoj (*Pinus nigra subsp. pallasiana* D. Don) v lesoparkovom massive Simferopol'skogo vodokhranilishcha, *Ekosistemy*, **8**, 63 (2016).
31. Bojko G. E., Gromenko V. M. Ocenka taksacionnykh pokazatelej i zhiznennogo sostoyaniya eksperimental'nykh lesnykh kul'tur kedra livanskogo i kedra atlasskogo v urochishche Kesslersky les, *Aktual'nye problemy sovremennogo lesovodstva. Vtorye mezhdunarodnye chteniya pamyati G. F. Morozova*, 82 (ARIAL, Simferopol, 2020).
32. Dobbertin M. Tree growth as indicator of tree vitality and of tree reaction to environmental stress: a review, *European Journal of Forest Research*, **124**, 319 (2005). doi:10.1007/s10342-005-0085-3
33. *Unified State Register of Soil Resources of Russia*. Version 1.0., 768 p. (V. V. Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 2014). URL: https://soil-db.ru
34. Levin S. V., Semenov M. A., Pashchenko V. I., Levin I. S. Environmental features of Crimean pine growth with joint growth with Scots pine, *Lecotekhnicheskij zhurnal [Forestry Engineering Journal]*, **1**, 44 (2019). doi:10.12737/article_5c92016cce31d2.57961318
35. Isikov V. P., Trikoz N. N. The reasons for drying out Pinus pallasiana and Pinus brutia var. pityusa in the Crimea in 2020*, Byulleten' Gosudarstvennogo Nikitskogo botanicheskogo sada [Bull. of the State Nikita Botan. Gard.]*, **138**, 50 (2021). doi:10.36305/0513-1634-2021-138-50-56

Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского
Биология. Химия. Том 12 (78). 2026. № 2. С. 128–143.

УДК 631.465

DOI 10.5281/ZENODO.20787974

АКТИВНОСТЬ ФЕРМЕНТОВ В СЕРЫХ ЛЕСНЫХ И ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВАХ ЛЕСОВ ТАТАРСТАНА

Кулагина В. И., Александрова А. Б., Рязанов С. С., Сунгатуллина Л. М., Гордеева К. А., Хайруллина А. М., Рупова Э. Х.

Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Казань, Российская Федерация
E-mail: viksoil@mail.ru

Показано, что активность инвертазы, фосфатазы и каталазы в серых лесных почвах в почвах пробных площадок в 1,5–3 раза выше, чем в дерново-подзолистых. Разница статистически значима согласно Tukey HSD test. Активность почвенных ферментов увеличивалась в ряду: сосняки < березняк + дубняк < лиственничник + ельник. Обнаружена высокая степень взаимосвязи между инвертазой, фосфатазой и каталазой в почвах исследованных участков (r=0,71–0,86, p<0,05). Показано, что активность инвертазы, фосфатазы и каталазы проявила более тесную корреляционную взаимосвязь с запасами углерода в слое почвы 0–30 см, чем с содержанием гумуса и азота в гумусовом горизонте. Установлено, что взаимосвязь с запасами углерода в лесной подстилке средняя для инвертазы и фосфатазы (r =0,67 и r =0,69, p<0,05), и слабая для каталазы (r=0,44, p<0,05).
Ключевые слова: почва, лесные экосистемы, инвертаза, каталаза, фосфатаза.

ВВЕДЕНИЕ

При изучении секвестрации углерода из атмосферы приоритет отдается лесам, как наиболее эффективным поглотителям парниковых газов. Однако поглощение углерода лесной экосистемой – это сложная динамическая совокупность процессов фотосинтеза, дыхания, длительного депонирования, эмиссии углерода и перехода из одного пула в другой [1–3]. Почва по запасам углерода в лесной экосистеме обычно занимает второе место после биомассы древостоя, запасы углерода в подстилке, как правило, меньше, чем запасы в почве, но их также рекомендуется учитывать при расчетах общих запасов [4–6]. На баланс углерода в таких пулах лесных экосистем, как почва и лесная подстилка, влияет множество факторов, включая биохимические свойства почв, то есть активность ферментов, участвующих в круговороте углерода. Ферментативная система почв определяет скорость минерализации лесной подстилки, формирование запасов органического углерода, что особенно актуально в условиях меняющегося климата и антропогенной нагрузки [7–9].

Ферментативная активность почвы служит интегральным индикатором биохимического потенциала экосистем, отражая интенсивность трансформации органического вещества и доступность биогенных элементов.

Ферментативная активность связана с типом почвы и породным составом леса [9–13].

Серые лесные и дерново-подзолистые почвы, доминирующие под лесами Татарстана, характеризуются существенными различиями в физико-химических свойствах, обусловленными историей и условиями почвообразования. Эти различия формируют специфические экологические ниши для почвенной микробиоты, модулируя спектр и интенсивность накопления ферментов в почвах. По данным Хазиева Ф. Х. в Предуралье ферментативная активность серых лесных почв выше, чем дерново-подзолистых [9]. Однако региональные особенности ферментативной активности в почвенно-климатических условиях Поволжья, к которому относится Татарстан, изучены недостаточно.

Сравнительный анализ хвойных и лиственных лесов позволяет выявить фундаментальные закономерности управления биогеохимическими циклами. Исследования демонстрируют, что тип растительного покрова оказывает более сильное влияние на ферментативный профиль, чем некоторые абактериальные факторы почвы [8, 10, 13]. Считается, что широколиственные леса способствуют быстрому обороту питательных веществ и переходу части углерода в гумус, хвойные экосистемы могут обеспечивать долгосрочную секвестрацию углерода в лесной подстилке благодаря замедленной динамике разложения и специфике ферментативного аппарата [14].

Несмотря на наличие обширных данных по ферментативной активности в глобальном масштабе [15], информация о количественных показателях активности ферментов в серых лесных и дерново-подзолистых почвах Татарстана, а также об их связи с качественными характеристиками подстилки и запасами органического углерода, остается фрагментарной. Отсутствие систематизированных данных препятствует разработке точных моделей круговорота элементов для региона.

Целью данной работы является оценка активности ферментов в дерново-подзолистых и серых лесных почвах Республики Татарстан, выявление взаимосвязи ферментативной активности с запасами органического углерода в почве и лесной подстилке, а также сравнительный анализ биохимических свойств почв под лесами разного породного состава.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились в мае 2025 г. на 6 учетных площадках с лесами разного породного состава, почвенный покров которых представлен серыми лесными и дерново-подзолистыми почвами. Места расположения площадок представлены на карте (рис. 1). Площадка 5 и площадка 6 расположены очень близко, поэтому обозначающие их знаки накладываются друг на друга.

Возраст лесов от 71 до 110 лет. Пять площадок заложены в лесах, представляющих собой искусственные посадки, 110-летний дубняк имеет естественное происхождение.

Площадка 1. Посадки сосны обыкновенной (*Pínus sylvéstris* L.), возраст – 75 лет. Согласно градации возрастных групп относятся к приспевающим. Густота древостоя 751 шт./га. Почвенный покров представлен дерново-подзолистыми

почвами. Пробная площадка 1 расположена в Государственном природном зоологическом заказнике регионального значения «Шорский».

Площадка 2. Посадки березы повислой (*Betula pendula* L.), возраст – 84 года, перестойные, 625 шт./га. Почвы – дерново-подзолистые. Охранная зона Раифского участка Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника (ВКГПБЗ).

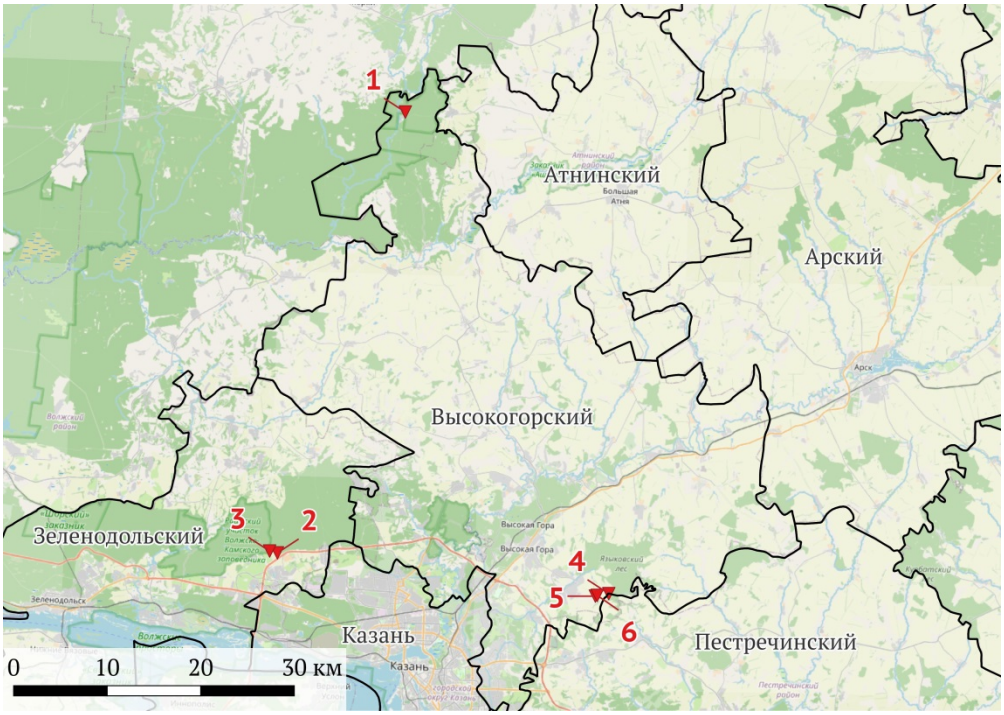


Рис. 1. Карта расположения пробных площадок (расшифровку см. в тексте).

Площадка 3. Посадки сосны обыкновенной (*Pínus sylvéstris* L.), возраст – 71 год, приспевающие, 407 шт./га. Почвы – дерново-подзолистые. Охранная зона ВКГПБЗ.

Площадка 4. Лес естественного происхождения. Дуб высокоствольный *(Quercus petraea* L.*)* с примесью липы, клена, вяза. Средний возраст дуба – 110 лет. Возраст остальных пород – менее 30 лет. Густота древостоя дуба – 112 шт./га, остальных пород –579 шт./га. Почвы – серые лесные. Иске-Казанское участковое лесничество, близ с. Пановка.

Площадка 5. Посадки лиственницы сибирской (*Larix sibirica* L.), возраст – 80 лет, средневозрастные, 646 шт./га. Почвы – серые лесные. Иске-Казанское участковое лесничество, близ с. Пановка.

Площадка 6. Посадки ели европейской (*Picea abies* L.), возраст – 80 лет, приспевающие, 1475 шт./га. Почвы – серые лесные. Иске-Казанское участковое лесничество, близ с. Пановка.

Внимание к лесным экосистемам на основе искусственных посадок объясняется тем, что в международной отчетности по секвестрации углерода учитываются в основном так называемые «управляемые леса» [16]. Дубняк заинтересовал относительной сохранностью и возрастом.

Площадь площадок от 1/10 до 3/10 га. На каждой пробной площадке почвенные образцы отбирались из пяти точек методом конверта на всю глубину гумусового горизонта, подстилки – из 24 точек при помощи рамки. Содержание гумуса определяли методом Тюрина И. В., валовый азот – колориметрически после разложения почвы смесью серной и хлорной кислот, активность каталазы – методом Джонсона и Темпле, инвертазы – по Щербаковой Т. А., фосфатазы по методу Геллера И. Т. и Гинзбург К. Е.

Некоторые параметры почв и лесных подстилок представлены в таблице 1.

Таблица 1

Запасы углерода в почве и лесной подстилке, содержание гумуса и азота в почвах пробных площадок (M±m)

ПП, №	Запасы С в слое почвы 0-30 см, т/га	Запасы С в подстилке, т/га	Гумус,%	N, %
1	27,4±3,5	6,1±0,3	2,3±0,3	0,11±0,01
2	17,2±1,2	0,7±0,1	0,9±0,1	0,11±0,01
3	9,1±2,0	3,1±0,3	0,8±0,1	0,06±0,01
4	59,6±12,2	1,4±0,2	4,3±0,8	0,32±0,09
5	31,6±3,9	7,2±0,4	2,5±0,2	0,19±0,01
6	60,2±2,3	11,6±0,9	3,6±0,1	0,25±0,01

Лесная подстилка в слой 0–30 см не входила – мощность этого слоя отсчитывалась от начала гумусового горизонта. Активность ферментов определялась только в гумусовом горизонте.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Инвертаза – фермент группы гидролаз, катализирующий гидролиз сахарозы до моносахаридов. Этот процесс является первым шагом в минерализации сложных углеводных соединений, поступающих в почву в виде лесной подстилки, корневых выделений и продуктов жизнедеятельности микроорганизмов [9, 17]. Считается, что активность инвертазы служит надежным индикатором общего метаболического потенциала почвы и скорости оборота легкодоступных форм органического углерода [18].

Логично ожидать, что породный состав леса и состав поступающих растительных остатков, должен оказывать существенное воздействие на активность инвертазы.

Проведенные исследования показали, что в почвах пробных площадок средняя активность инвертазы колеблется от 0,73 до 5,50 мг глюкозы /1 г почвы за 4 часа (рис. 2), то есть может отличаться в 7,5 раз. Самая низкая активность инвертазы обнаружена в почвах под сосняками (площадки 1 и 3), максимальная – под еловыми посадками (площадка 6).

Результаты, показывающие низкую активность инвертазы в почвах под сосняками по сравнению с лесами другого породного состава, согласуются с ранее полученными данными [4, 19].

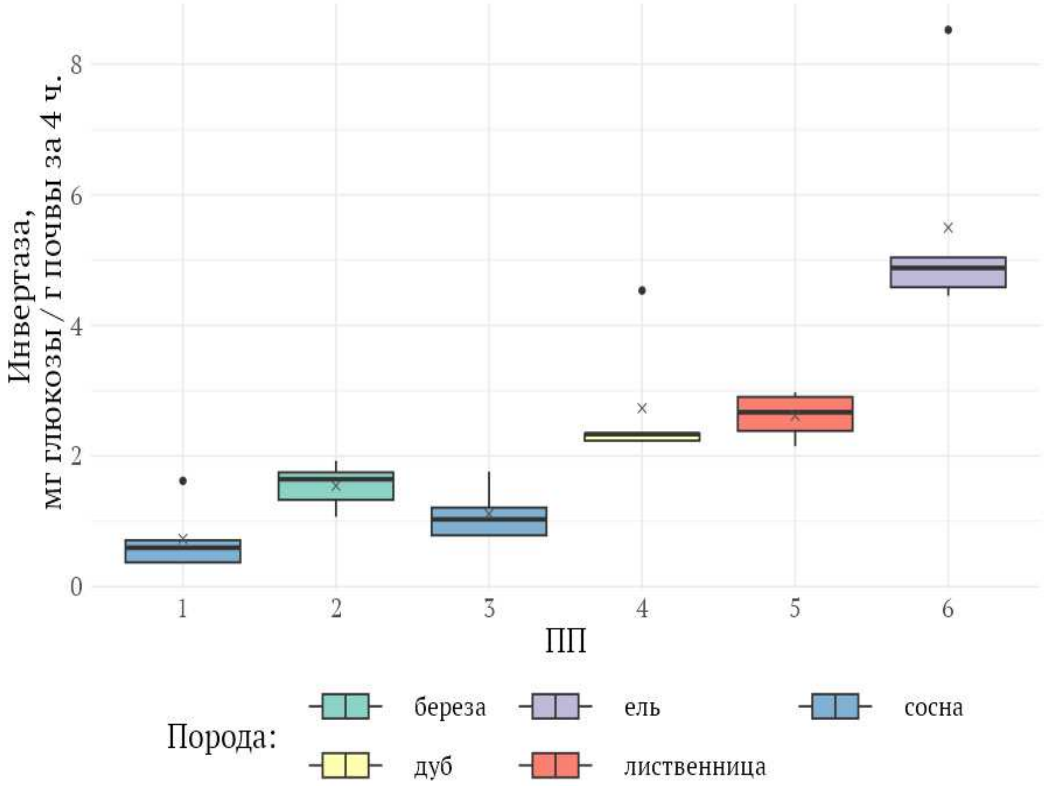


Рис. 2. Активность инвертазы в почвах пробных площадок. Расшифровку номеров площадок см. в тексте. Крестиком обозначено среднее значение, жирной линией – медиана, точки – «выбросы» значений.

Согласно Tukey HSD test активность фермента в почвах под сосняками статистически значимо меньше, чем под дубняком, лиственничником и ельником (табл. 2), для березняка – разница не значима. Отсутствие статистически значимой разницы по активности инвертазы между почвами березняков и сосняков

отмечалось нами ранее для молодых лесов [4], однако в данном случае леса не относятся к молоднякам. Возможными причинами могли послужить искусственный характер посадок, а также то, что березняк и сосняки в отличие от остальных пород располагались на дерново-подзолистых почвах.

Вполне ожидаемым оказалось отсутствие статистически значимой разницы по активности инвертазы между почвами лиственных лесов – дубняка и березняка (табл. 2). Однако предполагалось, что активность инвертазы под всеми хвойными лесами будет ниже, чем под лиственными. Поэтому несколько неожиданной оказалась высокая активность инвертазы в почвах ельника и лиственничника (рис. 2).

Таблица 2

Оценка значимости разницы по активности инвертазы согласно тесту Тьюки (Tukey HSD test) под лесами разного породного состава

Преобладающие породы	diff	lwr	upr	p adj
дуб-береза	1,189	-0,422	2,800	0,224
ель-береза	3,953	2,342	5,564	0,000*
лиственница-береза	1,073	-0,538	2,684	0,315
сосна-береза	-0,622	-2,017	0,773	0,688
ель-дуб	2,764	1,153	4,375	0,000*
лиственница-дуб	-0,116	-1,727	1,495	1,000
сосна-дуб	-1,811	-3,206	-0,416	0,007*
лиственница-ель	-2,880	-4,491	-1,269	0,000*
сосна-ель	-4,575	-5,970	-3,180	0,000*
сосна-лиственница	-1,695	-3,090	-0,300	0,012*

Примечание: *разница значима

Активность инвертазы в почве ельника статистически значимо выше, чем на остальных пробных площадках (табл. 2). Причинами могут быть как индивидуальные особенности древесных пород, так и влияние типа почв. О том, что хвойный опад не является обязательной причиной низкой ферментативной активности, свидетельствует работа Перминовой Е.М. с соавторами, отмечавшими довольно высокую активность инвертазы в подстилочно-торфяном горизонте подзолистых почв под ельниками в Республике Коми – от 17,5±2,6 до 26±4 мг глюкозы / г·за 24 часа [20].

Установлено, что средняя активность инвертазы в дерново-подзолистых почвах исследованных площадок в три раза ниже, чем в серых лесных (рис. 3). Согласно тесту Тьюки (Tukey HSD test) разница статистически значима. Тем не менее, средняя активность инвертазы в дерново-подзолистых почвах (1,13±0,14 мг глюкозы/1 г почвы за 24 часа) и серых лесных (3,62±0,45 мг глюкозы/1 г почвы за

24 часа) соответствует очень бедной обогащенности ферментами по шкале Звягинцева [17]. Полученные результаты в целом согласуются с данными Дроздовой Н. И. с соавторами для дерново-подзолистых почв [21], а также соответствуют ранее полученным данным для дерново-подзолистых почв молодых и средневозрастных лесов Республики Татарстан [4]. Активность инвертазы в серых лесных почвах исследованных площадок ниже, чем в агросерых почвах Татарстана [22].

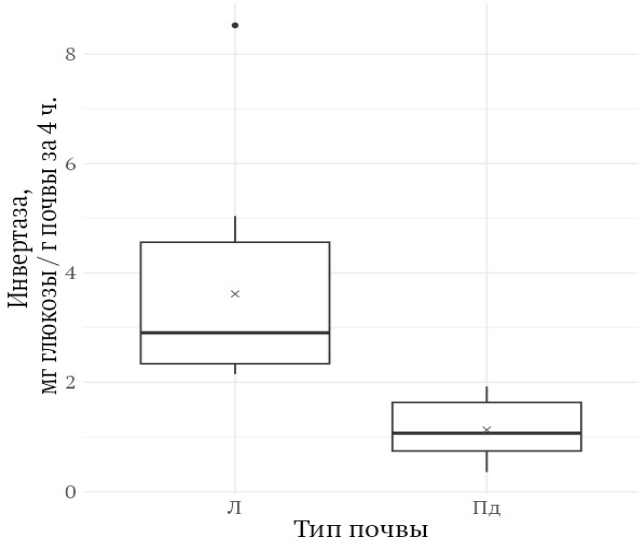


Рис. 3. Активность инвертазы в серых лесных и дерново-подзолистых почвах пробных площадок. Крестиком обозначено среднее значение, жирной линией – медиана, точки – «выбросы» значений. Пд – дерново-подзолистые, Л – серые лесные почвы.

В результате исследований на пробных площадках установлено, что наиболее тесная зависимость наблюдается между активностью инвертазы и запасами углерода в слое почвы 0–30 см и запасами в лесной подстилке – коэффициент корреляции Пирсона в обоих случаях равен 0,68 (p<0,05), что соответствует градации «средняя положительная взаимосвязь». Взаимосвязь активности инвертазы с содержанием гумуса и азота слабая положительная (r=0,43 и r=0,42 соответственно, p<0,05). Полученные результаты в целом согласуются с данными других исследователей о том, что активность инвертазы коррелирует с содержанием гумуса [9,17]. С соотношением C/N взаимосвязи не обнаружено, коэффициент корреляции равен -0,21.

Фосфатаза

Фермент фосфатаза катализирует отщепление остатка фосфорной кислоты от фосфорорганических соединений, тем самым обеспечивая почвенные микроорганизмы и растения доступным фосфором [9, 17].

Установлено, что средняя активность фосфатазы в почвах исследованных площадок колеблется от 1,42 до 6,77 мг P_2O_5 /10 г почвы за 24 часа (рис. 4).

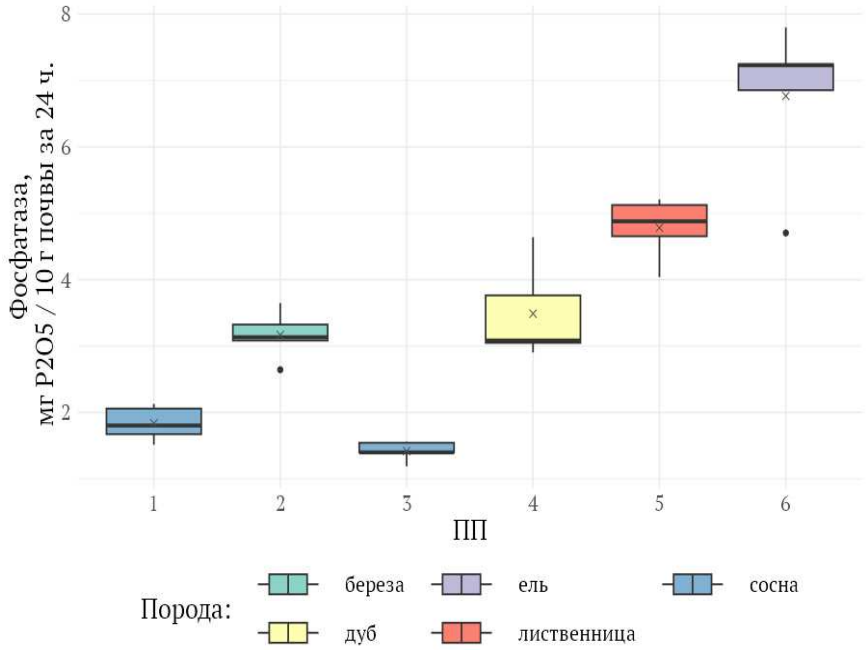


Рис. 4. Активность фосфатазы в почвах пробных площадок. Расшифровку номеров площадок см. в тексте. Крестиком обозначено среднее значение, жирной линией – медиана, точки – «выбросы» значений.

То есть, согласно шкале Звягинцева [17] активность фосфатазы изменяется от бедной под сосняками, до средней под березняком, лиственничником, дубняком, богатой – под ельником. В целом активность фосфатазы в почвах под лесами, кроме ельника, соответствует ранее полученным данным для молодых и средневозрастных лесов Татарстана [4], где активность фосфатазы составляла 0,6–4,3 мг P_2O_5/10 г почвы за 24 часа. Активность фосфатазы под ельниками в республике ранее не изучалась.

Примечательно, что почвы всех площадок с лесами разного породного состава, статистически значимо отличаются по активности фосфатазы за исключением двух площадок с лиственными лесами – березняком и дубняком (табл. 3).

Максимальная активность фосфатазы, как и инвертазы, наблюдалась в почвах под искусственными посадками ели. Корреляция между инвертазой и фосфатазой в исследованных почвах сильная (r=0,86, p<0,05). Взаимосвязь между активностью фосфатазы и запасами углерода в слое 0–30 см средняя (r=0,61, p<0,05), как и с запасами в подстилке (r=0,69, p<0,05). С содержанием гумуса в горизонте А1 взаимосвязь слабая (r=0,46, p<0,05), как и с содержанием валового азота (r=0,45, p<0,05).

Средняя активность фосфатазы в дерново-подзолистых почвах исследованных участков составила 2,14±0,21 мг P_2O_5 /10 г почвы за 24 часа, в серых лесных

5,01±0,41 мг P_2O_5 /10 г почвы за 24 часа (рис. 5), то есть в серых лесных почвах в 2,5 выше. Разница статистически значима.

Таблица 3

Оценка значимости разницы по активности фосфатазы согласно тесту Тьюки (Tukey HSD test) под лесами разного породного состава

Преобладающие породы	diff	lwr	upr	p adj
дуб-береза	0,321	-0,858	1,500	0,928
ель-береза	3,599	2,420	4,778	0,000*
лиственница-береза	1,614	0,435	2,793	0,004*
сосна-береза	-1,540	-2,561	-0,519	0,001*
ель-дуб	3,278	2,099	4,457	0,000*
лиственница-дуб	1,293	0,114	2,472	0,027*
сосна-дуб	-1,861	-2,882	-0,840	0,000*
лиственница-ель	-1,985	-3,164	-0,806	0,000*
сосна-ель	-5,139	-6,160	-4,118	0,000*
сосна-лиственница	-3,154	-4,175	-2,133	0,000*

Примечание: *разница значима

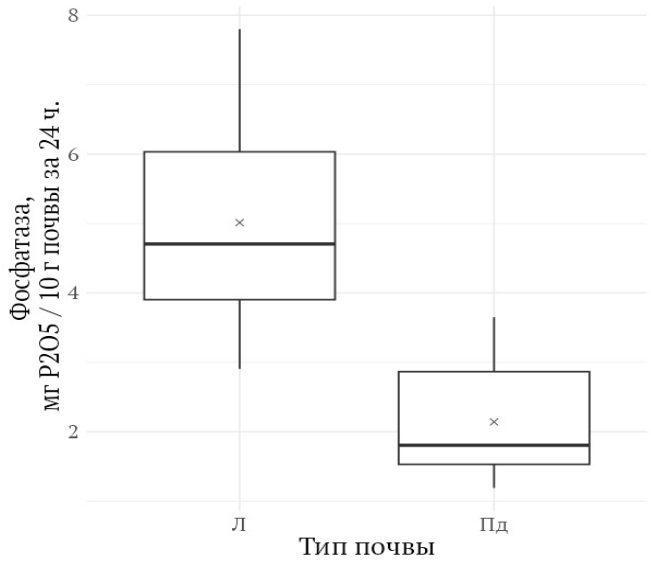


Рис. 5. Активность фосфатазы в серых лесных и дерново-подзолистых почвах пробных площадок. Крестиком обозначено среднее значение, жирной линией – медиана, точки – «выбросы» значений. Пд – дерново-подзолистые, Л – серые лесные почвы.

Каталаза

Каталаза способствует разложению перекиси водорода, образующейся в процессе дыхания живых организмов, находящихся в почве, на воду и молекулярный кислород [17, 20].

Активность каталазы в почвах исследованных участков колеблется от 1,27 до 2,67 мл 0,1 $KMnO_4$ / г почвы за 20 мин (рис. 6).

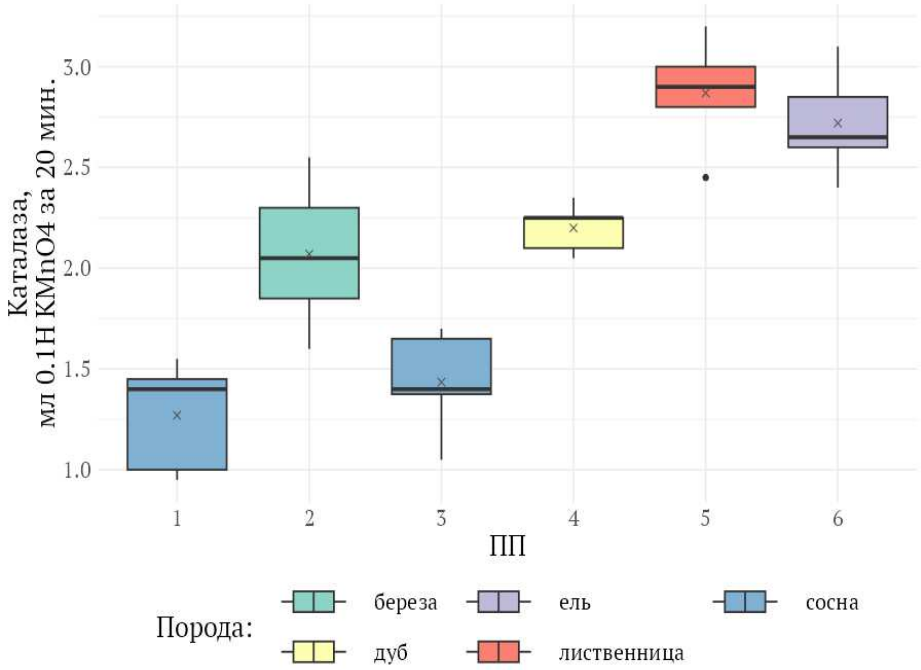


Рис. 6. Активность каталазы в почвах пробных площадок. Расшифровку номеров площадок см. в тексте. Крестиком обозначено среднее значение, жирной линией – медиана, точки – «выбросы» значений.

Каталаза – единственный из исследованных ферментов, чья средняя активность в почве под лиственничником выше, чем под ельником, хотя тест Тьюки свидетельствует об отсутствии статистически значимой разницы между ними (табл. 3). Почвы участков с лиственными лесами (дубняком и березняком) также статистически значимо не отличались по активности каталазы. Между остальными лесами разница значима.

Самая низкая активность фермента обнаружена в почвах под сосняками, она ниже, чем активность в почвах лиственных лесов, что согласуется с исследованиями, проведенными в Волжско-Камском заповеднике [19].

Активность каталазы в ельниках и лиственничниках Татарстана до этого не изучалась, но согласно полученным нами результатам, именно в почвах этих искусственных посадок она максимальна. Телеснина В. М. с соавторами,

изучавшие ферментативную активность почв в Костромской области, обнаружили максимальную активность каталазы в почве смешанного березово-елового леса. Они же связывали увеличение каталазной активности в почвах под древесной растительностью с влиянием выделений корневой системы и наличием лесной подстилки [23]. Следует отметить, что на исследованных площадках именно в ельнике густота древостоя максимальна, а ельнике и лиственничнике – самые большие запасы углерода в подстилке.

Таблица 4

Оценка значимости разницы по активности каталазы согласно тесту Тьюки (Tukey HSD test) под лесами разного породного состава

Преобладающие породы	diff	lwr	upr	p adj
дуб-береза	0,130	-0,375	0,635	0,941
ель-береза	0,650	0,145	1,155	0,007*
лиственница-береза	0,800	0,295	1,305	0,001*
сосна-береза	-0,718	-1,154	-0,281	0,001*
ель-дуб	0,520	0,015	1,025	0,041*
лиственница-дуб	0,670	0,165	1,175	0,005*
сосна-дуб	-0,848	-1,284	-0,411	0,000*
лиственница-ель	0,150	-0,355	0,655	0,904
сосна-ель	-1,368	-1,804	-0,931	0,000*
сосна-лиственница	-1,518	-1,954	-1,081	0,000*

Примечание: *разница значима

Взаимосвязь активности каталазы с активностью инвертазы и фосфатазы высокая (r=0,71 и r=0,78 соответственно, $p<0,05$), что объясняется участием всех трех ферментов в круговороте углерода в лесных экосистемах, хотя они являются катализаторами разных реакций.

Взаимосвязь активности каталазы с запасами углерода в слое почв 0–30 см средняя (r=0,50, $p<0,05$), с запасами в лесной подстилке – низкая (r=0,44, $p<0,05$), с содержанием гумуса и азота – низкая (r=0,38 и r=0,39 соответственно, $p<0,05$). Ранее полученные данные свидетельствовали о более тесной связи между содержанием гумуса и активностью каталазы в почвах Татарстана [4, 19], однако большая часть ранее изученных лесов имела естественное происхождение.

Если рассматривать активность каталазы отдельно в разных типах почв, то серых лесных почвах средняя активность каталазы примерно в 1,5 раза выше, чем в дерново-подзолистых – 2,60±0,09 мл 0,1 н $KMnO_4$ за 20 мин. и 1,59±0,12 мл 0,1 н $KMnO_4$ за 20 мин. соответственно (рис. 7). Разница статистически значима согласно Tukey HSD test.

Полученные данные согласуются с выводами Хазиева Ф. Х. о том, что в генетическом ряду равнинных почв ферментативная активность возрастает от дерново-подзолистых к серым лесным почвам [9].

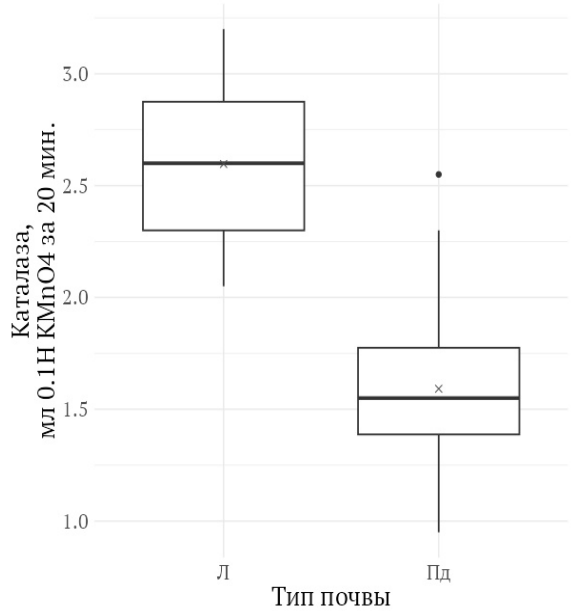


Рис. 7. Активность каталазы в серых лесных и дерново-подзолистых почвах пробных площадок. Крестиком обозначено среднее значение, жирной линией – медиана, точки – «выбросы» значений. Пд – дерново-подзолистые, Л – серые лесные почвы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что средняя активность инвертазы, фосфатазы и каталазы в серых лесных почвах исследованных пробных площадок в 1,5–3 раза выше, чем в дерново-подзолистых. Разница статистически значима согласно Tukey HSD test. Существенная разница в биохимических свойствах серых лесных и дерново-подзолистых почв еще раз подтверждает необходимость учета типа почв при исследованиях лесных экосистем.

Активность почвенных ферментов увеличивалась в ряду: сосняки < березняк + дубняк < лиственничник + ельник. Почвы березняка и дубняка не имели статистически значимых отличий по активности изученных ферментов. Высокая биохимическая активность в почвах ельников требует дополнительных исследований.

Обнаружена высокая степень взаимосвязи между инвертазой, фосфатазой и каталазой на исследованных участках (r=0,71–0,86, p<0,05), что объясняется участием изученных ферментов в круговороте углерода.

Показано, что активность инвертазы, фосфатазы и каталазы проявила более тесную корреляционную взаимосвязь с запасами углерода в слое почвы 0–30 см, чем с содержанием гумуса и азота в гумусовом горизонте. Взаимосвязь с запасами углерода в слое 0–30 см средняя (r =0,50–0,68, p<0,05), с гумусом и азотом – слабая (r =0,37–0,46, p<0,05). Установлено, что взаимосвязь с запасами углерода в лесной подстилке средняя для инвертазы и фосфатазы (r =0,67 и r =0,69, p<0,05), и слабая для каталазы (r=0,44, p<0,05). Более тесная взаимосвязь ферментативной активности с пулами углерода в подстилке и почве, чем с текущим содержанием гумуса, подтверждает активную вовлеченность ферментов в круговорот углерода в лесных экосистемах.

Изучение взаимосвязи активности почвенных ферментов с круговоротом углерода в лесах разного породного состава должно быть продолжено.

Список литературы

1. Замолодчиков Д. Г. Системы оценки и прогноза запасов углерода в лесных экосистемах / Д. Г. Замолодчиков // Устойчивое лесопользование. – 2011. – №4. – С. 15–22.
2. Кузнецова А. И. Влияние растительности на запасы почвенного углерода в лесах (обзор) / А. И. Кузнецова // Вопросы лесной науки. – 2021. – Т. 4, №4. – С. 1–54.
3. Пристова Т. А. Запасы углерода в почве березово-елового молодняка средней тайги Республики Коми / Т. А. Пристова // Экосистемы. – 2024. – Вып. 40. – С. 76–83.
4. Кулагина В. И. Активность ферментов в дерново-подзолистых почвах молодых и средневозрастных лесов / В. И. Кулагина, Л. М. Сунгатуллина, С. С. Рязанов, А. Б. Александрова, Р. Р. Шагидуллин, Э. Х. Рупова // Экосистемы. – 2025. – № 42. – С. 72–78.
5. Кулагина В. И. Закономерности распределения запасов углерода в почвах и лесной подстилке Волжско-Камского заповедника / В. И. Кулагина, А. Б. Александрова, С. С. Рязанов, Р. Р. Шагидуллин, Л. М. Сунгатуллина, Э. Х. Рупова // Российский журнал прикладной экологии. – 2024. – № 3 (39). – С. 28–33.
6. Методические указания по количественному определению объема поглощения парниковых газов. Утв. Распоряжением Минприроды России от 30.06.2017 No20-р.
7. Kujur M. Kinetics of soil enzyme activities under different ecosystems: An index of soil quality / M. Kujur, A. KumarPatel // Chilean journal of agricultural research. – 2014. – No 74(1). – P. 96–104.
8. Цандекова О. Л. Влияние эдафических факторов на активность ферментов почвы в подкроновом пространстве древесных растений в условиях Кемеровской области / О. Л. Цандекова // Вестник Оренбургского государственного педагогического университета. Электронный научный журнал. – 2025. – № 3 (55). – С. 68–77.
9. Хазиев Ф. Х. Экологические связи ферментативной активности почв / Х. Ф. Хазиев // Экобиотех. – 2018. – Т. 1, № 2. – С. 80–92.
10. Галибина Н. А. Биохимическая активность подстилки как индикатор качества почв сосновых лесов Восточной Фенноскандии / Н. А. Галибина, К. М. Никерова, Е. В. Мошкина, А. В. Климова // Почвоведение. – 2024. – №11. – С. 1589–1604.
11. Тах И. П. Ферментативная активность различных типов почв лесостепного пояса в условиях Западного Кавказа / И. П. Тах, А. Х. Агиров // Новые технологии. – 2009. – № 4. – С. 63–67.
12. Чернышева Е. В. Микробная биомасса и ферментативная активность целинных и пахотных почв как показатели физиологического состояния микробных сообществ / Е. В. Чернышева, К. С. Дущанова, Т. Э. Хомутова, А. В. Борисов // Успехи современной биологии. – 2023. – Т. 143, № 4. – С. 403–416.
13. Перминова Е. М. Каталазная активность подзолистых почв коренного ельника черничного и разновозрастных лиственно-хвойных сообществ / Е. М. Перминова, Е. М. Лаптева // Аграрный вестник Урала. – 2018. – № 5 (172). – С. 44–53.

14. Guolong Hou. A meta-analysis of changes in soil organic carbon stocks after afforestation with deciduous broadleaved, sempervirent broadleaved, and conifer tree species / Guolong Hou, Claudio O. Delang, Xixi Lu, Lei Gao // Annals of Forest Science. – 2020. – 77 (4). – P.92. – ff10.1007/s13595-020-00997-3ff. ffhal-03354949f 184
15. Daunoras J. Role of Soil Microbiota Enzymes in Soil Health and Activity Changes Depending on Climate Change and the Type of Soil Ecosystem / J. Daunoras , A. Kačergius, R. Gudiukaitė // Biology (Basel) – 2024. – 13(2). – P.85. https://doi.org/10.3390/biology13020085
16. Булаткин Г. А. Оценка влияния управляемых лесов на баланс углекислого газа в атмосфере Земли / Г. А. Булаткин // Жизнь земли. – 2021. – Т 43, №1. – С. 54–66.
17. Казеев К. Ш. Биодиагностика почв: методология и методы исследований / К. Ш. Казеев, С. И. Колесников. – Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального ун-та, 2012. – 260 с.
18. Anderson T. H. Microbial eco-physiological indicators to asses soil quality / T. H. Anderson // Agriculture, ecosystems and environment. – 2003. – Vol. 98, No 1-3. – P. 285–293.
19. Кулагина В. И. Микробная биомасса и ферментативная активность лесных почв Раифского участка Волжско-Камского заповедника / В. И. Кулагина, Л. М. Сунгатуллина, С. С. Рязанов, Р. Р. Шагидуллин, А. Б. Александрова, Э. Х. Рупова // Российский журнал прикладной экологии. – 2023. – № 2 (34). – С. 49–56.
20. Перминова Е. М. Биохимическая активность подзолистых почв на вырубках среднетаёжных еловых лесов / Е. М. Перминова, Н. Н. Бондаренко, Т. Н. Щемелинина, Е. М. Лаптева // Теоретическая и прикладная экология. – 2023. – № 1. – С. 56–66.
21. Дроздова Н. И. Исследование инвертазной и протеазной активности почвы территорий, сопредельных с полигонами твердых коммунальных отходов / Н. И. Дроздова, В. С. Аверин // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2023. – № 3 (138). – С. 15–20.
22. Проблемы и основные направления повышения эффективности функционирования АПК региона в условиях глобализации и импортозамещения / Монография. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2025. – 392 с.
23. Телеснина В. М. Особенности морфологии и химических свойств постагрогенных почв южной тайги на легких отложениях (Костромская область) / В. М. Телеснина, И. Е. Ваганов, А. А. Карлсен, А. Е. Иванова, М. А. Жуков, С. М. Лебедев // Почвоведение. – 2016. – №1. – С. 115–129.

ENZYME ACTIVITY IN GRAY FOREST AND SOD-PODZOLIC SOILS OF TATARSTAN FORESTS

Kulagina V. I., Alexandrova A. B., Ryazanov S. S., Sungatullina L. M., Gordeeva K. A., Khairullina A. M., Rupova E. H.

Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, Kazan, Republic of Tatarstan, Russia
E-mail: viksoil@mail.ru

Multiple factors, including the activity of enzymes involved in the carbon cycle, influence the carbon balance in pools of forest ecosystems such as soil and forest litter. However, regional features of enzymatic activity under the soil-climatic conditions of the Volga region, to which Tatarstan belongs, remain insufficiently studied. Despite the availability of extensive data on enzymatic activity on a global scale, information regarding quantitative indicators of enzyme activity in gray forest and sod-podzolic soils of Tatarstan, as well as their relationship with qualitative characteristics of litter and

organic carbon stocks, remains fragmentary. The lack of systematized data hinders the development of accurate element cycling models for the region. The aim of this study was to assess enzyme activity in sod-podzolic and gray forest soils of the Republic of Tatarstan, to identify the relationship between enzymatic activity and organic carbon stocks in soil and forest litter, and to conduct a comparative analysis of the biochemical properties of soils under forests of different species compositions. Research was conducted in May 2025 across six sampling plots characterized by gray forest and sod-podzolic soils. Dominant tree species included pine, birch, oak, spruce, and larch, with forest ages ranging from 71 to 110 years. Five plots were established in artificially planted forests, while one 110-year-old oak stand was of natural origin. Catalase activity was determined using the Johnson and Temple method, invertase activity according to Shcherbakova T.A., and phosphatase activity following the method of Heller I.T. and Ginzburg K.E. The results indicated that mean invertase activity across the sampling plots ranged from 0.73 to 5.50 mg glucose/g soil per 4 hours, phosphatase activity from 1.42 to 6.77 mg P_2O_5/10 g soil per 24 hours, and catalase activity from 1.27 to 2.67 mL 0.1 N $KMnO_4$/g soil per 20 minutes. It was established that the mean activity of invertase, phosphatase, and catalase in gray forest soils was 1.5 to 3 times higher than in sod-podzolic soils; this difference was statistically significant according to the Tukey HSD test. The substantial difference in biochemical properties between gray forest and sod-podzolic soils further confirms the necessity of accounting for soil type in forest ecosystem research. Soil enzyme activity increased in the following order: pine stands < birch and oak stands < larch and spruce stands. No statistically significant differences in the activity of the studied enzymes were observed between soils of birch and oak stands. The high biochemical activity observed in spruce stand soils warrants further investigation. A strong interrelationship was detected among invertase, phosphatase, and catalase activities across the studied sites ($r = 0.71–0.86$, $p < 0.05$), attributable to the participation of these enzymes in the carbon cycle. Furthermore, the activities of invertase, phosphatase, and catalase demonstrated a stronger correlation with carbon stocks in the 0–30 cm soil layer than with humus and nitrogen content in the humus horizon. The correlation with carbon stocks in the 0–30 cm layer was moderate ($r = 0.50–0.68$, $p < 0.05$), whereas correlations with humus and nitrogen were weak ($r = 0.37–0.46$, $p < 0.05$). Additionally, a moderate relationship was found between forest litter carbon stocks and the activities of invertase ($r = 0.67$, $p < 0.05$) and phosphatase ($r = 0.69$, $p < 0.05$), while the relationship with catalase was weak ($r = 0.44$, $p < 0.05$). The tighter association of enzymatic activity with carbon pools in litter and soil, compared to current humus content, confirms the active involvement of enzymes in the carbon cycle within forest ecosystems. Further research into the relationship between soil enzyme activity and carbon cycling in forests of varying species compositions is recommended.

***Keywords*:** soil, forest ecosystems, invertase, catalase, phosphatase.

References

1. Zamolodchikov D. G. Systems for assessing and forecasting carbon reserves in forest ecosystems, *Sustainable forest management*, **4**, 15 (2011).

2. Kuznetsova A. I. Influence of vegetation on soil carbon stocks in forests (review), *Issues of forest science*, **4**, **4**, 1 (2021).
3. Pristova T. A. Carbon Reserves in the Soil of Young Birch-Spruce Forests in the Middle Taiga of the Komi Republic, *Ecosystems*, **40**, 76 (2024).
4. Kulagina V. I., Sungatullina L. M., Ryazanov S. S., Alexandrova A. B., Shagidullin R. R., Rupova E. H. Enzyme activity in sod-podzolic soils of young and middle-aged Forest, *Ecosystems*, **42**, 72 (2025).
5. Kulagina V. I., Alexandrova A. B., Ryazanov S. S., Shagidullin R. R., Sungatullina L. M., Rupova E. H. Carbon stocks distribution patterns in soils and forest litter of Volga-Kama Reserve, *Russian Journal of Applied Ecology,* **3**, 28 (2024).
6. Guidelines for the quantitative determination of the volume of absorption of greenhouse gases. Approved By order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated June 30, 2017 №. 20-p.
7. Kujur M., KumarPatel A. Kinetics of soil enzyme activities under different ecosystems: An index of soil quality, *Chilean journal of agricultural research,* **1**, 96 (2014).
8. Tsandekova O. L. The inflence of edaphic factors on the activity of soil enzymes in the under-tree space of woody plants in the conditions of the Kemerovo region, *Vestnik of Orenburg State Pedagogical University*, **3**, 68 (2025).
9. Khaziev F. Kh. Ecological relations of the enzymatic activity of soils, *Ecobiotech journal*, **2**, 80 (2018).
10. Galibina N. A., Nikerova K. M., Voshkina E. V., Klimova A. V. The biological activity of litter as an indicator of soil quality in pine forests of Eastern Fennoscandia, *Soil science*, **11**, 1589, (2024).
11. Takh I. P., Agirov A. H. Enzymatic activity of various soil types of forest and steppe zone in Western Caucasus, *New technologies*, **4,** 63 (2009).
12. Chernysheva E. V., Dushchanova K. S., Khomutova T. E., Borisova A. V. Soil Enzyme Activity in Natural and Ploughed Catenas as Parameters of Physiological State of Microbial Communities, *Advances in Current Biology,* **4,** 403 (2023).
13. Perminova E. M., Lapteva E. M. Catalase activity of podzolic soils in the native spruce bilberry forest and deciduous spruce forest stands of different age, *Agrarian Bulletin of the Urals,* **5,** 44 (2018).
14. Guolong Hou, Claudio O. Delang, Xixi Lu, Lei Gao. A meta-analysis of changes in soil organic carbon stocks after afforestation with deciduous broadleaved, sempervirent broadleaved, and conifer tree species, *Annals of Forest Science*, **77 (4)**, 92 (2020). ff10.1007/s13595-020-00997-3ff. ffhal-03354949f
15. Daunoras J., Kačergius A., Gudiukaitė R. Role of Soil Microbiota Enzymes in Soil Health and Activity Changes Depending on Climate Change and the Type of Soil Ecosystem, *Biology (Basel),* **13(2)**, 85 (2024). https://doi.org/10.3390/biology13020085
16. Bulatkin G. A. Influence of the manager forests on CO_2 balance in Earth's atmosphere, *Life of the Earth*, **1**, 54 (2021).
17. Kazeev K. Sh., Kolesnikov S. I. *Soil biodiagnostics: methodology and research methods*, 260 (Southern Federal University Publishing House, Rostov-on-Don, 2012).
18. Anderson T. H. Microbial eco-physiological indicators to asses soil quality, *Agriculture, ecosystems and environment*, **1-3**, 285 (2003).
19. Kulagina V. I., Sungatullina L. M., Ryazanov S. S., Shagidullin R. R., Alexandrova A. B., Rupova E. H. Microbial biomass and enzymatic activity of forest soils in the Raifa area of the Volzhsko-Kamsky reserve, *Russian Journal of Applied Ecology,* **2,** 49 (2023).
20. Perminova E. M., Bondarenko N. N., Shchemelinina T. N., Lapteva E. M. Biochemical activity of podzolic soils at the cuttings in middle taiga spruce forest, *Theoretical and applied ecology,* **1,** 56 (2023).
21. Drozdova A. N., Averin V. S. Study of invertase and protease activity of the soil of territories adjacent to solid municipal waste landfills, *Proceedings of Francisk Scorina Gomel State University*, **3**, 15 (2023).
22. *Problems and main directions for improving the efficiency of the regional agro-industrial complex in the context of globalization and import substitution,* 392 (Penza State Agrarian University, Penza, 2025).
23. Telesnina V. M., Vaganov I. E., Karlsen A. A., Ivanova A. E., Zhukov M. A., Lebedev S. M. Specific features of the morphology and chemical properties of coarse-textured postagrogenic soils of the southern taiga (Kostroma oblast), *Soil science*, **1**, 115 (2016).

Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского
Биология. Химия. Том 12 (78). 2026. № 2. С. 144–157.

УДК 631.461

DOI 10.5281/ZENODO.20788264

ЗАПАСЫ УГЛЕРОДА В СЕРЫХ ЛЕСНЫХ И ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВАХ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ ТАТАРСТАНА

Кулагина В. И., Александрова А. Б., Рязанов С. С., Шагидуллин Р. Р., Сунгатуллина Л. М., Гордеева К. А., Хайруллина А. М.

Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Казань, Российская Федерация
E-mail: viksoil@mail.ru

На примере 6 пробных площадок показано, что запасы углерода в дерново-подзолистых и серых лесных почвах под пологом леса отличаются статистически значимо согласно Tukey HSD test. Средние запасы углерода в серых лесных почвах в 2,8 раза выше, чем в дерново-подзолистых (50,5 т/га и 17,9 т/га соответственно). При этом на 5 пробных площадках из 6 реальные запасы углерода оказались на 19,1–66,2 т/га ниже справочных. Запасы углерода в биомассе древостоя лучше всего коррелируют с запасами углерода в слое почв 0-30 см (r=0,69). Доля почвенного углерода от общих запасов лесной экосистемы для серых лесных почв – 23,2–26,9 %, для дерново-подзолистых – 7,7–15,3 %. Запас углерода в лесной подстилке и мертвой древесине определяется не типом почвы, а породным составом леса.
Ключевые слова: органический углерод, почва, секвестрация углерода, лесные экосистемы, искусственные леса.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема секвестрации углерода, а также ее учета, по-прежнему, остается существенным вопросом в международной повестке дня. Председатель Правительства России Михаил Мишустин, выступая с докладом 13 ноября 2024 г. на 29-й сессии Конференции Сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата (COP29), отметил, что одним из приоритетов в реализации глобальной климатической повестки является внедрение практических механизмов реализации международных договоренностей и создание единой системы оценки качества климатических проектов.

Наиболее результативными в плане декарбонизации атмосферы считаются лесоклиматические проекты [1, 2]. Россия имеет огромный потенциал по поглощению углерода лесными экосистемами, нашей стране принадлежит 1/5 лесных ресурсов мира [3]. Однако объемы поглощающей способности лесов России при подсчете с использованием разных методик отличаются в 4 раза и более [2]. Для достижения справедливых международных договоренностей, правильного определения количества углеродных единиц, которые принесет тот или иной лесорастительный проект, необходимы достоверные исходные данные по содержанию углерода в лесных экосистемах и разных их пулах [2, 4, 5].

В лесных экосистемах кроме живой и мертвой растительной биомассы углерод депонируется в почвах. По данным ФАО на 2025 г. на почву приходится 46 % углерода лесных экосистем мира, что в целом совпадает со средними данными для почв лесов России [6, 7]. При этом в докладе по глобальной оценке лесных ресурсов ФАО отмечено, что оценка проведена на основе неполных данных.

В России количество исследований по депонированию углерода компонентами лесных экосистем постоянно растет. Настолько, что научные журналы публикуют специализированные выпуски, посвященные исключительно данной теме: журнал «Почвоведение» в 2024 году, журнал «Вестник МГУ. Серия 17 Почвоведение» планирует такой выпуск в 2026 году. И все же российские исследователи неоднократно подчеркивали, что исходных (полевых и лабораторных) актуальных данных по углеродным пулам в лесных экосистемах в настоящее время недостаточно, особенно это касается почв [2, 8, 9], что нужны дополнительные исследования локальных региональных особенностей при разных сценариях образования и развития лесных экосистем [6, 10, 11].

Справочные данные по запасам углерода в почвах лесных экосистем обычно составляются с учетом породного и возрастного состава леса, как, например, в «Методических указаниях по количественному определению объема поглощения парниковых газов» [12], что неудивительно – средне- и крупномасштабные почвенные карты лесных участков часто отсутствуют, как и свежие аналитические данные. Однако леса одного породного состава часто располагаются на почвах, относящихся к разным типам и заметно отличающимся по запасам гумуса [13–16].

Необходимость получения достоверных данных по запасам углерода в почвах лесных экосистем остается актуальной задачей.

Цель данной работы – определить запасы углерода в серых лесных и дерново-подзолистых почвах Республики Татарстан под лесами разного породного состава и соотнести их с запасами углерода в биомассе древостоя, мертвой древесине и лесной подстилке.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Отбор образцов лесной подстилки и почв, замеры деревьев проводились весной 2025 г. на 6 площадках, занятых в основном искусственно посаженными лесами среднего возраста и старше, исключением является только участок с естественным дубняком 110-летнего возраста (табл. 1).

Почвенный покров трех пробных площадок (ПП) представлен дерново-подзолистыми почвами, трех других – серыми лесными. Ранее исследованные нами лесные сообщества располагались преимущественно на дерново-подзолистых почвах [8, 11, 17]. Следует отметить, что на территории Татарстана дерново-подзолистые почвы занимают всего 7 % площади, серые лесные – 39,5 % [18]. При этом лесные участки в Предкамье республики часто расположены на дерново-подзолистых почвах. Благодаря относительно низкому плодородию дерново-подзолистые почвы менее привлекательны для распашки, вследствие чего лесные массивы, в том числе заповедные, нередко приурочены именно к ним. Однако в Республике Татарстан лесные посадки и естественные леса имеются и на серых

лесных почвах. Для разработки региональных нормативов по запасам углерода в почвах лесов необходимо собрать базу данных по всем типам почв.

Пробные площадки прямоугольной формы закладывались на типичных участках леса. Размер площадок – 0,09–0,30 га. При более густом древостое необходимое для репрезентативной выборки количество деревьев располагается на меньшей площади.

Таблица 1

Характеристика пробных площадок

№ пробной площадки	Преобладающая порода, формула древостоя	Место расположения, происхождение, возраст, почва
ПП1	Сосна обыкновенная *(Pínus sylvéstris),* 10 С	Заказник Шорский, искусственная посадка, около 75 лет (приспевающие), почвы – дерново-подзолистые
ПП2	Береза повислая *(Betula pendula)* 10Б+Е+Лп	Охранная зона Раифского участка Волжско-Камского, искусственная посадка, 84 года (перестойные), почвы – дерново-подзолистые
ПП3	Сосна обыкновенная *(Pínus sylvéstris)* 10 С	Там же, искусственная посадка, 71 год (приспевающие), почвы – дерново-подзолистые
ПП4	Дуб высокоствольный *(Quercus petraea)* 7Д2Лп1Кл+В	Иске-Казанское участковое лесничество, близ с. Пановка, лес естественного возобновления, 110 лет (перестойные), почвы – серые лесные
ПП5	Лиственница сибирская *(Larix sibirica),* Лс10	Там же, искусственная посадка, 80 лет (средневозрастные), почвы – серые лесные
ПП6	Ель европейская *(Picea abies)* 8Е2Лс	Там же, искусственная посадка, 80 лет (приспевающие), почвы – серые лесные

Запасы органического углерода определялись в следующих пулах: почве, сырорастущей и мертвой древесине, лесной подстилке.

Диаметр каждого дерева замерялся на высоте 1,3 м. Объем древесины определялся по объемным таблицам. Запас углерода в биомассе древостоя вычислялся путем умножения объема древесины на конверсионный коэффициент [11, 12].

Образцы почв на каждой площадке отбирали из пяти точек, расположенных по углам площадки и в середине. Отбор образцов проводился строго по генетическим горизонтам почв, но запасы рассчитывались на слои определенной мощности. Методика подсчета более подробно описана ранее [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что в почвах пробных площадок средние запасы углерода в 30-исантиметровом слое колеблются от 9,1±2,0 т/га до 60,2±2,3 т/га (рис. 1). Минимальные запасы органического углерода обнаружены в дерново-подзолистой почве под сосняком в охранной зоне Раифского участка Волжско-Камского заповедника (ПП3). Максимальные средние запасы наблюдались в серых лесных почвах под дубняком и ельником (ПП4 и ПП6), максимальные медианные – под дубняком (ПП4).

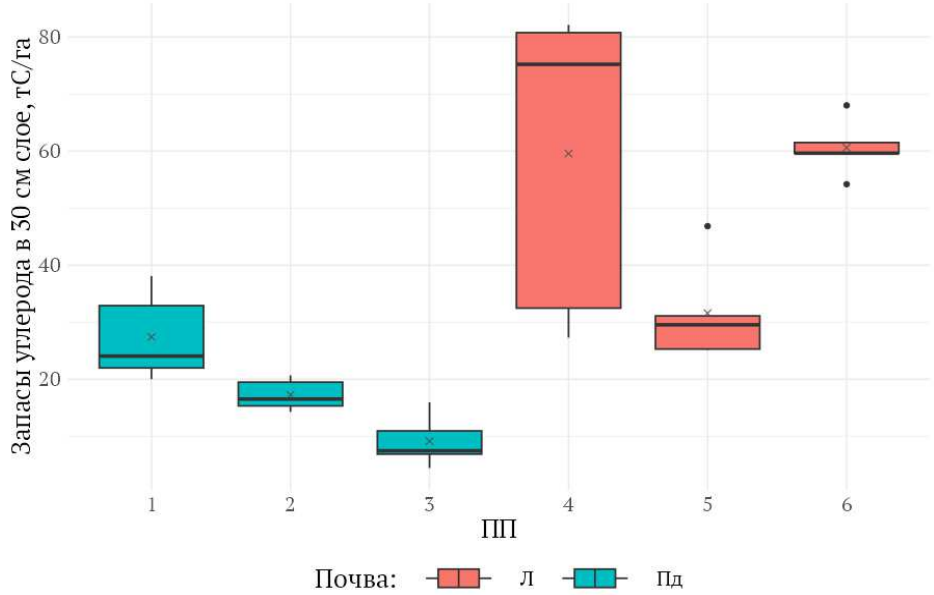


Рис. 1. Запасы углерода в почвах пробных площадок в слое 0–30 см. Расшифровку номеров площадок см. в таблице 1. Крестиком обозначено среднее значение, жирной линией – медиана, точки – «выбросы» значений. Л – серые лесные почвы, Пд – дерново-подзолистые почвы.

Согласно Tukey HSD test запасы углерода в почвах под естественным дубняком (ПП4) и искусственным ельником (ПП6) статистически значимо отличаются от запасов в почвах всех остальных исследованных пробных площадок (табл. 2).

На первый взгляд почва под сосняком заказника «Шорский» (ПП1) содержит больше углерода, чем под сосняком в охранной зоне Раифского участка заповедника (ПП3). Однако статистическая обработка результатов показала отсутствие значимой разницы между ними. Запасы углерода в почвах березняка (ПП2) не имеют статистически значимых отличий от запасов в почвах сосняков (табл. 2).

Средние запасы в дерново-подзолистых почвах под исследованными сосняками (27,3 т/га и 9,1 т/га) хорошо согласуются с ранее полученными данными для

Волжско-Камского заповедника и пробной площадки возле железнодорожной станции Новое Аракчино, где запасы под сосняками варьировали от 5,5 т/га до 27,4 т/га [8, 11, 17].

Таблица 2

Оценка значимости разницы по запасам углерода согласно тесту Тьюки (Tukey HSD test) в почвах пробных площадок

Пробные площадки	diff	lwr	upr	p adj
ПП2–ПП1	-10,144	-34,571	14,283	0,791
ПП3-ПП1	-18,279	-42,706	6,148	0,227
ПП4-ПП1	32,170	7,743	56,597	0,005*
ПП5-ПП1	4,178	-20,249	28,605	0,994
ПП6-ПП1	33,192	8,765	57,619	0,004*
ПП3-ПП2	-8,135	-32,562	16,292	0,903
ПП4-ПП2	42,315	17,888	66,741	0,000*
ПП5-ПП2	14,323	-10,104	38,750	0,477
ПП6-ПП2	43,336	18,909	67,763	0,000*
ПП4-ПП3	50,450	26,023	74,876	0,000*
ПП5-ПП3	22,458	-1,969	46,885	0,084
ПП6-ПП3	51,471	27,044	75,898	0,000*
ПП5-ПП4	-27,992	-52,419	-3,565	0,018*
ПП6-ПП4	1,022	-23,405	25,449	1,000
ПП6-ПП5	29,013	4,587	53,440	0,013*

Примечание: *разница значима

Запасы под березняком пробной площадки № 2 (17,3 т/га) оказались ниже, чем в среднем для Раифского участка заповедника (31,4 т/га), что объясняется более легким гранулометрическим составом почвы пробной площадки.

Запасы углерода в почве под искусственной посадкой ельника близ с. Пановка превышают запасы под ельниками Раифского участка заповедника в 6 раз (60,2 и 9,7 т/га соответственно) [8]. В данном случае причина очевидна: имеющие длительную историю развития естественные ельники заповедника расположены на очень бедных дерново-подзолистых почвах, искусственная посадка высажена на нехарактерных для природных ельников серых лесных почвах.

Запасы углерода в почве перестойного дубняка почти в полтора раза выше, чем в почве ранее изученного средневозрастного дубняка близ станции Новое Аракчино – 59,6 т/га и 38,9 т/га [11].Основная причина та же – почвы двух участков относятся к разным типам.

При сравнении средних запасов углерода в почвах под лесами разного породного состава со справочными данными из «Методических указаний…» [12]

выявлена разница от 10,6 до 66,2 т/га (табл. 3). Согласно проведенным исследованиям справочные данные в большинстве случаев завышены по сравнению с реальными результатами. Исключением является почва дубняка, для которой справочные данные занижены на 10,6 т/га (табл. 3).

Таблица 3

Запасы углерода в почвах лесов согласно справочным данным и разница с реальными запасами

№ пробной площадки	ПП1	ПП2	ПП3	ПП4	ПП5	ПП6
Запасы по справочным данным, т/га	71,5	83,4	71,5	49,0	73,7	79,3
Разница с реальными средними запасами, т/га	44,1	66,2	62,4	-10,6*	42,1	19,1
Отношение справочных запасов к реальным	2,6	4,8	7,8	0,8	2,3	1,3

Примечание:* отрицательное значение свидетельствует о том, что запасы углерода в почве больше справочных

Расхождения обусловлены особенностями построения справочных таблиц. В справочных таблицах «Методических указаний по количественному определению объема поглощения парниковых газов» (2017) тип почвы не учитывается, только макрорегион, преобладающая порода и возраст леса. Макрорегион, в который входит Республика Татарстан, очень обширный – Европейско-Уральская часть, южная тайга и южнее. На территории макрорегиона, для которого составлены справочные данные, в расчетную выборку вошли почвы нескольких разных типов, значительно отличающихся по запасам органического углерода, из них, как минимум, три зональных: дерново-подзолистые, серые лесные и черноземы. Самыми бедными по запасам гумуса являются дерново-подзолистые. Вполне ожидаемо, что разница между справочными данными и реальными запасами углерода для дерново-подзолистых почв выражена больше, чем для серых лесных (табл. 3).

Если рассматривать запасы углерода исследованных пробных площадок не по типам леса, а по почвам, то серые лесные почвы содержат в среднем почти в 3 раза больше углерода в слое 0–30 см, чем дерново-подзолистые (рис. 2). В этом полученные результаты согласуются с данными Иванова Д. В. с соавторами для почв лесных экосистем Татарстана [13]. Хотя абсолютные значения запасов в почвах исследованных пробных площадок несколько ниже средних значений для лесов республики [13].

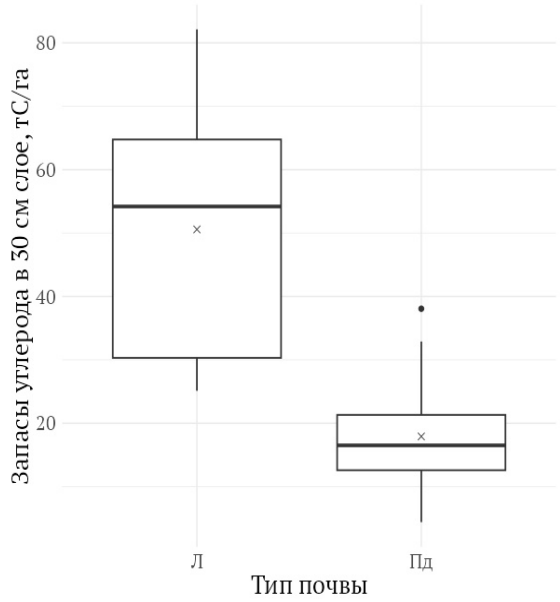


Рис. 2. Запасы углерода в серых лесных и дерново-подзолистых почвах пробных площадок. Крестиком обозначено среднее значение, жирной линией – медиана, точки – «выбросы» значений. Л – серые лесные почвы, Пд – дерново-подзолистые почвы.

Статистическая обработка результатов с использованием Tukey HSD test подтвердила значимую разницу между серыми лесными и дерново-подзолистыми почвами по запасам органического углерода (табл. 4).

Таблица 4

Оценка значимости разницы по запасам углерода согласно тесту Тьюки (Tukey HSD test) между серыми лесными и дерново-подзолистыми почвами

Сравниваемые почвы	diff	lwr	upr	p adj
Дерново-подзолистые – серые лесные	-32,655	-44,727	-20,582	0,000*

Примечание: *разница значима

Распределение запасов углерода в слоях разной толщины также различаются в серых лесных и дерново-подзолистых почвах исследованных пробных площадок (рис. 3). В дерново-подзолистых почвах основная доля запасов органического углерода сосредоточена в пределах слоя 0–30 см, прирост с глубиной не столь значителен. При учете только запасов только в слое 0–30 см, а не всей метровой толщи, неучтенными окажутся 20–40 % углерода.

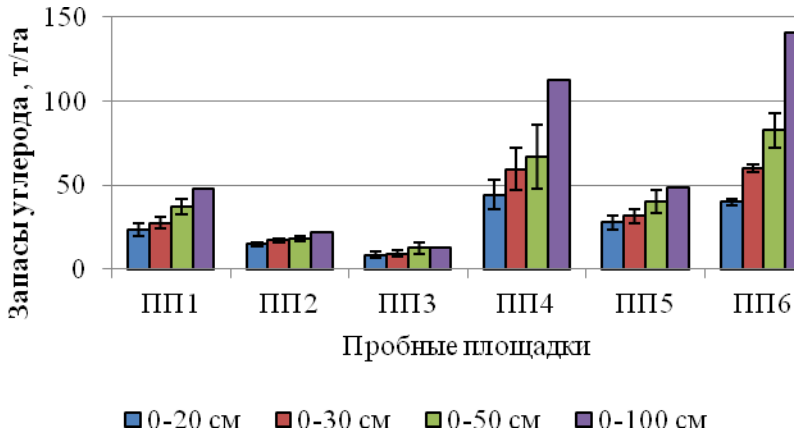


Рис. 3. Запасы органического углерода в разных расчетных слоях почв пробных площадок (M±m).

В серых лесных почвах гумусовый профиль более мощный и запасы в метровой толще в двух случаях из трех вдвое превышают запасы слоя в 0–30 см. При расчете на слой 0–30 см неучтенными окажутся 40–60 % органического углерода почв. Полученные результаты согласуются с обобщенными результатами для почв лесных экосистем республики [13], с данными для почв Национального парка «Нижняя Кама» [14], данными Шакирова К. Ш. для почв широколиственных лесов республики [16], а также с данными Черновой О. В. для дерново-подзолистых почв европейской части России [19].

Проведенные исследования показали, что в лесах среднего возраста и старше, независимо от преобладающей породы, биомасса древостоя коррелирует с запасами углерода в почвах (рис. 4).

Самый высокий коэффициент корреляции Пирсона отмечен для слоя 0–30 см (r=0,69), это значение находится на границе между высокой и средней зависимостью. Для слоя 0–100 см коэффициент корреляции составляет 0,67 (средняя зависимость).

Полученные результаты вполне ожидаемы, положительное воздействие высокого содержания органического вещества лесных почв на продуктивность древесных насаждений является общепризнанной [15, 20, 21]. Шакиров К. Ш. и Арсланов П. А., исследовавшие почвы широколиственных лесов Предволжья Республики Татарстан, также отмечали прямую зависимость между запасами гумуса в исследованных почвах и продуктивностью произрастающих на них лесов [16].

Следует отметить еще один момент: на самых бедных дерново-подзолистых почвах наблюдается самое широкое соотношение запасов углерода в биомассе древостоя к запасам в почвах – в 11 раз, в то время как на более богатых серых лесных почвах – всего в 2–3 раза.

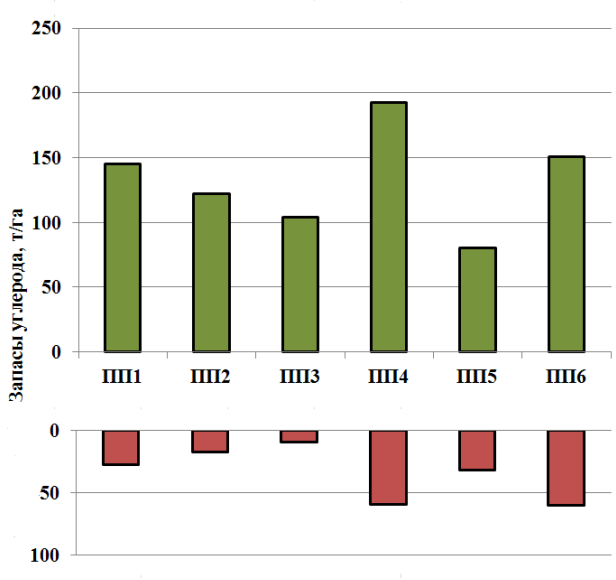


Рис. 4. Запасы углерода в биомассе древостоя (зеленый цвет) и в толще почвы 0–30 см (красный цвет).

На долю почвы в общих запасах углерода исследованных лесных экосистем приходится от 7,7 до 26,9 % (табл. 5).

Таблица 5

Структура запасов органического углерода экосистемы, %

№ ПП	Тип леса	Доля запасов углерода от общих запасов углерода экосистемы, %			
		Биомасса древостоя	Почва, слой 0-30 см	Лесная подстилка	Мертвая древесина
ПП1	Сосняк приспевающий	80,8	15,3	3,4	0,6
ПП2	Березняк перестойный	82,9	11,7	0,5	5,0
ПП3	Сосняк приспевающий	88,1	7,7	2,6	1,5
ПП4	Дубняк перестойный	75,0	23,2	0,6	1,2
ПП5	Лиственничник средневозрастный	66,9	26,3	6,0	0,8
ПП6	Ельник приспевающий	67,4	26,9	5,2	0,5

В экосистемах, расположенных на серых лесных почвах, доля почв в общих запасах больше, чем в расположенных на дерново-подзолистых почвах. Разница статистически значима (t-тест, $p<0,05$).

Доля запасов углерода, приходящаяся на почву, в березняке перестойном

несколько меньше, чем исследованном ранее березняке средневозрастном [11] – 11,7 % и 15,2 % от общих запасов. Полученные результаты согласуются с данными Наквасиной Е. Н. с соавторами, отмечавшими постепенное уменьшение доли почвы по мере развития лесных экосистем [10].

Доля запасов углерода, сосредоточенных в лесной подстилке, в лиственных лесах меньше, чем в хвойных (табл. 5), и от типа почвы не зависит. Доля запасов углерода, приходящаяся на мертвую древесину (сухостой + валеж), в большинстве случаев не превышает 1,5 %, и только в березняке перестойном достигает 5 %. Последнее объясняется как особенностями породы, так и возрастом леса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что реальные запасы органического углерода в почвах под лесами 5 пробных площадок на 19,1–66,2 т/га ниже справочных, и только в серых лесных почвах под дубняком перестойным превышают справочные на 10,6 т/га.

Показано, что средние запасы органического углерода в 30-сантиметровом слое серых лесных почв примерно в 2,8 раза превышают запасы в дерново-подзолистых почвах исследованных пробных площадок (50,5 т/га и 17,9 т/га соответственно). Разница статистически значима согласно Tukey HSD test.

При учете только запасов углерода только в слое 0–30 см, а не всей метровой толщи, в дерново-подзолистых почвах неучтенными окажутся 20–40 % углерода, в серых лесных 40–60 %.

Запасы углерода в биомассе древостоя коррелируют с запасами углерода в почвах, даже при разном породном составе леса. Максимальная корреляция обнаружена с запасами в слое почвы 0–30 см (r=0,69).

Доля запасов углерода в почвах от общего запаса углерода лесной экосистемы зависит от типа почв: для дерново-подзолистых – 7,7–15,3 %, для серых лесных – 23,2–26,9 %. На запасы углерода в подстилке и мертвой древесине влияет не тип почвы, а породный состав леса.

Полученный результат еще раз подтверждает, что при оценке запасов углерода в почвах лесных экосистем лучше всего использовать данные, полученные путем полевых и лабораторных исследований. Для научно-обоснованных выводов о потоках углерода в лесной экосистеме и реальном размере поглощаемого и длительно депонируемого углерода необходимо продолжить исследования лесов на разных типах почв, и внести соответствующие дополнения в справочные таблицы.

Список литературы

1. Колесниченко Е. А. Научно-методические основы реализации проектов по сокращению выбросов и увеличению поглощения парниковых газов лесами в России / Е. А. Колесниченко, А. Г. Третьяков, А. П. Шашкин, И. Н. Якунина // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2025. – Т. 13, № 1 (68). – С. 20–37.
2. Сорокина Д. Д. Сравнительный анализ и оценка методик расчета поглощения парниковых газов лесными экосистемами, применяемых в Российской Федерации / Д. Д. Сорокина, А. В. Птичников, А. А. Романовская // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2023. – Т.87, № 4. – С. 497–511.

3. Швиденко А. З. Углеродный бюджет лесов России / А. З. Швиденко, Д. Г. Щепащенко // Сибирский лесной журнал. – 2014. – №1. – С. 69–92.
4. Савенкова Е. В. Перспективы участия российских верификаторов в программе Глобального углеродного совета и их роль в обеспечении доверия к климатическим проектам и качеству верификации углеродных единиц / Е. В. Савенкова, К. Р. Кашаев, Д. О. Цибарева // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2025. – Т. 33, № 3. – С. 380–399.
5. Романовская А. А. Подходы к реализации экосистемных климатических проектов в России / А. А. Романовская // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2023. – Т. 87, № 4. – С. 463–478.
6. Киселева В. В. Оценка пространственной неоднородности почвенных свойств при организации мониторинга запасов углерода в лесных экосистемах / В. В. Киселева, В. Н. Карминов, С. И. Чумаченко, А. Ю. Агольцов, Е. М. Митрофанов // Почвоведение. – 2024. – №11. – С. 1475–1487.
7. Щепащенко Д. Г. Запасы органического углерода в почвах России / Д. Г. Щепащенко, Л. В. Мухоротова, А. З. Швиденко, Э. Ф. Ведрова // Почвоведение. – 2013. – №2. – С 123–132.
8. Кулагина В. И. Запасы органического углерода в почвах Раифского участка Волжско-Камского заповедника / В. И. Кулагина, А. Б. Александрова, С. С. Рязанов, Р. Р. Шагидуллин, А. А. Андреева, Т. Г. Кольцова // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия. – 2023. – Т.9, № 1. – С. 143–158.
9. Оценка потоков парниковых газов в экосистемах регионов Российской Федерации. / Под редакцией чл.-корр. РАН А. А. Романовской. – М.: ИГКЭ, ООО «Принт», 2023. – 343 с.
10. Наквасина Е. Н. Динамика запасов углерода при формировании лесов на постагрогенных землях / Е. Н. Наквасина, Ю. Н. Шумилова // Известия вузов. Лесной журнал. – 2021. – №1 – С. 46–59.
11. Кулагина В. И. Запасы углерода в почвах и биомассе древостоя молодых и средневозрастных лесов Татарстана / В. И. Кулагина, А. Б. Александрова, С. С. Рязанов, Р. Р. Шагидуллин, К. А. Гордеева, Л. М. Сунгатуллина, Э. Х. Рупова // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия. – 2025. – Т. 11 (77), № 1. – С. 53–66.
12. Методические указания по количественному определению объема поглощения парниковых газов. Утв. Распоряжением Минприроды России от 30.06.2017. № 20-р.
13. Иванов Д. В. Предварительные оценки запасов углерода в почвах лесных экосистем Республики Татарстан / Д. В. Иванов, А. Б. Александрова // Российский журнал прикладной экологии. – 2022. – № 2 (30). – С. 56–60.
14. Рязанов С. С. Запасы углерода в почвах Национального парка «Нижняя Кама»: апробация методов расчета / Рязанов С. С., Кулагина В. И. // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. – 2023. – Т. 9, № 2. – С. 86–102.
15. Припутина И. В. Модельные оценки изменений запасов органического вещества в почвах лесных территорий Европейской России при разных режимах лесопользования / И. В. Припутина, В. Н. Шанин, П. В. Фролов, С. И. Чумаченко, Д. Н. Тебенькова // Почвоведение. – 2024. – №11. – С. 1639–1654.
16. Шакиров К. Ш. Почвы широколиственных лесов Предволжья / К. Ш. Шакиров, П. А. Арсланов. – Казань: Изд-во Казанского университета, 1982. –176 с.
17. Кулагина В. И. Запасы углерода, содержание гумуса и азота в почвах Саралинского и Раифского участков Волжско-Камского заповедника / В. И. Кулагина, А. Б. Александрова, С. С. Рязанов, Р. Р. Шагидуллин, Л. М. Сунгатуллина, К. А. Гордеева // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия. – 2024. – Т. 10, № 1. – С. 145–158.
18. Атлас Республики Татарстан. – М.: Производственное картосоставительское объединение «Картография», 2005. – 211 с.
19. Чернова О. В. Оценка запасов органического углерода лесных почв в региональном масштабе/ О. В. Чернова, И. М. Рыжова, М. А. Подвезенная // Почвоведение. – 2020. – №3. – С. 140–150.
20. Климачева Т. В. Эколого-лесоводственные аспекты формирования пригородных территорий в районе хвойно-широколиственных лесов Прикамья / Т. В. Климачева, Р. Р. Абсалямов // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. – 2019. – № 3 (59). – С. 10–19.

21. Мартыненко О. В. Зависимость продуктивности сосновых насаждений от почвенно-грунтовых условий в Московском учебно-опытном лесничестве / О. В. Мартыненко, В. Н. Карминов, Д. Г. Щепащенко, П. В. Онтиков // Лесоведение. – 2017. – № 6. – С. 411–417.

CARBON STOCKS IN GRAY FOREST AND SOD-PODZOLIC SOILS OF FOREST ECOSYSTEMS IN TATARSTAN

Kulagina V. I., Alexandrova A. B., Ryazanov S. S., Shagidullin R. R., Sungatullina L. M., Gordeeva K. A., Khairullina A. M.

Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, Kazan, Republic of Tatarstan, Russia
E-mail: viksoil@mail.ru

The issue of carbon sequestration and its accounting remains a significant topic on the international agenda. Russia possesses immense potential for carbon absorption by its forest ecosystems, accounting for one-fifth of the world's forest resources. However, estimates of the sequestration capacity of Russian forests vary by a factor of four or more depending on the methodology used. To achieve fair international agreements and correctly determine the number of carbon units generated by a given afforestation project, reliable baseline data on carbon content in forest ecosystems and their various pools are essential. The aim of this work is to determine carbon stocks in gray forest and sod-podzolic soils of the Republic of Tatarstan under forests of different species composition and to correlate them with carbon stocks in tree stand biomass, deadwood, and forest litter. The research was conducted on six sample plots with middle-aged and older forests of varying species composition. The soil cover of three plots is represented by sod-podzolic soils, and the other three by gray forest soils. Stocks of organic carbon in soils, tree stand biomass, forest litter, and deadwood were determined. It was shown that average carbon stocks in gray forest soils are 2.8 times higher than in sod-podzolic soils (50.5 t/ha and 17.9 t/ha, respectively). The difference is statistically significant according to the Tukey HSD test. In the soils of 5 out of 6 sample plots, actual carbon stocks were 19.1–66.2 t/ha lower than reference values, and only in gray forest soils under a 110-year-old oak forest they were 10.6 t/ha higher. Carbon stocks in soils under pine forests on sod-podzolic soils generally correspond to those under pine forests in the Volzhsko-Kamsky Nature Reserve on soils of the same type. Carbon stocks in gray forest soils under artificial spruce plantations were 6 times greater than in sod-podzolic soils under spruce forests in the Volzhsko-Kamsky Nature Reserve. In sod-podzolic soils, accounting for stocks only in the 0–30 cm layer, rather than the entire meter-thick layer, leaves 20–40% of carbon unaccounted for; in gray forest soils, 40–60 % of soil organic carbon remains unaccounted for. The positive impact of high humus content in forest soils on the productivity of tree stands is widely recognized. However, on the studied sample plots, this relationship was demonstrated using forests of different species composition. Carbon stocks in tree stand biomass correlate best with carbon stocks in the 0–30 cm soil layer

(r=0.69), while the correlation with stocks in the 0–100 cm layer is weaker (r=0.67). The proportion of soil carbon in the total stocks of the forest ecosystem is 23.2–26.9 % for gray forest soils and 7.7–15.3 % for sod-podzolic soils. Carbon stocks in forest litter and deadwood are determined not by soil type but by the species composition of the forest. The conducted research indicates that reference tables require adjustment for soil type, as soils of different types not only differ significantly in carbon stocks but also influence carbon stocks in tree stand biomass. Although for calculating carbon stocks in forest ecosystems, it is preferable to use field and laboratory data rather than reference values.

***Keywords*:** organic carbon, soil, carbon sequestration, forest ecosystems, artificial forests.

References

1. Kolesnichenko E. A., Tretyakov A. G., Shashkin A. P., Yakunina I. N. Scientific and methodological foundations for the implementation of projects to reduce emissions and increase the absorption of greenhouse gases by forests in Russia, *Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice*, **1**, 20 (2025).
2. Sorokina D. D., Ptichnikov A. V., Romanovskaya A. A. Comparative Analysis and Assessment of Methodologies Applied in the Russian Federation for Calculating Greenhouse Gas Absorption by Forest Ecosystems, *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya,* **4,** 497 (2023).
3. Shvidenko A. Z., Schepaschenko D. G. Carbon Budget of Russian Forests, *Siberian journal of forest science*, **1,** 69 (2014).
4. Savenkova E. V., Kashaev K. R., Tsibareva D. O. Prospects for participation of Russian verifiers in the Global Carbon Council program and their role in ensuring trust in climate projects and the quality of verification of carbon units, *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*, **33(3)**, 380 (2025).
5. Romanovskaya A. A. Approaches to Implementing Ecosystem Climate Projects in Russia, *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya,* **4**, 463 (2023).
6. Kiseleva V. V., Karminov V. N., Chumachenko S. I., Agol'tsov A. Yu., Mitrofanov E. M. Assessment of spatial heterogeneity of soil properties upon monitoring carbon stocks in forest ecosystems, *Soil Science*, **11**, 1795 (2024).
7. Schepaschenko D. G., Mukhortova L. V., Vedrova E. F. The pool of organic carbon in the soils of Russia, *Soil Science*, **2**, 123 (2013).
8. Kulagina V. I., Alexandrova A. B., Ryazanov S. S., Shagidullin R. R., Andreeva A. A., Koltcova T. G. Organic carbon stocks in the soils of the Raifa section of the Volzhsko-Kamsky reserve, *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry,* **1**, 143 (2023).
9. *Assessment of greenhouse gas flows in ecosystems of the regions of the Russian Federation*. 343. (Print, Moscow, 2023).
10. Nakvasina E. N., Shumilova Yu. N. Dynamics of Carbon Stocks in the Formation of Forests on Post-Agrogenic Lands, *Russian Forestry Journal*, **1,** 46 (2021).
11. Kulagina V. I., Alexandrova A. B., Ryazanov S. S., Shagidullin R. R., Gordeeva K. A., Sungatullina L. M., Rupova E. H. Carbon stocks in soils and stand biomass of young and midaged forests of Tatarstan, *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry,* **1**, 53 (2025).
12. *Guidelines for the quantitative determination of the volume of absorption of greenhouse gases*. Approved By order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated June 30, 2017 №. 20-p.
13. Ivanov D. V., Alexandrova A. B. Preliminary estimations of carbon stocks in soils of forest ecosystems of the Republic of Tatarstan, *Russian Journal of Ecosystem Ecology,* **2(30)**, 56 (2022).
14. Ryazanov S. S., Kulagina V. I. Carbon stocks in soils of the National park «Nizhnyaya Kama»: testing the assessment mesods, *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University*. *Geography. Geology*, **2**, 86 (2023).
15. Priputina I. V., Shanin V. N., Frolov P. V., Chumachenko S. I., Tebenkova D. N. Model estimates of changes in soil organic matter stocks in forested areas of European Russia under different forest management regimes, *Soil Science*, **11**, 1639 (2024).

16. Shakirov K. Sh., Arslanov P. A. *Soils of broad-leaved forests of the Volga region*. 176. (Kazan University, Kazan, 1982).
17. Kulagina V. I., Alexandrova A. B., Ryazanov S. S., Shagidullin R. R., Sungatullina L. M., Gordeeva K. A. Organic carbon stocks, humus and nitrogen contents in the soils of the Saralinsky and Raifa sections of the Volzhsko-Kamsky reserve**,** *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry,* **1**, 145 (2024).
18. *Atlas of the Republic of Tatarstan*. 211. (Cartography, Moscow, 2005).
19. Chernova O. V., Ryzhova I. M., Podvezennaya M. A. Assessment of organic carbon stocks in forest soils on a regional scale, *Soil Science,* **3,** 140 (2020).
20. Klimacheva T. V., Absalyamov R. R. Ecological and silvicultural aspects of the suburban areas formation in the area of coniferous – broadleaved forests in the Kama region, *The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy*, **3**, 10 (2019).
21. Martynenko O. V., Karminov V. N., Shchepashchenko D. G., Ontikov P. V. Soil Controls Productivity of Pine Forests in Moscow Experimental Forestry Enterprise, *Forest Science,* **6**, 411 (2017).

Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского
Биология. Химия. Том 12 (78). 2026. № 2. С. 158–169.

УДК 612.821

DOI 10.5281/ZENODO.20788463

БЕТА-РИТМ КАК НЕЙРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЙ МАРКЕР АКТИВАЦИИ ДЕФОЛТ-СИСТЕМЫ МОЗГА

Манюхина Е. Ф., Тум М. В., Куличенко А. М., Павленко В. Б.

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», Симферополь, Республика Крым, Российская Федерация
E-mail: vpav55@gmail.com

Изучали взаимосвязи между уровнем самореферентного мышления (СРМ), предполагающим активацию дефолт-системы мозга, чертами личности и особенностями электроэнцефалограммы (ЭЭГ) у испытуемых разных национальностей, проживающих в Республике Крым. Показатели СРМ положительно коррелировали с уровнем моральной нормативности по опроснику Кеттелла, уровнями подозрительности и враждебности по тесту Басса-Дарки. Выявлены статистически значимые взаимосвязи между активностью головного мозга в диапазоне бета-ритма ЭЭГ и склонностью к СРМ.
Ключевые слова: дефолт-система мозга, самореферентное мышление, ЭЭГ, бета-ритм.

ВВЕДЕНИЕ

Дефолт-система мозга (ДСМ), также известная как сеть пассивного режима работы или «режима по умолчанию», представляет собой нейронную сеть, обеспечивающую нормальное функционирование мозга в условиях отсутствия внешней сенсорной стимуляции. Отличительной особенностью ДСМ является то, что она снижает свою активность во время когнитивной деятельности, связанной с восприятием текущих событий окружающего мира [1]. С другой стороны, данная нейронная сеть увеличивает свою активность в условиях относительного покоя, например, когда испытуемого просят расслабиться и ни о чем не думать. Как известно каждому из личного опыта, при этом мыслительный процесс не прекращается. Установлено, что ДСМ играет ключевую роль в формировании таких процессов как самореферентное мышление (СРМ) и способность регулировать собственное эмоциональное состояние [2].

СРМ – это разновидность интроспективного мышления, направленного обдумывание собственных проблем, возможного будущего и т.п. К функциям СРМ относят: категоризацию полученного опыта, формирование адекватного ответа на социально значимые раздражители, формирование «Я-идентичности» человека. В результате информация, воспринимаемая как релевантная для формирования «Я-идентичности», получает более высокий приоритет при обработке, легко внедряется в имеющиеся ассоциативные связи и быстро извлекается [3]. Наряду с позитивными сторонами СРМ необходимо отметить, что данный вид мышления при чрезмерной выраженности может переходить в руминацию. Руминация – это

навязчивое мышление, включающее повторяющиеся мысли или темы, которые мешают другим формам умственной деятельности. Как правило, она связана с тревожными размышлениями либо о будущем, либо о прошлом негативном опыте. Выявлена связь между навязчивыми размышлениями и активацией ДСМ [4].

Компоненты ДСМ впервые были выявлены с помощью томографии на основе функционального магнитного резонанса – как оказалось, у людей в состоянии покоя при закрытых глазах формируются крупные нейронные сети с повышенной активностью [5]. Функционирование ДСМ обеспечивается несколькими взаимосвязанными путями, которые интегрируют и координируют активность ряда структур мозга. Основным регулятором деятельности ДСМ выступает кортико-стриато-таламо-кортикальный контур, представляющий собой замкнутую петлю, объединяющую префронтальную зону коры головного мозга, базальные ганглии и таламус. Данный контур обеспечивает баланс между процессами возбуждения и торможения, регулируя уровень внимания и когнитивной гибкости [6].

Помимо описанного выше контура, в состав ДСМ входят: задняя часть цингулярной коры, дорсомедиальная префронтальная кора, гиппокамп и миндалевидное тело. Задняя часть цингулярной коры играет важную роль в обработке эмоциональных стимулов и формировании эмоциональной памяти, что делает данную область критически значимым компонентом ДСМ. Дорсомедиальная префронтальная кора участвует в формировании чувства стыда, эмпатии и усвоения социальных норм поведения Префронтальная кора в целом интегрирует данные психические компоненты, обеспечивая адаптивное социальное взаимодействие. Гиппокамп является центральным элементом системы долговременной памяти. Данная структура обеспечивает формирование логических связей между событиями, адаптацию к новым условиям на основе предыдущего опыта и интеграцию сенсорной информации. Гиппокамп также играет важную роль в регуляции эмоционального состояния и когнитивной гибкости, что делает его ключевым компонентом ДСМ [7]. Миндалевидное тело или амигдала, регулирует интенсивность реакции на эмоционально значимые стимулы, формирует чувство страха и тревожности, а также осуществляет активацию симпатической нервной системы. Усиление активности амигдалы может приводить к повышению уровня тревожности и снижению эффективности функционирования ДСМ [8].

Дисфункции ДСМ, вызванные такими факторами, как расстройства развития, нейродегенеративные заболевания или тяжелые психические травмы, могут проявляться в повышенной тревожности, снижении самоконтроля и когнитивных нарушениях. Чрезмерная активация ДСМ в некоторых случаях может приводить к появлению симптомов психоневрологических заболеваний [9]. При обсессивно-компульсивном расстройстве наблюдается дисбаланс в активности кортико-стриато-таламо-кортикального контура. Это приводит к чрезмерной сосредоточенности на повседневных задачах (обсессиям) и формированию стереотипных ритуалов для снижения уровня тревожности (компульсиям) [10]. Данные функциональных нейровизуализационных исследований указывают на то, что с аномальным функционированием ДСМ связаны слуховые вербальные галлюцинации [11]. У больных шизофренией в состоянии покоя чрезмерно

увеличивается активность и повышается коннективность в передних медиальных областях коры, что говорит о гиперактивации ДСМ, приводящей к появлению бреда и галлюцинаций. При дебюте заболеваний относящихся к спектру тревожных расстройств, выраженность депрессивной симптоматики коррелирует с доминированием ДСМ в правой височной доле коры [12]. У испытуемых с посттравматическим стрессорным расстройством нейровизуализационные исследования выявляют измененную активность медиальной префронтальной и задней поясной коры в состоянии покоя, а также патологические паттерны связности между дефолт-системой, сетью выявления значимости стимулов и центральной исполнительской сетью [13]. Указывают, что данное расстройство характеризуется дисфункцией дефолт-системы, связанной с навязчивыми воспоминаниями о травматическом событии, избеганием связанных с травмой стимулов и изменениями самоидентичности.

Как отмечалось выше, особенности активации ДСМ впервые описали на основе функциональной томографии. В тоже время данные, полученные при регистрации электроэнцефалограммы (ЭЭГ) в условиях относительного покоя и предположительной активации структур ДСМ остаются противоречивыми. Указывают [14], что с процессами внутренне ориентированного мышления и автобиографической памяти связан рост тета-ритма в медиальных структурах височной доли и фронтальной коры, а также рост функциональной связности дельта-ритма в сетях покоя. В другом исследовании [15], в условиях, предполагающих активацию ДСМ, выявлено увеличение мощности бета- и падение мощности альфа-ритмов. Некоторые авторы [16] также наблюдали в подобных условиях снижение мощности альфа-ритма в слуховой коре и одновременное повышение мощности в тета-диапазоне в медиальной префронтальной коре. В тоже время по результатам исследований Г. Г. Князева с коллегами [17] при росте уровня СРМ и активации ДСМ, выявленной по результатам параллельно проводимой функциональной томографии, мощность альфа-осцилляций растет. По мнению указанных авторов, десинхронизация альфа-ритма при открывании глаз или при выполнении когнитивной задачи сопровождается подавлением работы ДСМ и активацией систем, ориентированных на обработку внешней информации. Также, недостаточно изученным остается вопрос о том, каким образом в биоэлектрической активности структур дефолт-системы отражаются индивидуально-типологические особенности личности.

Исходя из вышеизложенного, целью исследования явилось изучение взаимосвязи между уровнем СРМ, предполагающим активацию ДСМ, чертами личности и особенностями ЭЭГ у испытуемых разных национальностей, проживающих в Республике Крым. Поскольку часть испытуемых, как правило, относивших себя к украинцам, прибыли в Крым из тех регионов, где недавно проходили боевые действия, особый интерес представляли особенности ЭЭГ у этой группы. Также одной из задач исследования явилось установление на основе электромагнитной томографии низкого разрешения (LORETA) пространственной локализации глубинных источников электрической активности мозга у испытуемых с высоким уровнем СРМ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В эксперименте участвовало 63 испытуемых в возрасте от 18 до 45 лет, 11 представителей мужского пола и 52 – женского. По национальной принадлежности 42 испытуемых отнесли себя к русским, 12 – к украинцам и 9 – к крымским татарам. Все процедуры, выполненные в исследовании, соответствуют этическим стандартам. Каждый участник исследования дал добровольное информированное согласие после получения разъяснений о характере предстоящего исследования.

Регистрацию ЭЭГ осуществляли с помощью электроэнцефалографа «Нейрон-Спектр – 5», ЭЭГ-потенциалы отводили монополярно в 19-ти отведениях по системе 10–20. На испытуемого накладывались чашечковые электроды в лобных, теменных, височных, центральных и затылочных зонах (Fp1, Fp2, F7, F3, Fz, F4, F8, T3, C3, Cz, C4, T4, T5, P3, Pz, P4, T6, O1, O2). После непродолжительного мониторинга начинали запись. Испытуемого просили сидеть спокойно, с открытыми глазами в течение 1 минуты. После этого просили закрыть глаза, расслабиться, не думать о чем-то конкретном. Запись велась в течение 3 минут.

После окончания эксперимента испытуемым предлагали заполнить опросник склонности к СРМ [18]. Указанный опросник нами был несколько сокращен (до 18 вопросов) и адаптирован под задачи эксперимента. Максимально возможное количество баллов по шкале СРМ – 30. Также испытуемые в дистанционном режиме на сайте «Психологические тесты онлайн» (https://psytests.org) заполняли 16-факторный личностный тест Кеттелла, опросник на уровень тревожности Спилберга – Ханина и тест Басса-Дарки для оценки враждебности.

Артефакты в ЭЭГ-записи, полученной при закрытых глазах испытуемого, устраняли при визуальном просмотре и с помощью метода анализа независимых компонент (Independent Components Analysis, ICA) в пакете EEGLAB toolbox (http://www.sccn.ucsd.edu/eeglab/). Затем определяли мощность альфа-, дельта-, тета-, бета- и гамма-ритмов ЭЭГ.

Для статистического анализа использовался пакет STATISTICA (версия 10). В зависимости от вида распределения данных (определяли по тесту Шапиро-Уилка) использовали параметрические или непараметрические критерии. Для установления взаимосвязей между переменными использовался корреляционный анализ. Для установления степени влияния разных факторов на показатели ЭЭГ использовался дисперсионный анализ (ANOVA). При этом с целью нормализации данных ЭЭГ применяли логарифмическое преобразование. Для оценки влияния психологических факторов личности, испытуемых делили на группы относительно медианного значения – с низким и высоким показателем фактора. Для локализации центров генерации ритмов ЭЭГ использовалась программа LORETA (low resolution brain electromagnetic tomography). Программа находится в свободном доступе (https://www.uzh.ch/keyinst/loreta).

Остальные подробности методики описаны ранее [19].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Средний уровень СРМ у всех испытуемых составил 16,15±0,66 баллов при крайних значениях 6–26 баллов. Уровень СРМ у испытуемых, относивших себя к

русским, оказался 16,0±0,66, к украинцам – 16,7±0,99, к крымским татарам – 16,0±1,98 баллов. Применение теста Краскела-Уоллиса не выявило статистически значимых различий между группами (p=0,23). Таким образом, у участников исследования, прибывших из новых регионов России, не выявлено повышенной склонности к СРМ, которую часто связывают с посттравматическим стрессорным расстройством.

Применение рангового критерия Спирмена выявило следующие значимые взаимосвязи уровня СРМ и личностных особенностей испытуемых. Показатели СРМ положительно коррелировали с уровнем моральной нормативности (G фактор) по опроснику Кеттела ($r = 0,283$, при $p = 0,021$), уровнями подозрительности и враждебности по тесту Басса-Дарки (в обоих случаях $r = 0,382$, при $p = 0,002$). Моральная нормативность характеризует настойчивое стремление к соблюдению моральных требований [20]. Таким образом, если человек склонен к высокоморальному поведению, дисциплинированности и обязательности, то его ответ на раздражитель всегда будет держаться в рамках его сильной «Я-идентичности». Однако чрезмерная моральная нормативность может сочетаться с повышенной подозрительностью и враждебностью [21]. Подозрительность представляет собой состояние недоверия и настороженности в межличностных отношениях, при котором индивид предполагает потенциальную угрозу со стороны окружающих. Если человек склонен к подозрительности, то его внимание часто направляется вовнутрь, к своим ощущениям и мыслям, что активирует работу дефолт-системы мозга. Кажется, будто все окружающее может нести угрозу, поэтому постоянное внимание к деталям, способность моделировать негативные ситуации кратно повышается. Также может расти враждебность – обобщенная негативная и недоверчивая установка по отношению к другим людям [22]. Постоянные переживания, руминация и склонность видеть во всем угрозу могут быть взаимосвязаны с гиперактивацией ДСМ, приводя к повышению тревожности, подозрительности и появлению желания чрезмерно контролировать окружающую действительность.

При определении корреляции между показателями СРМ и значениями мощности ритмов мозга на основе расчета коэффициента корреляции Пирсона были получены статистически значимые результаты для бета-ритма в отведениях O1 ($r = 0,271$ при $p = 0,030$) и F7 ($r = 0,266$ при $p = 0,034$). Усиление бета-ритма свидетельствует о повышенной психической активности, часто связанной с напряженной обработкой информации [16]. Отведение O1 соответствует затылочной зоне коры, а также глубинным источникам ритма в задней части цингулярной коры и гиппокампе. Отведение F7 соответствует дорсомедиальной части префронтальной коры, являющейся функциональной частью ДСМ. Два очага, в затылочной и префронтальной зоне, являются центрами наиболее мощного вклада бета-ритма в паттерн ЭЭГ. Можно заключить, что активация СРМ сопровождается увеличением мощности бета-ритма в отведениях, соответствующих функциональным компонентам ДСМ. Представляется возможным соотнести работу ДСМ и активность исполнительной сети мозга, центрами которой являются

фронтальные и каудальные области коры [23]. Качество и содержание СРМ зависят от индивидуальных особенностей функционирования ДСМ.

Для определения влияния уровня СРМ на ритмы ЭЭГ использовался ANOVA с факторами ГРУППА (низкий и высокий уровень СРМ), ЛОКУС (19 отведений) и их взаимодействие. Результаты анализа подтвердили значимое влияние уровня СРМ на мощность бета-ритма, что подтверждает приведенные выше результаты корреляционного исследования (табл. 1).

Таблица 1

Результаты дисперсионного анализа влияния склонности к самореферентному мышлению на показатели мощности ритмов ЭЭГ

ГРУППА	ЛОКУС	ГРУППА × ЛОКУС
ДЕЛЬТА-РИТМ		
$F_{1, 54}$ = 1,872; p = 0,176	$F_{18, 97}$ = 22,347; p < 0,001	$F_{18, 97}$ = 0,972; p = 0,49
ТЕТА-РИТМ		
$F_{1, 54}$ = 1,16; p = 0,286	$F_{18, 97}$ = 28,23; p < 0,001	$F_{18, 97}$ = 1,32; p = 0,164;
АЛЬФА-РИТМ		
$F_{1, 54}$ = 1,035; p = 0,313	$F_{18, 97}$ = 37,36; p < 0,001	$F_{18, 97}$ = 0,82; p = 0,676
БЕТА-РИТМ		
$F_{1, 54}$ = 1,42; p = 0,237	$F_{18, 97}$ = 33,047; p < 0,001	**$F_{18, 97}$ = 1,901; p = 0,012**
ГАММА-РИТМ		
$F_{1, 54}$ = 0,058; p = 0,809	$F_{18, 97}$ = 14,44; p < 0,001	$F_{18, 97}$ = 0,739; p = 0,771

Примечание: значимые эффекты взаимодействия психологического фактора и зоны отведения ЭЭГ отмечены жирным шрифтом

Показатели мощности бета-ритма в разных отведениях у испытуемых с низким и высоким уровнем СРМ представлены на рисунке 1. Из рисунка видно, что у испытуемых, склонных к напряженному размышлению о своих проблемах, мощность данного ритма увеличена во всех отведениях. Результаты дисперсионного анализа с применением метода контрастов показали значимость различий в отведении О1.

Наши результаты согласуются с данными других исследователей [24], которые показали, что руминация в неклинической выборке молодых людей была связана с увеличением бета-ритма в нервных путях между ДСМ и центральной исполнительной сеть. Такая связь может стать причиной перехода от навязчивых размышлений к психопатологической уязвимости.

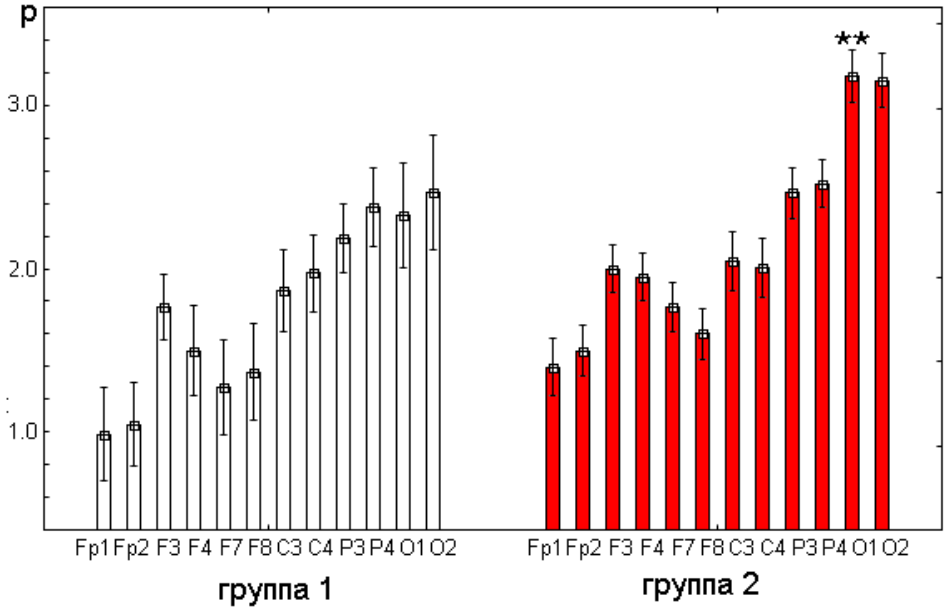


Рис. 1. Мощность (p) бета-ритма ЭЭГ у испытуемых с низким (группа 1, белые столбики) и высоким (группа 2, красные столбики) уровнем самореферентного мышления.
По вертикали – логарифмированные значения мощности бета-ритма (среднее и ошибка среднего), по горизонтали – часть отведений ЭЭГ. ** – различия между группами значимы при $p < 0,01$.

Для подтверждения полученных данных на основе метода выделения независимых компонентов (ICA) в программе EEGLAB построена карта спектральной мощности бета-ритма испытуемого с высоким уровнем СРМ, где отображены основные центры генерации ритма (рис. 2). Как видно из рисунка, у испытуемого с высоким уровнем СРМ наблюдаются обширные очаги генерации бета-ритма в зонах, соответствующих фронтальным и затылочным отведениям (F7 и O1).

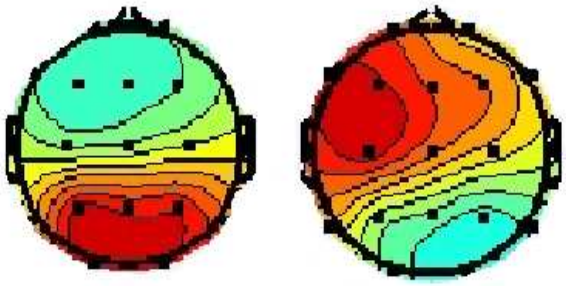


Рис. 2. Карта выраженности независимого компонента бета-ритма (13–30 Гц) у испытуемого И.С. с высоким уровнем самореферентного мышления.
Красным цветом отмечены очаги максимальной генерации бета-ритма.

С помощью метода LORETA построена усредненная карта глубинных источников ритма для группы из 27 испытуемых с высоким уровнем СРМ (рис. 3).

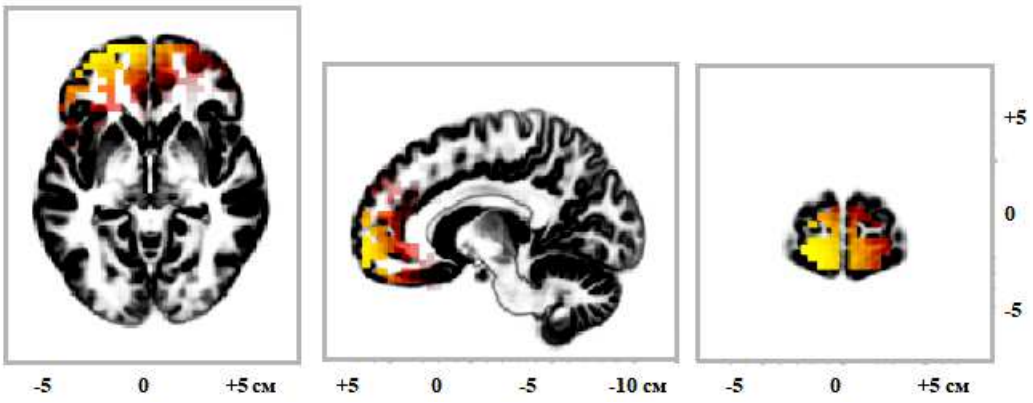


Рис. 3 Электромагнитная томограмма мозга низкого разрешения построенная на основании записей ЭЭГ 27 испытуемых с высоким уровнем самореферентного мышления.

Желтым цветом на томограмме отмечены очаги генерации бета-ритма. Слева показан виртуальный срез в горизонтальной, посередине – в саггитальной, справа – во фронтальной плоскости.

Анализ томограмм, выполненных с использованием технологии LORETA, показал, что основной источник генерации бета-ритма находится в дорсомедиальной части префронтальной коры, что согласуется с выявленными взаимосвязями СРМ с мощностью бета-ритма в отведении F7. Это соответствует данным предыдущих нейрофизиологических исследований, подчеркивающих значимость префронтальных областей коры в регуляции когнитивных функций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При активации СРМ в ЭЭГ испытуемых фиксируется повышение уровня бета-ритма в затылочных и фронтальных отведениях, соответствующих функциональным структурам ДСМ. Основные центры генерации ритма располагаются в отведениях O1 и F7, что подтверждается картами коры мозга, построенными на основе выделения независимых компонент. При изучении электромагнитной томограммы испытуемых с высоким уровнем СРМ во фронтальных отведениях выявлен очаг высокой выраженности бета-ритма. Можно предположить, что активная работа ДСМ вызывает у некоторых индивидов повышение уровня СРМ. Такие люди отличаются повышенной моральной нормативностью, но склонны к излишней подозрительности из-за высокого уровня тревожности.

Данное исследование может быть полезным для понимания роли ДСМ в развитии тревожных расстройств, посттравматического стрессового расстройства и

других нарушений поведения человека, а также разработки методов коррекции на основе биологической обратной связи по ЭЭГ.

Работа выполнена на оборудовании ЦКП научным оборудованием «Экспериментальная физиология и биофизика» ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского» в рамках инициативной темы № 126060421664-2 «Закономерности и механизмы адаптации организма к факторам разной природы»

Список литературы

1. Курганский А. В. Функциональная организация мозга человека в состоянии покоя / А. В. Курганский // *Журнал высшей нервной деятельности им. И. П. Павлова*. – 2018. – Т. 68, № 5. – С. 567–580.
2. Raij T. T. Dorsomedial prefrontal cortex supports spontaneous thinking per se / T. T. Raij, T. J. J. Riekki // Hum. Brain Mapp. – 2017. – Vol. 38, No. 6. – P. 3277–3288.
3. Сацукевич А. Опыт самореферентного сознания / А. Сацукевич // Философская антропология. – 2022. – Т. 8, № 1. – С. 62-76.
4. Zhou H. X. Rumination and the default mode network: Meta-analysis of brain imaging studies and implications for depression / H. X. Zhou, X. Chen, Y. Q. Shen [et al.] // NeuroImage. – 2020. – Vol. 206. – Art. 116287.
5. Mantini D. Electrophysiological signatures of resting state networks in the human brain / D. Mantini, M. G. Perrucci, C. Del Gratta [et al.] // M. Proc. Nat. Acad. Sci. U. S. A. – 2007. – Vol. 104, No. 32. – P. 13170–13175.
6. Альбертин С. В. Интегративные функции кортико-стрио-таламо-кортикальной системы мозга / С. В. Альбертин // Успехи физиологических наук. – 2021. – Т. 52, № 4. – С. 54–71.
7. Николаева Е. И. Дефолтная сеть (сеть пассивного режима работы мозга). Обзор иностранных источников / Е. И. Николаева // Комплексные исследования детства. – 2019. – Т. 1, № 1. – С. 80–84.
8. Жукова Д. И. Особенности дефолт-системы мозга у лиц с перфекционистскими установками / Д. И. Жукова // Дифференциальная психология и психофизиология сегодня: способности, образование, профессионализм. – 2021. – Т. 1, № 1. – С. 422–425.
9. Raine A. Reduced prefrontal gray matter volume and reduced autonomic activity in antisocial personality disorder / A. Raine, T. Lencz, S. Bihrle [et al.] // Arch. Gen. Psychiatry. – 2000. – Vol. 57, No. 2. – P. 119–127
10. Ishii R. Network-pluralistic psychiatry: linking genetics, brain connectivity, and psychosocial context / R. Ishii // Mental Health and Well-Being. – 2025. – Vol. 7, No. 5. – P. 123–145.
11. Вартанов А. В. Особенности организации дефолт-системы мозга в связи с выраженностью бреда и галлюцинаций при шизофрении / А. В. Вартанов, М. Д. Крысько, Д. А. Леонович [и др.] // Клиническая и специальная психология. – 2025. – Т. 14, № 3. – С. 136–153.
12. Бочаров А. В. Связь депрессии, тревожности и руминации с показателями коннективиности осцилляторных сетей покоя / А. В. Бочаров, Г. Г. Князев, А. Н. Савостьянов [и др.] // Физиология человека. – 2021. – Т. 47, № 2. – С. 16–21.
13. Щербакова А. М. Нарушения социального познания при посттравматическом стрессовом расстройстве: систематический обзор / А. М. Щербакова, И. С. Короткова // Психология посттравматического стресса: методология, теория, практика : материалы конференции. – 2025. – С. 398–405.
14. Fox M. D. The human brain is intrinsically organized into dynamic, anticorrelated functional networks / M. D. Fox, A. Z. Snyder, J. L. Vincent // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2018. – Vol. 102, No. 27. – P. 9673–9678.
15. Hipp J. F. Oscillatory synchronization in large-scale cortical networks predicts perception / J. F. Hipp, A. K. Engel, M. Siegel // Neuron. – 2011. – Vol. 69, No. 2. – P. 387–396.

16. Sadaghiani S. Distributed and antagonistic contributions of ongoing activity fluctuations to auditory stimulus detection / S. Sadaghiani, G. Hesselmann, A. Kleinschmidt // J. Neurosci. – 2009. – Vol. 29, No. 42. – P. 13410–13417.
17. Князев Г. Г. ЭЭГ-корреляты активности дефолт-системы при обработке социально значимой информации / Г. Г. Князев, А. В. Бочаров, А. Н. Савостьянов [и др.] // Журнал высшей нервной деятельности им. И. П. Павлова. – 2020. – Т. 70, № 2. – С. 174–181.
18. Knyazev G. G. Extraversion and anterior vs. posterior DMN activity during self-referential thoughts / G. G. Knyazev // Frontiers in Human Neuroscience. – 2013. – Vol. 6, No. 348. – P. 1–10.
19. Тум М. В. Психофизиологические особенности восприятия понятий, имеющих социальную значимость, у представителей разных национальностей, проживающих в Республике Крым / М. В. Тум, А. М. Куличенко, В. Б. Павленко // Вестник психофизиологии. – 2025. – № 3. – С. 66–73.
20. Резазадех З. Обусловленность психических состояний моральной нормативностью / З. Резазадех, Л. Ф. Баянова // Психологические исследования. – 2017. – Т. 10, № 53. – С. 1–10.
21. Свободный Ф. К. Определение психологических склонностей личности преступника с помощью методики Басса – Дарки / Ф. К. Свободный // Психопедагогика в правоохранительных органах. – 2001. – Т.16, № 2. – С. 114–117.
22. Кабачкова А. В. Влияние уровня двигательной активности на пространственное распределение бета-ритма электроэнцефалограммы / А. В. Кабачкова, Г. С. Лалаева, А. Н. Захарова // Известия ТулГУ. Физическая культура. Спорт. – 2016. – № 1. – С. 50–57.
23. Daigle K. M. Central Executive Network and Executive Function in Patients With Alzheimer's Disease and Healthy Individuals: Meta-Analysis of Structural and Functional MRI / K. M. Daigle, M. O. Pietrzykowski, A. B. Waters [et al.] // J. Neuropsychiatry Clin. Neurosci. – 2022. – Vol. 34, No. 3. – P. 204–213.
24. Imperatori C. Brooding rumination as a mediator of the association between default mode and central executive network connectivity and general psychopathology: a resting state EEG study / C. Imperatori, E. De Rossi, G. Allegrini [et al.] // Journal of Affective Disorders – 2026. – Vol. 394, Pt A. – Art. 120535.

BETA RHYTHM AS A NEUROPHYSIOLOGICAL MARKER OF BRAIN DEFULT SYSTEM ACTIVATION

Manyukhina E. F., Tum M. V. Kulichenko A. M., Pavlenko V. B.

V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Crimea, Russian Federation
E-mail: vpav55@gmail.com

The default mode network (DMN) is active during rest and less so during external tasks, playing a key role in self-referential thinking (SRM) and emotional regulation. Excessive SRM can lead to rumination, linked to DMN activation. DMN activity is regulated by the corticostriatal-thalamocortical circuit and involves key structures: the posterior cingulate cortex (emotional processing), dorsomedial prefrontal cortex (empathy and social norms), hippocampus (memory and cognitive flexibility), and amygdala (emotional responses). DMN dysfunction is associated with obsessive-compulsive disorder, schizophrenia (hyperactivation and hallucinations), anxiety/depressive disorders, and post-traumatic stress disorder (altered activity and connectivity). EEG findings on DMN are inconsistent: some studies report theta/delta increases and beta increase/alpha decrease, while others note alpha increase with higher SRM. The study aims to investigate relationships between SRM, personality traits, and EEG characteristics in a diverse

Crimean sample (including individuals from conflict zones) and to localise deep brain activity sources in high-SRM subjects using LORETA.

The study involved 63 participants (aged 18–45; 11 males, 52 females): 42 Russians, 12 Ukrainians, and 9 Crimean Tatars. All procedures complied with ethical standards and obtained voluntary informed consent. EEG was recorded using a Neuron-Spectrum – 5 device at 19 leads in two stages: 1 minute with eyes open (sitting quietly), followed by 3 minutes with eyes closed (relaxing without focused thoughts). Post-experiment, participants completed: a shortened SRM questionnaire (18 items, max 30 points), the 16-Personality Factor (Cattell) test, the Spielberger-Khanin Anxiety Inventory, and the Buss-Durkee Hostility Inventory online. EEG artifacts (eyes-closed data) were removed via visual inspection and ICA (EEGLAB toolbox). Power of alpha, delta, theta, beta, and gamma rhythms was then determined. Statistical analysis (STATISTICA 10) included Shapiro-Wilk testing for distribution type, followed by parametric/non-parametric tests, correlation analysis, and ANOVA. EEG data were log-transformed for normalization; participants were split into low/high groups by median values. LORETA was used to localize EEG rhythm sources.

Activation of the DMN is associated with increased beta-rhythm levels in occipital and frontal EEG leads (key sources localised at O1 and F7, confirmed by EEGLAB cortical maps). In participants with high SRM levels, a prominent beta-rhythm focus was detected in frontal leads. High DMN activity correlates with elevated SRM, which is linked to heightened moral normativity but also to excessive suspicion due to high anxiety and rumination. The findings enhance understanding of the DMN's role in anxiety disorders, PTSD, and other behavioural disturbances, and may inform EEG-based biofeedback correction methods.

***Keywords*:** default brain system, self-referential thinking, EEG, beta rhythm.

References

1. Kurgansky A. V., Functional organization of the human brain in the resting state, *Journal of Higher Nervous Activity named after I. P. Pavlov*, **68,** 567 (2018).
2. Raij T. T., Riekki T. J., Dorsomedial prefrontal cortex supports spontaneous thinking per se, *Human Brain Mapping*, **38**, 3277 (2017).
3. Satsukevich A., The experience of self referential consciousness, *Philosophical Anthropology*, **8**, 62 (2022).
4. Zhou H. X., Chen X., Shen Y. Q. and Li L., Rumination and the default mode network: Meta-analysis of brain imaging studies and implications for depression. *NeuroImage*, **206**, 116287 (2020).
5. Mantini D., Perrucci M. G., Del Gratta C. and Romani G. L., Corbetta M., Electrophysiological signatures of resting state networks in the human brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **104**, 13170 (2007).
6. Albertin S. V., Integrative functions of the corticostriatal thalamocortical brain system, *Advances in Physiological Sciences*, **52**, 54 (2021).
7. Nikolaeva E. I., The default mode network (resting state network): A review of foreign sources, *Complex Childhood Studies*, **1**, 80 (2019).
8. Zhukova D. I., Features of the default mode brain network in individuals with perfectionist attitudes, *Differential Psychology and Psychophysiology Today: Abilities, Education, Professionalism*, **1**, 422 (2021).

9. Raine A., Lencz T., Bihrle S. and LaCasse L., Colletti P., Reduced prefrontal gray matter volume and reduced autonomic activity in antisocial personality disorder, *Archives of General Psychiatry*, **57**, 119 (2000).
10. Ishii R., Network-pluralistic psychiatry: linking genetics, brain connectivity, and psychosocial context, *Mental Health and Well-Being*, **7**, 123 (2025).
11. Vartanov A. V., Krysko M. D., Leonovich D. A., and Shevaldova O. V. et al. Features of the organization of the default mode brain network in relation to the severity of delusions and hallucinations in schizophrenia. *Clinical and Special Psychology*, **14**, 136 (2025).
12. Bocharov A. V., Knyazev G. G., Savostyanov A. N., and Saprygin A. E. et al. The relationship between depression, anxiety, rumination and connectivity measures of resting state oscillatory networks. *Human Physiology*, **47**, 16 (2021).
13. Shcherbakova A. M., Korotkova I. S. Impairments in social cognition in post traumatic stress disorder: A systematic review. *Psychology of Post Traumatic Stress: Methodology, Theory, Practice: Conference Proceedings*, 398 (2025).
14. Fox M. D., Snyder A. Z., Vincent J. L., The human brain is intrinsically organized into dynamic, anticorrelated functional networks, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **102**, 9673 (2018).
15. Hipp J. F., Engel A. K., Siegel M., Oscillatory synchronization in large-scale cortical networks predicts perception, *Neuron*, **69**, 387 (2011).
16. Sadaghiani S., Hesselmann G., Kleinschmidt A., Distributed and antagonistic contributions of ongoing activity fluctuations to auditory stimulus detection, *Journal of Neuroscience*, **29**, 13410 (2009).
17. Knyazev G. G., Bocharov A. V., Savostyanov A. N. and Levin E. A. EEG correlates of default mode network activity during processing of socially significant information. *Journal of Higher Nervous Activity named after I. P. Pavlov*, **70**, 174 (2020).
18. Knyazev G. G. Extraversion and anterior vs posterior DMN activity during self-referentia thoughts, *Frontiers in Human Neuroscience*, **348**, 1 (2013).
19. Tum M. V., Kulichenko A. M., Pavlenko V. B. Psychophysiological features of perception of socially significant concepts among representatives of different nationalities living in the Republic of Crimea. *Bulletin of Psychophysiology*, **3**, 66 (2025).
20. Rezazadeh Z., Bayanova L. F. The conditioning of mental states by moral normativity. *Psychological Studies*, **10**, 1 (2017).
21. Svobodny F. K. Determination of psychological inclinations of a criminal's personality using the Bass–Darky method. *Psychopedagogy in Law Enforcement*, **16**, 114 (2001).
22. Kabachkova A. V., Lalaeva G. S., Zakharova A. N. The influence of physical activity level on the spatial distribution of the EEG beta rhythm. *Izvestiya TulSU. Physical Culture*. Sport, **1**, 50 (2016).
23. Daigle K. M., Pietrzykowski M. O., Waters A. B. and Swenson L. P., Gansler D. A., Central Executive Network and Executive Function in Patients With Alzheimer's Disease and Healthy Individuals: Meta-Analysis of Structural and Functional MRI, *Journal of Neuropsychiatry and Clinical Neurosciences*, **34**, 20 (2022).
24. Imperatori C., De Rossi E., Allegrini G. and Carbone G. A., Brooding rumination as a mediator of the association between default mode and central executive network connectivity and general psychopathology: a resting state EEG study, *Journal of Affective Disorders*, **394**, 120535 (2026)

Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского
Биология. Химия. Том 12 (78). 2026. № 2. С. 170–181.

УДК 612.821

DOI 10.5281/ZENODO.20788545

ОСОБЕННОСТИ РЕАКЦИИ УСВОЕНИЯ РИТМА ПРИ ВОСПРИЯТИИ РИТМИЧЕСКОЙ ФОТОСТИМУЛЯЦИИ: ВЛИЯНИЕ ПСИХОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИЧНОСТИ

Мустафаев Э. Р., Тум М. В., Куличенко А. М., Гурнаков Н. В., Павленко В. Б.

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», Симферополь, Республика Крым, Россия
E-mail: vpav55@gmail.com

Целью исследования являлся анализ изменения ЭЭГ у здоровых взрослых испытуемых при проведении сеанса ритмической фотостимуляции 5, 10 и 15 Гц, а также выявление влияния индивидуальных психологических особенностей человека на степень реакции усвоения ритма (РУР). В наибольшей степени РУР наблюдалась при частоте стимуляции 5 и 15 Гц. Выявлено, что у лиц со слабостью «Сверх-Я», низким самоконтролем и конформным поведением отмечается статистически значимое преобладание РУР на частоте 5 и 10 Гц во фронтальных, теменных и затылочных отведениях, что может свидетельствовать о снижении способности к произвольной регуляции восприятия и обработки сигналов. Результаты исследования подчёркивают важность учёта личностных черт при интерпретации особенностей РУР. Они также могут быть полезны для разработки персонализированных подходов к применению ритмической фотостимуляции в коррекционной работе.
Ключевые слова: ритмическая фотостимуляция, ЭЭГ, реакция усвоения ритма.

ВВЕДЕНИЕ

Первые исследования влияния ритмической фотостимуляции (РФС) на функциональную активность головного мозга проводились, начиная с середины прошлого века. РФС использовали как фактор выявления феномена фотосенситивности для диагностики эпилепсии при рутинной регистрации электроэнцефалограммы (ЭЭГ) [1]. В настоящее время метод РФС в сочетании с применением электроэнцефалографии также широко применяется в клинической диагностике эпилептических расстройств [2]. В этом случае РФС рассматривается как функциональная проба, которая основывается на предъявлении световых стимулов с определенными частотами [3].

С открытием в 1970-х годах артифициальных стабильных функциональных связей и разработкой метода их физиологической активации, было высказано предположение, что реакцию усвоения ритма (РУР), развивающуюся в ЭЭГ при РФС можно использовать в качестве маркера восстановления состояния нервной системы при корректировке функциональных расстройств [4]. Изучая восприимчивость к РФС установили, что восприятие световых вспышек зависит не

только от степени анатомо-функциональных нарушений корковых и подкорковых структур мозга [5]. В. Д. Небылициным было показано, что на характер РУР влияет также степень нестабильности процессов нейродинамики, уравновешенности процессов торможения и возбуждения [6]. Данным автором было установлено, что РУР на низких частотах более выражена у лиц с преобладанием высокого динамического торможения, а навязывание ритма на высоких частотах характерно для лиц с низким динамичным возбуждением.

В последние годы проводились работы по исследованию усвоения ритмов, соответствующих определенным частотным характеристикам световых мельканий. И. И. Коробейниковой и соавторами было определено, что временные параметры интеллектуальной деятельности взаимосвязаны с РУР при частоте стимуляции, приближенной к основному ритму ЭЭГ [7]. Зарипов К. А. и Нагорнова Ж. В. анализировали ЭЭГ у детей, проживающих в нескольких областях Севера России, и выявили, что у детей, живущих в разных географических регионах, фиксируется отличающаяся картина возрастного развития двух нейрофизиологических параметров: мощности ЭЭГ и способности мозга «подстраиваться» под ритмы фотостимуляции на высоких частотах [8]. В ряде работ упоминается зависимость проявления частотной модуляции ЭЭГ от особенностей РФС, в том числе от «несущей» частоты фотостимуляции, ее интенсивности и продолжительности [9, 10].

РФС нашла свое место в реабилитационной терапии: ее применяют для снижения уровня невротизма у людей с паническими атаками [11]. Также рекомендуют применение РФС для улучшения когнитивных функций пациентов с последствиями нарушений мозгового кровообращения. Исходят из того, что при проведении РФС сигналы воспринимаются зрительным анализатором с вовлечением в процесс корковых и лимбических структур, а также ретикулярной формации, что влияет на нейрогуморальную регуляцию организма в целом [12].

В тоже время, насколько нам известно, исследований по выявлению взаимосвязи между личностными характеристиками испытуемыми, определяемыми современными тест-системами, и особенностями РУР не проводились. Поэтому, целью нашего исследования являлся анализ изменения ЭЭГ у здоровых взрослых испытуемых при проведении сеанса РФС и выявление влияния индивидуальных психологических особенностей человека на степень РУР.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании приняли участие 80 студентов в возрасте от 18 до 45 лет (15 представителей мужского пола и 65 – женского; по национальной принадлежности 40 испытуемых отнесли себя к русским, 20 – к украинцам и 20 – к крымским татарам). Участники исследования были праворукими, имели нормальное или скорректированное до нормального зрение. По словам испытуемых, у них отсутствовали клинические нарушения, которые могли бы быть противопоказанием к применению РФС (фотосенситивность). Все процедуры, выполненные в исследовании, соответствуют этическим стандартам национального комитета по исследовательской этике и Хельсинкской декларации 1964 года, ее последующим изменениям или сопоставимым нормам этики. Они также были одобрены этическим комитетом ФГАОУ

ВО «Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского» (г. Симферополь), протокол № 1 от 25 января 2022 г. Каждый участник исследования дал добровольное информированное согласие после получения разъяснений о потенциальных рисках и преимуществах, а также о характере предстоящего исследования.

Для оценки психологических особенностей испытуемых использовались 16-ти факторный личностный опросник Кеттелла (16PF, форма А) и опросник Спилбергера-Ханина для оценки тревожности (STAI). Участники исследования проходили тестирование в дистанционной форме на сайте «Психологические тесты онлайн» (https://psytests.org). Для выявления воздействия психологического фактора личности на ЭЭГ выделяли группы с крайними (более выраженными) значениями психологического параметра (выше или ниже медианы, причем значения, равные медиане, исключались).

Во время регистрации ЭЭГ участники исследования сидели в кресле в затемненной комнате в положении сидя в кресле. Регистрация ЭЭГ осуществлялась с помощью электроэнцефалографа «Нейрон-Спектр-5» (ООО «Нейрософт», Россия). ЭЭГ-потенциалы записывали монополярно в 19 отведениях (Fp1, Fp2, F3, F4, F7, F8, Fz, C3, C4, Cz, T3, T4, T5, T6, P3, P4, Pz, O1, O2) по международной системе «10–20». Референтным электродом служили объединенные контакты на мочках ушей. Частоты среза фильтров высоких и низких частот составляли, соответственно, 0,5 и 35 Гц, частота квантования – 500 Гц.

Для проведения РФС применяли светодиодный стимулятор «ФС-1», входящий в комплект электроэнцефалографа «Нейрон-Спектр-5», формирующий прямоугольные направленные импульсы света красного спектра. Стимулятор располагали на расстоянии 10–15 см от глазных орбит, направляя его свет в область глазных яблок. В соответствии с рекомендациями Международной федерации клинической нейрофизиологии (IFCN) [13] исследование проводилось в два этапа: регистрация ЭЭГ в состоянии покоя и при воздействии стимула, с общей продолжительностью процедуры не более семи минут. В состоянии покоя ЭЭГ записывали при открытых глазах (2 мин.) и закрытых глазах (3 мин.). Световая стимуляция осуществлялась в три этапа по 20 секунд, с частотами 5, 10 и 15 Гц, разделенными 7-секундными паузами.

Артефакты в ЭЭГ-записи устраняли при визуальном просмотре и с помощью метода анализа независимых компонент (Independent Components Analysis, ICA) в пакете EEGLAB toolbox (http://www.sccn.ucsd.edu/eeglab/). Для анализа изменения спектральной мощности различных частотных компонентов в сигналах ЭЭГ использовался быстрый алгоритм преобразования Фурье. При этом анализ ЭЭГ проводили в полосах частот, соответствующие основным ритмам ЭЭГ: при стимуляции 5 Гц оценивали значения в полосе частот 4–6 Гц, т.е. в диапазоне тета-ритма; при 10 Гц – в полосе частот 9–11 Гц (в диапазоне альфа-ритма); при 15 Гц – в полосе частот 14–16 Гц (в диапазоне бета-ритма). Данные значения сравнивали с фоновыми при закрытых глазах и представили в виде процента отношения показателей ЭЭГ при РФС к фоновым значениям. Для сравнения значений мощности ЭЭГ у испытуемых разных групп ее показатели подвергали дисперсионному анализу с повторными измерениями (RM ANOVA) в пакете Statistica 12 с факторами: ГРУППА (две группы испытуемых с высокими и низкими показателями черты личности), ЛОКУС (19 отведений ЭЭГ), а также при их взаимодействии (ГРУППА × ЛОКУС).

Для оценки достоверности различий в каждом из 19 отведений после проведения дисперсионного анализа в качестве post-hoc теста использовали метод контрастов.

Статистически значимыми считали различия при $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Степень усвоения ритма на разных частотах анализировали с помощью дисперсионного анализа с факторами СИТУАЦИЯ (фон и стимуляция) и ЛОКУС. Обнаружено статистически значимое влияние фактора СТИМУЛЯЦИЯ при воздействии на частотах 5 ($F_{1, 74}$ =36,79 при $p < 0,001$), 10 ($F_{1, 72}$ =11,07 при $p < 0,01$) и 15 Гц ($F_{1, 69}$ =73,24 при $p < 0,001$). Степень и статистическую значимость РУР в разных отведениях выявили методом контрастов. Эффекты фотостимуляции на разных частотах представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Степень усвоения ритма у 80 испытуемых в разных отведениях ЭЭГ при ритмической фотостимуляции (РФС) с частотой 5, 10 и 15 Гц

Отведения ЭЭГ	Навязывание ритма в полосе частот (в %)		
	4-6 Гц (РФС 5 Гц)	9-11 Гц (РФС 10 Гц)	14-16 Гц (РФС 15 Гц)
Fp1	166,9±12,2***	118,7±12,8	349,8±29,3**
Fp2	177,6±13,8***	121,2±11,9	367,8±30,6**
F3	158,7±16,6***	119,9±11,6	317,2±24,5**
Fz	142,5±7,4***	119,3±12,7	317,1±24,1**
F4	155,6±9,9***	117,7±13,5	315,6±24,3**
F7	159,0±11,3***	119,4±12,1*	303,8±25,0**
F8	181,9±11,9***	118,9±12,2***	308,1±27,3**
C3	135,4±7,9***	113,3±12,2*	284,2±24,2***
Cz	144,5±7,0***	118,2±12,0	339,8±32,7**
C4	147,6±7,2***	114,7±11,4*	286,3±22,0**
T3	145,2±9,3***	112,1±11,2*	255,4±19,9***
T4	170,1±11,9***	118,4±12,1*	244,1±17,6**
P3	151,1±10,2***	118,2±14,7	290,5±24,5***
Pz	219,1±19,3***	175,2±38,0	463,1±47,0**
P4	152,9±9,6***	118,4±15,1	281,2±27,8***
T5	146,8±9,5***	109,6±12,7	240,8±18,7***
T6	158,5±10,2***	107,2±11,2*	221,5±16,8***
O1	410,8±55,5***	170,4±31,8	653,9±78,7**
O2	429,7±58,9***	153,2±22,2	695,1±79,8**

Примечание: Представлены средние значения изменений мощности ЭЭГ в процентах по отношению к фону и их ошибки; различия по отношения к фону значимы при: * – $p < 0,05$, ** – $p < 0,01$, *** – $p < 0,001$.

Из таблицы видно, что увеличение мощности ЭЭГ наблюдалось с наибольшей степенью усвоения ритма при частоте стимуляции 5 и 15 Гц. Так, мощность ЭЭГ в соответствующей частотной полосе при РФС 5 Гц в разных отведениях увеличивалась на 35–330 %, при стимуляции с частотой 15 Гц – на 121–95 %. Что касается эффектов стимуляции на частоте 10 Гц, то степень РУР была заметно меньше, и значимые эффекты наблюдалось только в отведениях F7, C3, C4, T3, T4 и T6. Мощность ЭЭГ при этом возросла на 7–70 %.

Для выявления влияния индивидуальных психологических особенностей испытуемых на степень РУР при РФС провели дисперсионный анализ с факторами ГРУППА (группы испытуемых с разной выраженностью черт личности) и ЛОКУС. Далее приведены эффекты только для тех факторов личности, которые оказывали статистически значимое влияние на характер РУР.

Как отмечалось выше, исходя из величины медианы испытуемых разделили на группы с низким и высоким уровнем фактора первого порядка G (Слабость/Сила «Сверх-Я») 16-факторного опросника Кеттелла. В группах оказалось 19 испытуемых с низким и 21 – с высоким значением фактора G. Результаты исследования выявили статистически значимое влияние взаимодействия факторов ЛОКУС и ГРУППА на усвоение ритма при РФС с частотой 5 и 10 Гц (табл. 2).

Взаимодействие факторов ЛОКУС И ГРУППА отражается в противоположной направленности РУР у испытуемых указанных групп в разных областях коры. Так, post-hoc анализ методом контрастов показал, что при частоте симуляции 5 Гц у испытуемых с низким и высоким значением силы «Сверх-Я» значимо отличалась степень РУР в отведении F7 (Рис. 1, представлены часть отведений). Как видно из рисунка, у людей низким значением фактора G, т.е. со слабостью «Сверх-Я», навязывание ритма в этом и большинстве других фронтальных отведений выше, чем у испытуемых с высоким значением данного фактора. В тоже время, у людей с высокой силой «Сверх-Я» в затылочных отведениях присутствует тенденция к более высокой степени усвоения ритма. Слабость «Сверх-Я» отражает непостоянство, переменчивость, недобросовестность и низкую нормативность поведения [14]. Можно предположить, что у испытуемых с такими особенностями нервной системы высокая степень навязывания ритма во фронтальных отведениях обусловлена относительно слабым развитием лобной коры. Данная область неокортекса ответственна за регуляцию поведенческих реакций, выступая в качестве внутреннего регулятора поведения [15]. Вероятно, у испытуемых группы с низкими значениями фактора G регулятивная функция ослаблена, что и проявляется в характерных для них негативных элементах поведения. Высокие показатели фактора G (сила «Сверх-Я») характерны для стойких, упорных, обязательных людей. Выраженное усвоение ритма в затылочной коре у испытуемых с высокими значениями фактора G является адекватной реакцией зрительной коры на световые стимулы [16].

Что касается РУР при частоте стимуляции 10 Гц, достоверных различий у испытуемых с низким и высоким значением силы «Сверх-Я» методом контрастов в определенных отведениях ЭЭГ выявлено не было.

Таблица 2.

Дисперсионный анализ влияния особенностей личности испытуемых (16-факторный опросник Кеттелла) на реакцию усвоение ритма при ритмической фотостимуляции с частотой 5, 10 и 15 Гц

ГРУППА	ЛОКУС	ГРУППА×ЛОКУС
5 Гц		
Фактор первого порядка G (Слабость «Сверх-Я»/Сила «Сверх-Я»)		
$F_{1, 40}$ =0,07; p = 0,800	$F_{18, 738}$ =10,33; p **< 0,001**	$F_{18, 738}$ =1,85; p **=0,017**
Фактор второго порядка F4 (Конформность/Независимость)		
$F_{1, 55}$ = 0,46; p = 0,462	$F_{18, 990}$ = 0,74; p **< 0,001**	$F_{18, 990}$ = 1,64; p **= 0,044**
10 Гц		
Фактор первого порядка G (Слабость "Сверх-Я"/Сила "Сверх-Я")		
$F_{1, 40}$ = 0,14; p = 0,710	$F_{18, 720}$ = 0,89; p = 0,585	$F_{18, 720}$ =1,78; p **= 0,024**
Фактор первого порядка Q3 (Низкий самоконтроль поведения/Высокий самоконтроль поведения)		
$F_{1, 46}$ = 1,89; p = 0,175	$F_{18, 828}$ = 0,88; p = 0,607	$F_{18, 828}$ = 2,82; p **< 0,001**
15 Гц		
Фактор второго порядка F1 (Низкая тревожность/Высокая тревожность)		
$F_{1, 54}$ = 0,03; p = 0,87	$F_{18, 972}$ = 0,30; p **< 0,001**	$F_{18, 972}$ = 1,99; p **= 0,008**

Для выявления влияния психологического фактора личности F4 (Конформность/Независимость) испытуемых разделили на группы с низким и высоким уровнем данного фактора (28 и 27 человек, соответственно). Результаты исследования свидетельствуют, что и в этом случае восприятие и усвоение ритма при РФС с частотой 5 Гц обусловлено взаимодействием факторов ЛОКУС и ГРУППА при p = 0,044 (см. табл. 2). Высокие показатели фактора F4 (независимость) характерны для самостоятельных и самодостаточных людей, проявляющих поведенческую, эмоциональную и мировоззренческую независимость. Они склонны сохранять свои убеждения, принимать решения самостоятельно и не поддаваться слепо групповому давлению [17]. Показатель конформности свидетельствует о склонности индивида к уступчивости, его зависимости от социального давления и принятии групповых норм как своих собственных [14]

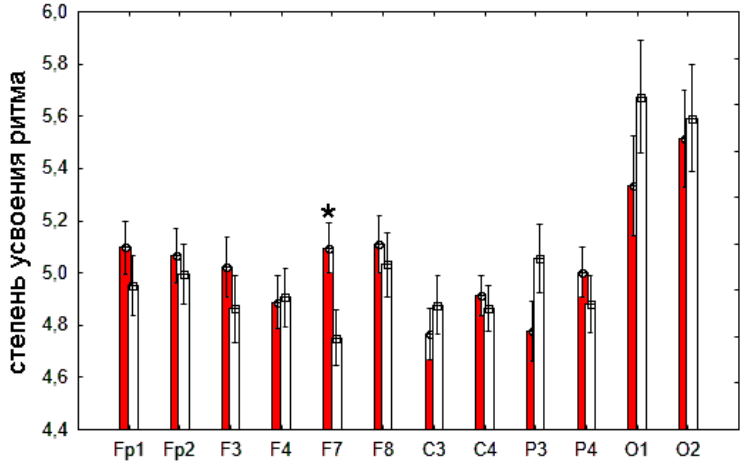


Рис. 1. Степень реакции усвоения ритма при ритмической фотостимуляции с частотой 5 Гц у испытуемых со слабостью «Сверх-Я»/силой «Сверх-Я» (красные и белые столбики, соответственно).

Примечания: По горизонтали – отведения ЭЭГ, по вертикали – логарифмированные значения степени усвоения ритма. Приведены средние значения и ошибки среднего. Красные столбики – выборка испытуемых с выраженной слабостью «Сверх-Я», белые столбики – с выраженной силой «Сверх-Я».

Анализ методом контрастов выявил, что у групп испытуемых с низким и высоким значением фактора F4 при частоте симуляции 5 Гц значимо отличалась степень РУР в отведении Fp1 (при $p = 0{,}031$) и F8 (при $p = 0{,}047$). В ходе исследования у испытуемых с выраженным проявлением конформности было обнаружено увеличение степени РУР во фронтальных отведениях, по сравнению с группой, имеющей ярко выраженную независимость поведения. В свою очередь, у испытуемых с высокими значениями данного фактора, т.е. с независимостью поведения, была выявлена тенденция к более высокой степени усвоения ритма в затылочных областях.

По значению психологического фактора первого порядка Q3 (Низкий самоконтроль поведения/Высокий самоконтроль поведения) испытуемых разделили на группы с низким и высоким уровнем данного фактора (25 и 21 человек, соответственно). Данный фактор отражает способность к волевому регулированию, планированию, сдерживанию импульсивных реакций и поддержанию целенаправленного поведения. Эти функции опосредованы активностью коры и её нисходящими связями с подкорковыми структурами. Самоконтроль предполагает более эффективную модуляцию возбудимых и тормозных процессов, адаптацию нейронных сетей к ритмическим стимулам, избегание избыточной эмоциональной реактивности, а также способность гибко подстраивать нейронную активность под частоту стимула [14, 17]. Результаты исследования свидетельствуют, что восприятие и усвоение ритма при РФС с частотой 10 Гц обусловлено взаимодействием факторов

ЛОКУС и ГРУППА при $p < 0{,}001$ (см. табл. 2). Методом контрастов выявили, что у групп испытуемых с низким и высоким значением фактора Q3 значимо отличалась степень РУР при частоте симуляции 10 Гц в отведениях P3 (при $p = 0{,}028$), Pz (при $p = 0{,}033$) и O2 (при $p = 0{,}018$). Причем степень навязывания ритма выше у людей с низким самоконтролем.

По значению психологического фактора второго порядка F1 (Низкая тревожность/Высокая тревожность) испытуемых разделили на группы с низким и высоким уровнем данного фактора (в группах оказалось 30 и 24 человек, соответственно). Результаты исследования свидетельствуют, что восприятие и усвоение ритма при РФС с частотой 15 Гц обусловлено взаимодействием факторов ЛОКУС и ГРУППА при $p = 0{,}008$ (см. табл. 2). Однако методом контрастов не удалось выявить отведения ЭЭГ, в которых наблюдались бы статистически значимые различия.

Для оценки влияния ритмической фотостимуляции на РУР испытуемых в зависимости от особенностей, оцениваемых по методике Спилбергера-Ханина, испытуемые были разделены на группы с низкими и высокими значениями личностной тревожности. В группах оказалось 23 испытуемых с низким и 25 – с высоким уровнем данного психологического параметра личности. В этом случае обнаружено взаимодействие факторов ГРУППА и ЛОКУС при РФС с частотой 10 Гц (табл. 3).

Таблица 3.

Дисперсионный анализ влияния личностной тревожности (опросник Спилбергера-Ханина) на усвоения ритма при фотостимуляции с частотой 10 Гц

ГРУППА	ЛОКУС	ГРУППА × ЛОКУС
$F_{1, 48;}$ p	$F_{18, 864;}$ p	$F_{18, 864;}$ p
0.20; 0.660	0.84; 0.939	1.66; **0.041**

По ситуативной тревожности испытуемые также были разделены на группы, но статистически значимого влияния фактора ГРУППА и взаимодействия факторов при этом выявлено не было.

Личностная тревожность, в отличие от ситуативной, которая носит временный характер, является устойчивой чертой. Эта черта отражает предрасположенность индивида воспринимать обширный круг ситуаций как состояния, представляющие опасность. Уровень личностной тревожности коррелирует с активностью лимбической системы (в частности, миндалевидного тела и гипоталамуса) [18]. Однако значимых различий между группами в конкретных отведениях по методу контрастов выявлено не было.

Влияние принадлежности испытуемых к той или иной национальности на степень РУР не было обнаружено при всех исследованных частотах фотостимуляции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о наличии взаимосвязи между психологическими характеристиками личности и особенностями регуляции РУР при РФС. Выявлено, что у лиц со слабостью «Сверх-Я», низким самоконтролем и конформным поведением отмечается статистически значимое выраженное навязывание ритмов 5 и 10 Гц во фронтальных, теменных и затылочных отведениях. Данный факт может свидетельствовать о повышенной реактивности первичных и ассоциативных зон коры по отношению к стимуляции, снижении способности к произвольной регуляции восприятия и обработки сигналов. У лиц с высоким уровнем показателей самоконтроля, силы «Сверх-Я» и независимости поведения наблюдается тенденция к высокой степени навязывания ритма в затылочных отведениях. Такая особенность указывает на преимущественную вовлеченность зрительных зон в обработку ритмических сигналов без значительного вовлечения высших регуляторных центров, а также на большую способность к селективной обработке информации (т.е. относительно активного восприятия ритмических стимулов на уровне сенсорной коры, без избыточной активации лобных долей). Результаты исследования подчёркивают важность учёта личностных черт при интерпретации ЭЭГ-данных в клинико-диагностической и исследовательской практике. Они также могут быть полезны для разработки персонализированных подходов к применению РФС в коррекционной работе.

Исследование выполнено на оборудовании Центра социальной антропологии и формирования личности и ЦКП научным оборудованием «Экспериментальная физиология и биофизика» ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского» в рамках инициативной темы № 126060421664-2 «Закономерности и механизмы адаптации организма к факторам разной природы»

Список литературы

1. Walter W. G. Analysis of the electrical response of the human cortex to photic stimulation / W. G. Walter, V. J. Dovey, H. Shipton // Nature. – 1946. – Vol. 158, №. 4016. – P. 540–541.
2. Богданова Е. П. Функциональные пробы и модулирующие воздействия во время электроэнцефалографии: методика проведения и серия клинических наблюдений / Е. П. Богданова, О. Д. Ельшина, В. Ю. Ноговицын [и др.] // Нервные болезни. – 2024. – № 4. – С. 58–68.
3. Александров М. В. Электроэнцефалография: руководство / М. В. Александров, Л. Б. Иванов, С. А. Лытаев [и др.] – СПб.: Издательство «СпецЛит». – 2020. – 224 с.
4. Святогор И. А. Анализ изменений ЭЭГ паттернов в ответ на ритмическую фотостимуляцию при различных нарушениях функционального состояния центральной нервной системы / И. А. Святогор, О. Е. Дик, А. Д. Ноздрачев [и др.] // Физиология человека. – 2015. – Т. 41, № 3. – С. 41–49.
5. Корсакова Н. К. К истории концепции А. Р. Лурии о трёх структурно-функциональных блоках мозга человека / Н. К. Корсакова, И. Ф. Рощина // Медицинская психология в России. – 2021. – Т. 13, № 2. – С. 3–10.
6. Небылицын В. Д. Избранные психологические труды / Небылицин В. Д. – М.: Издательство «Педагогика». – 1990. – 408 с.
7. Коробейникова И. И. Усвоение ритма световых мельканий и результативность интеллектуальной деятельности / И. И. Коробейникова, Н. А. Каратыгин, Я. А. Венерина, Е. В. Бирюкова // Тюменский медицинский журнал. – 2017. – Т. 19, № 2. – С. 37–43.

8. Зарипов К. А. Возрастные эффекты фотостимуляции 13–21 Гц у детей, проживающих в заполярном и приполярном регионах РФ / К. А. Зарипов, Ж. В. Нагорнова // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. – 2020. – Т. 56, №. 7. – С. 594.
9. Савчук Л. В. Резонансное сканирование и анализ электроэнцефалограммы при определении зрелости корковой ритмики у младших школьников / Л. В. Савчук, С. А. Полевая, С. Б. Парин [и др.] // Биофизика. – 2022. – Т. 67, №. 2. – С. 354–361.
10. Туровский Я. А. Частотная модуляция электроэнцефалограммы при фотостимуляции. / Я А. Туровский, С. В. Борзунов, В. Ю. Алексеев [и др.] // Биофизика. – 2021. – Т. 66, №. 3. – С. 583–589.
11. Дик О. Е. Анализ паттернов ЭЭГ у лиц с паническими атаками / О. Е. Дик, И. А. Святогор, Т. Н. Резникова, Д. А. Федоряка, А. Д. Ноздрачев // Физиология человека. – 2020. – Т. 46, № 2. – С. 63–75.
12. Дробышев В. А. Аудиовизуальная и магнитная стимуляция головного мозга в реабилитации постинсультных когнитивных нарушений (обзор литературы) / В. А. Дробышев, Л. А. Щепанкевич, Д. В. Белик [и др.] // Journal of Siberian Medical Sciences. – 2025. – Том 9, № 3. – С. 109–127.
13. Babiloni C. International Federation of Clinical Neurophysiology (IFCN) – EEG research workgroup: Recommendations on frequency and topographic analysis of resting state EEG rhythms. Part 1: Applications in clinical research studies / C. Babiloni, R. J. Barry, K. J. Blinowska [et al] // Clinical Neurophysiology. – 2020. – Vol. 131, № 1. – P. 285–307.
14. Мельников В. М. Введение в экспериментальную психологию личности / В. М. Мельников, Л. Т. Ямпольский // М.: Просвещение. – 1985. – 319 с.
15. Артеменков А. А. Сенсорная полимодальная интеграция когнитивных функций мозга человека / А. А. Артеменков // Ульяновский медико-биологический журнал. – 2025. – № 3. – С. 20–40.
16. Козин А. В. Индивидуальный подход к выбору частоты фотостимуляции в системах ИМК на основе SSVEP-парадигмы и моделей машинного обучения / А. В. Козин, А. К. Герасимов, М. А. Бакаев // Системы анализа и обработки данных. – 2025. – Т.99, № 3. – С. 45–68.
17. Рукавишников А. А. Факторный личностный опросник Кеттелла: диагностика личностных черт детей, подростков и взрослых, методическое руководство / А. А. Рукавишников, М. В. Соколова // СПб.: ИМАТОН. – 2019. – 91 с.
18. Венерина Я. А. Физиологические корреляты тревожности при когнитивной деятельности: дисс. … канд. мед. наук: 03.03.01/ Я. А. Венерина – Москва, 2022. – 156 с.

FEATURES OF THE RHYTHM ASSIMILATION REACTION IN THE PERCEPTION OF RHYTHMIC PHOTOSTIMULATION: THE INFLUENCE OF PSYCHOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE PERSONALITY

Mustafaev E. R., Tum M. V. Kulichenko A. M. Gurnakov N. V., Pavlenko V. B.

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Crimea, Russia
E-mail: vpav55@gmail.com

The aim of our study was to analyze EEG changes in healthy adult subjects during a session of rhythmic photostimulation (RPS) and to identify the influence of individual psychological characteristics on the degree of rhythm assimilation response (RAR).

The study involved 80 students aged 18 to 45 years (15 males and 65 females; 40 subjects identified themselves as Russian, 20 as Ukrainian, and 20 as Crimean Tatar). To assess the psychological characteristics of the subjects, the Cattell 16-factor personality questionnaire (16PF) and the Spielberger-Khanin anxiety inventory (STAI) were used. To

determine the impact of the psychological factor of personality on the EEG, groups with extreme (more pronounced) values of the psychological parameter (above or below the median, and values equal to the median were excluded). EEG was recorded using a Neuron-Spectrum-5 electroencephalograph. EEG potentials were recorded unipolarly in 19 leads using the international 10–20 system. The reference electrodes were connected to the earlobes.

A red-spectrum LED stimulator was used to perform RFS. Light stimuli were applied for three 20-second intervals at frequencies of 5, 10, and 15 Hz, with 7-second pauses. EEG analysis was performed in frequency bands corresponding to the main EEG rhythms. With 5 Hz stimulation, values were assessed in the 4–6 Hz frequency band, i.e., in the theta rhythm range; with 10 Hz stimulation, in the 9–11 Hz frequency band (in the alpha rhythm range); and with 15 Hz stimulation, in the 14–16 Hz frequency band (in the beta rhythm range).

An increase in EEG power during RFS was observed with the highest degree of rhythm assimilation at stimulation frequencies of 5 and 15 Hz. To identify the influence of individual psychological characteristics of subjects on the degree of RUR during RFS, an analysis of variance was performed with the factors GROUP (groups of subjects with varying severity of personality traits) and LOCUS (19 leads). The analysis revealed an interaction of factors G (strength/weakness of the superego), F4 (conformity/independence), Q3 (low/high behavioral self-control), F1 (low/high anxiety), and indicators of personal anxiety with the LOCUS factor. The interaction of the LOCUS and GROUP factors is reflected in the opposite direction of RUR in subjects of the indicated groups in different areas of the cortex. The conducted analysis allows us to conclude that there is a relationship between the psychological characteristics of an individual and the features of RUR regulation during RFS. Individuals with a weak superego, low self-control, and conformist behavior were found to exhibit statistically significant, pronounced rhythm imposition of 5 and 10 Hz in the frontal, parietal, and occipital leads. This may indicate increased reactivity of the primary and association areas of the cortex to stimulation, as well as a reduced capacity for voluntary regulation of perception and signal processing. Individuals with high levels of self-control, a strong superego, and independent behavior tend to exhibit a high degree of rhythm imposition in the occipital leads, indicating the predominant involvement of the visual areas in processing rhythmic stimuli without significant involvement of higher regulatory centers.

The study's results highlight the importance of considering personality traits when interpreting EEG data in clinical diagnostic and research practice. They may also be useful for developing personalized approaches to the use of RFS in correctional work.

***Keywords*:** rhythmic photostimulation, EEG, rhythm learning response

References

1. Walter W. G., Dovey V. J. and Shipton H., Analysis of the electrical response of the human cortex to photic stimulation, *Nature*, **158 (4016)**, 540 (1946).
2. Bogdanova E. P., Elshina O. D., Nogovitsyn V. Yu. and Sinkin M. V., Functional tests and modulating interventions during electroencephalography: methodology and a series of clinical observations, *Nervous Diseases*, **(4)**, 58 (2024).

3. Alexandrov M. V., Ivanov L. B., Lytaev S. A., Cherny V. S., Alexandrova T. V., Chukhlovin A. A. and Kostenko I. A., *Electroencephalography: a guide*, 224 (SpetsLit, Saint Petersburg, 2020).
4. Svyatogor I. A., Dik O. E., Nozdrachev A. D. and Guseva N. L., Analysis of EEG pattern changes in response to rhythmic photostimulation in various disorders of the functional state of the central nervous system, *Human Physiology*, **41(3)**, 41 (2015).
5. Korsakova N. K. and Roshchina I. F., On the history of A. R. Luria's concept of three structural functional blocks of the human brain, *Medical Psychology in Russia*, **13(2)**, 3 (2021).
6. Nebylitsyn V. D., *Selected psychological works*, 408 p. (Pedagogika, Moscow, 1990).
7. Korobeinikova I. I., Karatygin N. A., Venerina Ya. A. and Biryukova E. V., Assimilation of light flicker rhythm and intellectual performance efficiency, *Tyumen Medical Journal*, **19(2)**, 37 (2017).
8. Zaripov K. A. and Nagornova Zh. V., Age related effects of photostimulation at 13–21 Hz in children living in the polar and subpolar regions of the Russian Federation, *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*, **56(7)**, 594 (2020).
9. Savchuk L. V., Polevaya S. A., Parin S. B., Bondar A. T., and Fedotchev A. I., Resonant scanning and EEG analysis in assessing cortical rhythm maturity in primary schoolchildren, *Biophysics*, **67(2)**, 354 (2022).
10. Turovsky Ya. A., Borzunov S. V., Alekseev V. Yu. and Karpova M. A., Frequency modulation of the electroencephalogram during photostimulation, *Biophysics*, **66(3)**, 583 (2021).
11. Dik O. E., Svyatogor I. A., Reznikova T. N., Fedoryaka D. A. and Nozdrachev A. D., Analysis of EEG patterns in individuals with panic attacks, *Human Physiology*, **46(2)**, 63 (2020).
12. Drobyshev V. A., Shchepankevich L. A., Belik D. V., Shekalov A. V., Abramovich S. G., Agasarov L. G., Shpagina L. A., Ponomareva M. S. and Karmanovskaya S. A., Audiovisual and magnetic brain stimulation in rehabilitation of post-stroke cognitive impairment (literature review), *Journal of Siberian Medical Sciences,* **9(3)**, 109 (2025).
13. Babiloni C., Barry R., Blinowska K., Basar E., Cichocki A., Drinkenburg W., Klimesch W., Knight R., Jeong J., Lopes da Silva F., Nunez P., Oostenveld R., Pascual-Marqui R., Valdes Sosa P. and Hallett M., International Federation of Clinical Neurophysiology (IFCN) – EEG research workgroup: Recommendations on frequency and topographic analysis of resting state EEG rhythms. Part 1: Applications in clinical research studies, *Clinical Neurophysiology*, **131(1)**, 285 (2020).
14. Melnikov V. M. and Yampolsky L. T., *Introduction to experimental personality psychology*, 319 p. (Prosveshchenie, Moscow, 1985).
15. Artemenkov A. A., Sensory multimodal integration of human brain cognitive functions, *Ulyanovsk Medical Biological Journal*, **(3)**, 20 (2025).
16. Kozin A. V., Gerasimov A. K. and Bakaev M. A., Individual approach to selecting photostimulation frequency in BCI systems based on the SSVEP paradigm and machine learning models, *Systems of Data Analysis and Processing*, **99(3)**, 45 (2025).
17. Rukavishnikov A. A. and Sokolova M. V., *Cattell's factor personality questionnaire: diagnostics of personality traits in children, adolescents and adults: methodological guide*, 91 p. (IMATON, Saint Petersburg, 2019).
18. Venerina Ya. A., *Physiological correlates of anxiety during cognitive activity*: Dissertation for the degree of Candidate of Medical Sciences (specialty 03.03.01 «Physiology»), 156 p. (Moscow, 2022).

Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского
Биология. Химия. Том 12 (78). 2026. № 2. С. 182–189.

УДК 616-001.18:575.22
DOI 10.5281/ZENODO.20792567

РОЛЬ ПОЛИМОРФИЗМОВ ГЕНОВ ОКСИДАТИВНОГО СТРЕССА И ВОСПАЛЕНИЯ В ФОРМИРОВАНИИ МЕТАБОЛИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ ПРИ ВИБРАЦИОННОЙ БОЛЕЗНИ

Мухаммадиева Г. Ф.[1], Шайхлисламова Э. Р.[1,2], Каримов Д. О.[1,3], Хуснутдинова Н. Ю.[1], Рябова Ю. В.[1], Репина Э. Ф.[1], Каримов Д. Д.[1]

[1]ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», Уфа, Российская Федерация
[2]ФГБОУ ВО «Башкирский Государственный медицинский университет» Минздрава России, Уфа, Российская Федерация
[3]ФГБНУ «Национальный НИИ общественного здоровья имени Н. А. Семашко», Москва, Российская Федерация
E-mail: ufniimt@mail.ru

Исследована ассоциация полиморфизмов генов антиоксидантной защиты и воспаления (*SOD2* rs4880, *IL-1β* rs16944, *TNF-α* rs361525, *IL-6* rs1800795, *MMP-1* rs1799750) с метаболическими и воспалительными маркерами у 73 больных вибрационной болезнью (ВБ) и 73 лиц контроля. Генотипирование выполнено методом ПЦР в реальном времени. Установлено, что носители генотипа C/C полиморфизма *SOD2* rs4880 имеют достоверно более высокую массу тела по сравнению с носителями T/C (91,00±5,09 против 76,28±2,63 кг, p=0,025). Для полиморфизма *IL-1β* rs16944 выявлена тенденция к повышению уровня глюкозы у носителей генотипа A/G, а для *IL-6* rs1800795 – к повышению СРБ у носителей C/G и снижению гемоглобина у G/G. Ассоциаций полиморфизмов генов *TNF-α* и *MMP-1* с исследуемыми показателями не обнаружено. Результаты указывают на дифференциальный вклад полиморфных вариантов генов *SOD2*, *IL-1β* и *IL-6* в модуляцию метаболических и воспалительных параметров при ВБ.
Ключевые слова: вибрационная болезнь, полиморфизм генов, *SOD2*, *IL-1β*, *TNF-α*, *IL-6*, *MMP-1*, метаболические маркеры, С-реактивный белок.

ВВЕДЕНИЕ

Вибрационная болезнь (ВБ) остается одной из ведущих нозологий в структуре профессиональной патологии у работников, подвергающихся воздействию локальной, общей или комбинированной вибрации [1]. Заболевание характеризуется сложным патогенезом, включающим нейрососудистые расстройства, поражение опорно-двигательного аппарата и развитие системных метаболических нарушений [2]. Современные исследования указывают на важную роль хронического субклинического воспаления и окислительного стресса в прогрессировании ВБ и формировании ее осложнений [3, 4].

В развитии воспалительного ответа и деструкции соединительной ткани ключевое значение имеют провоспалительные цитокины, такие как интерлейкин-1β

(IL-1β), фактор некроза опухоли-α (TNF-α), интерлейкин-6 (IL-6), а также ферменты деградации внеклеточного матрикса, в частности матриксная металлопротеиназа-1 (MMP-1) [5, 6]. Не менее важным звеном патогенеза является дисбаланс в системе антиоксидантной защиты, центральным элементом которой является митохондриальная супероксиддисмутаза 2 (SOD2) [7]. Индивидуальные различия в выраженности этих процессов могут быть обусловлены генетическими факторами, в частности, функциональными полиморфизмами в промоторных или кодирующих регионах соответствующих генов [8].

В настоящее время активно изучается роль полиморфизмов указанных генов в предрасположенности к профессиональным заболеваниям и особенностях их клинического течения [9]. Однако данные о взаимосвязи генетических вариантов с метаболическими параметрами и маркерами воспаления у больных ВБ остаются ограниченными. Подобные исследования важны для выявления лиц с повышенным риском развития метаболических и сердечно-сосудистых осложнений ВБ, что является основой для предиктивной и профилактической медицины.

Цель исследования – изучить ассоциации полиморфных вариантов генов *SOD2* (rs4880), *IL-1β* (rs16944), *TNF-α* (rs361525), *IL-6* (rs1800795) и *MMP-1* (rs1799750) с показателями массы тела, уровня гемоглобина, С-реактивного белка (СРБ), глюкозы и общего холестерина у больных вибрационной болезнью.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследование включены 73 пациента с установленным диагнозом ВБ различного генеза (воздействие локальной, общей или комбинированной вибрации). Группу контроля составили 73 условно здоровых лица, сопоставимых по возрасту и полу, не имеющих контакта с профессиональной вибрацией. Все участники были жителями Республики Башкортостан, исследование проведено с их информированного согласия.

Для молекулярно-генетического анализа использовали цельную венозную кровь, стабилизированную K_3ЭДТА. Выделение геномной ДНК выполняли с помощью набора реагентов для экстракции «Магно-сорб» (ФБУН ЦНИИ Эпидемиологии Роспотребнадзора). В качестве объектов исследования были выбраны функционально значимые полиморфные варианты генов, ассоциированные с патогенезом воспаления, оксидативного стресса и ремоделирования тканей: rs4880 (47C>T, Ala16Val) гена супероксиддисмутазы 2 (*SOD2*), rs16944 (-511C>T) гена интерлейкина-1β (*IL-1β*), rs361525 (-238G>A) гена фактора некроза опухоли-α (*TNF-α*), rs1800795 (-174G>C) гена интерлейкина-6 (*IL-6*) и rs1799750 (-1607 1G>2G) гена матриксной металлопротеиназы-1 (*MMP-1*). Генотипирование проводили методом полимеразной цепной реакции в режиме реального времени с использованием аллель-специфичных олигонуклеотидных зондов на амплификаторе Rotor-Gene Q (Qiagen, Германия).

Для клинико-лабораторной характеристики пациентов с ВБ использовали данные о массе тела, а также результаты определения уровня гемоглобина, С-реактивного белка (СРБ), глюкозы и общего холестерина в сыворотке крови.

Статистическую обработку данных проводили с использованием программного пакета IBM SPSS Statistics 21.0. Распределение количественных признаков оценивали на соответствие нормальному. Для выявления различий средних значений исследуемых биохимических и антропометрических показателей между группами, сформированными по генотипам, применяли однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с последующим попарным сравнением по критерию Тьюки. Количественные данные представлены в виде среднего значения и стандартной ошибки среднего (M±m). Статистически значимыми считали различия при $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ взаимосвязи полиморфных вариантов исследуемых генов с количественными биохимическими и антропометрическими показателями у больных ВБ выявил ряд закономерностей (табл. 1).

Статистически значимая ассоциация была обнаружена для полиморфного варианта rs4880 гена *SOD2*. У носителей гомозиготного генотипа C/C масса тела была достоверно выше (91,00 ± 5,09 кг), чем у носителей гетерозиготного генотипа T/C (76,28 ± 2,63 кг; p=0,025). У носителей генотипа T/T (80,00 ± 2,70 кг) значимых различий с другими группами выявлено не было. По остальным параметрам (гемоглобин, СРБ, глюкоза, холестерин) значимых различий между носителями разных генотипов rs4880 не установлено. Полученный результат согласуется с известными данными о роли *SOD2* в митохондриальном энергообмене и регуляции адипогенеза [10]. Полиморфизм rs4880 (Ala16Val) влияет на эффективность транспорта фермента в митохондрии, и его связь с массой тела может указывать на вовлеченность оксидативного стресса в метаболические нарушения при ВБ.

При оценке влияния полиморфного варианта rs16944 гена *IL-1β* была отмечена тенденция к повышению уровня глюкозы в крови у носителей гетерозиготного генотипа A/G (7,20 ± 0,92 ммоль/л) по сравнению с носителями гомозиготного генотипа A/A (5,38 ± 0,34 ммоль/л). У носителей генотипа G/G уровень глюкозы составлял 5,57 ± 0,22 ммоль/л. Различия не достигли уровня статистической значимости ($p>0.05$), однако выявленная тенденция согласуется с плейотропной ролью *IL-1β*, который участвует не только в воспалении, но и в индукции инсулинорезистентности [11]. По другим изучаемым параметрам значимых различий между группами по данному полиморфизму не выявлено.

Полиморфный вариант rs1800795 гена *IL-6* продемонстрировал интересные, хотя и статистически незначимые, тенденции в отношении маркеров воспаления и кроветворения. Наиболее высокий средний уровень СРБ наблюдался у носителей гетерозиготного генотипа C/G (7,53 ± 4,47 мг/л) по сравнению с носителями генотипов C/C (4,90 ± 1,73 мг/л) и G/G (4,17 ± 0,89 мг/л). Кроме того, у носителей генотипа G/G отмечался минимальный среди групп средний уровень гемоглобина (135,23 ± 2,77 г/л), тогда как в группе C/C этот показатель был максимальным (148,00 ± 4,28 г/л; p=0,061 для сравнения G/G и C/C). *IL-6* является ключевым индуктором синтеза СРБ в печени, а также влияет на метаболизм железа и эритропоэз [12, 13]. Наши данные косвенно подтверждают функциональную значимость промоторного полиморфизма rs1800795 в модуляции этих процессов при ВБ.

Таблица 1

Показатели веса, уровня гемоглобина, С-реактивного белка, глюкозы и холестерина в зависимости от полиморфных вариантов исследуемых генов у больных ВБ

Полиморфизм	Гено-типы	Вес, кг	Гемоглобин, г/л	С-реактивный белок, мг/л	Глюкоза, ммоль/л	Холестерин ммоль/л
rs4880 (ген *SOD2*)	T/T	80,00±2,70	138,22±2,73	6,85±3,53	6,13±0,56	5,56±0,24
	T/C	76,28±2,63	140,21±3,25	3,73±0,80	5,96±0,38	5,05±0,17
	C/C	91,00±5,09	143,13±8,99	2,71±0,36	5,99±0,42	6,01±0,27
rs361525 (ген *TNF-α*)	G/G	79,22±2,05	138,26±2,26	5,47±1,58	5,82±0,29	5,38±0,14
	G/A	79,13±3,06	139,38±6,91	3,14±0,51	6,41±1,04	5,14±0,38
	A/A	99,00±6,00	142,50±9,50	-	8,1±0,50	5,50±1,40
rs16944 (ген *IL-1β*)	A/A	76,63±4,01	134,69±4,77	3,92±1,36	5,38±0,34	5,36±0,26
	A/G	80,33±3,65	135,94±3,56	9,53±4,50	7,20±0,92	5,48±0,25
	G/G	80,35±2,41	144,29±3,41	3,00±0,28	5,57±0,22	5,43±0,29
rs1799750 (ген *MMP-1*)	1G/1G	77,53±4,18	135,32±3,96	4,20±1,23	6,11±0,72	5,53±0,27
	1G/2G	82,06±2,44	138,00±4,05	7,06±4,20	5,53±0,25	5,27±0,29
	2G/2G	82,17±3,22	144,50±3,99	5,36±1,70	7,00±0,91	5,88±0,25
rs1800795 (ген *IL-6*)	C/C	81,08±4,18	148,00±4,28	4,90±1,73	6,39±1,12	5,38±0,34
	C/G	76,31±2,09	140,65±5,09	7,53±4,47	6,20±0,53	5,27±0,30
	G/G	83,46±3,16	135,23±2,77	4,17±0,89	5,93±0,38	5,58±0,21

Что касается полиморфных вариантов rs361525 гена *TNF-α* и rs1799750 гена ММР-1, то статистически значимых различий по всем анализируемым количественным признакам (масса тела, гемоглобин, СРБ, глюкоза, холестерин) между носителями различных генотипов выявлено не было. Средние значения показателей в группах были сопоставимы. Это может свидетельствовать о том, что вклад данных конкретных полиморфных локусов в вариабельность изученных метаболических и воспалительных маркеров в контексте ВБ не является ведущим, либо их эффект требует изучения в более крупных выборках или с учетом взаимодействия с другими генетическими и средовыми факторами.

Таким образом, результаты исследования указывают на дифференцированное влияние изученных генетических вариантов. Полиморфизм гена антиоксидантной защиты *SOD2* оказался ассоциирован с антропометрическим показателем (массой тела), в то время как варианты генов цитокинов *IL-1β* и *IL-6* показали тенденции к связи с параметрами углеводного обмена и острофазового воспаления соответственно. Это согласуется с представлениями о том, что хроническое низкоинтенсивное воспаление и оксидативный стресс выступают

взаимосвязанными патогенетическими звеньями, способствующими формированию метаболических нарушений у больных вибрационной болезнью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволило выявить дифференцированное влияние полиморфных вариантов ключевых генов антиоксидантной защиты и провоспалительных цитокинов на метаболические и воспалительные маркеры у больных вибрационной болезнью. Установлена статистически значимая ассоциация генотипа C/C полиморфного варианта rs4880 гена *SOD2* с увеличением массы тела, что указывает на вовлеченность генетически детерминированных особенностей оксидативного стресса в регуляцию энергетического обмена при данном заболевании. Обнаружены также тенденции к связи генетических вариантов цитокинов с лабораторными показателями: гетерозиготный генотип A/G полиморфного варианта rs16944 гена *IL-1β* ассоциирован с тенденцией к повышению уровня глюкозы, а генотип C/G полиморфного варианта rs1800795 гена IL-6 – с более высокими значениями С-реактивного белка, что согласуется с их ролью в модуляции воспалительного ответа и метаболизма. В то же время, в исследуемой выборке не выявлено значимого влияния полиморфных вариантов rs361525 гена *TNF-α* и rs1799750 гена *MMP-1* на вариабельность изученных биохимических параметров. Полученные результаты расширяют понимание молекулярно-генетических механизмов формирования коморбидных метаболических нарушений при вибрационной болезни. Выделенные генетические маркеры (*SOD2*, *IL-1β*, *IL-6*) представляют интерес для дальнейших исследований в рамках разработки персонализированных подходов к оценке риска и профилактике сердечно-сосудистых осложнений у пациентов с длительным воздействием производственной вибрации.

Список литературы

1. Бабанов С. А. О современных аспектах классификации вибрационной болезни / С. А. Бабанов, Т. А. Азовскова, Н. В. Вакурова, Р. А. Бараева // Терапевт. – 2019. – № 4. – С. 21–27.
2. Мухина Н. А. Профессиональные болезни / Н. А. Мухина, С. А. Бабанов. – М.: Гэотар-медиа, 2018. – 576 с.
3. Krajnak K. Systemic Effects of Segmental Vibration in an Animal Model of Hand-Arm Vibration Syndrome / K. Krajnak, S. Waugh // J Occup Environ Med. – 2018. – Vol. 60, No 10. – P. 886–895. doi: 10.1097/JOM.0000000000001396.
4. Tekavec E. Serum biomarkers in patients with hand-arm vibration injury and in controls / E. Tekavec, T. Nilsson, L. B. Dahlin [et al.] // Sci Rep. – 2024. – Vol. 14, No 1. – P. 2719. doi: 10.1038/s41598-024-52782-1.
5. Kany S. Cytokines in Inflammatory Disease / S. Kany, J. T. Vollrath, B. Relja // Int J Mol Sci. – 2019. – Vol. 20, No 23. – P. 6008. doi: 10.3390/ijms20236008.
6. Lee H. S. The Role of Matrix Metalloproteinase in Inflammation with a Focus on Infectious Diseases / H. S. Lee, W. J.Kim // Int J Mol Sci. – 2022. – Vol. 23, No 18. – P. 10546. doi: 10.3390/ijms231810546.
7. Tamagawa S. SOD2 orchestrates redox homeostasis in intervertebral discs: A novel insight into oxidative stress-mediated degeneration and therapeutic potential / S. Tamagawa, D. Sakai, H. Nojiri [et al.] // Redox Biol. – 2024. – Vol. 71. – P. 03091. doi: 10.1016/j.redox.2024.103091.

8. Olaniyan M. F. Susceptible Genes and Polymorphisms Associated with Communicable and Noncommunicable Diseases / M. F. Olaniyan, A. A. Oladele, A. Tijani [et al.] // J. Bio-XRes. – 2024. – Vol. 7. – P. 0001. doi: 10.34133/jbioxresearch.00.
9. Жукова А. Г. Ретроспектива молекулярно-генетических исследований производственно обусловленной патологии / А. Г. Жукова, Л. Г. Горохова // Медицина в Кузбассе. – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 5–11. doi: 10.24412/2687-0053-2021-3-5-11.
10. Grujicic J. Manganese Superoxide Dismutmase: Structure, Function, and Implications in Human Disease / J. Grujicic, A. R. Allen // Antioxidants (Basel). – 2025. – Vol. 14, No 7. – P. 848. doi: 10.3390/antiox14070848.
11. Asif R. Role of Interleukins in Type 1 and Type 2 Diabetes / R. Asif, A. Khalid, T. Mercantepe [et al.] // Diagnostics (Basel). – 2025. – Vol. 15, No 15. – P. 1906. doi: 10.3390/diagnostics15151906.
12. Ngwa D. N. IL-6 regulates induction of C-reactive protein gene expression by activating STAT3 isoforms / D. N. Ngwa, A. Pathak, A. Agrawal // Mol Immunol. – 2022. – Vol. 146. – P. 50–56. doi: 10.1016/j.molimm.2022.04.003.
13. Zhang F. Increased levels of systemic iron content in adult-onset interleukin-6 knockout mice / F. Zhang, C. Zhang, Q. Luo [et al.] // Redox Rep. Optics Express. – 2026. – Vol. 31, No 1. – P. 2602306. doi: 10.1080/13510002.2025.2602306.

THE ROLE OF OXIDATIVE STRESS AND INFLAMMATION-RELATED GENE POLYMORPHISMS IN THE FORMATION OF METABOLIC DISORDERS IN VIBRATION DISEASE

Mukhammadiyeva G. F.[1], Shaihlislamova E. R.[1,2], Karimov D. O.[1,3], Khusnutdinova N. Yu.[1], Ryabova Yu. V.[1], Repina E. F.[1], Karimov D. D.[1]

[1]Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Ufa, Russian Federation
[2]Bashkir State Medical University, Ufa, Russian Federation
[3]N. A. Semashko National Research Institute of Public Health, Moscow, Russian Federation
E-mail: ufniimt@mail.ru

Vibration disease (VD) is a common occupational pathology resulting from prolonged exposure to local, whole-body, or combined vibration. Its pathogenesis is complex, involving neurovascular, musculoskeletal disorders and systemic metabolic disturbances. Emerging evidence highlights the critical role of chronic low-grade inflammation and oxidative stress in VD progression and its complications. Genetic predisposition, mediated by functional polymorphisms in genes regulating these processes, may explain individual differences in susceptibility and clinical manifestations. However, data on the association of genetic variants with metabolic and inflammatory markers in VD patients are limited. This study aimed to investigate the associations between polymorphisms in key genes involved in antioxidant defense (*SOD2*, rs4880), pro-inflammatory signaling (*IL-1β*, rs16944; *TNF-α*, rs361525; *IL-6*, rs1800795), and tissue remodeling (*MMP-1*, rs1799750) with anthropometric and biochemical parameters, including body weight, hemoglobin, C-reactive protein (CRP), glucose, and total cholesterol levels in patients with VD. A case-control study was conducted involving 73 patients with a confirmed diagnosis of VD and 73 healthy individuals without occupational vibration exposure, matched for age and sex (control group). All participants

were residents of the Republic of Bashkortostan and provided informed consent. Genomic DNA was isolated from venous blood using the magnetic particle-based "Magno-Sorb" kit (FBUN TsNII Epidemiology of Rospotrebnadzor). Genotyping of the single nucleotide polymorphisms (SNPs) rs4880 (*SOD2*), rs16944 (*IL-1β*), rs361525 (*TNF-α*), rs1800795 (*IL-6*), and polymorphism rs1799750 (*MMP-1*) was performed using real-time polymerase chain reaction (PCR) with allele-specific fluorescent probes on a Rotor-Gene Q thermocycler (Qiagen, Germany). For VD patients, data on body weight (kg) and serum levels of hemoglobin (g/L), CRP (mg/L), glucose (mmol/L), and total cholesterol (mmol/L) were collected. Statistical analysis was performed using IBM SPSS Statistics 21.0. Normality of data distribution was assessed. To compare mean values of the studied parameters across genotype groups, one-way analysis of variance (ANOVA) was applied, followed by pairwise comparisons using Tukey's test. Data are presented as mean ± standard error of the mean (M±m). A p-value of <0.05 was considered statistically significant. The analysis revealed a statistically significant association for the SOD2 rs4880 polymorphism. Carriers of the homozygous C/C genotype had a significantly higher body weight (91.00 ± 5.09 kg) compared to carriers of the heterozygous T/C genotype (76.28 ± 2.63 kg; p=0.025). No significant differences were found for other parameters (hemoglobin, CRP, glucose, cholesterol) between different rs4880 genotypes. Regarding the *IL-1β* rs16944 polymorphism, a trend towards higher blood glucose levels was observed in carriers of the heterozygous A/G genotype (7.20 ± 0.92 mmol/L) compared to carriers of the homozygous A/A genotype (5.38 ± 0.34 mmol/L). For the *IL-6* rs1800795 polymorphism, the highest mean CRP level was found in carriers of the heterozygous C/G genotype (7.53 ± 4.47 mg/L). Furthermore, a trend towards a lower hemoglobin level was noted in carriers of the homozygous G/G genotype (135.23 ± 2.77 g/L) compared to the C/C genotype group (148.00 ± 4.28 g/L; p=0.061). No statistically significant associations were found for the *TNF-α* rs361525 and *MMP-1* rs1799750 polymorphisms with any of the studied biochemical or anthropometric parameters among VD patients. This study demonstrates a differential influence of genetic polymorphisms related to oxidative stress and inflammation on metabolic and inflammatory markers in vibration disease. A significant association was established between the *SOD2* rs4880 C/C genotype and increased body weight, highlighting the role of genetic factors in antioxidant defense in energy metabolism regulation in VD. Trends were identified linking *IL-1β* and *IL-6* gene variants with glucose metabolism and acute-phase inflammation, respectively. These findings contribute to understanding the molecular genetic mechanisms underlying comorbid metabolic disorders in VD and identify *SOD2*, *IL-1β*, and *IL-6* as potential candidate genes for further research aimed at developing personalized risk assessment and prevention strategies for cardiovascular and metabolic complications in workers exposed to occupational vibration.

***Keywords*:** vibration disease, gene polymorphism, *SOD2*, *IL-1β*, *TNF-α*, *IL-6*, *MMP-1*, metabolic markers, C-reactive protein.

References

1. Babanov S. A., Azovskova T. A., Vakurova N. V., Barayeva R. A. About modern aspects of the classification of vibration disease, *Therapist*, **4,** 21 (2019).
2. Mukhina N. A., Babanov S. A. *Occupational Diseases*, 576 p. (GEOTAR-Media, Moscow, 2018).
3. Krajnak K., Waugh S. Systemic Effects of Segmental Vibration in an Animal Model of Hand-Arm Vibration Syndrome, *J. Occup. Environ. Med.*, **60,** 886 (2018). doi: 10.1097/JOM.0000000000001396.
4. Tekavec E., Nilsson T., Dahlin L. B., Huynh E., Axmon A., Nordander C., Riddar J., Kåredal M. Serum biomarkers in patients with hand-arm vibration injury and in controls, *Sci. Rep.*, **14,** 2719 (2024). doi: 10.1038/s41598-024-52782-1.
5. Kany S., Vollrath J. T., Relja B. Cytokines in Inflammatory Disease, *Int J Mol Sci.*, **20,** 6008 (2019). doi: 10.3390/ijms20236008.
6. Lee H. S., Kim W. J. The Role of Matrix Metalloproteinase in Inflammation with a Focus on Infectious Diseases, *Int J Mol Sci.*, **23,** 10546 (2022). doi: 10.3390/ijms231810546.
7. Tamagawa S., Sakai D., Nojiri H., Nakamura Y., Warita T., Matsushita E., Schol J., Soma H., Ogasawara S., Munesada D., Koike M., Shimizu T., Sato M., Ishijima M., Watanabe M. SOD2 orchestrates redox homeostasis in intervertebral discs: A novel insight into oxidative stress-mediated degeneration and therapeutic potential, *Redox Biol.*, **71,** 103091 (2024). doi: 10.1016/j.redox.2024.103091.
8. Olaniyan M. F., Oladele A. A., Tijani A., Muhibi M. A. Olaniyan TB. Susceptible Genes and Polymorphisms Associated with Communicable and Noncommunicable Diseases, *J. Bio-XRes.*, **7,** 0001 (2024). doi: 10.34133/jbioxresearch.00.
9. Zhukova A. G., Gorokhova L. G. A retrospective in molecular and genetic studies of production-related pathology, *Medicine in Kuzbass*, **20,** 5 (2020). doi: 10.24412/2687-0053-2021-3-5-11.
10. Grujicic J., Allen A. R. Manganese Superoxide Dismutase: Structure, Function, and Implications in Human Disease, *Antioxidants (Basel).*, **14,** 848 (2025). doi: 10.3390/antiox14070848.
11. Asif R., Khalid A., Mercantepe T., Klisic A., Rafaqat S., Rafaqat S., Mercantepe F. Role of Interleukins in Type 1 and Type 2 Diabetes, *Diagnostics (Basel).*, **15,** 1906 (2025). doi: 10.3390/diagnostics15151906.
12. Ngwa D. N., Pathak A., Agrawal A. IL-6 regulates induction of C-reactive protein gene expression by activating STAT3 isoforms, *Mol Immunol.*, **146,** 50 (2022). doi: 10.1016/j.molimm.2022.04.003.
13. Zhang F., Zhang C., Luo Q., Li J., Qiu X., Qian Z. Increased levels of systemic iron content in adult-onset interleukin-6 knockout mice, *Redox Rep.*, **31,** 2602306 (2026). doi: 10.1080/13510002.2025.2602306.

Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского
Биология. Химия. Том 12 (78). 2026. № 2. С. 190–199.

УДК 581.95(502.7)
DOI 10.5281/ZENODO.20792794

НАХОДКИ РЕДКИХ ВИДОВ НА ТЕРРИТОРИИ ПАМЯТНИКА ПРИРОДЫ «МЕДВЕДСКИЙ БОР» И ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ (КИРОВСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Пересторонина О. Н., Шабалкина С. В.

Вятский государственный университет, Киров, Россия
E-mail: olgaperest@mail.ru

В статье приведены данные о находках редких видов сосудистых растений и лишайников на особо охраняемой природной территории «Медведский бор» и ее окрестностях (Нолинский район, Кировская область). Впервые указаны *Epipogium aphyllum* Sw. и *Calypso bulbosa* (L.) Oakes; даны сведения о новых местонахождениях *Cypripedium calceolus* L. и *Cephalanthera rubra* (L.) Rich. Подтверждено произрастание редкого вида растений *Serratula coronata* L., не отмечавшегося для данной территории более 10 лет, и редких видов лишайников: *Usnea florida* (L.) Weber ex F. H. Wigg. и *Lobaria pulmonaria* (L.) Hoffm., не отмечавшихся здесь более 20 лет.
Ключевые слова: биоразнообразие, Красная книга, Медведский бор, новое местонахождение, особо охраняемая природная территория, редкий вид, Orchidaceae.

ВВЕДЕНИЕ

Во флористическом отношении памятник природы «Медведский бор» является уникальной территорией, расположенной в Кировской области на границе южной тайги и хвойно-широколиственных лесов. Здесь, на площади 7 181,6 га, нашли приют бореальные, неморальные и понтические ботанико-географические элементы флоры. В бору произрастают 23 редких вида сосудистых растений, внесенных в Красную книгу Кировской области и 14 видов в Приложение № 2 к ней, как виды, нуждающиеся в контроле за состоянием популяций [1]. Флора охраняемых растений включает, главным образом, степные виды (*Dianthus borbasii* Vandas, *Dianthus arenarius* L., *Gypsophila paniculata* L., *Silene borysthenica* (Grun.) Walters, *Potentilla humifusa* Willd. ex Schlecht., *Centaurea sumensis* Kalen., *Jurinea cyanoides* (L.) Reichenb.) и представителей семейства Orchidaceae (*Cypripedium guttatum* Sw., *Cypripedium calceolus* L., *Neottia nidus-avis* (L.) Rich, *Cephalanthera rubra* (L.) Rich, *Gymnadenia conopsea* (L.) R. Br.).

Особо охраняемая природная территория (ООПТ) «Медведский бор» раскинулась по надпойменным террасам левого берега нижнего течения реки Вятки, расположена на древних материковых песчаных дюнах. Формирование типично пустынных форм рельефа определяется реликтовыми древними четвертичными холодными пустынями, когда сухой климат и разреженность растительности способствовали перевеванию древнеаллювиальных и водноледниковых песков с

образованием дюн высотой 6–9 м. Нередко отдельные дюнные холмы соединяются в мощные гряды, которые тянутся на сотни метров. Междюнные понижения имеют округлую форму, от мелких котловин до крупных низин с плоским дном [2]. Дюнный рельеф и длительный охранный режим обусловили разнообразие сообществ в Медведском бору: сосновые, елово-сосновые, сосново-еловые, мелколиственные леса, озера, болота на разной стадии формирования.

Медведский бор имеет более чем столетнюю историю изучения. Еще в конце 80-ых гг. XIX в. проведены первые исследования [3], в 1919 г. местный краевед А. Д. Фокин совместно с юннатами и коллегами собрал интересные материалы по геологии, почвам, фауне и флоре этой территории [4]. В дальнейшем природа Медведского бора постоянно привлекала ученых-исследователей [5–9]; с 1960 г. и по настоящее время сотрудники Кировского государственного педагогического института (ныне Вятского государственного университета) активно изучают биоту, ландшафт и почвы памятника природы [10–17 и др.]. Поэтому любые находки, несмотря на длительную историю изучения этой территории, не теряют своей актуальности и в настоящее время.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспедиционные исследования на территории Медведского бора проведены нами с 2001 г. во время вегетационных сезонов. Флору изучали маршрутно-рекогносцировочным методом в сочетании с более детальным обследованием в многочисленных базовых пунктах различных частей охраняемой территории; при геоботаническом описании пробных площадей, которые выполнены согласно стандартным подходам [18]. Полевые наблюдения и сборы проводили в разное время: ранней и поздней весной (май), ранним летом (июнь), в середине лета (июль) и в некоторых местах – осенью (сентябрь). Выбирали маршруты и закладывали базовые участки с учётом полноты охвата различных элементов рельефа и разнообразия растительных ассоциаций. Часть находок обнаружена во время совместных автомобильных выездов с сотрудниками ООО «Нолинская лесопромышленная компания» по инвентаризации местонахождения, состава и численности популяций известных редких видов. На начальных этапах обобщены доступные источники литературы и гербарные материалы.

При выявлении ценопопуляций, особи и местообитания фотографировали. В связи с тем, что в статье приводятся сведения с одной территории, в описании большинства находок опущены следующие данные: Кировская область, Нолинский район, ООПТ «Медведский бор».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Впервые выявленные редкие виды растений на территории Медведского бора относятся к семейству Orchidaceae.

Epipogium aphyllum Sw.: «квартал 121, левый берег р. Талица, ельник приручьевой разнотравный, 57°20′5.8″ с. ш. 50°07′4″ в. д. 11 VII 2014». – Ареал евразиатский, палеарктический, охватывает почти всю Европу и Средиземноморье, Крым и значительную часть Азии [19]. Внесен в Красную книгу РФ [20]; в

Кировской области редкий в недавнем прошлом вид, численность которого быстро сокращается, со II категорией охраны; за последние 20 лет отмечался только на территории государственного природного заказника «Былина» в Лузском районе [21]. Ранее местонахождения *E. aphyllum* фиксировали в Верхнекамском, Нагорском, Подосиновском и Унинском районах области [22].

В Нолинском административном районе *E. aphyllum* отмечен впервые, это самая южная точка местообитания этого вида. Обнаруженная ценопопуляция произрастает в ельнике приручьевом разнотравном, на довольно сыром субстрате, особи встречаются единично. Сомкнутость крон древостоя в сообществе 0,6–0,7. В составе подлеска встречаются *Daphne mezereum* L., *Euonymus verrucosus* Scop., *Lonicera xylosteum* L., *Ribes nigrum* L., *Rubus idaeus* L. Видовой состав травяно-кустарничкового яруса богатый: *Aconitum septentrionale* Koelle, *Actaea spicata* L., *Aegopodium podagraria* L., *Ajuga reptans* L., *Asarum europaeum* L., *Athyrium filix-femina* (L.) Roth ex Mert., *Cacalia hastata* L., *Calamagrostis arundinaceae* (L.) Roth., *Cardamine pratensis* L., *Carex digitata* L., *Circaea alpine* L., *Cirsium heterophyllum* (L.) Hill., *Convallaria majalis* L., *Dryopteris carthusiana* (Vill.) H. P. Fuchs., *Dryopteris expansa* (C. Presl) Fraser-Jenkins et Jermy, *Dryopteris filix-mas* (L.) Schott, *Equisetum pratense* Ehrh., *Fragaria vesca* L., *Geranium sylvaticum* L., *Geum rivale* L., *Gymnocarpium dryopteris* (L.) Newman, *Impatiens noli-tangere* L., *Lathyrus vernus* (L.) Bernh., *Linnaea borealis* L., *Maianthemum bifolium* (L.) F. W. Schmidt, *Mercurialis perennis* L., *Orthilia secunda* (L.) House, *Oxalis acetosella* L., *Paris quadrifolia* L., *Phegopteris connectilis* (Michx.) Watt, *Pulmonaria obscura* Dumort., *Pyrola rotundifolia* L., *Rubus saxatilis* L., *Stachys sylvatica* L., *Stellaria holostea* L., *Stellaria nemorum* L., *Trientalis europaea* L., *Urtica dioica* L., *Vicia sylvatica* L., *Viola mirabilis* L.

Calypso bulbosa (L.) Oakes: «квартал 79, заболоченный участок осиново-березово-соснового разнотравного леса, 57°23′2.2″ с. ш. 50°01′0″ в. д. 23 V 2018». – Ареал голарктический, дизъюнктивный, включает Скандинавию, север России, Монголию, Японию, Китай, Корею и Северную Америку [19]. Занесена в Красную книгу РФ [20]; в Кировской области это редкий малочисленный вид с III категорией охраны. В настоящее время на территории региона *C. bulbosa* отмечена в окрестностях г. Кирова и 13 административных районах; до 2001 г. ее фиксировали еще в шести районах [22, 23].

Во флоре памятника природы «Медведский бор» *C. bulbosa* обнаружена впервые. Ценопопуляция малочисленная, произрастает на заболоченном участке осиново-березово-соснового разнотравного леса. Древостой образован *Abies sibirica* Ledeb., *Betula pubescens* Ehrh., *Picea×fennica* (Regel) Kom., *Pinus sylvestris* L., *Populus tremula* L. Сомкнутость крон – 0,9. В подлеске встречаются *Chamaecytisus ruthenicus* (Fisch. ex Woloszcz.) Klaskova, *D. mezereum*, *Juniperus communis* L., *L. xylosteum*, *Padus avium* Mill., *R. idaeus*, *Sambucus sibirica* Nakai, *Sorbus aucuparia* L. В травяно-кустарничковом ярусе отмечены: *A. podagraria*, *A. europaeum*, *C. arundinacea*, *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth, *C. heterophyllum*, *C. majalis*, *D. carthusiana*, *Equisetum sylvaticum* L., *Filipendula denudata* (J. Presl ex C. Presl) Fritsch., *F. vesca, Galium uliginosum* L., *G. sylvaticum, Goodyera repens* (L.) R. Br., *G. dryopteris, Hieracium pilosella* L., *L. vernus*, *L. borealis*, *Luzula pilosa* (L.)

Willd., *M. bifolium*, *Melampyrum sylvaticum* L., *Or. secunda*, *O. acetosella*, *Platanthera bifolia* (L.) Rich., *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn, *P. rotundifolia*, *R. saxatilis*, *Solidago virgaurea* L., *Vaccinium myrtillus* L., *Vaccinium vitis-idaea* L., *Vicia sepium* L., *Viola palustris* L.

Кроме впервые обнаруженных видов в Медведском бору отмечены также новые местонахождения двух видов из семейства Orchidaceae на его территории.

Cypripedium calceolus L.: «квартал 118, елово-сосновый разнотравный лес, 57°20′28.7″ с. ш. 50°07′36.8″в. д. 09 VI 2016». – Ареал евразиатский, охватывает всю Европу (кроме крайнего севера и юга), Крым, Средиземноморье, Малую Азию, Сибирь, Дальний Восток [19]. Занесен в Красную книгу РФ [20]; в регионе является редким малочисленным видом с III категорией охраны. С 2001 г. сборы, подтвержденные коллекционными материалами, проведены в окрестностях г. Кирова и 12 административных районах области, до этого года задокументировано наличие *C. calceolus* в 22 районах [24]. На территории памятника природы «Медведский бор» вид отмечался ранее только в 105 квартале [9].

Обнаруженная ценопопуляция расположена в елово-сосновом разнотравном лесу. Древостой образован *P. sylvestris*, *P.×fennica* с единичной *Betula pendula* Roth. Сомкнутость крон – 0,7. Подлесок образуют *D. mezereum*, *E. verrucosus*, *Frangula alnus* Mill., *J. communis*, *L. xylosteum*, *S. aucuparia*. Богатый травяно-кустарничковый ярус состоит из *A. septentrionale*, *A. podagraria*, *Angelica sylvestris* L., *A. europaeum*, *C. hastata*, *C. arundinaceae*, *C. pratensis*, *C. heterophyllum*, *C. majalis*, *Dactylorhiza incarnata* (L.) Soo, *D. carthusiana*, *Epipactis helleborine* (L.) Crantz., *Equisetum hyemale* L., *E. pratense*, *F. denudata*, *Galium aparine* L., *Galium boreale* L., *G. rivale*, *L. vernus*, *L. borealis*, *Listera ovata* (L.) R. Br., *M. bifolium*, *Or. secunda*, *O. acetosella*, *P. quadrifolia*, *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud., *P. aquilinum*, *P. obscura*, *P. rotundifolia*, *Ranunculus cassubicus* L., *R. saxatilis*, *S. virgaurea*, *Tussilago farfara* L., *V. myrtillus*, *V. vitis-idaea*, *V. mirabilis*.

Cephalanthera rubra (L.) Rich.: «квартал 75, опушка березово-елового разнотравно-брусничного леса, на пересечении лесных дорог, возле противопожарной минерализованной полосы, 57°23′31″ с. ш. 50°06′41″ в. д. 01 VII 2019». – Ареал евразиатский, распространен в Европе, на Балканах, в Крыму, Средиземноморье, Малой Азии, Иране, Туркменистане и на Кавказе [19]. Внесен в Красную книгу РФ [25]; в Кировской области редкий малочисленный вид с III категорией охраны. В настоящее время отмечен в Малмыжском, Нолинском и Советском административных районах, до 2001 г. наличие *C. rubra* фиксировали в окрестностях г. Кирова и в Юрьянском районе [21]. На территории Медведского бора вид регистрировался ранее только в 33 квартале [9].

Во вновь обнаруженном местообитании совместно с *C. rubra* произрастают: *C. arundinaceae*, *C. majalis*, *Fallopia convolvulus* (L.) A. Löve, *G. boreale*, *Geranium pratense* L., *Glechoma hederacea* L., *Hieracium umbellatum* L., *Pimpinella saxifraga* L., *Polygonatum odoratum* (Mill.) Druce, *Pulsatilla patens* (L.) Mill., *R. saxatilis*, *S. virgaurea*, *S. aucuparia*, *Salix* L.

За время исследований подтверждено наличие двух редких видов лишайников на ООПТ «Медведский бор», которые не документировались с 2001 г.

Usnea florida (L.) Weber ex F. H. Wigg. (Parmeliaceae): «92 квартал, опушка сосняка майниково-брусничного, кора ствола *Pinus sylvestris*, 57°23′16,5″ с. ш. 50°11′20,4″ в. д. 13 V 2014». – Ареал дизъюнктивный, охватывает лесную зону Европы, Азии, Северной и Центральной Америки, в горах Кавказа [26]. Занесена в Красную книгу РФ [27]; в Кировской области является видом, находящимся под угрозой исчезновения с I категорией охраны. В настоящее время на территории региона *U. florida* отмечена в Юрьянском и Санчурском районах, в 20–30-ых гг. XX в. регистрировалась в окрестностях г. Кирова, в Нолинском и Яранском районах. В Медведском бору вид фиксировался более 20 лет назад [26].

U. florida обнаружена на коре ствола *P. sylvestris*, которая произрастает на опушке сосняка майниково-брусничного. Полнота насаждений 0,7; возраст деревьев 90 лет, высота 23 м, диаметр ствола 24 см. В подлеске встречаются *Ch. ruthenicus*, *J. communis*, *S. aucuparia*. Травяно-кустарничковый ярус образуют: *Arctostaphylos uva-ursi* (L.) Spreng., *C. arundinacea*, *C. epigeios* Roth, *Carex praecox* Schreb., *Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop., *M. bifolium*, *Or. secunda*, *P. patens*, *V. myrtillus*, *V. vitis-idaea*.

Lobaria pulmonaria (L.) Hoffm. (Lobariaceae): «квартал 79, заболоченный участок осиново-березово-соснового разнотравного леса, 57°23′2.2″ с. ш. 50°01′0″ в. д. 23 V 2018». – Вид широко распространен, ареал охватывает Европу, Азию, Африку, Северную Америку и Австралию [26]. Внесена в Красную книгу РФ [28]; в регионе это редкий в недавнем прошлом вид, численность которого быстро сокращается, со II категорией охраны. С 2001 г. сборы, подтвержденные коллекционными материалами, проведены в Лузском, Подосиновском, Нагорском, Даровском, Фаленском, Котельничском, Санчурском, Уржумском районах области, до этого года задокументировано наличие *L. pulmonaria* в окрестностях г. Кирова и девяти административных районах [26]. На территории памятника природы «Медведский бор» вид регистрировали до 2001 г.

Обнаруженная нами *L. pulmonaria* произрастает на коре ствола *P. tremula* в осиново-березово-сосновом разнотравном лесу. Полнота насаждений 0,7; возраст осины 90 лет, высота древостоя 25 м, диаметр ствола 32 см. Видовой состав фитоценоза приведен ранее при описании *C. bulbosa.*

В окрестностях ООПТ «Медведский бор», к юго-западу от п. Медведок обнаружена ценопопуляция *Serratula coronata* L. из семейства Asteraceae: гривы в пойме р. Вятки на разнотравно-злаковых лугах между ассоциациями пойменных дубняков, 57°23′35″ с. ш. 50°01′20″ в. д. Ареал евроазиатский, распространен в средней Европе, в средней Азии, Монголии и Японии. В России на европейской части, в Сибири и на Дальнем Востоке. В Кировской области вид редкий, малочисленный, включен в региональную Красную книгу, имеет III категорию охраны. На территории области отмечен в Вятскополянском, Кильмезском, Лебяжском, Малмыжском, Нолинском и Уржумском районах. В окрестностях Медведского бора вид не фиксировали последние 15 лет. Обнаруженная ценопопуляция *S. coronata* произрастает совместно с *C. majalis* L., *Iris sibirica* L. и *Galatella rossica* Novopokr. – виды, внесенные в Приложение 2 Красной книги Кировской области [21]. Общая площадь местообитания – более 2500 м^2.

Ценопопуляция немногочисленная, неполночленная, насчитывает порядка 30 особей. В момент обследования особи находились в вегетативной фенологической фазе. Однако, наличие вегетативно-генеративных побегов прошлого года, свидетельствует о преобладании особей генеративного возрастного периода. Проективное покрытие *S. coronata* составляет 5 %, обилие – единично. Для оценки динамики недостаточно данных ввиду отсутствия информации и отслеживания возрастной и популяционной структуры в предшествующие годы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований, проведенных с 2001 г. на ООПТ «Медведский бор», получены новые сведения о произрастании двух редких видов растений семейства Orchidaceae, для которой они ранее не приводились. Для двух редких видов растений этого же семейства установлены новые местонахождения в составе сообществ памятника природы. Наряду с этим подтверждено произрастание одного редкого вида сосудистого растения, который не отмечался более 15 лет и двух редких видов лишайников, которые не отмечались более 20 лет в Медведском бору. Находки пяти последних видов подтверждают сохранность их популяций на охраняемой территории и ее окрестностях в течение длительного времени.

Список литературы

1. Красная книга Кировской области: Животные, растения, грибы. Изд. 2-е. / под ред. О. Г. Барановой, Е. П. Лачохи, В. М. Рябова [и др.] – Киров: ООО «Кировская областная типография», 2014. – 336 с.
2. Лавров Д. Д. Рельеф / Д. Д. Лавров // Природа Кировской области. Сборник статей. – Киров, 1967. – С. 72–89.
3. Медведский бор // Сборник статей. – Киров: Триада плюс, 2006. – 104 с.
4. Соловьев А. Н. Сокровища Вятской природы / А. Н. Соловьев. – Киров, 1986. – 159 с.
5. Шернин А. И. О работе студенческого кружка по изучению местного края / А. И. Шернин. – Вятка, 1926. – С. 199–204.
6. Шернин А. И. Шесть лет работы студенческого кружка по изучению местного края при Вятском педагогическом институте им. В. И. Ленина / А. И. Шернин. – Вятка, 1929. – 14 с.
7. Садырин В. М. Достопримечательности природы / В. М. Садырин // Вятка. Краеведческий сборник. Сост. М. А. Ардашев. – Киров, 1972. – С. 112–121.
8. Носкова Т. С. К изучению лишайниковых синузий Медведского бора / Т. С. Носкова, С. А. Сенникова // Проблемы изучения, использования и охраны природы Кировской области. Киров, 1992. – С. 37–40.
9. Тарасова Е. М. Государственный памятник природы «Медведский бор» / Е. М. Тарасова // О состоянии окружающей природной среды Кировской области в 2000 году. Региональный доклад. – Киров, 2001. – С. 131–143.
10. Копысов В. А. Видовой состав лишайников Медведского бора / В. А. Копысов /// Вестник Вятского государственного гуманитарного университета. – 2002. – № 6. – С. 15–21
11. Савиных Н. П. Флора Медведского бора / Н. П. Савиных, О. Н. Пересторонина, М. А. Киселева // Вестник ВятГГУ. – Киров, 2002. – № 6. – С. 16–19.
12. Киселёва Т. М. Роль ООПТ «Медведский бор» в сохранении α, β, γ разнообразия на территории Кировской области / Т. М. Киселева, О. Н. Пересторонина, Н. П. Савиных // Роль заповедников лесной зоны в сохранении и изучении биологического разнообразия Европейской части России: материалы науч.-практ. конф., посвящённой 70-летию Окского государственного природного

биосферного заповедника. Серия «Труды Окского государственного природного биосферного заповедника». – Рязань, 2005. – С. 403–412.
13. Матушкин А. С. Сравнительный анализ структуры древнеэоловых ландшафтов памятника природы «Медведский бор» / А. С. Матушкин, А. М. Прокашев // Географический вестник. – 2012. – 1(20). – С. 15–31.
14. Мазеева А. В. Фауна и экология булавоусых чешуекрылых (Lepidoptera, Rhopalocera) памятника природы «Медведский бор», Кировская область / А. В. Мазеева, О. И. Кулакова // Актуальные проблемы биологии и экологии: материалы докладов XXIII Всероссийской молодежной научной конференции (с элементами научной школы) (Сыктывкар, 04–08 апреля 2016 г.). – Сыктывкар, 2016. – С. 74–78.
15. Матушкин А. С. Структура почвенного покрова карстовых и дюнно-карстовых долинно-зандровых ландшафтов Медведского бора / А. С. Матушкин // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2017. – Т. 31. – С. 1091–1095.
16. Дабах Е. В. Особенности почв Медведского бора / Е. В. Дабах, Т. И. Кутявина // Утилизация отходов производства и потребления: инновационные подходы и технологии: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (Киров, 4 декабря 2019 г.). – Киров, 2019. – С. 248–250.
17. Пересторонина О. Н. Эколого-ценотическая характеристика флоры сосняков памятника природы «Медведский бор» (Кировская область) / О. Н. Пересторонина, С. В. Шабалкина, Н. П. Савиных // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. – 2019. – № 18. – С. 354–359.
18. Методы изучение лесных сообществ. – СПб.: НИИХимии – СПбГУ, 2002. – 240 с.
19. Вахрамеева М. Г. Орхидные России (биология, экология и охрана) / М. Г. Вахрамеева, М. Г. Варлыгина, И. В. Татаренко – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2014. – 437 с.
20. Аверьянов Л. В. Калипсо луковчиная – *Calypso bulbosa* (L.) Oakes; Венерин башмачок настоящий – *Cypripedium calceolus* L.; Надбородник безлистный – *Epipogium aphyllum* Sw. / Л. В. Аверьянов // Красная книга Российской Федерации. Растения и грибы. – М.: Товарищество науч. изд-й КМК, 2008. – С. 354–355, 363–364, 375–376.
21. Баранова О. Г. Надбородник безлистный – *Epipogium aphyllum* Sw.; Пыльцеголовник красный – *Cephalanthera rubra* (L.) Rich.; Серпуха венценосная – *Serratula coronata* L. / О. Г. Баранова // Красная книга Кировской области: животные, растения, грибы. – Киров: ООО «Кировская областная типография», 2014. – С. 227, 235, 215.
22. Носкова Т. С. Калипсо луковичная – *Calypso bulbosa* (L.) Oakes; Пыльцеголовник красный – *Cephalanthera rubra* (L.) Rich. / Т. С. Носкова // Красная книга Кировской области: животные, растения, грибы. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2001. – С. 156, 162.
23. Чупракова Е. И. Калипсо луковичная – *Calypso bulbosa* (L.) Oakes / Е. И. Чупракова // Красная книга Кировской области: животные, растения, грибы. – Киров: ООО «Кировская областная типография», 2014. – С. 223.
24. Лачоха Е. П. Венерин башмачок настоящий – *Cypripedium calceolus* L. / Е. П. Лачоха // Красная книга Кировской области: животные, растения, грибы. – Киров: ООО «Кировская областная типография», 2014. – С. 218.
25. Жирнова Т. В. Пыльцеголовник красный – *Cephalanthera rubra* (L.) Rich. / Т. В. Жирнова, М. Г. Вахрамеева // Красная книга Российской Федерации. Растения и грибы. – М.: Товарищество науч. изд-й КМК, 2008. – С. 360–361.
26. Булдаков М. С. Уснея цветущая – *Usnea florida* (L.) Weber ex F. H. Wigg.; Лобария легочная – *Lobaria pulmonaria* (L.) Hoffm. / М. С. Булдаков // Красная книга Кировской области: животные, растения, грибы. – Киров: ООО «Кировская областная типография», 2014. – С. 272, 279.
27. Голубкова Н. С. Уснея цветущая – *Usnea florida* (L.) Weber ex F. H. Wigg. / Н. С. Голубкова // Красная книга Российской Федерации. Растения и грибы. – М.: Товарищество науч. изд-й КМК, 2008. – С. 739–740.
28. Истомина Н. Б. Лобария легочная – *Lobaria pulmonaria* (L.) Hoffm. / Н. Б. Истомина // Красная книга Российской Федерации. Растения и грибы. – М.: Товарищество науч. изд-й КМК, 2008. – С. 715–716.

FINDINGS OF RARE SPECIES IN THE MEDVEDSKIY BOR NATURAL MONUMENT AND ADJACENT TERRITORIES (KIROV REGION)

Perestoronina O. N., Shabalkina S. V.

Vyatka State University, Kirov, Russian Federation
E-mail: olgaperest@mail.ru

The natural monument “Medvedskiy Bor” (Kirov Oblast, 7,181.6 ha) lies at the ecotone between southern taiga and coniferous-broadleaf forests and is floristically unique, combining boreal, nemoral, and Pontic botanical-geographical elements. The area harbors 23 vascular plant species listed in the Red Data Book of Kirov Oblast and 14 additional species included in its Appendix No. 2. These include steppe taxa (*Dianthus borbasii*, *Gypsophila paniculata*) and orchids (*Cypripedium calceolus*, *Neottia nidus-avis*, among others).

The landscape features ancient continental sand dunes (6–9 m high), formed during the Pleistocene cold deserts when sparse vegetation and arid conditions facilitated aeolian reworking of glaciofluvial sands. This distinctive relief, combined with long-term conservation, has fostered diverse ecosystems: pine and spruce-pine forests, wetlands, and lakes.

Scientific study of the area began in the late 19th century; since the 1960s, researchers from Vyatka State University have systematically investigated its biota, soils, and landscapes. Since 2001, we have conducted seasonal field surveys using route reconnaissance and permanent plots across representative habitats.

Our research yielded two orchid species new to “Medvedskiy Bor”: *Epipogium aphyllum* (first record for Nolinsk District and the southernmost known locality in the region) and *Calypso bulbosa*. Additionally, we documented new localities within the reserve for *Cypripedium calceolus* and *Cephalanthera rubra*, previously known only from isolated sites.

Epipogium aphyllum Sw.: "Quarter 121, left bank of the Talitsa River, floodplain herb-rich spruce forest, 57°20′5.8″ N, 50°07′4″ E, 11 July 2014." – The species has a Eurasian, Palaearctic range, encompassing nearly all of Europe and the Mediterranean region, Crimea, and a large part of Asia. It is listed in the Red Data Book of the Russian Federation. In Kirov Oblast, it is a rare species that has undergone rapid population decline in recent decades and is assigned conservation Category II. Over the past 20 years, it has been recorded only within the Bylina State Nature Reserve in Luzhskiy District. Earlier records exist from Verkhnekamskiy, Nagorskiy, Podosinovskiy, and Uninskiy districts of the oblast.

This is the first documented occurrence of *E. aphyllum* in Nolinsk Administrative District, representing the southernmost known locality of the species in the region. The discovered cenopopulation grows in a moist, herb-rich floodplain spruce forest, with individuals occurring sporadically.

Calypso bulbosa (L.) Oakes: "Quarter 79, wetland site within an aspen-birch-pine herb-rich forest, 57°23′2.2″ N, 50°01′0″ E, 23 May 2018." – The species has a disjunctive Holarctic distribution, encompassing Scandinavia, northern Russia, Mongolia, Japan,

China, Korea, and North America. It is listed in the Red Data Book of the Russian Federation. In Kirov Oblast, it is a rare and sparse species assigned to conservation Category III. Currently, *C. bulbosa* is recorded in the vicinity of the city of Kirov and in 13 administrative districts of the region; prior to 2001, it was also documented in six additional districts.

This is the first record of *C. bulbosa* for the flora of the "Medvedskiy Bor" Natural Monument. The discovered cenopopulation is small and occurs on a waterlogged site within an aspen-birch-pine herb-rich forest.

We also confirmed the continued presence of two rare lichens not recorded here for over 20 years: *Usnea florida* (Category I – "Endangered") and *Lobaria pulmonaria*. Furthermore, near the reserve's boundary, we rediscovered a population of *Serratula coronata* (Asteraceae) – a Red Data Book species (Category III) absent from the area for 15 years.

These findings underscore the high conservation value of "Medvedskiy Bor" and demonstrate the long-term persistence of rare species populations under sustained protection.

***Keywords*:** biodiversity, Medvedskiy Bor, new location, Orchidaceae, rare species, Red Book, specially protected natural area.

References

1. *Krasnaya kniga Kirovskoy oblasti: Zhivotnye, rasteniya, griby*. Izd. 2-e. /pod red. O. G. Baranovoy, E. P. Lachokhi, V. M. Ryabova [i dr.]. 336 s. (Kirov: OOO "Kirovskaya oblastnaya tipografiya", 2014).
2. Lavrov D. D. *Priroda Kirovskoy oblasti*. Sbornik statey, 72 (Kirov, 1967).
3. *Medvedskiy bor*, Sbornik statey. 104 s. (Kirov: Triada plyus, 2006).
4. Solovev A. N. *Sokrovishcha Vyatskoy prirody*, 159 s. (Kirov, 1986).
5. Shernin A. I. *O rabote studencheskogo kruzhka po izucheniyu mestnogo kraya*, 199 (Vyatka, 1926).
6. Shernin A. I. *Shest let raboty studencheskogo kruzhka po izucheniyu mestnogo kraya pri Vyatskom pedagogicheskom institute im. V. I. Lenina*, 14 s. (Vyatka, 1929).
7. Sadyrin V. M. *Dostoprimechatelnosti prirody*, 112 (Vyatka. Kraevedcheskiy sbornik. Sost. M. A. Ardashev. Kirov, 1972).
8. Noskova T. S., Sennikova S. A. K izucheniyu lishaynikovykh sinuziy Medvedskogo bora, *Problemy izucheniya, ispolzovaniya i okhrany prirody Kirovskoy oblasti*, 37 (Kirov,1992).
9. Tarasova E. M. Gosudarstvennyy pamyatnik prirody "Medvedskiy bor", *O sostoyanii okruzhayushchey prirodnoy sredy Kirovskoy oblasti v 2000 godu. Regionalnyy doklad*, 131 (Kirov, 2001).
10. Kopysov V. A. Vidovoy sostav lishaynikov Medvedskogo bora, *Vestnik Vyatskogo gosudarstvennogo gumanitarnogo universiteta*, **6,** 15 (2002).
11. Savinykh N. P., Perestoronina O. N., Kiseleva M. A. Flora Medvedskogo bora, *Vestnik VyatGGU*, **6**, 16 (Kirov, 2002).
12. Kiseleva T. M., Perestoronina O. N., Savinykh N. P. Rol OOPT «Medvedskiy bor» v sokhranenii α, β, γ raznoobraziya na territorii Kirovskoy oblasti, *Rol zapovednikov lesnoy zony v sokhranenii i izuchenii biologicheskogo raznoobraziya Evropeyskoy chasti Rossii: materialy nauch.-prakt. konf., posvyashchennoy 70-letiyu Okskogo gosudarstvennogo prirodnogo biosfernogo zapovednika. Seriya «Trudy Okskogo gosudarstvennogo prirodnogo biosfernogo zapovednika»*, 403 (Ryazan,2005). (in Russ).
13. Matushkin A. S., Prokashev A. M. Sravnitelnyy analiz struktury drevneeolovykh landshaftov pamyatnika prirody «Medvedskiy bor», *Geograficheskiy vestnik*, **1**(20), 15 (2012).
14. Mazeeva A. V., Kulakova O. I. Fauna i ekologiya bulavousykh cheshuekrylykh (Lepidoptera, Rhopalocera) pamyatnika prirody «Medvedskiy bor», Kirovskaya oblast, *Aktualnye problemy biologii i ekologii: materialy dokladov XXIII Vserossiyskoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii (s elementami nauchnoy shkoly)* (Syktyvkar, 04–08 aprelya 2016 g.), 74 (Syktyvkar, 2016). (in Russ).

15. Matushkin A. S. Struktura pochvennogo pokrova karstovykh i dyunno-karstovykh dolinno-zandrovykh landshaftov Medvedskogo bora, *Nauchno-metodicheskiy elektronnyy zhurnal «Kontsept»*, **31,** 1091 (2017).
16. Dabakh E. V., Kutyavina T. I. Osobennosti pochv Medvedskogo bora, *Utilizatsiya otkhodov proizvodstva i potrebleniya: innovatsionnye podkhody i tekhnologii: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* (Kirov, 4 dekabrya 2019 g.), 248 (Kirov, 2019). (in Russ).
17. Perestoronina O. N., Shabalkina S. V., Savinykh N. P. Ekologo-tsenoticheskaya kharakteristika flory sosnyakov pamyatnika prirody «Medvedskiy bor» (Kirovskaya oblast), *Problemy botaniki Yuzhnoy Sibiri i Mongolii*, **18**, 354 (2019).
18. *Metody izuchenie lesnykh soobshchestv*, 240 s. (SPb.: NIIKhimii. SPbGU, 2002).
19. Vakhrameeva M. G., Varlygina M. G., Tatarenko I. V. *Orkhidnye Rossii (biologiya, ekologiya i okhrana)*, 437 s. (M.: Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2014).
20. Averyanov L. V. Kalipso lukovchinaya – *Calypso bulbosa* (L.) Oakes; Venerin bashmachok nastoyashchiy – *Cypripedium calceolus* L.; Nadborodnik bezlistnyy – *Epipogium aphyllum* Sw., Krasnaya kniga Rossiyskoy Federatsii. Rasteniya i griby, 354–355, 363–364, 375–376 (M.: Tovarishchestvo nauch. izd-y KMK, 2008).
21. Baranova O. G. Nadborodnik bezlistnyy – *Epipogium aphyllum* Sw.; Pyltsegolovnik krasnyy – *Cephalanthera rubra* (L.) Rich.; Serpukha ventsenosnaya – *Serratula coronata* L. *Krasnaya kniga Kirovskoy oblasti: zhivotnye, rasteniya, griby,* 227, 235, 215. (Kirov: OOO "Kirovskaya oblastnaya tipografiya", 2014).
22. Noskova T. S. Kalipso lukovichnaya – *Calypso bulbosa* (L.) Oakes; Pyltsegolovnik krasnyy – *Cephalanthera rubra* (L.) Rich., *Krasnaya kniga Kirovskoy oblasti: zhivotnye, rasteniya, griby,* 156, 162 (Ekaterinburg: Izdatelstvo Uralskogo universiteta, 2001).
23. Chuprakova E. I. Kalipso lukovichnaya – *Calypso bulbosa* (L.) Oakes, *Krasnaya kniga Kirovskoy oblasti: zhivotnye, rasteniya, griby*, 223 (Kirov: OOO "Kirovskaya oblastnaya tipografiya", 2014).
24. Lachokha E. P. Venerin bashmachok nastoyashchiy – *Cypripedium calceolus* L., *Krasnaya kniga Kirovskoy oblasti: zhivotnye, rasteniya, griby*, 218 (Kirov: OOO "Kirovskaya oblastnaya tipografiya", 2014).
25. Zhirnova T. V., Vakhrameeva M. G. Pyltsegolovnik krasnyy – *Cephalanthera rubra* (L.) Rich., *Krasnaya kniga Rossiyskoy Federatsii. Rasteniya i griby*, 360 (M.: Tovarishchestvo nauch. izd-y KMK, 2008).
26. Buldakov M. S. Usneya tsvetushchaya – *Usnea florida* (L.) Weber ex F. H. Wigg.; Lobariya legochnaya – *Lobaria pulmonaria* (L.) Hoffm. *Krasnaya kniga Kirovskoy oblasti: zhivotnye, rasteniya, griby*, 272, 279 (Kirov: OOO "Kirovskaya oblastnaya tipografiya", 2014).
27. Golubkova N. S. Usneya tsvetushchaya – *Usnea florida* (L.) Weber ex F. H. Wigg., *Krasnaya kniga Rossiyskoy Federatsii. Rasteniya i griby*, 739 (M.: Tovarishchestvo nauch. izd-y KMK, 2008).
28. Istomina N. B. Lobariya legochnaya – *Lobaria pulmonaria* (L.) Hoffm., *Krasnaya kniga Rossiyskoy Federatsii. Rasteniya i griby*, 715 (M.: Tovarishchestvo nauch. izd-y KMK, 2008).

Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского
Биология. Химия. Том 12 (78). 2026. № 2. С. 200–213.

УДК 594.121-13

DOI 10.5281/ZENODO.20793645

ДИНАМИКА РОСТА И РАЗВИТИЯ ЛИЧИНОК ГИГАНТСКОЙ УСТРИЦЫ *MAGALLANA GIGAS* (THUNBERG, 1793) (BIVALVIA: OSTREIDAE) ЧЕРНОМОРСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Пиркова А. В., Ладыгина Л. В., Рябушко В. И., Щуров С. В., Тоичкин А. М.

ФГБУН ФИЦ "Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН", Севастополь, Россия
E-mail: avpirkova@mail.ru

Изучена динамика роста и развитие личинок гигантской устрицы *Magallana gig*as (Thunberg, 1793), полученных в питомнике от производителей черноморского происхождения. Составлены рационы питания для личинок разных стадий развития. Описаны морфометрические характеристики, включая изменение формы раковин и положение макушки, личинок на разных стадиях развития: D-стадии, велигера, великонхи и педивелигера. Максимальные размеры (L×H) личинок на D-стадии составили: 77×63 мкм; на стадии педивелигера – 336×378 мкм. Отношения длины к высоте раковин личинок изменялись в онтогенезе от 1.16 до 0.87. В течение всего периода выращивания отмечена дифференциация личинок по размерам. Разница между максимальными и минимальными значениями высоты раковин личинок составила – от 7 (возраст 2 сут.) до 200 мкм (возраст 18 сут.). Представлены СЭМ-изображения раковин с концентрическими линиями роста у быстрорастущих и медленнорастущих личинок возрастом 18 суток.
Ключевые слова: гигантская устрица, личинки, морфометрические характеристики, аквакультура, Черное море.

ВВЕДЕНИЕ

Двустворчатый моллюск *Magallana gig*as (Thunberg, 1793) – является наиболее распространенным в мире из всех видов устриц. Гигантская устрица завезена в 66 стран и успешно выращивается в 17 странах, благодаря ее высоким темпам роста, адаптации к различным условиям солености и температуры, устойчивости к заболеваниям [1, 2]. Оптимальный диапазон солености для гигантской устрицы составляет от 20 до 25 ‰, хотя вид может встречаться при 10 ‰ и выживать при 35 ‰. Он также может обитать в широком температурном диапазоне: от –1.8 до +35°C [3].

В Черное море гигантская устрица интродуцирована вначале 80-х гг. XX ст. взамен исчезающему виду *Ostrea edulis* (Linnaeus, 1758) [4, 5]. Начиная с 1989 по 1991 гг., была продолжена доставка спата гигантской устрицы из Японского моря в новые районы Черного моря, включая прибрежье Крыма и Кавказа [6]. Продолжительное время *M. gigas* не образовывала природных поселений, как предполагается из-за низкой концентрации гамет. В последнее время осевших

устриц все чаще обнаруживают на различных твердых субстратах и раковинах моллюсков у берегов Кавказа и Крыма [7, 8]. Спат гигантской устрицы был найден на пластиковых буях мидийно-устричной фермы, функционирующей в акватории оз. Донузлав и бухтах Севастополя [9]. О размножении гигантских устриц в море свидетельствует нахождение личинок в планктоне в летне-осенний период [10]. Хотя количество обнаруженных естественных поселений *M. gigas* еще невелико, и, вероятно, они были образованы при размножении устриц, интродуцированных в виде спата для промышленного выращивания, вид демонстрирует способность размножения в природных условиях.

В настоящее время на черноморском побережье России функционируют три десятка морских ферм, используемых технологию полуцикличного выращивания устриц, закупая спат *M. gigas* в питомниках европейских стран либо на Дальнем Востоке [8]. Товарного размера гигантская устрица достигает в течение 2–3 лет. За это время устрицы могут отнереститься в море 2–3 раза, так как половозрелыми они становятся в возрасте одного года [6, 11]. Посадочный материал – спат гигантской устрицы для промышленного выращивания получают в питомниках. Поэтому необходимы обширные исследования по подбору маточного стада, изучению темпов роста и выживаемости личинок, полученных от разных типов скрещивания, и применению селекции для выведения линий с хозяйственно-ценными признаками, адаптированных к конкретной среде обитания.

Цель работы – изучение темпа роста и развития личинок гигантской устрицы *M. gigas*, полученных от производителей черноморского происхождения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования послужили личинки *M. gigas*, полученные при скрещивании производителей устриц черноморского происхождения и выращенные в питомнике до оседания. Осенью 2022 г. в акватории оз. Донузлав (западное побережье Крыма) был собран спат гигантской устрицы, осевший на раковинах мидий. В дальнейшем устриц подращивали до товарного размера в выростных садках на глубине 5 м. В июле 2024 г. в качестве производителей были отобраны 21 экз. *M. gigas* возрастом 2+ года высотой раковин более 110 мм с видимым ростовым краем.

Для выращивания личинок использовали только фильтрованную морскую воду (соленость 18 ‰; pH 8.21–8.22), последовательно прошедшую через песчаный фильтр, УФ стерилизатор и три механические фильтры: 20, 10 и 1 мкм. Оплодотворение яйцеклеток, развитие эмбрионов и рост личинок происходило в помещении с контролируемой температурой воды (+24.0°C). Для постоянной аэрации воды использовали аквариумные микрокомпрессоры.

Нерест устриц стимулировали растворенным в стерильной морской воде серотонином ($C_{14}H_{19}N_5O_2 \cdot H_2SO_4$) концентрацией 0.003 % по 1.5 мл·экз.$^{-1}$, вводя раствор в межстворчатую полость [12]. Примерно через 40 мин. после стимуляции нереста отнерестились две устрицы: самка (H=195.83 мм) и самец (H=110.27 мм).

Для очищения от примесей (фекалий и псевдофекалий) суспензию яйцеклеток пропускали через газ-сито диаметром ячеи 72 мкм и собирали в градуированную

емкость; суспензию сперматозоидов – через сито диаметром ячеи 32 мкм. Через 15 мин. после соединения гамет, чтобы исключить явление полиспермии, яйцеклетки промыли фильтрованной морской водой при помощи газ-сита с размером ячеи 32 мкм. Процесс оплодотворения и эмбрионального развития контролировали под микроскопом. Выделение направительных телец свидетельствовало о 100 % оплодотворении.

Развитие эмбрионов проходило при плотности посадки 50 тыс. экз.·л$^{-1}$ в цилиндрических баках (V=50 л), изготовленных из стеклопластика. Всего получено 2.5 млн. экз. Через 24 ч после оплодотворения объем воды увеличили в два раза (V=100 л) и добавили небольшое количество микроводорослей *Monochrysis lutheri* (Droop, 1953) и *Isochrysis galbana* (Parke, 1949). Полную замену воды провели через 2 сут. при помощи газ-сита диаметром ячеи 56 мкм. Поскольку темп роста личинок в онтогенезе был не равномерным, для сохранения их количества при обмене воды применяли сита размерами ячеи меньшими, чем размеры личинок. Сортировку личинок перед оседанием проводили при помощи газ-сита с размерами ячеи 308 мкм.

В течение всего периода выращивания поддерживали оптимальную плотность посадки личинок, определенную ранее методами многофакторных экспериментов для разных стадий развития [8]. На стадии велигера, при плотности посадки личинок 20 тыс. экз.·л$^{-1}$, воду меняли ежедневно. На стадии великонхи и педивелигера при плотности посадки соответственно 10 и 5 тыс. экз.·л$^{-1}$ обмен воды проводили через 48 ч. Для определения плотности посадки количество личинок подсчитывали еженедельно при помощи микроскопа МБС-9 в камере Богорова. Весь период выращивания личинок проходил при естественном освещении.

Терминология стадий: D-стадия, велигер, великонха, великонха с “глазком”, педивелигер и морфометрические характеристики личинок: длина и высота раковин приведены в статье согласно описанным ранее [13, 14]. Измерение линейных параметров раковин личинок (высота H, мкм и длина L, мкм) проводили с помощью окуляр-микрометра микроскопа МБС-9 (×56) с интервалом 2 сут. (по 20–97 экз.). Средние значения ($\bar{x}$, мкм) и стандартные отклонения (SD, мкм) подсчитаны в программе MS Excel. Достоверность разницы между линейными параметрами раковин личинок устриц определяли по критерию *t*-Стьюдента. Все тесты проводились при 5 % уровне значимости.

Среднесуточный прирост (мкм·сут.$^{-1}$) определяли по формуле:

$$\Delta H = \frac{H_2 - H_1}{T_2 - T_1}, \quad (1)$$

где: H_1 и H_2 – предыдущие и настоящие средние значения высоты раковин; T_1 и T_2 – интервал, сут. [15]. Коэффициент вариации (*CV*%) определяли согласно формуле:

$$CV = 100\frac{SD}{\bar{x}}\%, \quad (2)$$

где: SD – стандартное отклонение; $\bar{x}$ – среднее значение.

Фотографии личинок устриц сделаны при помощи фотокамеры Sony 7.2 Mega pixels и микроскопа МИКМЕД-6 (×80). Анализ линий роста на раковине

продиссоконх II проводили при помощи электронного сканирующего микроскопа SEM Hitachi SU 3500. Препараты готовили в следующей последовательности. Зафиксированных в этаноле личинок (возраст 18 сут.) промывали в дистиллированной воде, высушивали при комнатной температуре и переносили на двусторонний скотч, приклеенный на предметный столик, затем покрывали в вакууме медным напылением.

В течение всего периода выращивания суточную дозу корма подавали три раза: сразу после замены воды и два раза в течение рабочего дня. В качестве корма использовали 6 видов водорослей: *Is. galbana, M. lutheri, Phaeodactylum tricornutum* (Bohlin, 1897)*, Tetraselmis suecica* ((Kylin) Butcher, 1959), *Tetraselmis viridis* ((Rouchijajnen) R.E.Norris, Hori & Chihara, 1980), *Chlorella vulgaris* f. *suboblonga* (Beijerinck, 1890; Andreeva, 1975). Микроводоросли наращивали в культиваторах (одноразовые полиэтиленовые мешки) объемом 25 л при температуре 20–22°С, круглосуточной освещенности 10 тыс. клк, на питательной среде Конвея и аэрации газовоздушной смесью, содержащей 2 % углекислого газа [8]. Концентрацию корма для личинок устриц рассчитывали по общему количеству клеток водорослей на объем емкости с личинками при оптимальной плотности их посадки. На стадии велигера корм состоял из микроводорослей: *I. galbana* + *M. luthery* концентрацией 100 тыс. кл.·мл$^{-1}$ (соотношение клеток 1:1). На стадии великонхи в качестве корма использовали смесь микроводорослей, добавляя *Ph. tricornutum,* при суммарной концентрации 150 тыс.кл.·мл$^{-1}$ в соотношении клеток 1:1:1. Начиная со стадии великонхи с “глазком”, в состав корма включили зеленую микроводоросль *Ch. vulgaris*. На стадии педивелигера состав корма дополняли микроводорослями *T. suecica* и *T. viridis* при суммарной концентрации 250 тыс. кл.·мл$^{-1}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

После стимуляции нереста устриц-производителей, проведено индивидуальное скрещивание. Через сутки наблюдали первую личиночную стадию – продиссоконх I или D-стадию. На этой стадии у личинок полностью сформированы две створки, развита пищеварительная система и велюм – орган, характерный для всех личинок двустворчатых моллюсков. В возрасте двух суток средняя длина (L) и высота (H) раковин личинок составила 71.7×61.6 мкм, а максимальные размеры – 77×63 мкм; отношение длины к высоте раковины – 1.16 (табл. 1; рис. 1а).

В дальнейшем формируется раковина продиссоконх II. На 6 сут. выращивания по мере роста личинок с прямым замком средние значения длины и высоты раковины почти сравнялись (85.1×84.8 мкм), отношение длины к высоте раковины составило 1.0, а максимальные размеры велигеров – 105×98 мкм; (см. табл. 1; рис. 1б). В возрасте 8 сут. высота личиночной раковины становится больше длины (105.7×114.8 мкм) (табл. 1; рис. 1в). При высоте раковины 125 мкм (возраст 10 сут.) макушка левой створки стала округлой формы (рис. 1г). На стадии великонхи при достижении средних размеров 146.6×165.6 мкм (возраст 14 сут.) макушка начинает скрывать линию замка (рис. 1д). В возрасте 16 сут. (средние размеры 196.6×223.4 мкм; отношение длины к высоте – 0.88) макушка становится скошенной и направленной назад, причем на левой створке она намного больше (рис. 1е).

Таблица 1

Размерные характеристики личинок гигантской устрицы *Magallana gigas* в онтогенезе (n = 445 экз.)

T, сут.	Max-min		Сред. знач. H, мкм	SD_H, мкм	*CV%*	Сред. знач. L, мкм	SD_L, мкм	L/H	Средне-сут. прирост, Δ H, мкм·сут.$^{-1}$	n, экз.
	H, мкм	L, мкм								
0	–	–	53.4	1.1	2.0	53.4	–	–	–	20
2	63–56	77–63	61.6	2.9	4.7	71.7	3.7	1.16	4.1	25
4	77–56	84–63	66.5	5.3	8.0	74.9	5.9	1.13	2.5	26
6	98–63	105–70	84.8	12.7	15.0	85.1	9.0	1.00	9.2	25
8	133–77	126–77	114.8	17.2	14.9	105.7	14.0	0.92	15.0	20
10	154–98	133–84	124.6	13.6	10.9	112.7	13.4	0.90	4.9	30
11	168–98	154–98	138.9	17.2	12.4	128.5	13.5	0.93	14.3	25
12	196–98	175–84	157.6	21.7	13.8	142.5	20.6	0.90	18.7	25
14	224–98	203–98	165.5	28,6	17.2	146.6	27.1	0.89	4.0	33
16	266–126	231–112	223.4	37.5	16.8	196.6	32.5	0.88	29.0	38
18	322–122	280–120	230.3	40.2	19,2	209.2	37.0	0.91	3.5	55
20	350–154	322–125	255.1	48.3	18.9	229.7	46.9	0.90	12.4	97
*20	350–294	322–252	328.3	21.2	6.5	284.6	21.8	0.87	–	21
*22	378–294	336–252	337.7	18.2	5.3	298.2	18.3	0.88	4.7	25

Примечание: * – личинки, отобранные для оседания при помощи газ-сита с размерами ячеи 308 мкм; SD – стандартное отклонение; *CV %*– коэффициент вариации.

У личинок с высотой раковины 220–223 мкм появился “глазок”, диаметр которого около 7 мкм. “Глазки” расположены в мантии на боковых сторонах тела личинки почти в центре раковины и представляют собой пигментную чашу, выполняющую функцию линзы [16]. Стадия великонхи с “глазком” продолжалась до 4 суток. Появление “глазков” зависит от размера личинок и совпадает с необычным поведением: наблюдается массовое объединение личинок при помощи слизистых выделений. В мерной емкости при обмене воды личинки сосредотачивались на поверхности воды. Это явные признаки того, что через несколько дней личинки будут готовы к оседанию. В возрасте 18–20 сут. личинки высотой раковин 320 мкм перешли в стадию педивелигера (рис. 1ж). Между периодами плавания педивелигеры ползали при помощи ноги в поисках подходящего субстрата. Оседание личинок произошло на 22 сут. выращивания при достижении средних размеров (L×H): 298.2×337.7 мкм (диаметр “глазка” около 14 мкм) (рис. 1з), что согласуется с указанными ранее размерами, где максимальная высота плавающих личинок гигантской устрицы составили примерно 340 мкм [17, 18].

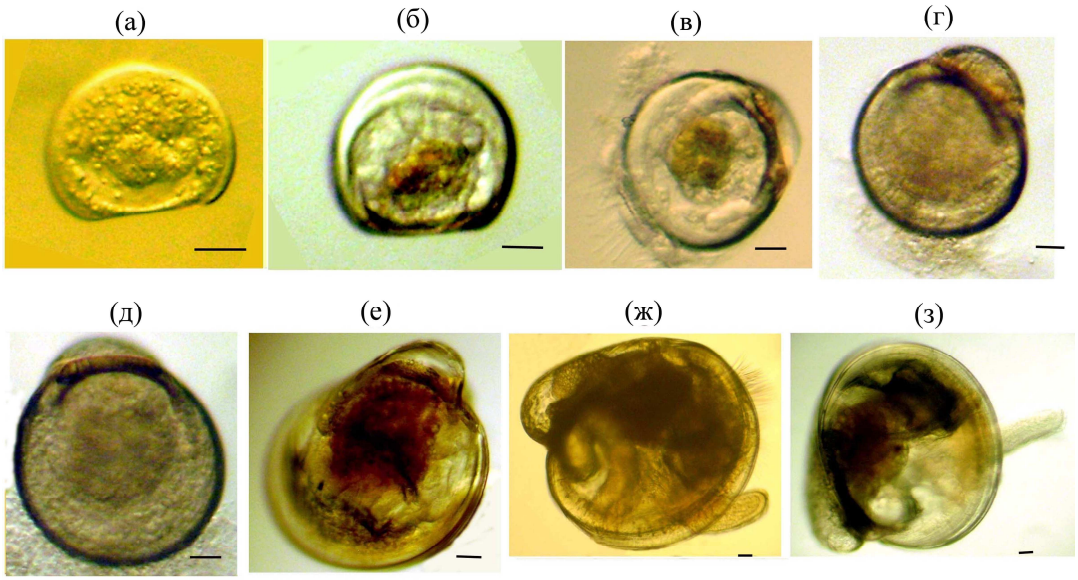


Рис. 1. Личинки гигантской устрицы *Magallana gigas* на разных стадиях развития: (а) – D-стадия, возраст 2 сут.; (б) – велигер, возраст 6 сут.; (в) – поздний велигер, возраст 8 сут.; (г) – великонха, возраст 11 сут.; (д) – великонха, возраст 14 сут.; (е) – великонха с "глазком", возраст 16 сут.; (ж) – педивелигер, возраст 20 сут.; (з) – педивелигер, возраст 22 сут. Масштаб: 20 мкм.

Динамика линейного роста личинок *M. gigas* представлена на рис. 2. На стадии прямого замка длина раковины больше высоты на 10 мкм (возраст 2–4 сут.). На 6 сутки значения длины и высоты раковины велигеров были аналогичны (рис. 1б). Но уже через двое суток высота раковины личинок превысила длину на 9 мкм и в течение последующего планктонного периода и до оседания средние значения высоты раковин были достоверно выше средних значений длины: $t_{st}=2.45<t_{ф}=7.58$; P=0.05 и k=6. Разница линейных параметров раковины личинок составила от 11.9 мкм – на 10 сутки (L=112.7±4.8 мкм; H=124.6±4.9 мкм) до 25.4 мкм – на 20 сутки (L=229.7±9.4 мкм; H=255.1±9.7мкм).

Среднесуточный прирост высоты раковины личинок за 20 сут. выращивания составил около 10 мкм·сут.$^{-1}$. Минимальные значения среднесуточного прироста отмечены на стадии велигера в возрасте 4 сут. – 2.5 мкм·сут.$^{-1}$, что, вероятно, связано с переходом в следующую стадию; а максимальные (29 мкм·сут.$^{-1}$) – на стадии великонхи с "глазком" (возраст 16 сут.) (табл. 1), когда рацион был дополнен новыми видами водорослей: *Ph. tricornutum* и *Ch. vulgaris*. На 8–10 сут. выращивания при переходе личинок в стадию великонхи выживаемость составила около 73 %; отход произошел за счет медленнорастущих личинок, что совпадает с началом формирования и роста макушки и считается критическим периодом в

развитии личинок рода *Magallana* [19]. Через четверо суток выживаемость личинок уменьшилась на 16 %; на 18 сутки – еще на 8 %, а на 20 сутки доля выживших личинок составила примерно 50 % от начального количества (1.25 млн. экз.).

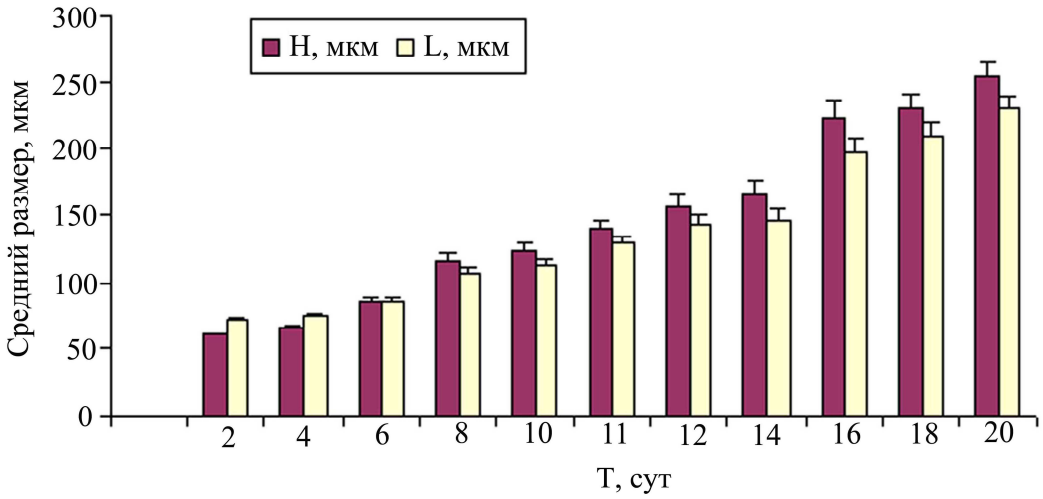


Рис. 2. Динамика линейных параметров личинок устрицы *Magallana gig*as в онтогенезе.

Дифференциация личинок по размерам отмечена уже на вторые сутки выращивания: разница между максимальными и минимальными значениями высоты раковин личинок составила 7 мкм (*CV*=4.7 %). На 6 сутки разница увеличилась до 35 мкм (*CV*=15.0 %), на 18 сут. – до 200 мкм при максимальном коэффициенте вариации размеров: *CV*=19.2 % (табл. 1). На 20 сут. выращивания пул личинок можно было условно разделить на три группы: быстрорастущие, среднерастущие и медленнорастущие. В пробе из 97 экз. великонхи составили 36 %, великонхи с “глазком” – 53.7 %, а педивелигеры – 10.3 %. Оседание быстрорастущих личинок произошло на 22 сутки (максимальные размеры 336×378 мкм); среднерастущих – на 30 сут., а медленнорастущих – на 42 сут. выращивания.

Раковина продиссоконх I (длина – от 63 до 77 мкм) формируется в течение 24 часов (D-стадия). Ее поверхность неровная, имеет тонкозернистую звездчатую структуру (рис. 3). В дальнейшем формируется раковина продиссоконх II с выделяющимися линиями роста. На рис. 3 стрелкой указана граница раковины продиссоконх I и II. У личинок (возраст 18 сут.) на раковине продиссоконх II видны темные полосы, чередующихся со светлыми. На раковине личинки размерами 122 мкм насчитывается 27 темных полос (рис. 3а); у личинки с высотой раковины 185 мкм – 17 темных полос (рис. 3б).

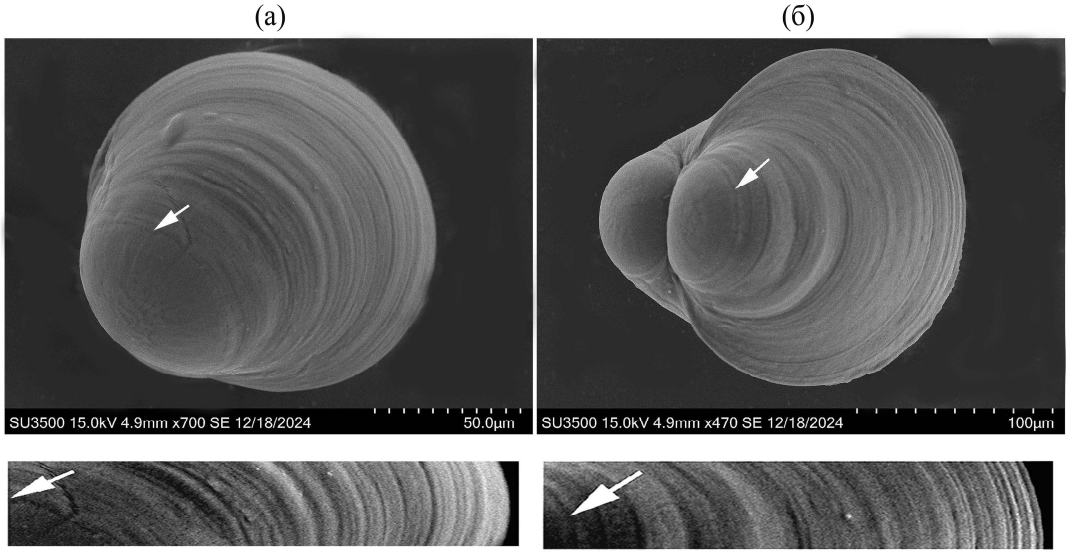


Рис. 3. СЭМ-изображение раковин личинок *Magallana gigas* с линиями роста (возраст 18 сут.): (а) – высота раковины 122 мкм; (б) – высота раковины 185 мкм. Стрелкой обозначена граница раковины продиссоконх – I и II.

Сезон размножения гигантской устрицы, как в естественных местах обитания (моря Дальнего Востока), так и при выращивании в Черном море, начинается с третьей декады июня при температуре воды +20°С и продолжается до конца июля или середины августа в зависимости от суммарной температуры воды и обилия пищи [6, 11, 20]. Резкое повышение температуры воды в море (до +27°С) в середине июля 2024 г способствовало быстрому созреванию гонад и непродолжительному нерестовому периоду. Во второй декаде июля на нерестовой стадии оставались только единичные особи. В данном исследовании количество отнерестившихся производителей составило 10 %. При этом выживаемость личинок за 20 суток выращивания составила около 50 %. Известно, что выживаемость личинок устрицы максимальная при скрещивании родительских пар, гонады которых находятся в начале нерестовой стадии [21].

В промышленных питомниках по выращиванию личинок гигантской устрицы (атлантическое побережье) для обеспечения генетического разнообразия потомства применяется массовое оплодотворение: отбирают гаметы как минимум от 6 самцов и 6 самок; причем маточное стадо питомника каждый раз пополняют устрицами из природных поселений [3]. Одним из важных факторов при отборе маточного стада является их происхождение: отобраны они из питомника или из природной популяции. Потомство, полученное от производителей, выращенных в питомнике, обычно является результатом скрещивания небольшого числа производителей и, следовательно, представляет собой лишь часть генетической изменчивости природной популяции. К тому же отбор быстрорастущих личинок способствует исключению из потомства большей части генетических вариаций маточного стада

[22]. В данном исследовании потомство, полученное в результате индивидуального скрещивания устриц *M. gigas* черноморского происхождения, отобранных из природных поселений, характеризовалось дифференциацией по размерам в течение онтогенеза, вследствие чего продолжительность планктонного периода быстрорастущих и медленнорастущих личинок различалась на 20 сут. и составила от 22 до 42 сут.

При выращивании личинок *M. gigas* в питомнике основные морфометрические характеристики стадий развития совпадают с ранее описанными [17, 19]. Личинки на D-стадии наблюдались через сутки после оплодотворения. На этой стадии развития длина раковины больше высоты. Через несколько суток у личинок было отмечено начало образования раковины продиссоконх II с концентрическими линиями роста. На 6 сутки выращивания раковина личинок приобрела округлую форму, а отношение длины к высоте раковины стало близким к единице. В дальнейшем на стадии великонхи сформировалась макушка, которая была больше выражена на левой створке. Следует отметить, что в отличие от довольно симметричной раковины личинок D-стадии, у великонхи раковина асимметричная – правая створка более плоская и высота ее меньше левой. Начиная с этой стадии, наблюдались наибольшие колебания высоты и длины, что можно объяснить неравномерным ростом личинок на поздних стадиях развития.

Для видовой идентификации личинок устриц кроме простого рассмотрения двух параметров: высоты и длины раковин и отношения длины к высоте раковины, должно быть включено описание формы личинок. Это актуально в связи с обнаружением в планктоне Черного моря личинок *M. gigas* [10]. Параметры размеров в сочетании с простыми характеристиками формы (форма и положение макушки) являются видовыми признаками [23]. В результате анализа развития личинок установлено, что при размерах (L×H) 106×115 мкм (возраст 8 сут.) на левой створке начинает развиваться непропорционально большая макушка. Раковина личинок становится асимметричной при высоте 220 мкм. Многие авторы подчеркивают, что сильно выраженная асимметрия раковины и разностворчатость, когда правая створка меньше левой, является систематическим признаком рода *Magallana* [18, 19, 24].

Продолжительность периода личиночного развития напрямую связана с температурой воды, плотностью посадки личинок, и зависит от концентрации и качественного состава кормовых видов микроводорослей. В данном исследовании выращивание личинок *M. gigas* в питомнике при температуре воды +24°C и оптимальной плотности посадки, продолжалось от 22 до 42 сут. На 20 сутки были отобраны быстрорастущие личинки (средние значения высоты раковины: 328.3 мкм; SD=21.2 мкм) (табл. 1), у которых процесс оседания начался на 22 сут., что на сутки позже, чем при температуре +25°C [25] и на двое суток позже, чем при +27°C [14, 19]. Корм личинкам состоял из 6 видов микроводорослей. Для каждой стадии развития личинок подбирали рацион с учетом размеров клеток и биохимического состава видов водорослей [8]. Известно, что период развития личинок тихоокеанской устрицы, полученных при групповом скрещивании производителей – потомков, интродуцированных с Японского в Черное море,

увеличился до 52 сут. [8]. Выращивание личинок проходило при оптимальной температуре воды (+25°С) в проточной системе на природном фитопланктоне, но без добавления культуры микроводорослей.

При оптимальных условиях выращивания рост и продолжительность развития личинок зависит от наследственных факторов. Этот тезис подтверждают результаты по изучению темпов роста и выживаемости личинок гигантской устрицы, полученных при групповых скрещиваниях черноморской когорты инбредных устриц с атлантической когортой, когда оседание личинок произошло на 20 сут. при минимальном варьировании размеров личинок [20].

Особенности роста личинок устриц в онтогенезе можно проследить, анализируя количество и ширину линий роста на раковине продиссоконх II. Так, у быстрорастущих личинок в возрасте 18 сут. (высота раковины 185 мкм) на раковине насчитывается 17 темных и светлых полос (рис. 3б): светлая (широкая) и темная (узкая) полосы соответствуют суточному приросту. Наличие 27 полос на раковине продиссоконх II медленнорастущих личинок в возрасте 18 сут. (H=122 мкм) (рис. 3а) не соответствует суточным приростам и, очевидно, связано с периодическим закрытием створок в дневное время, следовательно, – прекращением на некоторое время фильтрации (питания), чем и можно объяснить отставание их в росте. Предполагается, что увеличение выраженности линий роста на раковине личинок устриц связано с физиологическими изменениями, зависящими от закрытия створок, а также от фактического прогиба края мантии [16] и свидетельствуют об изменении режима обызвествления [26].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При оптимальных температурных и трофических условиях выращивания личинок в питомнике, продолжительность планктонных стадий *M. gigas*, полученных от производителей черноморского происхождения, составила от 22 до 42 суток. В течение всего периода выращивания отмечена дифференциация личинок по размерам. Разница между максимальными и минимальными значениями высоты раковин личинок составила – от 7 (возраст 2 сут.) до 200 мкм (возраст 18 сут.). Сравнение количества линий роста на раковинах продиссоконх II быстрорастущих и медленнорастущих личинок аналогичного возраста, показало не соответствие суточным приростам медленнорастущих личинок, что, очевидно, связано с большей частотой закрытия створок.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме “Комплексное исследование механизмов функционирования морских биотехнологических комплексов с целью получения биологически активных веществ из гидробионтов” (№ гос. регистрации 124022400152-1).

Список литературы

1. Harris J. Pacific oyster, *Crassostrea gig*as (Thunberg, 1793) / Harris J. // Aquatic Invas. Ecol. – 2008. – P. 1–12.
2. Ruesink J. L. Introduction of nonnative oysters: Ecosystem effects and restoration implications / J. Ruesink, H. Lenihan, A. Trimble, K. Heiman // Annual Rev. Ecol. Evol. Sys. – 2005. – Vol. 36. – P. 643–689. Doi: 10.1146/annurev.ecolsys.36.102003.15263
3. Helm M. M. Hatchery culture of bivalves. A practical manual / M. M. Helm, N. Bourne, A. Lovatelli – Rome: FAO, 2004. – 177 p.
4. Орленко А. Н. Гигантская устрица *Crassostrea gigas* (Bivalvia, Mytiliformes, Crassostreidae) как объект акклиматизации и основные этапы ее трансплантации в Черное море / А. Н. Орленко // Зоологический журнал. – 1994. – Т. 73(1). – С. 51–54.
5. Орленко А. Н. Основные результаты работ по акклиматизации и культивированию гигантской устрицы *Crassostrea gigas* (Th.) в Черном море за период 1985–2004 гг. / А. Н. Орленко // Рыбн. хоз-во Украины. – 2005. – Спец. Вып. – № 6. – С. 178–180.
6. Орленко А. Н. Результаты формирования маточного стада тихоокеанской устрицы в Черном море и получения ее спата в искусственных условиях / А. Н. Орленко, В. И. Вижевский // Труды Южного Научно-исследовательского института морского рыбного хозяйства и океанографии. – 1995. – Т. 41. – С. 136–140.
7. Переладов М. В. Тихоокеанская устрица (*Crassostrea gigas*) в Черном море. Современные природные поселения и перспективы дальнейшей экспансии / М. В. Переладов // Труды VIII Международной научно-практической конференции “Морские исследования и образование (MARESEDU-2019)”. – Тверь: ООО “ПолиПРЕСС”, 2020. – Т. II (III). – С. 343–347.
8. Пиркова А. В. Биологические и биотехнические аспекты организации и функционирования устричного питомника на Черном море. / А. В. Пиркова, Л. В. Ладыгина, В. И. Холодов – Севастополь: ФИЦ ИнБЮМ, 2020. – 120 с.
9. Попов М. А. Находки молоди двустворчатого моллюска *Crassostrea gigas* (Thunberg, 1793) в озере Донузлав и в Артиллерийской бухте (Крым, Черное море) / М. А Попов, С. В. Щуров // Морск. биол. журн. – 2019. – Т. 4, № 4. – С. 97–99.
10. Лисицкая Е. В. О нахождении личинок *Crassostrea gigas* (Thunberg 1793) (Bivalvia, Ostreidae) в Черном море / Е. В. Лисицкая, С. В. Щуров // Зоол. журн. – 2024. – Т. 103, № 5. – С. 11–15.
11. Раков А. В. Биологические основы культивирования тихоокеанской устрицы *Crassostrea gigas* (Thunberg) в заливе Петра Великого : Автореф. дис. … канд. биол. наук. Академия наук СССР. Дальневосточный научный центр. ТИНРО / А. В. Раков. – Владивосток, 1984. – 24 с
12. Gibbons M. C. Serotonin as an inducer of spawning in six bivalve Species / M. C. Gibbons, M. Castagna // Aquaculture. – 1984. – Vol. 40. – P. 189–191 (abstract).
13. Захваткина К. А. Личинки двустворчатых моллюсков – Bivalvia // Определитель фауны Черного и Азовского морей. Свободноживущие беспозвоночные. / К. А. Захваткина. – Киев: Наукова Думка, 1972. – Т. 3. – С. 250–271.
14. Loosanoff V. L. Dimensions and shapes of larvae of some marine bivalve mollusks / V. L. Loosanoff, H. C. Davis, P. E. Chanley // Malac. – 1966. – Vol. 4. – P. 351–435.
15. Алимов А. Ф. Рост и возраст. Методы изучения двустворчатых моллюсков / А. Ф. Алимов, А. А. Львова, Г. Е. Макарова, И. Н. Солдатова // Труды Зоол. института. – 1990. – Т. 219. – С. 121–141.
16. Waller T. R. Functional morphology and development of veliger larvae of the European oyster, *Ostrea edulis* Linné / T. R. Waller // Smithsonian Contributions to Zoology. – 1981. – Vol. 328. – 70 p. Doi: 10.5479/si.00810282.328
17. Куликова В. А. Пелагические личинки двустворчатых моллюсков Японского моря, морфология, идентификация / В. А. Куликова, Н. К. Колотухина // Препринт № 21. Владивосток, 1989. – 32 с.
18. Chanley P. Comparative descriptions of some oyster larvae from New Zealand and Chile, and a description of a new genus of oyster, Tiostrea, New Zealand / P. Chanley, P. Dinamani // J. of Mar. and Freshwater Res. – 1980. – Vol. 14, № 2. – P. 103–120. Doi: 10.1080/00288330.1980.9515851

19. Christo S. W. Crescimento da prodissoconcha de ostras do gênero *Crassostrea* Sacco, 1897 (Bivalvia, Ostreidae) / S. W Christo, T. M. Absher // Boletim do Instituto de Pesca. – 2008. – Vol. 34, №. 1. – P. 71–77.
20. Холодов В. И. Выращивание мидий и устриц в Черном море. / В. И. Холодов, А. В. Пиркова, Л. В. Ладыгина. – Воронеж. ООО "Издат-принт", 2017. – 508 с.
21. Lannan J. E. Broodstock management of *Crassostrea gigas*. II. Broodstock conditioning to maximize larval survival / J. E. Lannan, A. Robinson, W. P. Breese // Aquacult. – 1980. – Vol. 21, № 4. – P. 337–345.
22. Beaumont A. Genetic considerations in transfers and introductions of scallops / A. Beaumont // Aquacult. Inter. – 2000. – Vol. 8. – P. 493–512
23. Hendriks I. E. Identification of larvae of intertidal bivalves / I. E. Hendriks., L. A. Duren, P. M. J. Herman // J. of Sea Res. – 2014. – Ch. 2. – P. 30–46.
24. Waller T. R. Comparative descriptions of some oyster larvae from New Zealand and Chile, and a description of a new genus of oyster, Tiostrea, New Zealand / T. R. Waller // J. of Mar. and Freshwater Res. – 1980. – Vol. 14, № 2. – P. 103–120. Doi: 10.1080/00288330.1980.9515851
25. Muniz E. M. C. Cultura artificial de larvas de ostras / E. M. C. Muniz // In: Brasil, Ministério da Marinha.Manual de maricultura. Rio de Janeiro, Instituto Nacional de Estudos do Mar. – 1983. – P. 165–192.
26. Marin F. The formation and mineralization of mollusk shell / F. Marin, N. L. Roy, B. Marie // Front. Biosci. (Schol Ed). – 2012. – Vol. 4, № 3. – P. 1099–1125. doi: 10.2741/s321

GROWTH DYNAMICS AND DEVELOPMENT OF LARVAE OF THE GIANT OYSTER *MAGALLANA GIGAS* (THUNBERG, 1793) (BIVALVIA: OSTREIDAE) OF BLACK SEA ORIGIN

Pirkova A. V., Ladygina L. V., Ryabushko V. I., Shchurov S. V., Toichkin A. M.

Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
E-mail: avpirkova@mail.ru

The study is focused on growth dynamics and development of giant oyster *Magallana gigas* (Thunberg, 1793) larvae obtained in a nursery from Black Sea breeders. Special feed rations containing six algae species were elaborated for larvae of different development stages. The feed concentration for oyster larvae was calculated based on the total number of algae cells per volume of the container with larvae at the optimal stocking density. At the veliger stage, the feed consisted of microalgae: *Isochrysis galbana* + *Monochrysis luthery* at a concentration of 100 thousand cells·ml^{-1} (cell ratio 1:1). At the velikonchi stage, a mixture of microalgae was used as feed, with *Phaeodactylum tricornutum* being added, at a total concentration of 150 thousand cells·ml^{-1} in a cell ratio of 1:1:1. Starting from the velikonchi stage with an "eye", the green microalga *Chlorella vulgaris f. suboblonga* was included in the feed. At the pediveliger stage, the feed was supplemented with the microalgae *Tetraselmis suecica* and *Tetraselmis viridis* at a total concentration of 250000 cells·ml^{-1}.

The article describes morphometric characteristics of larvae at the following stages of development are described: D-stage, velikoncha, pediveliger, including changes in shell shape and apex position. Larvae at the D-stage (or prodissoconch I) were observed 24

hours after fertilization. At this stage of development, the shell length is greater than the height. A few days later, the larvae began to form a prodissoconch II shell with concentric growth lines. On the 6 th day of cultivation, the larval shell acquired a rounded shape, and the length-to-height ratio of the shell was approaching to one. Later, at the velikoncha stage, there appeared an umbo, which was more pronounced on the left valve. It should be noted that, in contrast to rather symmetrical shell of the D-stage larvae, the velikoncha shell is asymmetrical – the right valve is flatter and its height is less than the left one. From this stage on, both height and length fluctuated siginficantly, which can be explained by uneven growth of larvae in the late stages of development. The maximum dimensions (L×H) of larvae at the D-stage were: 77×63 μm; at the pediveliger stage – 336×378 μm. During ontogenesis, the length-to-height ratio of the larval shells changed from 1.16 to 0.87. Throughout the entire growing period, the indices of larvae size were different. The difference between the maximum and minimum values of the larval shell height ranged from 7 μm (age 2 days) to 200 μm (age 18 days). The growth patterns of oyster larvae during ontogenesis can be traced by analyzing the number and width of growth lines on the shell of prodissoconch II. This study presents SEM images of shells with concentric growth lines in fast- and slow-growing larvae aged 18 days. The comparison of the number of growth lines on the shells of prodissoconch II in fast-growing (height 185 μm) and slow-growing (height 122 μm) larvae of the same age revealed a discrepancy with the daily increments of slow-growing larvae. Apparently, it related to a higher frequency of valve closure and a temporary cessation of feeding, which caused growth retardation.

***Keywords*:** giant oyster, larvae, morphometric characteristics, aquaculture, Black Sea.

References

1. Harris J. Pacific oyster, *Crassostrea gig*as (Thunberg, 1793), *Aquatic Invas. Ecol.*, 1 (2008).
2. Ruesink J. L., Lenihan H., Ruesink J., Trimble A., Heiman K., Introduction of nonnative oysters: Ecosystem effects and restoration implications, *Annual Rev. Ecol. Evol. Sys,* **36**, 643 (2005). Doi: 10.1146/annurev.ecolsys.36.102003.15263
3. Helm M. M., Bourne N., Lovatelli A. *Hatchery culture of bivalves. A practical manual*. 177 p. (Rome: FAO, 2004).
4. Orlenko A. N. Giant oyster *Crassostrea gigas* (Bivalvia, Mytiliformes, Crassostreidae) as an object of acclimatization and the main stages of its transplantation to the Black Sea, *Zoological journal*, **73** (1), 51 (1994).
5. Orlenko A. N., Main results of works on acclimation and cultivation of the giant oyster *Crassostrea gigas* (Th.) in the Black Sea for the period of 1985–2004, *Fisheries of Ukraine. Special Issue*, **6**, 178 (2005).
6. Orlenko A. N., Vizhevsky V. I. Results of the formation of the Pacific oyster broodstock in the Black Sea and obtaining its spat in artificial conditions, *Proceedings of the Southern Research Institute of Marine Fisheries and Oceanography,* **41**. 136 (1995).
7. Pereladov M. V. Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) in the Black Sea., (Modern natural settlements and prospects for further expansion. *Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference "Marine Research and Education" (MARESEDU-2019)*, **II** (III), 343 (Tver: PoliPRESS, 2020).
8. Pirkova A. V., Ladygina L. V., Kholodov V. I. *Biological and biotechnical aspects of organization and functioning of the oyster hatchery in the Black Sea*, 120 p. (Sevastopol: FRC IBSS, 2020).
9. Popov M. A., Schurov S. V. Findings of spat of bivalve mollusc *Crassostrea gigas* (Thunberg, 1793) in Donuzlav Lake and Artillery Bay (Crimea, the Black Sea), *Marine Biological Journal,* **4**(4), 97 (2019).
10. Lisitskaya E. V., Shurov S. V. The first record of larval *Crassostrea gigas* (Thunberg 1793) (Bivalvia, Ostreidae) from the Black Sea, *Biology Bulletin*, **103** (5), 11 (2024).

11. Rakov A. V. Biological foundations of cultivating the Pacific oyster *Crassostrea gigas* (Thunberg) in Bay the Great Peter, (*Abstract of Cand. Sci. (Biol.). USSR Academy of Sciences*. Far Eastern Scientific Center. TINRO. Vladivostok. 1984). 24 p.
12. Gibbons M. C., Castagna M. Serotonin as an inducer of spawning in six bivalve Species, *Aquaculture,* **40,** 189 (1984).
13. Zakhvatkina K. A. *Larvae of bivalve mollusks – Bivalvia*, 250. (In: Vodyanitskyi V.A., Mordukhai-Boltovskoi F.D. (eds) *Key to the fauna of the Black and Azov Seas*. Kiev: Naukova Dumka, 1972)
14. Loosanoff V. L., Davis H. C., Chanley P. E. Dimensions and shapes of larvae of some marine bivalve mollusks, *Malac.* **4,** 351 (1966).
15. Alimov A. F., Lvova A. A., Makarova G. E., Soldatova I. N. Growth and age. Methods of studying bivalve mollusks, *Transactions of the Zoological Institute*, **219**, 121 (1990).
16. Waller T. R. Functional morphology and development of veliger larvae of the European oyster, *Ostrea edulis* Linné, *Smithsonian Contributions to Zoology*. **328,** 70 p. (1981). Doi: 10.5479/si.00810282.328
17. Kulikova V. A., Kolotukhina N. K. *Pelagic larvae of bivalve mollusks of the Sea of Japan, in* Methody, morphologia, identifikatsiya*,* 32 p. (Reprint № 21. Vladivostok: Dal'nevost. Otd., Acad. Nauk SSSR, 1989).
18. Chanley P., Dinamani P. Comparative descriptions of some oyster larvae from New Zealand and Chile, and a description of a new genus of oyster, Tiostrea, New Zealand, *J. of Mar. and Freshwater Res*., **14** (2), 103 (1980). Doi: 10.1080/00288330.1980.9515851
19. Christo S. W., Absher T. M. Crescimento da prodissoconcha de ostras do gênero *Crassostrea* Sacco, 1897 (Bivalvia, Ostreidae), *Boletim do Instituto de Pesca*, **34** (1), 71 (2008).
20. Kholodov V. I., Pirkova A. V., Ladygina L. V. *Cultivation of mussels and oysters in the Black Sea*, 508 p. (Voronezh, OOO Izdat-print, 2017).
21. Lannan J. E. Robinson A., Breese W. P., Broodstock management of *Crassostrea gigas*. II. Broodstock conditioning to maximize larval survival*, Aquaculture*, **21**(4), 337 (1980).
22. Beaumont A. Genetic considerations in transfers and introductions of scallops, *Aquacult. Inter*., **8**, 493 (2000).
23. Hendriks I. E., Duren L.A., Herman P.M.J., Identification of larvae of intertidal bivalves, *J. of Sea Res*., **2**, 30 (2014).
24. Waller T. R. Comparative descriptions of some oyster larvae from New Zealand and Chile, and a description of a new genus of oyster, Tiostrea, New Zealand, *J. of Mar. and Freshwater Res.* **14 (**2), 103 (1980). Doi: 10.1080/00288330.1980.9515851
25. Muniz E. M. C. Cultura artificial de larvas de ostras, *Brasil, Ministério da Marinha. Manual de maricultura. Rio de Janeiro, Instituto Nacional de Estudos do Mar*, 165 (1983).
26. Marin F., Roy N. L., Marie B. The formation and mineralization of mollusk shell, *Front. Biosci.* (Schol Ed), **4 (**3), 1099 (2012). doi: 10.2741/s321

Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского
Биология. Химия. Том 12 (78). 2026. № 2. С. 214–226.

УДК 612.621.31-055.2:796.015.6
DOI 10.5281/ZENODO.20793778

ВОЗРАСТНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РЕГУЛЯТОРНОГО И КАРДИОГЕМОДИНАМИЧЕСКОГО МЕХАНИЗМОВ АДАПТАЦИИ У ВЫСОКОКВАЛИФИЦИРОВАННЫХ СПОРТСМЕНОВ ПРИ РАЗНОЙ СПЕЦИФИКЕ ФИЗИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Погодина С. В., Саядян В. Е.

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», Симферополь, Республика Крым, Российская Федерация
E-mail: sveta_pogodina@mail.ru

Установлены особенности регуляторных и кардиогемодинамических реакций у высококвалифицированных спортсменов при разной специфике физических нагрузок в юношеском, первом и втором зрелом возрасте. Применялся анализ вариабельности сердечного ритма и реоплетизмография. В результате у спортсменов возрастного периода второй зрелости установлено снижение вариабельности в ритме сердца и отмечены неблагоприятные кардиогемодинамические адаптационные реакции. При специфике силовых нагрузок отмечена избыточность гиперкинетических кардиогемодинамических реакций на высокоинтенсивную работу. При специфике нагрузок на выносливость отмечается отсутствие сосудистого и кардиального ответов на высокоинтенсивную работу. Выявленные регуляторные и кардиогемодинамические возрастные предикаты дизадаптации требуют текущего контроля функционального состояния сердечно-сосудистой системы.
Ключевые слова: возраст, адаптация к специфическим физическим нагрузкам, высококвалифицированные спортсмены, регуляция сердечного ритма, кардиогемодинамика.

ВВЕДЕНИЕ

Приспособительные возможности и здоровье спортсменов высокого класса является активно обсуждаемым прикладным аспектом спортивной физиологии [1]. При этом наибольший интерес представляют механизмы поддержания высокого уровня функциональных резервов организма на протяжение длительного времени занятий спортом. Ведь для современного олимпийского и профессиональном спорта характерна тенденция «постарения» спортсменов [2]. Отмечается высокая продолжительность этапа сохранения высоких спортивных достижений на протяжении нескольких олимпийских циклов (двух, трех, четырех и даже пяти олимпийских циклов). На спортивной арене одновременно с молодыми атлетами, успешно выступают спортсмены, возраст которых попадает в границы второго периода зрелости, а также нередки случаи выступления спортсменов старше пятидесяти лет [3]. С позиций возрастной физиологии адаптация к физическим нагрузкам в таких поздних возрастных периодах должна проходить с напряжением

в связи с падением функциональных резервов организма [4]. Возникает ряд актуальных вопросов: какими физиологическими механизмами, с перенапряжением или компенсацией, в данном случае поддерживается высокий уровень работоспособности у «возрастных» спортсменов; насколько безопасна во втором зрелом возрасте разная специфика физических нагрузок; какова степень влияния возрастных и тренирующих факторов на приспособительные механизмы основных систем организма.

Одной из важнейших основных систем, ответственной за адаптацию к физическим нагрузкам является сердечно-сосудистая система (ССС). Изучению ее регуляторного и кардиогемодинамического механизмов адаптации у спортсменов, представителей разных видов спорта посвящено большое количество научных трудов. Это подтверждает актуальность изучения проблемы сохранения резервов ССС при разной специфике физических нагрузок [5]. Наиболее часто применяемым методологическим подходом к исследованию резервов ССС является их изучение в векторе возрастного развития спортсменов и повышения их спортивной квалификации, то есть от начала адаптации и до ее устойчивой стадии формирования адаптационных резервов [6]. Тогда, как в аспекте кумулятивной (чрезмерно длительной) адаптации, исследования механизмов, поддерживающих физиологических резервы ССС на высоком уровне заслуживают пристального внимания [7]. Ведь спортсмены в связи с «постарением» при чрезмерно продолжительных занятиях спортом попадают в возрастную зону риска снижения функционального состояния [8]. Также для установления причин, обусловливающих снижение функционального состояния у возрастных спортсменов необходим сравнительный анализ приспособительных возможностей нетренированных сверстников. Это поможет получить информацию о тех функциях организма, которые в периоде второй зрелости не чувствительны к физическим воздействиям и при занятиях спортом требуют квалифицированной поддержки [9].

Цель работы – установление возрастных особенностей регуляторного и кардиогемодинамического механизмов адаптации у высококвалифицированных спортсменов, имеющих разную специфику физических нагрузок, а также их сравнение с нетренированными сверстниками.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования предполагали участие трех возрастных групп высококвалифицированных спортсменов добровольцев мужского пола, занимающихся видами спорта с направленностью физических нагрузок на выносливость (стайерские дистанции в велоспорте, плавании, беговом виде легкой атлетики) и на силу (гиревой спорт). Для сравнительного анализа исследование предусматривало участие относительно здоровых нетренированных мужчин аналогичных возрастных групп. Спортсмены и нетренированные мужчины представлены в следующих возрастных группах: первая возрастная группа – 17–18 лет (юношеский возраст); вторая возрастная группа – 22–26 лет (первый период зрелого возраста); третья возрастная группа – 40–46 лет (второй период зрелого возраста), всего 180 человек. Для изучения статистических параметров

регуляции ритма сердца использовали технологию вариационной пульсометрии Баевского Р. М. [4]. В периодичном ряду пятиминутного фрагмента электрокардиограммы определяли величины параметров частоты сердечных сокращений (ЧСС, уд/мин); стандартного отклонения средних значений NN интервалов (SDANN), моды (Мо), амплитуды моды (АМо) и индекса напряжения регуляторных систем (ИН). В волновой структуре ритма сердца определяли соотношение (%) волн с высокочастотными (HF), низкочастотными (LF) и колебаниями очень низкой частоты (VLF). По отношению средних значений LF и HF определяли коэффициент вагосимпатического взаимодействия (LF/HF, %). Величины кардиогемодинамических параметров регистрировали на реоплетизмографе ReoCom Standart. В частности, изучали ЧСС (уд/мин), ударный объём крови (УОК, мл), минутный объём крови (МОК, л/мин), работоспособность левого желудочка (РЛЖ, кгм), систолическое (АДС, мм рт.ст.) и диастолическое (АДД, мм рт.ст.) артериальное давление. Представленные выше показатели изучались в фоновом состоянии покоя и в условиях велоэргометрического теста ступенчато-повышающейся мощности. Продолжительность работы на каждой ступени пять минут [5, 10]. Мощность работы на первой ступени нагрузки составляла 50–80 Вт (скорость педалирования 60 об/мин). На последней ступени мощность доводили до 150–220 Вт. Далее, на последних 30 секундах педалирования регистрировали изучаемые параметры.

Результаты исследований проанализированы параметрическими методами математической статистики поэтапно. На первом этапе проведена проверка соответствия данных нормальному распределению по критерию Шапиро-Уилка. На втором этапе проводили вычисление среднего значения и ошибки среднего значения цифровых величин физиологических параметров. На третьем этапе вычисляли статистическую значимость между различиями выборок по t-критерию Стьюдента при $p<0,05$. На завершающем этапе статистического анализа применялся корреляционный анализ для выявления статистически значимых взаимосвязей между исследуемыми показателями с помощью коэффициента корреляции (r) Пирсона. Подтверждение его статистической значимости считалось при $p<0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Системы регуляции являются самыми динамическими системами организма и могут отражать, как общее его состояние, так и состояние отдельных систем и органов. Регуляция сердечного ритма, а именно, его периодичность определяет диапазон адаптации и является информативным критерием функциональных возможностей и резервов организма. Поэтому технология вариабельности сердечного ритма (ВСР) является одной из самых востребованных в отношении оценки адаптационных резервов ССС у спортсменов. Сравнительный анализ ВСР у спортсменов позволил установить в исходном состоянии покоя наибольшую вариабельность ритма сердца во второй возрастной группе, что можно связать с наиболее высоким уровнем их тренированности в возрасте 22–26 лет [11]. Величины SDANN в этой возрастной группе достигают у представителей гиревого спорта и видов спорта на выносливость соответственно 137,7±31,67 и

143,0±79,13 мс, p<0,01. При этом у представителей гиревого спорта определено сравнительно высокое значение ИН 74,3±31,0 (p<0,001), что говорит о большем напряжении вегетативной нервной регуляции ССС. Сравнительно низкая вариабельность ритма сердца установлена в третьей возрастной группе спортсменов. Так, величины SDANN у 40-46 летних представителей видов спорта на выносливость и гиревого спорта находились в пределах значений соответственно 50,0±10,61 и 73,5±15,31 мс, p<0,01. При этом, в данной возрастной группе спортсменов, тренирующих выносливость снижение вариабельности сопровождалось достоверным повышением ИН до 131,0±52,03, (p<0,001), а тренирующих силу с достоверным снижением мощности HF волн до 532,24±166,55 мс^2, p<0,05.

Величина показателя LF/HF, характеризующего вагосимпатический баланс, была наименьшей во второй возрастной группе у всех спортсменов, а наибольшей в третьей возрастной группе. Установленный факт указывал на преобладание симпатических влияний в регуляции сердечного ритма у спортсменов третьей возрастной группы и подтверждался сравнительным (относительно других возрастных групп) преобладанием доли LF волн в общую мощность частоты сердечных колебаний у тренирующих выносливость до 51,4±10,41 %, (p<0,05), а у тренирующих силу до 57,6±9,39 %, p<0,05). Во всех возрастных группах нетренированных мужчин определена сравнительно низкая вариабельность ритма сердца относительно спортсменов. Показатель SDANN у нетренированных мужчин равен 35,3±1,95 %, p<0,01. При этом у нетренированных мужчин можно увидеть увеличение показателя LF/HF уже в первом зрелом возрасте, что говорит об увеличении симпатической активности в регуляции сердечного ритма к 22–26 годам.

Условия высокоинтенсивной физической нагрузки являются критерием, наиболее объективно определяющим диапазон адаптационных возможностей ССС. При выполнении спортсменами высокоинтенсивной работы на последней ступени нагрузочного теста установлено повышение вариабельности сердечного ритма только в первой возрастной группе, а именно, у юношей, тренирующих выносливость (увеличение SDANN на 176 %). Выявленный факт, очевидно, связан с высокой реактивностью парасимпатической нервной системы, регуляторные влияния которой возрастают при тренировках на выносливость [6]. Также известно, что регуляторные влияния парасимпатической нервной системы на сердечный ритм значительно усиливаются в юношеском возрасте [5]. Вероятно, сочетанное воздействие регуляторных и тренирующих факторов в этом возрасте обеспечивает наибольший диапазон адаптационных возможностей ССС.

У представителей первой возрастной группы, занимающихся гиревым спортом и нетренированных лиц изменения ВСР при нагрузочном тестировании не выявлено. Также не выявлено сдвигов ВСР при нагрузочном тесте во второй и третьей возрастной группах спортсменов, тренирующих выносливость. Однако, это может говорить об устойчивом влиянии вегетативного контура регуляции на миокард в связи с кумулятивной адаптацией. В свою очередь, у спортсменов второй и третьей возрастных групп, тренирующих силу установлено снижение ВСР после

нагрузки (снижение SDANN соответственно на 54 и 19 %). С одной стороны, это может говорить о сравнительно низком диапазоне адаптации в условиях нагрузки, а с другой о высокой степени инерционности регуляторных процессов внутриорганного регулирования сердечной мышцы, основанном на механизме Франка-Старлинга [12].

С возрастом значимость процессов внутриорганного регулирования ССС усиливается. Их эффективность, определяемая хроно- и инотропными эффектами миокарда, которые указывают на степень устойчивости аппарата кардиогемодинамики к воздействию изменчивых факторов внешней и внутренней среды. В условиях применения высокоинтенсивной физической нагрузки выраженный хронотропный эффект (повышение вклада ЧСС до 173 % в прирост МОК) установлен в первой и второй возрастных группах у спортсменов, тренирующих силу и нетренированных лиц (рис. 1). При этом у нетренированных мужчин отсутствовала хроноинотропная зависимость. В свою очередь, у спортсменов первой, второй и третьей возрастной групп, тренирующих выносливость установлены положительные инотропные эффекты, выраженные в повышении доли УО в прирост МОК до 32–38 %. Также положительный инотропный эффект установлен в третьей возрастной группе нетренированных мужчин, но при сравнительно малой мощности работы, при которой прирост МОК составил 47 %. Выявленные особенности говорят о большей выраженности хронотропных эффектов у спортсменов, тренирующих силу и инотропных эффектов у спортсменов, тренирующих выносливость. У нетренированных мужчин первой и второй возрастной групп также в большей степени проявлена хроноторопная зависимость прироста МОК. В третьей возрастной группе нетренированных мужчин отмечен инотропный эффект в условиях относительно низкой мощности работы.

При изучении возрастных особенностей кардиогемодинамического механизма адаптации ССС большой интерес представляет анализ эффективности и экономичности работы левого желудочка миокарда. В первой возрастной группе спортсменов наибольшая работа, затрачиваемая левым желудочком при увеличении МОК отмечена у представителей гиревого спорта (рис. 2). Во второй возрастной группе спортсменов сравнительно высокая степень экономизации энергетических трат при расширении функциональных резервов миокарда определена у представителей видов спорта на выносливость. Тогда как у нетренированных мужчин данной возрастной группы отмечено увеличение энергетических трат при работе левого желудочка (увеличение РЛЖ до 87 %). В третьей возрастной группе спортсменов, тренирующих выносливость определено минимальное повышение РЛЖ и МОК на последней ступени физической работы. В этой же возрастной группе спортсменов тренирующих силу показано, что РЛЖ увеличивается в 5 раз меньше (всего на 21 %) чем МОК, что может свидетельствовать о низкой степени удовлетворения метаболического запроса. У нетренированных мужчин третьей возрастной группы определено значительное увеличение МОК, которое сопровождается снижением РЛЖ на 9 %. Этот факт можно рассматривать, как неадекватную кардиогемодинамическую реакцию, связанную с утомлением [5].

Важнейшим критерием адекватности кардиогемодинамического механизма адаптации к условиям физических нагрузок являются реакции артериального давления. С позиций экономизации функций кардиогемодинамики в данных условиях наиболее благоприятной реакцией является гиперкинетический тип кровообращения, связанный с умеренным повышением АДС и АДД.



Рис. 1. Возрастные особенности долевого вклада ЧСС и УОК в приросте МОК у высококвалифицированных спортсменов и нетренированных мужчин в условиях работы в анаэробно-аэробном режиме.
Примечание: 1 – спортсмены, тренирующие выносливость, 2 – спортсмены, тренирующие силу, 3 – нетренированные мужчины.

У спортсменов и нетренированных мужчин второй возрастной группы также определена гиперкинетическая реакция. Однако у спортсменов, тренирующих силу, а также у нетренированных лиц АДС повысилось соответственно до 162,0±2,83 и 162,0±2,83 мм рт. ст., $p<0,05$. Тогда, как у спортсменов тренирующих выносливость данный показатель увеличился до значений 145,5±2,71, $p<0,05$, то есть был значимо ниже. В свою очередь у нетренированных мужчин данной возрастной группы в сравнении со спортсменами определен наиболее высокий показатель АДД равный 97,3±1,89, $p<0,05$. В третьей возрастной группе у спортсменов, тренирующих выносливость показано отсутствие реакции АД на нагрузку (АДС в покое

120,7±3,75 и во время нагрузки 131,8±6,54 мм. рт. ст., p>0,05, АДД в покое 77,3±2,73 и во время нагрузки 85,5±3,32 мм. рт. ст., p>0,05). У спортсменов данной возрастной группы, тренирующих силу, отмечена избыточная гиперкинетическая реакция АД (АДС 172,32±7,76, p<0,05, АДД 106,23±4,87, p<0,05). В третьей возрастной группе нетренированных лиц отмечено повышение АДС до 178,9±8,45 мм. рт. ст., p<0,01 и снижение АДД до 59,8±4,03 мм. рт. ст., p<0,01.

Эффективность адаптации и функциональные возможности ССС определяются не только состоянием систем регуляции и кардиогемодинамики, но и качеством их взаимодействия. В этой связи установление возрастных особенностей адаптации ССС спортсменов к условиям тренирующих воздействий может быть более объективным при изучении специфики функциональной организации регуляторного и кардиогемодинамического звеньев ССС [10]. Корреляционный анализ показателей кардиогемодинамики и вегетативной регуляции ритма сердца позволил раскрыть степени их взаимосвязи при формировании высокого уровня функционального состояния ССС спортсменов в разных возрастных периодах.

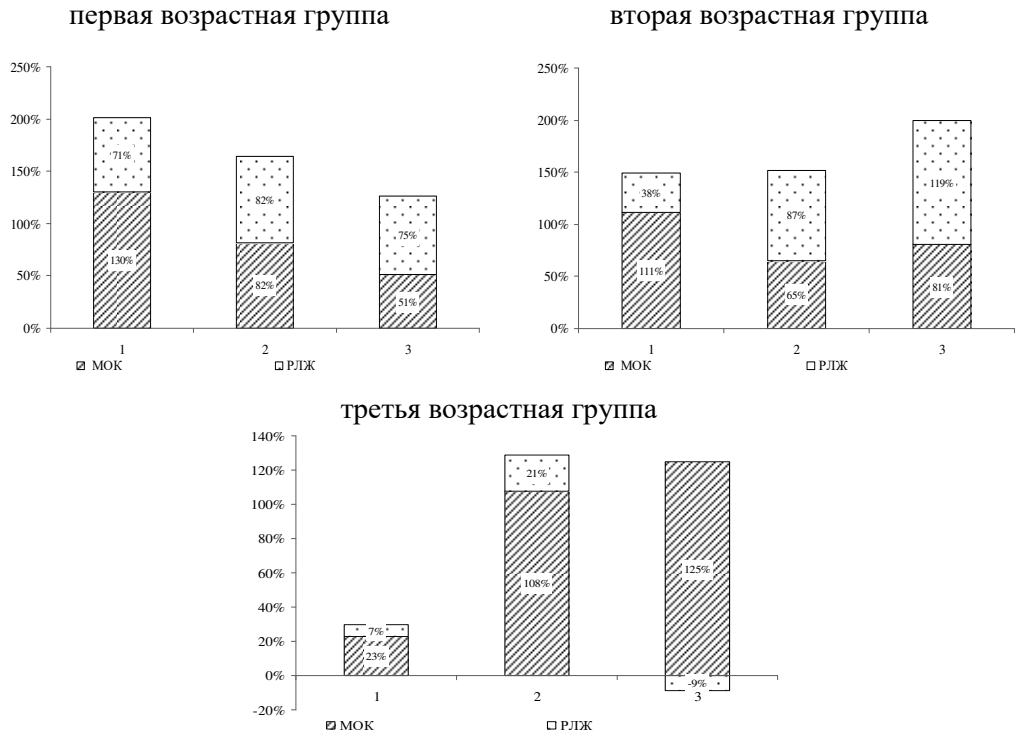


Рис. 2. Возрастные особенности прироста МОК и РЛЖ у высококвалифицированных спортсменов и нетренированных мужчин в условиях работы в анаэробно-аэробном режиме.

Примечание: 1 – спортсмены, тренирующие выносливость, 2 – спортсмены, тренирующие силу, 3 – нетренированные мужчины.

В результате проведенного анализа было обращено внимание на дифференциацию двух преимущественных вариантов взаимосвязей – внутрисистемного и межсистемного (табл. 1). В первой возрастной группе спортсменов, тренирующих выносливость установлен межсистемный вариант организации функций ССС. При данном варианте установлена важная значимая реципрокная взаимосвязь между АДС и VLF (r=-0,64). У спортсменов, тренирующих силу, преимущественно выражен внутрисистемный вариант взаимодействия в системе кардиогемодинамики. При этом практически все показатели кардиогемодинамики имеют реципрокный характер взаимосвязи с показателями, характеризующими уровень парасимпатической активности. То есть условия для увеличения сократительной способности миокарда и интенсивности кровообращения могут быть оптимальными при снижении парасимпатических влияний. У нетренированных сверстников отмечен внутрисистемный вариант взаимодействия в системе кардогемодинамики.

Во второй возрастной группе у спортсменов, тренирующих выносливость, установлен межсистемный вариант взаимодействия при незначительном количестве межсистемных взаимосвязей. Это говорит о снижении активности систем в поддержании функций ССС, очевидно по причине повышения ее функционального уровня. Определены положительные статистически значимые взаимосвязи между параметрами УОК, МОК и показателем SDANN (соответственно r=0,91, 0,88) и HF % (соответственно r=0,79, 0,8), что говорит о благоприятном влиянии парасимпатической регуляции на повышение сократительной способности миокарда. У спортсменов данной возрастной группы, тренирующих силу, установлено отсутствие показателей регуляции ритма сердца в структуре функциональных взаимодействий с показателями кардиогемодинамики. В тоже время наблюдается усиление внутрисистемных взаимосвязей в системе кардиогемодинамики. Отмеченная тенденция свидетельствует о повышении внутрисердечных механизмов адаптации ССС и согласуется с данными литературы [5]. У нетренированных мужчин второй возрастной группы также имеет место наличие внутрисистемных вариантов взаимосвязей.

В третьей возрастной группе спортсменов, тренирующих выносливость, установлен вариант внутрисистемных взаимодействий. При этом в большей степени выражены внутрисистемные взаимосвязи в системе кардиогемодинамики. В группе спортсменов, тренирующих силу, установлен межсистемный вариант взаимодействия. Статистически значимые взаимосвязи установлены между кардиогемодинамическими параметрами АДД, МОК, РЛЖ с показателем LF % (соответственно r=-0,64; r=0,92; r=-0,90). Таким образом, кардиогемодинамическое обеспечение осуществляется при выраженном участии симпатических влияний.

В группе нетренированных лиц второго зрелого возраста выявлены межсистемные взаимосвязи в парах ЧСС и VLF (r=0,85), УОК и Мо (r=-0,68), МОК и Мо (r=-0,68), РЛЖ и Мо (r=-0,76). Данные взаимосвязи говорят об усилении зависимости кардиогемодинамических параметров от величины Мо, которая характеризует степень напряжения регуляторных механизмов. При этом взаимосвязь в паре ЧСС и VLF является свидетельством усиления с возрастом

влияния высших вегетативных центров на синусовый узел, что значительно повышает степень напряжения в системе регуляции.

Для глубокого раскрытия механизмов организации функций ССС в условиях адаптации к физическим нагрузкам, и в частности, возрастных особенностей взаимосодействия системных компонентов нами были проанализированы значения суммы статистически значимых коэффициентов корреляции (СК), отражающие силу взаимодействия и характеризующие активность систем в поддержании гомеостатического равновесия (табл. 1). Установлено, что в первой возрастной группе СК у спортсменов, тренирующих выносливость сравнительно выше (39,2 в противовес 18,30). А у нетренированных юношей СК сравнительно выше, чем у спортсменов сверстников.

Таблица 1.

Возрастая дифференциация вариантов межсистемного (М), внутрисистемного (В) взаимодействия регуляторных и кардиогемодинамических показателей в исследуемых группах

Испытуемые с разной направленностью физических нагрузок	Вариант взаимодействия	СК
Первая возрастная группа		
тренирующие выносливость	М	39,2
тренирующие силу	В	18,90
нетренированные	В	44,60
Вторая возрастная группа		
тренирующие выносливость	М	18,88
тренирующие силу	В	11,81
нетренированные	В	18,50
Третья возрастная группа		
тренирующие выносливость	В	19,61
тренирующие силу	М	27,23
нетренированные	М	32,07

Во второй возрастной группе величина СК имеет сравнительно минимальные возрастные значения (у спортсменов, тренирующих выносливость 18,88; у спортсменов, тренирующих силу 11,81; у нетренированных мужчин 18,50). Очевидно, что таким образом в данной возрастной группе выражается экономизирующий эффект адаптации, который проявляется в снижении системных взаимосвязей и увеличении их степеней свободы. При этом у спортсменов, тренирующих силу и в группе «нетренированных» сверстников отмечается внутрисистемный вариант взаимодействия элементов в системе гемодинамики, что указывает на преобладание ее роли в регуляции гемодинамических реакций ССС.

В третьей возрастной группе показатель СК сравнительно выше у спортсменов, тренирующих силу. То есть в данной группе количество регуляторных и

кардиогемодинамических взаимодействий в поддержании функций ССС больше, что может быть обусловлено сравнительно высокой активностью компенсаторных процессов, участвующих в стабилизации функционального состояния ССС. Максимальные значения СК в группе нетренированных лиц при межсистемном варианте говорят об увеличении нагрузки на регуляцию кардиогемодинамики, что соответствует общей закономерности, связанной с увеличением жесткости системы при ее функциональном напряжении.

Таким образом, предложенный методологический подход, связанный с изучением адаптационных возможностей ССС высококвалифицированных спортсменов в векторе инволютивно-возрастных изменений позволил раскрыть приспособительные механизмы стабилизации высокого уровня функционального состояния при разной специфике физических нагрузок в течение длительного времени занятий спортом. Известно, что адаптация к физическим нагрузкам в спорте формирует в организме спортсменов системно-структурный след, связанный с перестройкой структуры и функций основных систем и органов. Главным результатом системного структурного следа адаптации являются физиологические резервы адекватные требованиям адаптации. Однако при возникающем противоречии между закономерностями возрастного развития и адаптации, то есть когда уровень функциональной готовности спортсменов не соответствует запросу адаптации, необходимы дополнения к имеющемуся объему знаний аспекта адаптации в спорте. По нашему мнению, такими важными дополнениями могут явиться знания, касающиеся компенсаторно-приспособительных особенностей, и в частности, в регуляторном и кардиогемодинамическом механизмах адаптации ССС к физическим нагрузкам по мере перехода спортсменов высокого класса от ранних к более поздним этапам возрастного развития.

Также полезным и необходимым дополнением будут и результаты научных исследований, в которых проведено сравнение исследуемых компенсаторно-приспособительных механизмов высококвалифицированных спортсменов с нетренированными лицами по мере перехода из ранних возрастных периодов в поздние. В наших исследованиях это дало возможность понимания в чем заключается разница, а в чем подобие адаптационных реакций ССС у данных категорий лиц. Ведь дискуссии об уровне функционального состояния и здоровья профессиональных спортсменов не утихают [7]. Вопрос – может ли больной стареющий спортсмен «бить» мировые и олимпийские рекорды, остается открытым. Поэтому имеются фактические основания говорить о том, что функциональные возможности спортсменов высокого класса находятся на ином, высочайшем уровне, и практически не подвластны возрасту и недостижимы для обычного человека. Причем, имеющие у возрастных спортсменов высокого класса серьезные нарушения функций основных систем зачастую рассматриваются с позиций нормы адаптации организма к длительным по времени и большим по величине нагрузкам. Однако наши исследования конкретизируют те возрастные изменения в регуляторном и кардиогемодинамическом механизмах адаптации ССС спортсменов, которые аналогичны, по сути, с изменениями у нетренированных лиц. И эти изменения связаны, прежде всего, со снижением физиологических резервов на уровне регуляции

сердечного ритма. Да, конечно, уровень физиологических параметров и резервов ССС у спортсменов высокого класса значительно выше, чем у нетренированных сверстников, однако тенденция к возрастному снижению резервов адаптации очевидна. Выявленная тенденция связана с выраженным изменением адаптивного реагирования ССС на высокоинтенсивную физическую работу во втором зрелом возрасте. Именно сдвиг в реагировании ССС на физическую нагрузку и определяет возрастное снижение адаптационных возможностей спортсменов высокого класса. Причем данный сдвиг проявляется не только на уровне физиологических функций (вегетативного нервного регулирования и кардиогемодинамики), но и на функциональном системном уровне, меняя тем самым системную организацию функций ССС. Аналогичные спортсменам возрастные физиологические и системные сдвиги характерны и для нетренированных лиц. Это позволяет утвердительно говорить о зависимости функционального состояния ССС спортсменов от фактора возраста. В свою очередь фактор специфики физических нагрузок определяет для спортсменов направление адаптационных реакций ССС, в котором должны отслеживаться адаптационные риски в наиболее поздних периодах онтогенеза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С возрастом, у высококвалифицированных спортсменов снижается вариабельность сердечного ритма, повышается вагосимпатический индекс и степень инерционности внутриорганного регулирования сердечной мышцы. Особенно это проявляется в условиях высокоинтенсивной физической работы, где отмечаются неблагоприятные адаптационные реакции ССС. Аналогичные возрастные сдвиги, характерны и для нетренированных мужчин при сравнительно низких функциональных возможностях ССС относительно спортсменов. Вступление спортсменов и нетренированных лиц в период второй зрелости сопровождается переходом с устоявшегося варианта организации ССС на иной алгоритм взаимодействия, что говорит о возрастных перестройках регуляторного и кардиогемодинамического механизмов адаптации. При специфике нагрузок силовой направленности в периоде второй зрелости определяется избыточность гиперкинетических кардиогемодинамических реакций на высокоинтенсивную работу. В свою очередь, при специфике нагрузок на выносливость отмечается отсутствие сосудистого и кардиального ответов на высокоинтенсивную работу. Выявленные у высококвалифицированных спортсменов регуляторные и кардиогемодинамические возрастные предикаты дизадаптации требуют текущего контроля функционального состояния сердечно-сосудистой системы.

Список литературы

1. Коган О. С. Факторы профессиональной спортивной деятельности, негативно влияющие на здоровье высококлассных спортсменов / О. С. Коган, С. Д. Галиуллина // Пульс. – 2017. – Т. 19, № 5. – С. 153–158.
2. Горегляд И. А. Влияние профессионального спорта на организм человека / И. А. Горегляд // Инновации. Наука. Образование. – 2021. – № 34. – С. 3137–3139.

3. Соколова А. Ю. Влияние профессионального спорта на здоровье спортсмена / А. Ю. Соколова // Шаг в науку. – 2020. – С. 625–628.
4. Исаева О. Н. К физиологическому обоснованию системы донозологического индивидуального контроля / О. Н. Исаева, А. Г. Черникова, Р. Н. Баевский // Вестник Российского университета дружбы народов: Серия Медицина. – 2014. – № 1. – С. 5–10.
5. Белоцерковский З. Б. Сердечная деятельность и функциональная подготовленность у спортсменов (норма и атипичные изменения в нормальных и измененных условиях адаптации к физическим нагрузкам) / З. Б. Белоцерковский, Б. Г. Любина. – Санкт-Петербург: Лань, 2021. – 548 с.
6. Иванова Н. В. Оценка функционального состояния кардиореспираторной системы спортсменов с различной спецификой мышечной деятельности в соревновательном периоде подготовки / Н. В. Иванова // Вестник спортивной науки. – 2011. – № 1. – С. 64–68.
7. Гордиенко В. И. Влияние профессионального спорта и здоровье спортсменов / В. И. Гордиенко, А. И. Осинин // Научные высказывания. – 2025. – № 2 (70). – С. 48–50.
8. Байгозина В. Д. Профессиональный спорт: польза или вред? / В. Д. Байгозина // Трибуна ученого. – 2022. – № 10. – С. 5–7.
9. Викулов А. Д. Вариабельность сердечного ритма у лиц с повышенным режимом двигательной активности и спортсменов / А. Д. Викулов, А. Д. Немиров, Е. Л. Ларионова, А. Ю. Шевченко // Физиология человека. – 2005. – Т. 31, № 6. – С. 54–59.
10. Похачевский А. Л. Оценка функционального состояния по кардиоритмограмме при велоэргометрии / А. Л. Похачевский // Физиология человека. – 2007. – Т. 33, № 6. – С. 117–119.
11. Мельников А. А. Автономная регуляция сердечной деятельности во время арифметического счета у спортсменов / А. А. Мельников // Журнал медико-биологических исследований. – 2019. – Т. 7, № 2. – С. 205–215.
12. Смирнова А. Д. Риск внезапной сердечной смерти занимающихся силовыми нагрузками / А. Д. Смирнова, А. В. Новицкий, А. С. Шмойлова, Ю. Г. Шварц // Российский кардиологический журнал. – 2021. – Т. 26, № 45. – С. 59–64.

AGE-RELATED CHARACTERISTICS OF REGULATORY AND CARDIOHEMODYNAMIC FDAPTATION MECHANISMS IN HIGHLY TRAINED ATHLETES UNDERGOING DIFFERENT TYPES OF PHYSICAL ACTIVITY

Pogodina S. V., Sayadyan V. E.

V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Crimea, Russian Federation
E-mail: sveta_pogodina@mail.ru

The article reveals the features of regulatory and cardiohemodynamic responses in highly qualified athletes under different loads in adolescence, early adulthood and late adulthood. Three age groups of highly qualified male volunteer athletes engaged in sports focused on endurance (long-distance cycling, swimming, and track and field) and strength (kettlebell lifting) were examined. For comparative analysis, untrained male peers, relatively healthy volunteers, were examined. Athletes and untrained men were represented in the following age groups: the first age group – 17–18 years old (adolescence); the second age group – 22–26 years old (early adulthood); the third age group – 40–46 years old (second adulthood), a total of 180 people. Heart rate variability

analysis, rheoplethysmography, a step-increasing power bicycle exercise test, and mathematical statistics were used.

It was found that with age, athletes experience a decrease in variability, an increase in the vagosympathetic index, and an increase in the degree of inertia of the cardiac muscle's internal organ regulation. The adaptive responses of the cardiovascular system become less favorable, which is especially evident under high-intensity physical work. Similar age-related shifts are also characteristic of untrained men, who have comparatively low cardiovascular functional capacity compared to athletes. The entry of athletes and untrained individuals into the second maturity period is accompanied by a transition from the established cardiovascular system to a different interaction algorithm, indicating restructuring of the regulatory and cardiohemodynamic adaptation mechanisms.

Strength athletes typically exhibit hyperkinetic, excessive cardiohemodynamic responses to high-intensity exercise, and the older the athlete, the more pronounced this is, requiring monitoring of myocardial function. Endurance athletes do not exhibit excessive cardiohemodynamic responses. With age, a lack of vascular and cardiac responses to exercise is observed, which is also unfavorable and requires monitoring of the regulatory mechanism of adaptation.

***Keywords*:** age, adaptation to specific physical activity, highly skilled athletes, heart rate regulation, cardiohemodynamics.

References

1. Kogan O. S. and Galiullina S. D., Faktory professional'noj sportivnoj dejatel'nosti, negativno vlijajushhie na zdorov'e vysokoklassnykh sportsmenov, *Pul's*, **19** (5), 153 (2017).
2. Goregljad I. A., Vlijanie professional'nogo sporta na organizm cheloveka, *Innovacii. Nauka. Obrazovanie*, **34**, 3137 (2021).
3. Sokolova A. Ju., Vlijanie professional'nogo sporta na zdorov'e sportsmena, *Shag v nauku*, 625 (2020).
4. Isaeva O. N., Chernikova A. G. and Baevskij R. N., K fiziologicheskomu obosnovaniju sistemy donozologicheskogo individual'nogo kontrolja, *Vestnik Rossijskogo universiteta druzhby narodov: Serija Medicina*, **1**, 5 (2014).
5. Belocerkovskij Z. B. and Ljubina B. G., *Serdechnaja dejatel'nost' i funkcional'naja podgotovlennost' u sportsmenov (norma i atipichnye izmenenija v normal'nyh i izmenennyh uslovijah adaptacii k fizicheskim nagruzkam)*, 548 p. (Lan', Sankt-Peterburg, 2021).
6. Ivanova N. V., Ocenka funkcional'nogo sostojanija kardiorespiratornoj sistemy sportsmenov s razlichnoj specifikoj myshechnoj dejatel'nosti v sorevnovatel'nom periode podgotovki, *Vestnik sportivnoj nauki*, **1**, 64 (2011).
7. Gordienko V. I. and Osinin A. I., Vlijanie professional'nogo sporta i zdorov'e sportsmenov, *Nauchnye vyskazyvanija*, **2** (70), 48 (2025).
8. Bajgozina V. D., Professional'nyj sport: pol'za ili vred?, *Tribuna uchenogo*, **10**, 5 (2022).
9. Vikulov A. D., Nemirov A. D., Larionova E. L. and Shevchenko A. Ju., Variabel'nost' serdechnogo ritma u lic s povyshennym rezhimom dvigatel'noj aktivnosti i sportsmenov, *Fiziologija cheloveka*, **31** (6), 54 (2005).
10. Pohachevskij A. L., Ocenka funkcional'nogo sostojanija po kardioritmogramme pri velojergometrii, *Fiziologija cheloveka*, **33** (6), 117 (2007).
11. Mel'nikov A. A., Avtonomnaja reguljacija serdechnoj dejatel'nosti vo vremja arifmeticheskogo schjota u sportsmenov, *Zhurnal mediko-biologicheskih issledovanij*, **7** (2), 205 (2019).
12. Smirnova A. D., Novickij A. V., Shmojlova A. S. and Shvarc Ju. G., Risk vnezapnoj serdechnoj smerti zanimajushhihsja silovymi nagruzkami, *Rossijskij kardiologicheskij zhurnal*, **26** (45), 59 (2021).

Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского
Биология. Химия. Том 12 (78). 2026. № 2. С. 227–251.

УДК 582. 33/34
DOI 10.5281/ZENODO.20794576

БРИОФЛОРА ДЕЙСТВУЮЩИХ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ ОХРАНЯЕМЫХ ТЕРРИТОРИЙ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО ПРИЦНИНСКОГО ЛАНДШАФТНОГО РАЙОНА ТИПИЧНОЙ ЛЕСОСТЕПИ (ТАМБОВСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Попова Н. Н.

ФГБОУ ВО «Воронежская государственная академия спорта», Воронеж, Россия
E-mail: leskea@vmail.ru

В статье представлены материалы по бриофлоре действующих и перспективных охраняемых территорий Северо-Восточного Прицнинского ландшафтного района, расположенного к западу от долины р. Цны в Тамбовской области. Изучены все действующие ООПТ (1 комплексный заказник и 17 памятников природы), рекомендованы к охране 10 объектов. В составе бриофлоры выявлено 117 видов, из них 11 видов занесены в основной и 8 – в мониторинговый списки Красной книги Тамбовской области; 2 вида рекомендовано включить в следующее издание. Территориальной охраной охвачено лишь 76 % видового состава бриофлоры. Перевод перспективных охраняемых территорий в категорию действующих позволит значительно повысить уровень охраны редких видов.
Ключевые слова: бриофлора, видовое разнообразие, Красная книга, мохообразные, охраняемые территории, памятники природы, редкие виды, репрезентативность.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на разработанные в конце XX века теоретические подходы к созданию регионального экологического каркаса, существующие сети ООПТ в областях средней полосы России далеки от совершенства. Одним из перспективных направлений анализа сети ООПТ является, на наш взгляд, ландшафтно-экологический подход, который позволяет оценить степень охвата типичных и уникальных ландшафтов региона и должную их дублированность. Цель данного исследования заключается в оценке репрезентативности сети ООПТ Северо-Восточного Прицнинского физико-географического района типичной лесостепи Лесостепной провинции Окско-Донской равнины в аспекте сохранении биоразнообразия такого компонента биоты как мохообразные.

Северо-Восточный Прицинский район типичной лесостепи, площадью 7536 км^2, приурочен к Окско-Донскому водоразделу [1]. На востоке его ограничивает долина р. Цны, на юге и западе граница сильно размыта и примерно совпадает с линией водораздела рек Цны и Дона. В орографическом плане район можно охарактеризовать как возвышенный (максимальная отметка 218 м над уровнем моря), моренный, равнинно-увалистый, среднерасчлененный.

Рельефообразующими породами являются песчано-глинистые отложения неогена четвертичного времени. Четвертичные отложения представлены мореной днепровского оледенения, безвалунными суглинками (на водоразделах), делювиальными (склоны речных долин) и аллювиальными песками и супесями (днища долин). На крайнем севере района отложения неогена выклиниваются на дневную поверхность. Гидрографическая сеть представлена рекой Челновой, а также верховьями Цны с ее левыми притоками; у западных границ располагаются истоки р. Матыры. Климат района резко континентальный, гидротермический коэффициент – около 1. Господствующими зональными почвами являются слабо- и средневыщелоченные черноземы глинистого и суглинистого механического состава с вкраплениями мощных черноземов и серых лесных почв. В поймах рек развиты пойменные зернистые и зернисто-слоистые почвы. В бассейнах рек Челновой и Разазовки имеются значительные массивы серых лесных песчаных и супесчаных почв.

В доагрикультурное время район был более чем на 50 % покрыт лесами, чередующимися с участками мезофильных разнотравно-луговых степей. В настоящее время степной тип растительности представлен лишь сильно трансформированными фрагментами, приуроченными к склоновому типу местности. Процент лесопокрытой площади составляет около 10 %. Леса представлены в основном байрачными дубравами типичной многоярусной структуры; на надпойменных террасах сохранились сосновые боры с обилием бореальных видов в напочвенном покрове; к западинам приурочен такой редкий тип сообществ как осоково-сфагновые болота. В поймах рек небольшие площади занимают пойменные дубравы и ольшаники. На севере района встречаются березовые рощи (на месте вырубленных дубрав), а на юге и западе – осиновые кусты. Степень сельскохозяйственного освоения района весьма высока – около 80 %.

Сеть ООПТ на территории Северо-Восточный Прицнинского района (рис. 1) включает 1 государственный региональный природный заказник «Моршанский» и 17 памятников природы областного значения [2], предложено к охране 10 объектов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Сборы мохообразных проводились маршрутным методом с 2014 по 2025 гг. Камеральная обработка осуществлялась с применением общепринятых бриологических методик. Идентифицировано около 400 образцов. Гербарные сборы хранятся в фондовом гербарии заповедника «Галичья гора» (VU). Бриологические материалы, касающиеся изучаемого района отражены в ряде публикаций [3–10].

Номенклатура видов дана по сводкам мхов и печеночников России [11, 12]. Сначала анализируются параметры видового богатства существующих ООПТ [1], затем перспективных, предлагаемых к охране автором статьи; номера объектов в тексте соответствуют Рис. 1. Наиболее интересные объекты проиллюстрированы фотографиями автора. Принятые сокращения: р-н – район, пгт. – поселок городского типа, ВР видовое разнообразие мохообразных, ЛР – ландшафтный район, ПП – памятник природы; виды, занесенные в Красную книгу в Тамбовской области [13] в тексте отмечены *.

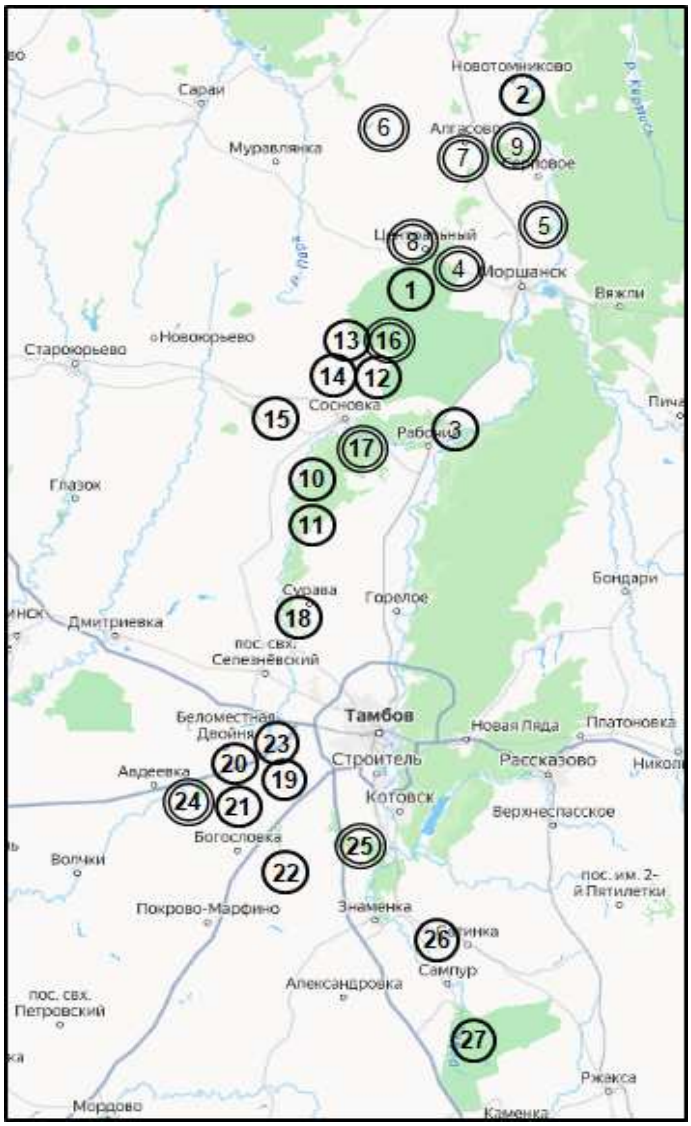


Рис. 1. Действующие (одинарный контур) и перспективные (двойной контур) ООПТ на территории Северо-Восточного Прицинского ландшафтного района.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Видовой состав мохообразных Северо-Восточного Прицнинского ландшафтного района типичной лесостепи

В Таблице 1 представлен список мохообразных изучаемого района. Для каждого вида указаны: активность в баллах, приуроченность к сообществам, а также порядковый номер местонахождения, что позволяет, при необходимости, установить состав бриофлоры каждого объекта.

Таблица 1

Видовой состав мохообразных Северо-Восточного Прицнинского ландшафтного района типичной лесостепи

Вид	А	Сообщества	Пункты
Abietinella abietina (Hedw.) M. Fleisch.	3	СС, К, ВК	1, 6, 7, 9, 10, 11, 13, 18, 19
Amblystegium serpens (Hedw.) Bruch et al.	4	Все типы	1 – 27
Anomodontella longifolia (Schleich. Ex Brid.) Ignatov &Ignatova	2	Д, П	5, 24
Atrichum flavisetum Mitt.	2	СЛ, ВК	11
Atrichum undulatum (Hedw.) P. Beauv.	3	Д, СЛ, П, ВК	6, 7, 9 – 13, 17 – 19
Aulacomnium palustre (Hedw.) Schwaegr.	2	Б, О	5, 17
Barbula unguiculata Hedw.	4	Б, Д, К, ВК, СЛ, П, Л	1 – 5, 11 – 15, 18, 21 – 27
Brachytheciastrum velutinum (Hedw.) Ignatov et Huttunen	4	Д, С, СС, СЛ, П, К, ВК	1 – 5, 7 – 13, 18 – 22, 24 – 27
Brachythecium albicans (Hedw.) Bruch et al.	5	СС, С, СЛ, К, ВК, П	1, 6 – 13, 17, 18, 21, 25, 26,
Brachythecium campestre (Muell. Hal.) Bruch et al	5	СС, С, СЛ, К, ВК, П, Л	1, 3, 4, 7, 9, 12, 13, 15, 18, 21, 22, 24, 26, 27
Brachythecium glareosum (Bruch ex Spruce) Bruch et al.	2	СС	1, 28
Brachythecium mildeanum (Schimp.) Schimp.	3	Д, СЛ, О, Б, Л, П	1, 2, 4, 6, 8, 12, 18 – 20, 22, 23, 25
Brachythecium rotaeanum De Not	3	Д, П	5, 19, 24, 25, 26
Brachythecium rutabulum (Hedw.) Bruch et al.	4	Д, О, Б, Л	8, 10, 11, 13, 14, 16 – 19, 24, 33
Brachythecium salebrosum (F. Weber et D. Mohr.) Bruch et al.	5	Все типы	1 – 27
Bryum argenteum Hedw.	2	СС, П, К, ВК	1, 2, 5, 6, 7, 14, 22, 26, 27
Bryum caespiticium Hedw.	3	СС, П, К, ВК, Д, СЛ	1, 2, 6 – 10, 13, 18, 21, 22, 24, 25, 27
Bryum capillare Hedw.	1	О	6, 30
Bryum creberrimum Taylor	2	СС, П	3, 4, 12, 13
Bryum elegans Nees	2	ВК	10, 11, 31
Bryum moravicum Podp.	3	Д, СЛ, П, О	1, 2, 4, 5, 8, 10, 19 – 26
Bryum pseudotriquetrum (Hedw.) P. Gaerth.	3	Б, О, СЛ, Л	2, 8, 10, 18, 29
Buxbaumia aphylla Hedw.	1	С	17

Продолжение таблицы 1

Callicladium haldanianum (Grew.) H.F. Crum	3	С, СЛ	1, 8, 9, 11, 17, 32, 33
Calliergon cordifolium (Hedw.) Kindb.	3	Б, О	8, 17
Calliergon giganteum (Schimp.) Kindb.	2	Б	17
Calliergonella cuspidata (Hedw.) Loeske	3	Б, О	8, 11
Cephaloziella rubella (Nees) Warnst.	1	ВК	11
Ceratodon purpureus (Hedw.) Brid.	5	П, К, СС, ВК, Д, С, СЛ	1 – 27
Chiloscyphus pallescens (Ehrh. ex Hoffm.) Dum.	2	С	17
Climacium dendroides (Hedw.) F.Weber et D.Mohr.	3	С, СЛ	1, 6, 8, 9, 11, 17
Dicranella heteromalla (Brid.) Schimp.	2	Д, СЛ	9, 10, 11, 17, 25, 29, 32
Dicranella varia (Hedw.) Schimp.	1	П	4
Dicranum bonjeanii De Not	2	С	17
Dicranum montanum Hedw.	3	С, СЛ, Д	5, 9, 11, 13, 15, 17
Dicranum polysetum Sw.	4	С, СЛ	1, 9, 11, 17, 18, 19, 29, 32
Dicranum scoparium Hedw.	4	С, СЛ, Д	1, 8 – 11, 17, 19, 32, 33
Didymodon rigidulus Hedw.	1	ВК	11
Drepanocladus aduncus (Hedw.) Warnst.	5	Б, О, П, Л	1, 2, 6, 8, 12, 18
Drepanocladus polygamus (Bruch et al.) Hedenaes	2	О	6
Eurhynchiastrum pulchellum (Hedw.) Ignatov et Huttunen	3	Д, СС, СЛ, ВК	10, 11, 13, 18, 21
Fissidens bryoides Hedw.	2	СС, ВК	3, 7, 11
Fissidens gracilifolius Brugg.-Nann. & Nyholm	1	ВК	3, 11
Fissidens taxifolius Hedw.	3	Д, П	3, 18, 24
Funaria hygrometrica Hedw.	3	Л, П, ВК	3, 11
Herzogiella seligeri (Brid.) Z. Iwats.	2	С	1
Homalia trichomanoides (Hedw.) Bruch et al.	2	Д	25
Hygroamblystegium humile (P. Beauv.) Vanderp., Goffinet et Hedenaes	2	Б, О, Л	6, 8, 12, 13, 18
Hygroamblystegium varium (Hedw.) Moenk.	2	Б, О	10, 11

Продолжение таблицы 1

Hylocomiadelphus triquetrus (Hedw.) Ochyra et Stebel	3	С, СЛ	8, 11, 18
Hypnum cupressiforme Hedw.	4	Д, СЛ, С, П	1, 3 – 5, 8, 0, 16, 17, 19 – 26
Jochenia pallescens (Hedw.) Hedenaes	4	Д, О, С, СЛ, П	1 – 5, 8 – 11, 13, 16 – 21, 23 – 27
Leptobryum pyriforme (Hedw.) Wilson	2	П, ВК	2
Leptodictyum riparium (Hedw.) Warnst.	3	Б, Д, О, СЛ, П, Л	1 – 4, 12, 14, 18, 19, 24, 27
Leskea polycarpa Hedw.	5	С, Д, СЛ, О, ВК, П, К	1 – 27
Leucodon sciuroides (Hedw.) Schwaegr.	1	Д, П	20, 24
Lewinskya affinis (Brid.) F. Lara, Farilleti et Groffinet	2	Д, СЛ, П	16, 19
Lewinskya speciosa (Nees) F. Lara, Farilleti et Groffinet	4	Д, СЛ, С, О, К, П	1 – 27
Lophocolea heterophylla (Schrad.) Dum.	3	СЛ, С, Д	1, 6, 8 – 10, 13, 17, 20, 25
Lophocolea minor Nees.	2	ВК, СЛ	10, 11, 18
Marchantia polymorpha L.	3	Д, СЛ, ВК	8, 11, 29, 31
Mnium stellare Hedw.	1	ВК	11
Nygolniella obtusifolia (Brid) Holmen et E.Warncke	3	Д, СЛ, О, К, П	1, 3, 5, 8, 14, 19 – 21, 23– 27
Orthotrichum diaphanum Brid.	1	К	30
Orthotrichum pallens Sw. ex anon	2	Д, П	24
Orthotrichum pumilum Sw. ex anon	3	Д, П, СЛ	1, 2, 4, 5, 8, 19 – 25, 30
Oxyrrhynchium hians (Hedw.) Loeske	4	Все типы	1 – 5, 8 – 19, 21 – 27
Pellia endiviifolia (Dicks.) Dum.	1	ВК	11
Pellia epiphylla (L.) Corda	3	СЛ, ВК	10, 11, 17, 29
Physcomitrium pyriforme (Hedw.) Hampe	2	П, Л	2, 13, 18
Plagiomnium affine (Blandow ex Funk) T.J. Kop.	2	СЛ	13, 18
Plagiomnium cuspidatum (Hedw.) T.J. Kop.	4	Д, О, СЛ, С, СС, ВК, К	1 – 5, 8 – 11, 17 – 19, 21, 24 – 26
Plagiomnium ellipticum (Brid.) T.J. Kop.	3	Б, О	5, 8, 9, 19
Plagiomnium rostratum (Schrad.) T.J. Kop.	1	ВК	10
Plagiothecium cavifolium (Brid.) Z. Iwats.	3	ВК, СЛ	10, 17, 32, 33

Продолжение таблицы 1

Plagiothecium denticlatum (Hedw.) Bruch et al.	2	С, СЛ, Д	1, 6, 8, 9, 11, 17, 25, 29
Plagiothecium denticulatum var. *undulatum* (Hedw.) Bruch et al.	2	СЛ, О	6, 10
Plagiothecium latebricola Bruch et al.	1	О, ВК	19, 11
Plagiothecium nemorale (Mitt.) A.Laegr.	2	Д	19
Plagiothecium rossicum Ignatov & Ignatova	3	Д, СЛ, С	1, 9, 10, 11, 17, 25, 32, 33
Platygyrium repens (Brid.) Bruch et al.	4	Д, С, СЛ, О, ВК, П	1 – 5, 8, 9, 13, 17, 19 – 21, 24 – 26
Pleurozium schreberi (Brid.) Mitt.	4	С, СЛ	1, 8 – 11, 13, 17, 18
Pohlia cruda (Hedw.) Lindb.	2	ВК	10, 11
Pohlia melanodon (Brid.) A.J. Shaw	1	П	2
Pohlia nutans (Hedw,) Lindb.	3	СЛ, С, Д	1, 9 – 11, 17, 18
Polytrichastrum longisetum (Sw. ex Brid.) G.L Sm.	3	С	17
Polytrichum commune Hedw.	3	Б	17
Polytrichum juniperinum Hedw.	4	С, СЛ, СС	1, 7, 9, 10, 18, 29
Polytrichum piliferum Hedw.	4	С, СЛ, СС	1, 8 – 11, 13, 18, 29
Polytrichum strictum Brid.	2	Б	17
Porella platyphylla (L.) Pfeiff**.**	1	П	24
Pseodoamblystegium subtille (Hedw.) Vanderp. et Hedenaes	2	Д, П	19, 20, 24
Pseudoleskeella nervosa (Brid.) Nyholm	3	Д, П	5, 18, 19, 20, 24, 25
Ptilidium ciliare (L.) Hampe	1	С	17
Ptilidium pulcherrimum (G. Web.) Vain.	2	С, СЛ	1, 9, 17, 32
Ptilium crista-castrensis (Hedw.) De Not	2	С	8, 9
Pylaisia polyantha (Hedw.) Bruch et al.	5	Д, С, СЛ, О, К, ВК	1 – 27
Radula complanata (L.) Dum.	2	Д, П	5, 20, 25
Riccia sorocarpa Bisch.	1	СС	7
Rhizomnium magnifolium (Horik.) T.J. Kop.	2	Б	17
Rhizomnium punctatum (Hedw.) T.J. Kop.	2	ВК, СЛ	10, 11,17
Sanionia uncinata (Hedw.) Loeske	3	СЛ, С	1, 11, 17, 32
Schistidium apocarpum (Hedw.) Bruch et al.	1	ВК	31

Продолжение таблицы 1

Sciuro-hypnum curtum (Lindb.) Limpr.	4	Б, Д, С, СЛ	1, 8, 9, 10, 13, 17 – 20, 25
Sciuro-hypnum populeum (Hedw.) Ignatov et Huttunen	2	П	5
Sciuro-hypnum reflexum (Starke) Ignatov et Huttunen	3	Д, П	4, 5, 8, 15, 16, 19 – 21, 24 – 26
Sphagnum capilifolium (Ehrh) Hedw.	3	Б	17
Sphagnum centrale C.E.O. Jensen	3	Б	17
Sphagnum fallax (H.Klinggr.) H. Klinggr	3	Б	17
Sphagnum girgensohnii Russov	3	Б	17
Sphagnum magellanicum Brid.	3	Б	17
Sphagnum squarrosum Crome	3	Б	17
Syntrichia ruralis (Hedw.) F. Weber et D. Mohr.	4	СС, С, К	1, 6 – 10, 13, 18, 26, 27
Tetraphis pellucida Hedw.	1	С	17
Tortula acaulon (With.) R.H. Zander	1	СС	2, 22
Tortula muralis var. *aestiva* Hedw.	2	ВК, П	2, 3, 10, 11, 31
Warnstorfia fluitans (Hedw.) Loeske	2	Б	17

Примечание. Активность вида (А) определялась на основе встречаемости и обилия: 1– встречается очень редко и имеет очень низкое обилие; 2 – довольно редко, обилие довольно низкое; 3 – спорадически, обилие умеренное; 4 – довольно часто, обилие незначительное; 5 – часто, обилие высокое; сообщества: Б – сфагновые болота, Д – дубравы байрачные, С – сосняки на надпойменных террасах и зандрах, СЛ – смешанные (сосново-дубово-березовые) леса, О – ольшаники, СС – степные сообщества на лессовых суглинках и песках; Л – луга, К – песчаные карьеры, ВК – выходы каменистых обнажений, П – парковые ландшафты. Местонахождения редких видов вне описываемых в тексте объектов: 28 – с. Новое Грязное, 29 – с. Темяшево, 30 – Моршанские карьеры близ с. Плоская Дубрава, 31 – с. Канада (Моршанский р-н), 32 – Степной лесхоз близ с. Кузьмино-Гать (Тамбовский р-н), 33 – с. Новая Слободка (Сосновский р-н).

Всего в составе бриофлоры Северо-Восточного Прицнинского ЛР к настоящему времени выявлено 117 видов мохообразных, из них примерно 8 % занесены в Красную книгу Тамбовской области [13]. Лишь 22 % от общего объема бриофлоры ЛР являются частыми и обильными эвритопными видами (баллы 4 и 5). Видов спорадического распространение с низким или умеренным обилием – около 30 %. Почти такая же доля видов (31.5 %) характеризуется довольно низкими показателями встречаемости и обилия (балл 2), видов с баллом 1 почти 17 %.

Ниже приводятся эколого-географические и популяционные особенности редких видов, занесенных в Красную книгу Тамбовской области [13]:

Anomodontella longifolia (категория 3). Евразиатско-американский вид, распространенный в зоне широколиственных лесов и в горах. Обитает на стволах

широколиственных пород (дуб, липа); выявленные популяции не превышают по площади 2–3 дм^2*;* (2/0; здесь и далее в числителе приводится общее число известных в изучаемом районе местонахождений, а в знаменателе – число охраняемых, что позволяет оценить обеспеченность территориальной охраной).

Atrichum flavisetum (категория 3). На территории европейской России встречается в подзонах южной и средней тайги; в лесостепи известен по единичным находкам. Выявленная популяция компактная, общей площадью около 5–7 дм^2; спороношение обильное; (1/1).

Homalia trichomanoides (категория 2). Типичный представитель неморального базифильного комплекса, предпочитает кору дуба, ясеня, липы, клена; собран однократно на стволах клена остролистного, площадь популяции около 2 дм^2; (1/0).

Hylocomiadelphus triquetrus (категория 3) Вид обычен в арктической и бореальной зонах Северного полушария, в лесостепи редок. Характерные местообитания – подстилка в хвойно-широколиственных лесах; встречается отдельными латками, площади локальных популяций не превышают 2–3 дм^2; (2/2).

Leucodon sciuroides (категория 2). Характерный неморальный эпифит полосы широколиственных лесов Европы; растет на коре широколиственных древесных видов, собран на стволах клена остролистного, площадь популяции – около 0,5 дм^2; (1/1).

Plagiothecium latebricola (категория 2). Преимущественно таежный вид Северного полушария, в европейской России имеет спорадическое распространение от южной тайги до подзоны широколиственных лесов, в лесостепи встречаемость резко падает. Обнаружен на обнажениях супесчано-торфянистой почвы на границе коренного берега и притеррасного ольшаника, общая площадь популяций – около 2 дм^2; (1/1).

Porella platyphylla (категория 1). Представитель неморального базифильного эпифитного комплекса; индикатор хорошей сохранности широколиственных лесов. Отмечен однократно в лесопарке бывшего усадебного лесопарка, площадь популяции около 1 дм^2; (1/0).

Ptilium crista-castrensis (категория 2). В России приурочен преимущественно к таежной зоне, в широколиственных лесах встречается существенно реже. Отмечен в средневозрастных сосняках на подстилке, площадь популяций составляет 5–10 дм^2; (2/0).

Sciuro-hypnum populeum (категория 3). Бореальный петрофитно-лесной вид. В средней полосе России имеет рассеянное распространение, встречается преимущественно на каменистых субстратах. Входит в состав базифильного эпифитно-петрофитного комплекса; площадь популяции около 1 дм^2; (1/0).

Sphagnum capilifolium (категория 2). Аркто-бореальный болотный вид, обычный на болотах в тундрах, тайге и высокогорьях, в лесостепи редок; выявлено несколько локальных популяций на болотах Челнавского лесного массива, площади их варьируют в пределах 0, 5–1 м^2; (1/0).

Sphagnum magellanicum (категория 2). В России встречается преимущественно в лесной зоне, в лесостепи – только на наиболее крупных и старых болотных

массивах, преимущественно мезо- и олиготрофных; доминирует в центральных частых сплавин, площади популяций – 5–10 м^2; (1/0).

Лишь для *Atrichum flavisetum, Homalia trichomanoides, Sciuro-hypnum populeum* отмечено наличие спороношений*;* у *Plagiothecium latebricola* выявлены обильные выводковые тела.

В основной список третьего издания Красной книги Тамбовской области целесообразно включить следующие виды (для обоих рекомендуемая категория 2): *Orthotrichum diaphanum* – неморальный эпифит, известен по единичной находке, обнаруженная на молодой осине популяция крайне мала по площади (1/0); *Ptilidium ciliare* – бореальный печеночник, отмеченный на сосновой подстилке близ болота (1/0). Для обоих видов находки в Тамбовской области – единственные для средней полосы России.

В список видов, популяции которых нуждаются в контроле (мониторинговый список), занесены: облигатный бореально-неморальный эпиксил *Herzogiella seligeri* (2/0), бореальный эпигеид *Buxbaumia aphylla* (1/0), бореальный эпиксил *Tetraphis pellucida* (1/0), неморальный петрофит *Fissidens gracilifolius* (2/2), преимущественно кальцефильный петрофит *Didymodon rigidulus* (1/1), неморальный эпифит *Radula complanata* (2/1), неморальные напочвенные виды *Mnium stellare* (1/1), *Pohlia cruda* (2/2). В большинстве случаев встречаемость и обилие у этих видов низкие.

Ниже перечислены прочие редкие и интересные виды с указанием обеспеченности территориальной охраной: степной ксерофит *Brachythecium glareosum* (1/0); псаммофиты *Bryum elegans* (2/2) и *B. capillare* (2/0); гелофиты *Calliergon giganteum* (1/0), *Shahnum girgensohnii* (1/0), *Polytrichum strictum* (1/0), *Warnstorfia fluitans* (1/0); эпиксилы и напочвенные виды *Chiloscyphus pallescens* (1/0), *Rhizomnium magnifolium* (1/0); гигрофильные вида обнаженной почвы и опада *Pellia epiphylla* (4/2), *Physcomitrium pyriforme* (3/3), *Drepanocladus polygamus* (1/0), *Hygroamblystegium varium* (1/1), виды напочвенного покрова хвойных лесов *Cirriphyllum piliferum* (1/0), *Dicranum bonjeanii* (1/0), *Plagiomnium affine* (1/1), *Polytrichastrum longisetum* (1/0), эпигеиды *Dicranella varia* (1/1), *Fissidens bryoides* (3/2), *F. taxifolius* (1/1), *Leptobryum pyriforme* (1/1), *Plagiothecium cavifolium* (3/1), *P. denticulatum* var. *undulatum* (2/1), *P. nemorale* (1/1), *Pohlia melanodon* (1/1), *Riccia sorocarpa* (1/0); эпигейный степной вид *Tortula acaulon* (1/1); петрофит *T. muralis* var. *aestiva* (4/4).

На действующих охраняемых территориях изучаемого района сосредоточено 76 % от бриофлоры всего ландшафтного района**.** Из всех известных местонахождений, выявленных для редких видов, лишь 50 % обеспечены территориальной охраной.

Бриологическая характеристика действующих и перспективных ООПТ Северо-Восточного Прицнинского ландшафтного района

Для изученных ООПТ указаны: краткие установочные данные [1], количество выявленных видов; перечислены редкие, интересные и охраняемые виды, занесенные в Красную книгу Тамбовской области [13].

МОРШАНСКИЙ РАЙОН

Действующие ООПТ

1. Моршанский заказник. Заказник, площадью 45275 га, организован в 2007 г. с целью охраны и восстановления промысловых животных, расположен в южной части Моршанского и северной – Сосновского р-нов. Характерными ландшафтами являются слабооблесенные долины небольших речек (Разазовка, Грязнушка, Сержалы, верховья Питерки, Ивенки), балки, старовозрастные посадки сосны, смешанные леса. Все наиболее интересные ландшафты (ольшаники, заброшенные торфоразработки, степные склоны, фрагменты старинных парков, характерные для севера Тамбовской области, остались за пределами заказника. Ключевыми участками для проведения бриологических исследований явились: урочища Большие сосны, Клин, Шильный овраг, фрагмент усадебного парка в с. Малые Кулики, система балок и долина р. Грязнушки южнее с. Савинские Карпели. ВР – 35 видов, редких нет; в бриофлоре присутствуют характерные для хвойно-широколиственных лесов бореальные виды *Pleurozium schreberi, Dicranum polesetum, Climacium dendroides* (лесная подстилка), *Sanionia uncinata, Ptilidium pulcherrimum* (основания и стволы берез).

2. Новотомниковский парк в усадьбе графа И. И. Воронцова-Дашкова в с. Новотомниково (20.9 га, организован в 1979 г.) – один из самых известных в области, заложен в конце XVIII века. Монументальные липовые аллеи ведут в пойму р. Цны, и до сих пор похожи на просторные дороги. Состояние парка неудовлетворительное – фруктовые сады в боскетах вырублены, аллеи сильно заросли, пруды полностью пересохли, имеются следы стихийных рубок. Большую историческую ценность представляют: усадебный дом (до недавнего времени в нем размещался санаторий, ныне заброшен и быстро разрушается), Благовещенская церковь, комплекс конюшен, ипподром, некрополь. При всех негативных тенденциях объект имеет высокий рекреационно-туристический потенциал. ВР – 25 видов, редких нет, из эпигейных видов спорадического распространения можно назвать лишь *Physcomitrium pyriforme, Pohlia melanodon*.

3. Парк при Левинской школе в с. Левино (7.97 га, 1979 г.). До недавнего времени на территории усадьбы Чолокаевых располагалась школа, после ее закрытия парк и постройки быстро пришли в запустение. Заметны следы рубок деревьев, свалки мусора в долине ручья. Просматриваются лишь следы основных аллей. ВР – 23 вида, из редких – петрофит *Fissidens gracilifolius* (на старых кирпичах).

Примечание. ПП **Киселевские посадки сосны обыкновенной** в Моршанском (13 га) и Сосновском р-нах (43.3 га), учитывая лишь дендрологическую значимость объектов и сложность нахождения среди естественных насаждений, специально не изучалась. Не рассматривался и зоологический ПП **«Поселение слепышей».**

Перспективные ООПТ

4. Фрагменты аллей бывшей усадьбы Безобразовых в окр. с. Сарымовка. В селе имеются относительно сохранившиеся промышленные здания бывшей экономии богатых помещиков Безобразовых. Сама усадьба располагалась восточнее, в окружении естественного дубово-березового лесного массива (Юдинский лес), к ней вела широкая липовая аллея, которая сохранилась до наших

дней. ВР – 20 видов, из спорадичных видов интересен лишь эпигейный мох *Dicranella varia*.

5. Санаторный парк в пос. 13-й Октябрь (владельцы бывшей усадьбы неизвестны). До недавнего времени здесь функционировал санаторий-профилакторий одного из предприятий г. Моршанска. Скважина, вскрывающая ценные хлоридно-натриевые минеральные воды с биологически активным бромом, является геологическим ПП, сейчас она законсервирована. Парк в хорошем состоянии, имеет четкую аллейную планировку, в древостое преимущественно старовозрастные липы и клены. Восточная часть парка представляет собой узкую полоску естественной дубравы на правобережье р. Цны. ВР – 24 вида, особую ценность представляют неморальные эпифиты **Anomodontella longifolia*, *Brachythecium rotaeanum, *Sciuro-hypnum populeum, Radula complanata*, отмеченные на стволах клена остролистного.

6. Степная балка в окр. с. Погореловка в долине р. Островки (рис. 2) – довольно большой по площади и хорошо сохранившийся фрагмент ранее обширных Больших Алгасовских степей, еще в XIX веке описанный известными ботаниками В. В. Алехиным и Н. И. Прозоровским. Сложная система балок со склонами разных экспозиций, необычность субстрата (преимущественно песок), наличие по днищу балок молодых ольшаников и торфянистых почв) обусловило богатый и экологически контрастный набор мохообразных. Помимо обычных степных псаммофитов (*Syntrichia ruralis, Bryum caespiticeum, Polytrichum piliferum, P. juniperinum,* последние 2 вида дают высокое покрытие), в ольшанике отмечен ряд редких гигрофильных мхов – *Calliergon cordifolium, Dreponacladus polygamus, Plagiothecium denticulatum* var. *undulatum, Aulacomnium palustre, Plagiomnium ellipticum*. Требуется безотлагательная охраны данного ценного природного объекта.



Рис. 2. Степи у с. Погореловка.

7. Степные склоны в окр. с. Алгасово (рис. 3). Разнотравно-ковыльные степи довольно занимают крутые восточные и южные склоны долины р. Вобши. По-видимому, это оставшийся рефугиум Малых Алгасовских степей. ВР – 15 видов, помимо характерных ксерофильных видов каменистых степей на лессовидных суглинках (*Abietinalla abietina, Syntrichia ruralis, Bryum caespiticeum, Polytrichum piliferum*), в нижних частых склонах, в затененных условиях отмечены эпигейные виды *Riccia sorocarpa, Fissidens bryoides.* Целесообразно комплексное изучение и организация охраны ценных степных участков на севере Тамбовской области.



Рис. 3. Степи у с. Алгасово.

8. Старые торфоразработки и ольшаник в окр. с. Сарымовка с прилегающим смешанным лесом (рис. 4). Южная часть урочища представляет собой искусственные молодые посадки сосны обыкновенной, тем не менее в них обнаружены на подстилке бореальные виды **Ptilium crista-castrensis, *Hylocomiadelphus triquetrus*. В пойме р. Разазовки ранее добывали торф, о чем свидетельствуют обводненные канавы, перемежающиеся с гребнями, занятыми старовозрастной ольхой. ВР – 40 видов, высокого обилия достигают гигрофиты *Plagiomnium ellipticum Calliergonella cispidata, Calliergon cordifolium, Bryun pseudotriquetrum, Marchantia polymorpha* и др. Подобные сообщества практически отсутствуют в системе ООПТ области.



Рис. 4. Ольшаник близ с. Сарымовка.

9. Старовозрастные сосняки в Серповском лесничестве. Объект расположен на левобережье р. Серп в 2 км к северо-западу от пос. Молодежный. Видовой состав (33 вида), типичен для сосновых лесов хорошей сохранности, присутствуют бореальные представители лесной подстилки **Ptilium crista-castrensis*, ацидофильные эпифиты березового комплекса *Plagiothecium denticulatum, Ptilidium pulcherrimum*, опушечные виды *Abietinalla abietina, Syntrichia ruralis*.

СОСНОВСКИЙ РАЙОН

Действующие ООПТ

10. Опорный разрез Дегтянских слоев горелкинской свиты (рис. 5). Геологический ПП (1 га, 1979 г.) расположен на правом берегу р. Челновая напротив с. Березовка. Объект охраны: обнажения позднего миоцена с остатками ископаемой флоры. Местообитания, пригодные для поселения мхов, весьма разнообразны: старые разработки песка, поросшие сосной и березой, осыпи песков с включениями мелких линз песчаников, обрывистая терраса реки, притеррасный заболоченный ольшаник. ВР (с учетом прилегающей к ПП территории) – 34 вида, из редких присутствуют псаммофиты *Bryum elegans, Plagiothecium cavifolium, P. denticulatum* var. *undulatum, P. nemorale, Pohlia cruda,* гигрофиты *Hygroamblystegium varium, Pellia epiphylla *Plagiothecium. latebricola*. Целесообразно значительное увеличение охраняемой площади данного, а также всех прочих геологических ПП, изменение их профиля на комплексный, что обусловлено высоким уровнем ландшафтно-экологического и флористического разнообразия.



Рис. 5. Карьер у с. Дегтянка.

11. Стратотип каменнобродских слоев. Геологический ПП (1 га, 1979 г.) расположен на правобережье р. Челновой напротив с. Каменный Брод. (рис. 6). Объект охраны: геологический разрез осадочных пород первой половины среднемиоценовой эпохи с остатками ископаемой флоры. Выходы песчаников наблюдаются на достаточном протяжении коренного склона долины (не менее 2 км), заросшего средневозрастным сосновым лесом. Спектр местообитаний: выходы песчаников в глубоком тенистом овраге с временным водотоком, сосняки, остепненные луга, пески нижнемелового возраста, родники. ВР весьма велико – 40 видов и во многом сходно с предыдущим ПП, среди редких мохообразных – бореально-неморальные виды почвенных обнажений и лесной подстилки (**Atrichum flavisetum, Bryum elegans, Pohlia cruda, Mnium stellare, *Hylocomiadelphus triquetrus*), эпиксилы (*Rhizomnium punctatum*, *Lophocolea heterophylla*); необычно присутствие кальцефита *Didymodon rigidulus.* Обращает на себя внимание обилие печеночников (5 видов), среди них *Pellia epiphylla, Marchantia polymorpha, Cephaloziella rubella.*

12. Сосновские бугры. Геологический ПП (180 га, 1983 г.) расположен на северо-восточной окраине пгт. Сосновка на правобережье р. Сосновочки (рис. 7). Объект охраны: нижнемеловые и неогеновые пески, перекрытые слоем морены и покровных суглинков с остатками морской фауны. Высота бугров около 30–40 м. Верхние части склона засажены сосной, в основании склонов – частично пересохшее русло речки, имеются ямы от выкопки песка, поросшие ивняками; эти особенности определяют довольно большое количество гигрофильных видов. ВР – 16 видов, из видов спорадичного характера распространения можно назвать лишь *Bryum creberrimum* и *Hygroamblystegium humile.*



Рис. 6. Выходы песчаников у урочище Каменный брод.



Рис. 7. Сосновские бугры.

13. Балка Большая Карташовая (34.7 га, 1983 г.). Расположена на правобережье р. Сосновочки в 1 км к северу от пгт. Сосновка. Балка облесена смешанными насаждениями березы, сосны и дуба; склоны достаточно крутые,

затененные. В напочвенном покрове представлены как степные (*Abietinalla abietina*), так и бореальные (*Pleurozium schreberi, Plagoimbium affine, Sciuro-hypnum curtum*) виды; присутствуют мезо-гигрофильные виды спорадичного распространения *Physcomitrium pyriforme, Hygroamblestegium humile*. ВР – 29 видов.

14. Парк имени академика В.Р. Вильямса. От парка (1.9 га, 1979 г.), расположенного на территории имения графа Бенкендорфа, остались единичные экземпляры лиственницы, ели, пихты и кленовые насаждения по берегам прудов. Видовой состав очень скудный (12 видов) и представлен частыми устойчивыми видам (*Brachythecium salebrosum, Leskea polycarpa, Leptodyctium riparium, Ceratodon purpureus* и др.). Состояние объекта неудовлетворительное.

15. Геологический памятник второй половины средне-миоценовой эпохи (стратотип Ламкинской свиты). ПП (1 га, 1979 г.), расположен в окрестностях заброшенной д. Покровки, представляет собой заросший древостоем склон балки, выходящей в долину р. Ламочки. Обнажения почти полностью задернованы. ВР – 10, редких и интересных видов нет.

Перспективные ООПТ

16. Парк в с. Космачевка в бывшей усадьбе Шиловских – Машвеловых расположен на берегу большого пруда к север-западу от села. Парк в основном кленовый, старовозрастный, хорошей сохранности. Бриофлора насчитывает 11 видов, среди них эпифиты **Leucodon sciuroides, Orthotrichum affine, Sciuro-hypnum reflexum.*

17. Болотно-боровой комплекс в окр. с. Вихляйка (рис. 8). Крупные лесной массив, расположен в междуречье рек Челновой и Цны. Ценность объекта определяется наличием старовозрастных сосняков, сфагновых болот, многочисленных лесных ручьев. Учитывая то обстоятельство, что подобные комплексы весьма слабо представлены в сети ООПТ Тамбовской области, актуальность охраны значительна. ВР – самое большое из всех изученных объектов – 55 видов (вполне возможно и увеличение этой цифры), причем 17 видов обнаружены только здесь: *Buxbaumia aphylla, Calliergon giganteum, Chylosciphus pallescans, Dicranum bonjeanii, Polytrchum commune, P. strictum, *Ptilidium ciliare* (единственная находка в Центральном Черноземье), *Tetrphis pellucida, Warnstorfia fluitans, *Sphagnum capilifolium, *S. magellanicum* и др. Такого богатства и флористического разнообразия не наблюдается даже в другом ценном действующем ООПТ подобного профиля – Иловай-Воронежском болотно-боровом комплексе.

ТАМБОВСКИЙ РАЙОН

Действующие ООПТ

18. Лысые горы. Геологический ПП (5 га, 1979 г.) расположен на правобережье р. Челновой близ с. Лысые Горы. Объект охраны: стратотип лысогорских слоев миоцена. Спектр местообитаний весьма широк: крутые склоны, прорезанные оврагами и поросшие в верхней части сосняком, степные участки, ключи с прилегающей заболоченной территорией. ВР – 33 вида, среди них *Physcomitrium pyriforme*, **Hylocomiadelphus triquetrus.*

19. Урочище Араповская дача у с. Красносвободное (208 га, 1979 г.). Один из старейших ПП Тамбовской области, пПредставляет собой дубраву типичной ярусной структуры, расположенной на берегу запруженной р. Большая Липовица. В

прежние времена урочище находилось на землях помещиков Араповых и лесокультурные работы в нем поддерживались на высоком уровне. В настоящее время лесное урочище сохранило свою ценность. ВР довольно высокое – 30 видов, среди них неморальные виды *Radula complanata, Brachythecium rotaeanum, Pseudoleskeella nervosa, Fissidens taxifolius,* присутствуют гигрофиты *Plagiomnium ellipticum, Brachythecium rutabulum*, опушечные виды *Abietinalla abietina.*



Рис. 8. Сфагновове болото близ с. Вихляйка.

20. Дубравы на правобережье р. Матыра – Большая (435 га) и Малая (152 га) Матыра, имеют охранный статус с 1990 г. Урочище Большая Матыра расположено на западной окраине с. Большая Матыра, изначально являло собой группу осиновых колков, перемежающихся с луговыми степями. В середине XX века была осуществлена подсадка дуба черешчатого. В настоящее время состояние урочища Большая Матыра неудовлетворительное, степные сообщества практически отсутствуют. Урочище Малая Матыра расположено с восточной стороны села, представляет собой относительно чистые дубовые насаждения хорошей сохранности. ВР (обоих урочищ в целом) – 25 видов, среди них интересны неморальные эпифиты **Leucodon sciuroides* (Малая Матыра)*, Brachythecium rotaeanum,* печеночники *Radula complanata, Lophocolea heterophylla,* наиболее частыми обильными являются *Bryum moravicum, Sciuro-hypnum reflexum.*

21. Урочище Елкашевская дача в 7 км к югу от с. Большая Матыра (74 га, 1983 г.). ВР – 20 видов мохообразных, видовой состав типичен для байрачных дубрав области, редких видов нет.

22. Урочище Осиновский овраг (374.1 га, 2014 г.). Основная часть балки, протяженностью около 5–7 км вытянута в юго-западном направлении, перед устьем

она поворачивает на юго-восток, а затем на юг, открываясь в долину р. Сухая Липовица у пос. Вишневка. Нераспаханными остаются лишь склоны балки, шириной максимум до 200 м. Проективное покрытие злаково-разнотравного травостоя высокое, что неблагоприятно для развития мхов. В верховьях боковых отвершков представлены кустарники (терн, крушина, ракитник) и небольшие деревья клена американского, осины, березы, иногда встречаются небольшие по площади разреженные молодые байрачные дубравы. ВР – 16 видов, редких нет.

23. Красносвободские осиновые кусты в 3 км к северо-западу от с. Большая Матыра (3.2 га, 1979 га). ПП расположен в 3 км к северо-западу от с. Красносвободное, представляет собой группу осиновых кустов, окруженных сельхозугодьями, характерный компонент «лесостепного комплекса» – галофильные степи – отсутствует. ВР весьма скудное – 11 видов, редких видов нет.

Перспективные ООПТ

24. Дубрава у с. Кугушево. Объект находится к югу от села, ранее здесь располагалась усадьба Кугушевых. Обширный лесопарк с севера окружает пруд; в древостое представлены старовозрастные (70–80 лет) насаждения клена остролистного, дуба, ясеня, что само по себе представляет ценность, поскольку широколиственных лесов в области немного. ВР **–** 30 видов, среди них – ряд редких в области неморальных эпифитов: **Anomodontella longifolia, *Porella platyphylla*, *Brachythecium rotaeanum, Pseudoamblestegium subtilis, Orthotrichum pallens,* обнаружен неморальный эпигейный вид *Fissidens taxifolius,* спорадически встречающийся в области.

25. Дубравы в междуречье рек Большая Липовица и Цна севернее с. Большая Липовица. Большая часть лесного массива представлена смешанными насаждениями дуба и посадками сосны, но в южной части имеются более или менее чистые средневозрастные насаждения дуба, причем, рельеф осложнен небольшими балками, выходящими в долину. Указанные обстоятельства обеспечивают довольно высокий уровень биоразнообразия мхов – как неморальных эпифитов, так и напочвенных видов лесных оврагов; выявлено около 30 видов, среди них **Homalia trichomanoides* (единственное местонахождение в ЛР), *Radula complanata, Brachythecium rotaeanum, Dicranella heteromalla.*

Примечание. Не представляет бриологического интереса такой ПП как **Татарский вал**, бриофлора включает около 5 гемерофильных видов, преимущественно космополитов (*Ceratodon purpureus, Barbula unguiculata, Brachythecium campestre* и др.), тем не менее планируется более тщательное изучение объекта. Не включен в перечень и гидрологический ПП **«Озеро Красное».**

САМПУРСКИЙ РАЙОН

Действующие ООПТ

26. Урочище Отрог близ с. Текино (51.6 га, 2014 г.). Объект представляет собой большую разветвленную балку, в западном отвершке близ впадения в долину р. Цны имеется байрачная дубрава. ВР – 16 видов, из относительно редких лишь *Brachythecium rotaeanum.* Развитие напочвенных мхов затрудняет мощный злаково-разнотравный травостой.

27. Верховье реки Цны. (21061.74 га, 1983 г.), включая ПП **Степь в имении герцога Лейхтенбергского** (5.4 га). Небольшой участок степи расположен в южной части района на водоразделе рек Цны и Бурначек близ с. Ивановка. Злаково-разнотравные сообщества представлены высоким, густым травостоем, в небольшим западинах встречаются заросли ив. Мохообразные обнаруживаются лишь в осенний и ранневесенний период, когда травостой отсутствует, причем, на выпасаемых участках. В целом, значительная часть ПП «Верховье р. Цны» представлена сельхозугодьями, долинами небольших рек, которые, сливаясь образуют главную водную артерию Тамбовской области – реку Цну. Видовой состав мхов скудный (15 видов) и весьма тривиальный (*Ceratodon purpureus, Bryun caespiticeum, Brachythecium campestre* и др.), типичный для долинных сообществ и агроценозов.

Бриологическая характеристика биоразнообразия типичных ландшафтов Северо-Восточного Прицнинского ландшафтного района

Ниже кратко характеризуются бриофлоры типичных ландшафтов изучаемого района и дается оценка их репрезентативности в сети ООПТ.

Дубравы (в основном байрачные) распространены незначительно и представлены в объектах 19, 20, 21, 25. Бриофлора достаточно богата (41 вид) и в количественном и качественном отношениях близка парковой бриофлоре, что естественно, поскольку парки, а особенно лесопарки, имеют сходный спектр местообитанйи. В целом, доля специфичных видов, в дубравах и парках весьма велика – 37 %, в основном это неморальные эпифиты (**Leucodon sciuroides*, **Anomodontella longifolia, *Homalia trichomanoides, Brachythecium rotaeanum, Radula complanate* и др.), реже – напочвенные мхи (*Fissideans taxifolius*). Организация охраны требуется для старовозрастных дубрав на правобережье р. Липовица (объект 25).

Садово-парковые ландшафты – фрагменты заброшенных парков и лесопарков, сформированных на месте территории бывших усадеб (объекты 2, 3, 4, 5 16, 24, а также фрагменты парков в сс. Малые Кулики, Ракша, Островка). Бриофлора насчитывает 40 вида, доля редких и интересных видов – около 25 %, только в этом типе ландшафтов отмечены *Dicranella varia, Pohlia melanodon* (эпигейные виды), **Sciuro-hypnum populeum*, **Porella platyphylla* (эпифиты), 4 вида из состава парковой бриофлоры занесены в Красную книгу Тамбовской области: **Sciuro-hypnum populeum, *Leucodon sciuroides*, **Anomodontella longifolia, *Porella platyphylla.* Охранный статус имеют лишь 2 объекта, нами рекомендуются к охране еще 4, наиболее ценным из них является лесопарк в с. Кугушево.

Сосновые и смешанные леса на песках зандров и надпойменных террас – в изучаемом районе имеют довольно большие площади и распространены в междуречье рек Челновой и Цны, а также на левобережье р. Серп. Бриофлора насчитывает не менее 60 преимущественно бореальных, видов. Доля редких и интересных видов – около 20 %, среди них *Buxbaumia aphylla*, *Chiloscyphus pallescens, Dicranum bonjeanii, Herzogiella seligeri, *Hylocomiadelphus triquetrus, Plagiomnium affine, Polytrichastrum longisetum, Ptilidium ciliare,* Ptilium crista-*

castrensis, Tetraphis pellucida, которые выявлены только в данных сообществах. Учитывая недостаточную представленность болотно-боровых комплексов в системе ООПТ, а также их высокую научную ценность, целесообразна охрана объектов – 9, 17.

Ольшаники, небольшие по площади, представлены в поймах рек Челновой, Островки, Разазовки и входят в состав объектов 6, 8, 17. ВР – 25 видов, доля редких и интересных составляет 24 %, среди них гигрофиты *Hygroamblystegium humile, H. varium, Drepanocladus polygamus*, поселяющиеся на гнилой древесине и опаде, а также *Plagiothecium denticulatum* var. *undulatum, *P. latebricola* – на торфе. Целесообразна организация охраны заболоченной поймы р. Разазовка, включая старые торфоразработки, лесные урочища Юдинский лес и Заповедь.

Сфагновые болота – характерный тип ландшафтов сосновых и смешанных лесов области, однако в изучаемом ЛР представлен лишь в Челнавском лесном массиве близ с. Вихляйка и в Стежкинском лесничестве. Видовое богатство составляет 27 видов, из них 2 вида **Sphagnum capilifolium, *S. magellanicum* являются «краснокнижными». Уровень специфичности весьма высок – 11 видов (17 %) выявлены только в болотных сообществах (*Calliergon goganteum, Polytrichum strictum, Warnstorfia fluitans*, 6 видов сфагновых мхов и др.). В перечне ООПТ Тамбовской области болотные ландшафты представлены недостаточно, хотя именно болотные комплексы демонстрируют очевидную негативную динамику под воздействием как прямых, так и косвенных причин. Целесообразно создать большой по площади ООПТ (в ранге памятника природы или заказника) Болотно-боровой комплекс в окр. с. Вихляйка (объект 17), где помимо болот охраной будут охвачены и старовозрастные сосновые леса.

Луга фрагментарно представлены по днищам балок и долин небольших речек (объекты 1, 18, 21). Бриофлора скудна – 15 видов и представлена в основном мезо-гигрофитами, из относительно редких – *Physcomitrium pyriforme.*

Степи на севере Тамбовской области приурочены исключительно к склоновому типу местности. На черноземных почвах развиваются высокотравные луговые варианты степей, где условия для произрастания мхов неблагоприятны, поэтому видовой состав скудный (объекты 22, 26, 27), присутствуют устойчивые виды широкой экологической амплитуды (*Bryum argenteum, B. caespiticeum, Brachythecium campestre*), а также короткоживущие *Barbula unguiculata, Tortula acaulon.* Более интересна бриофлора степей на лессовидных суглинках и песках (объекты 6, 7, 28). К сожалению, эти варианты степей в настоящее время в сети ООПТ не представлены вовсе. К тривиальным видам открытых местообитаний здесь добавляются *Fissidens bryoides, Riccia sorocarpa* (эти 2 вида отмечены только в степных сообществах, хотя на территории ЦЧО встречаются и на почвенных обнажениях в лесных и опушечных сообществах)*, Eurhynchiastrum pulchellum, Bryum creberrimum, Plagiomnium cuspidatum.* На песках доминирующую роль играют *Polytrichum piliferum, P. juniperinum, Syntrichia ruralis.* Всего в степных сообществах отмечен 21 вид. Актуальна безотлагательная охрана фрагментов бывших Алгасовских степей (Моршанский р-н).

Выходы каменистых пород (песчаников) встречаются на правобережье р. Челновой (объекты 10,11, 18) в окружении искусственных сосновых и смешанных лесов. Видовой состав подобных ландшафтов богат и своеобразен – 35 видов, 9 из них (20 %) встречены только в них – *Atrichum flavisetum, Bryum elegans, Didymodon rigidulusm Cephaloziella rubella, Mnium stellare, Plagiomnium rostrarum, Pohlia cruda, Pellia endiviifolia, Rhizomnium punctatum.* Охрана выходов каменистых пород обеспечена в геологических ПП, однако целесообразно существенное расширение их площадей и изменение профиля на комплексный.

Карьеры по добыче песка (объекты 30, заброшенные части карьеров прилегают к ПП 10, 18). В моршанских карьерах (ныне заброшенных) выявлено 20 видов, наиболее характерны на почве *Abietinella abietina, Brachythecium albicans, Brachytheciastrum velutinum, Ceratodon purpureus, Bryum caepiticeum*. Днища выработок заросли молодыми осинами и березами, поэтому в состав бриофлоры включены и эпифитные мхи. Из числа редких видов обнаружен ксерофильный эпифит *Ortotrichum diaphanum* (популяция не более 3 квадратных сантиметров); вероятно, его произрастание на молодых осинах носит случайный характер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Бриофлору Северо-Восточного Прицнинского ЛР, насчитывающую 117 видов, можно оценить как весьма богатую – не менее 60–70 % от бриофлоры всей Тамбовской области. Состав бриофлоры характеризуется высоким уровнем таксономического, ботанико-географического, эколого-биологического разнообразия, обилием редких видов – в основном из числа бореальных болотных видов и неморальных эпифитов. На действующих охраняемых территориях представлено 76 % видового состава мохообразных.
2. Лишь 22 % от общего объема бриофлоры являются частыми и обильными эвритопными видами. Видов спорадического распространения с низким или умеренным обилием – около 30 %. Почти столько же видов (31.5 %) имеют довольно низкие показатели встречаемости и обилия; видов редких стенотопных – почти 17 %.
3. В Красную книгу Тамбовской области занесены 11 видов (8 % видового состава) и 2 вида рекомендуются к включению в следующее издание. Полный охват территориальной охраной имеют местонахождения лишь у половины «краснокнижных» видов, примерно у стольких же видов все известные на сегодняшний день местонахождения охранного статуса не имеют.
4. Наибольший уровень видового богатства и специфичности имеют сосновые и смешанные леса – 60 видов / 20 % специфичных; выходы каменистых пород – 36 / 20 %, сфагновые болота – 27 / 7 %. Близки по количеству и составу бриофлоры дубрав и садово-парковых ландшафтов – 43 вида (в целом) / 37 % специфичных. Умеренным уровнем разнообразия и почти полным отсутствием специфичных видов характеризуются ольшаники (25 видов), степи (21), луга (15), песчаные карьеры (20 / 5 %).
5. Степень дублированности характерных ландшафтов в действующей системе ООПТ изучаемого района недостаточна. Такие типы урочищ как дубравы,

болотно-боровые комплексы, степи требуют безотлагательной охраны. Целесообразно значительное увеличение площадей существующих геологических памятников природы и изменение их профиля на комплексный.

б. Значительную природоохранную ценность из числа действующих ООПТ имеют геологические памятников природы (стратотипы дегтянских и каменнобродских слоев), урочище Араповская дача, дубравы у с. Матыра. Рекомендуется к охране 10 объектов, их них высоким биоразнообразием и значительной долей редких видов характеризуются следующие: Степная балка у с. Погореловка, Дубрава у с. Кушушево, Дубрава в междуречье рек Большая Липовица и Цна, Болотно-боровой комплекс у с. Вихляйка, Старые торфоразработки и ольшаник у с. Сарымовка.

Список литературы

1. Физико-географическое районирование Центральных Черноземных областей / Под ред. Ф. Н. Милькова. – Воронеж: Издательство Воронежского университета, 1961. – 262 с.
2. Приказ Министерства экологии и природных ресурсов Тамбовской области от 21.09.2023 №456 «Об утверждении перечня особо охраняемых природных территорий регионального значения, управляемых Тамбовским областным государственным бюджетным учреждением «Дирекция особо охраняемых природных территорий регионального значения».
3. Попова Н. Н. К оценке репрезентативности сети ООПТ Тамбовской области: бриологический аспект / Попова Н. Н. // Биоразнообразие и антропогенная трансформация природных экосистем: материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Саратов: Саратовский источник, 2018. – С. 154–160
4. Попова Н. Н. Бриофлора санаторных парков Тамбовской области / Попова Н. Н. // Флора и растительность Центрального Черноземья-2019. – Курск, 2019. – С. 200–202.
5. Попова Н. Н. Бриофлора старинных усадебных парков Тамбовской области / Н. Н. Попова // Бот. журн. – 2019. – Т. 104, №3. – С. 363–376.
6. Попова Н. Н. Биоразнообразие мохового компонента дубрав Тамбовской области и его охрана / Попова Н. Н. // Сохранение лесных экосистем: проблемы и пути решения: мат-лы II Международ.науч.-практ конф. – Киров, 2019. – С. 300–305.
7. Попова Н. Н. Бриофлора геологических памятников природы Центральной России. Часть 1. / Н. Н. Попова // Флора и растительность Центрального Черноземья-2015. – Курск, 2015. – С. 195–200.
8. Попова Н. Н. Бриофлора геологических памятников природы Центральной России. Часть 2. / Н. Н. Попова // Флора и растительность Центрального Черноземья-2017. – Курск, 2017. – С. 167–174.
9. Попова Н. Н. Бриофлора геологических памятников природы Центральной России. Часть 3. / Н. Н. Попова // Флора и растительность Центрального Черноземья. – Курск: Мечта, 2018. – С. 150–155.
10. Попова Н. Н. Бриофлора геологических памятников природы Центральной России. Часть 4. / Попова Н. Н. // Флора и растительность Центрального Черноземья-2022. – Курск, 2022. – С. 163–166.
11. Потемкин А. Д. Печеночники и антоцеротовые России. Т. 1. / А. Д. Потемкин, Е. В. Софронова. – СПб.-Якутск, 2009. – 368 с.
12. Флора мхов России / М. С. Игнатов (отв. ред.). Т. 2. – М., 2017. – 560 с.; Т. 4. – М., 2018. – 543 с.; Т. 5. – М., 2020. – 600 с.; Т. 6. – М., 2022 – 472 с.
13. Красная книга Тамбовской области: Мхи, сосудистые растения, грибы, лишайники / А. С. Соколов, Л. А. Соколова, В. С. Третьяков, Е. Э. Мучник, Н. Н. Попова, М. К. Скрипникова, Е. В. Скрипникова, И. Б. Кирина, Л. Е. Борисова, Е. В. Варгот, И. А. Иванова, О. Г. Гришуткин, В. В. Глушков, А. Н. Гудина, А. А. Кондрашова, В. А. Распопов. Изд. 2-е, перераб. и доп. – Тамбов: ООО «ТПС», 2019. – 480 с.

BRYOFLORA OF EXISTING AND PROSPECTIVE PROTECTED AREAS OF THE NORTHEASTERN PRITSNINSKY LANDSCAPE AREA OF TYPICAL FOREST-STEPPE (TAMBOV REGION)

Popova N. N.

Voronezh State Academy of Sports, Voronezh, Russia
E-mail: leskea@vmail.ru

The purpose of this study is to assess the representativeness of the network of protected areas in the Northeastern Pritsninsky landscape area of a typical forest-steppe (Tambov region) The forest-steppe province of the Oka-Don plain in terms of preserving the biodiversity of such a component of biota as bryophytes. The area under study is confined to the Oka-Don watershed, in the east it is bounded by the valley of the Tsny River, in the south and west the border roughly coincides with the watershed of the Tsny and Don rivers. The area is flat and rugged, medium-sized. The relief-forming rocks are sandy-clay deposits of the Neogene of the Quaternary period. The dominant zonal soils are weakly and medium–leached chernozems of clay and loamy mechanical composition. Forests (about 10% of the area of the district) are represented by oak forests and mixed forests; pine forests with an abundance of boreal species have been preserved on the upper terraces.; Sedge-sphagnum swamps are found in the depressions. The steppes are represented by strongly transformed fragments associated with a sloping terrain type.

The network of protected areas of the district includes 1 state regional nature reserve "Morshansky" and 17 natural monuments of regional significance. Collections of mosses were carried out by the route method from 2014 to 2025. Herbarium collections are kept in the stock herbarium of the Galichya Gora Nature Reserve (VU).

The bryoflora of the Northeastern Pritsninsky landscape area, numbering 117 species, can be assessed as very rich – at least 60–70 % of the bryoflora of the entire Tambov region. The composition of the bryoflora is characterized by a high level of taxonomic, botanical, geographical, ecological and biological diversity, an abundance of rare species, mainly from boreal marsh species and non-morose epiphytes. Only 76 % of the species are represented in the existing protected areas. Only 22 % of the total bryoflora are frequent and abundant eurytopic species. The species has a sporadic distribution with low or moderate abundance – about 30 %. Almost the same proportion of species (31.5 %) has rather low rates of occurrence and abundance; rare, stenotic species – almost 17 %. 11 species (8 % of the species composition) are listed in the Red Book of the Tambov region and 2 species are recommended for inclusion in the next edition. Only half of the "Red Book" species have locations with full territorial protection, and about as many species have locations that are currently known to have no protected status. Pine and mixed forests have the highest level of species richness and specificity – 60 species / 20 % specific; rocky outcrops – 36/20 %, sphagnum swamps – 27 / 7 %. The bryoflora of oak forests and landscape gardens are similar in number and composition – 43 species (overall) / 37 % specific. The degree of duplication of characteristic landscapes in the current system of protected areas in the studied area is insufficient. Such types of tracts as oak forests, marsh-forest complexes, and steppes require urgent protection. It is advisable

to significantly increase the area of existing geological natural monuments and change their profile to a comprehensive one. Geological natural monuments (stratotypes of the Degtyansk and Kamennobrodsky strata), the Arapovskaya dacha tract, and oak forests near the village of Matyr have significant environmental value among the existing protected areas. It is recommended to protect 10 sites, of which the following are characterized by high biodiversity and a significant proportion of rare species: Steppe ravine near the village of Pogorelovka, Oak grove near the village of Kushushevo, Oak grove in the interfluve of the Bolshaya Lipovitsv and Tsna rivers, Marsh-borovoi complex near the village of Vikhlyaika, Old peat and alder mines near the village of Sarymovka.

***Keywords*:** bryoflora, bryophytes, natural monuments, protected areas, Red Book, rare species, representativeness, species diversity.

References

1. Milkov F. N. (ed.) *Physico-geographical zoning of the Central Chernozem regions*, 262 p. (Voronezh: Voronezh University Press, 1961).
2. *Order of the Ministry of Ecology and Natural Resources of the Tambov Region* dated 09.21.2023 No. 456 "On Approval of the List of Specially Protected Natural Territories of Regional Significance managed by the Tambov Regional State Budgetary Institution Directorate of Specially Protected Natural Territories of Regional Significance".
3. Popova N. N. *On the assessment of the representativeness of the network of protected areas of the Tambov region: a bryological aspect. Biodiversity and anthropogenic transformation of natural ecosystems*, 154 (Saratov: Saratov Source, 2018).
4. Popova N. N. *Bryoflora of sanatorium parks of the Tambov region. Flora and vegetation of the Central Chernozem region*, 200 (Kursk: Dream, 2019).
5. Popova N. N. Bryoflora of ancient manor parks of the Tambov region, *Botanical journal*, **104** (3), 363 (2019).
6. Popova N. N. Biodiversity of the moss component of oak forests of the Tambov region and its protection, *Conservation of forest ecosystems: problems and solutions*, 300 (Kirov, 2019).
7. Popova N. N. *Bryoflora of geological natural monuments of Central Russia*. Part 1, Flora and vegetation of the Central Chernozem region, 195 (Kursk: Dream, 2015).
8. Popova N. N. *Bryoflora of geological natural monuments of Central Russia*. Part 2, Flora and vegetation of the Central Chernozem region, 167 (Kursk: Dream, 2017).
9. Popova N. N. *Bryoflora of geological natural monuments of Central Russia*. Part 3, Flora and vegetation of the Central Chernozem region, 163 (Kursk: Dream, 2018).
10. Popova N. N. *Bryoflora of geological natural monuments of Central Russia*. Part 4, Flora and vegetation of the Central Chernozem region, 150 (Kursk: Dream, 2022).
11. Potemkin A. D., Sofronova E. V. *Liverworts and anthocerotes of Russia*, 368 p. (St. Petersburg.-Yakutsk, 2009).
12. *Flora of mosses of Russia,* M. S. Ignatov (ed.). Vol. 2., 560 p., (Moskow, 2017); Vol. 4., 543 p., (Moskow, 2018); Vol. 5, 600 p., (Moskow, 2020); Vol. 6, 472 p., (Moskow, 2022).
13. *The Red Book of the Tambov region: Mosses, vascular plants, fungi, lichens* ,480 p. A. S. Sokolov, L. A. Sokolova, V. S. Tretyakov, E. E. Muchnik, N. N. Popova, M. K. Skripnikova, E. C. Skripnikova, I. B. Kirina, L. E. Borisova, E. C. Vargot, I. A. Ivanova, O. G. Grishutkin, V. C. Glushkov, A. N. Gudina, A. A. Kondrashova, V. A. Raspopov. 2nd Ed., reprint. e supplement (Tambov: LLC "TPS", 2019).

Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского
Биология. Химия. Том 12 (78). 2026. № 2. С. 252–264.

УДК 582.282.112:635.054
DOI 10.5281/ZENODO.20794699

МУЧНИСТОРОСЯНЫЕ ГРИБЫ БОТАНИЧЕСКОГО САДА ИМ. Н. В. БАГРОВА КРЫМСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА ИМЕНИ В. И. ВЕРНАДСКОГО

Просянникова И. Б., Клименко Д. С.

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», Симферополь, Республика Крым, Россия
E-mail: aphanisomenon@mail.ru

На территории Ботанического сада Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского выявлен 21 вид мучнисторосяных грибов из семи родов (*Podosphaera, Phyllactinia, Erysiphe, Golovinomyces, Sawadaea, Blumeria, Neoerysiphe*) с преобладанием рода *Erysiphe* (7 видов), что составляет 33,3 % от общего количества видов грибов-паразитов. Определена частота встречаемости (обилие) эризифальных грибов по шкале Гааса и отмечены наиболее часто встречающиеся возбудители болезней растений, оказывающие негативное влияние на жизнеспособность и декоративные качества растений Ботанического сада. Мучнисторосяные грибы зарегистрированы на 29 видах растений, относящихся к 23 родам, 16 семействам и 16 порядкам отдела Покрытосеменные. Выявлены наиболее поражаемые семейства высших растений: Rosaceae, Aceraceae, Oleaceae и Betulaceae, что составляет 43 % от общего числа обнаруженных видов грибов-паразитов и делает эти группы растений приоритетными для дальнейшего мониторинга и разработки защитных мероприятий.
Ключевые слова: мучнисторосяные грибы, видовой состав питающих растений, Ботанический сад КФУ, Предгорный Крым.

ВВЕДЕНИЕ

Ботанический сад имени Н. В. Багрова Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского (БС КФУ) расположен в Крымской лесостепной зоне, которая соответствует Лесостепной зоне дубовых лесов и луговых степей Горнокрымской подпровинции Средиземноморской лесной области. Он был организован на основе ландшафтного парка «Салгирка» в 2004 году и находится на левом берегу реки Салгир (Предгорный Крым), занимая первую надпойменную террасу [1]. К настоящему времени площадь БС КФУ составляет 32,5 га. Сад разделён на зоны, каждая из которых выполнена в своём стиле. Таксономическое разнообразие древесно–кустарниковых растений за 20 лет увеличилось в 20 раз. Коллекция декоративных травянистых растений включает порядка 1,5 тысяч видов и культиваров. Общее количество деревьев и кустарников – более 20 тысяч особей [2].

Одним из видов научной работы ботанических садов является фитосанитарный мониторинг в сочетании с диагностикой и прогнозом развития и распространения вредных для растений организмов. Мучнисторосяные (эризифальные) грибы,

являясь облигатными паразитами растений, их существенно ослабляют, заметно снижают интенсивность фотосинтеза, уменьшают семенную продуктивность, способность к вегетативному возобновлению, а также наносят урон их декоративности. В результате выращивания монокультур, особенно интродуцированных видов и сортов, некоторые их заболевания принимают форму эпифитотий. Поэтому для поддержания декоративных свойств коллекций требуется обобщение сведений о структуре микобиоты, консортивно связанной с цветочно-декоративными растениями Ботанического сада. С 2005 года было начато изучение видового состава эризифальных грибов БС КФУ. Последний раз подобная инвентаризация проводилась в 2008 году [3]. С момента их первичного изучения прошло 18 лет, а, следовательно, возникла необходимость в проведении дополнительных исследований по изучению видового состава этой группы грибов–паразитов с учетом того факта, что сортимент декоративных растений БС КФУ за последние 15 лет значительно расширился. Цель исследования – изучение видового состава и частоты встречаемости мучнисторосяных грибов БС КФУ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились на территории БС КФУ детально-маршрутным методом осенью 2024 года и в течение вегетационного сезона 2025 года. Собранный материал обрабатывался по общепринятой методике и образцы паразитных грибов на питающих растениях гербаризировали с составлением стандартных этикеток [4]. Встречаемость фитопатогенных микромицетов (или показатель обилия вида) определяли с использованием шкалы Гааса [5]. Видовую идентификацию грибов-паразитов проводили путем приготовления временных препаратов с использованием отечественных и зарубежных определителей и справочной литературы [6–8]. Таксономический статус видов грибов приведен согласно международным базам: «Mycobank Database» [9] и «Index Fungorum» [10]; видовые названия и таксономическое положение растений-хозяев представлены в соответствии со сводкой «WFO The Plant List» [11].

Фотофиксацию симптомов заболевания растений и спороношения грибов-паразитов проводили с использованием метода световой микроскопии при помощи микроскопов прямого CX31RTSF, Olympus (Филиппины) и стереоскопического SZN71, Soptop (Китай).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Видовой состав мучнисторосяных грибов, зафиксированных на территории БС КФУ в течение вегетационного сезона 2024–2025 года, размещен в нижерасположенном списке с приведением соответствующего балла шкалы Гааса в скобках [5], с указанием субстрата, на котором были выявлены грибы-паразиты и даты обнаружения. Для представителей семейства Erysiphaceae указана стадия развития, в которой гриб был выявлен – анаморфы или телеоморфы.

Царство Грибы
Отдел Ascomycota
Класс Leotiomycetes

Порядок Helotiales
Семейство Erysiphaceae
Blumeria graminis (DC.) Speer (4)
на *Aegilops cylindrica* Host., листья, анаморфа, 30.05.2025; *Dactylis glomerata* L., листья, анаморфа, 30.05.2025; *Elytrigia repens* L., листья, телеоморфа, 30.05.2025; *Hordeum leporinum* Link., листья, телеоморфа, 30.05.2025.
Erysiphe alphitoides (Griffon & Maubl.) U. Braun & S. Takam (3)
на *Quercus robur* L., листья, анаморфа, 10.07.2025; листья, телеоморфа, 30.10.2024, 08.10.2025.
Erysiphe berberidis DC. (3)
на *Berberis thunbergii* DC., листья, телеоморфа, 28.09.2025; *Berberis vulgaris* L., листья, телеоморфа, 08.10.2025.
Erysiphe convolvuli DC. (1)
на *Convolvulus arvensis* L., листья, начало закладки телеоморфы, 28.09.2025.
Erysiphe corylacearum U. Braun & S. Takam (1)
на *Corylus avellana* L., адаксиальная часть листа, анаморфа, 10.07.2025.
Erysiphe macleayae R.Y. Zheng & G.Q. Chen (1)
на *Chelidonium majus* L., листья, начало закладки анаморфы, 30.10.2024, листья, анаморфа, 28.09.2025.
Erysiphe syringae Schwein (1)
на *Syringa vulgaris* L., листья, анаморфа, 28.09.2025.
Erysiphe elevata (Burrill) U. Braun & S. Takam. (2)
на *Catalpa bignonioides* Walter., листья, анаморфа, 30.10.2024; листья, телеоморфа, 28.09.2025.
Golovinomyces cichoracearum (DC.) Heluta. (4)
на *Solidago virgaurea* L., листья, анаморфа, 28.09.2025; *Symphyotrichum dumosum* (L.) G.L. Nesom, листья, анаморфа, 28.09.2025; *Rudbeckia laciniata var. hortensia* L.H., листья, анаморфа 28.09.2025; *Symphyotrichum novi-belgii* G.L. Nesom., листья, анаморфа, 08.10.2025.
Golovinomyces cynoglossi (Wallr.) V.P. Heluta (1)
на *Symphytum officinale* L., листья, анаморфа, 28.09.2025.
Neoerysiphe galeopsidis (DC.) U. Braun (2)
на *Lamium purpureum* L., листья, анаморфа, начало закладки телеоморфы, 30.05.2025.
Neoerysiphe galii (S. Blumer) U. Braun (1)
на *Galium aparine* L., листья, телеоморфа, 30.05.2025.
Phyllactinia fraxini (DC.) Fuss (1)
на *Fraxinus excelsior* L., листья, телеоморфа, 28.09.2025.
Phyllactinia guttata (Schltdl.) Lév (2)
на *Berberis vulgaris* L. *f. atropurpurea* Regel, листья, телеоморфа, 10.07.2025; *Corylus avellana* L., нижняя сторона листьев, анаморфа, 10.07.2025.
Phyllactinia mali (Duby) U. Braun (1)
на *Crataegus rhipidophylla* Gand., листья, телеоморфа, 28.09.2025.
Podosphaera clandestina (Wallr.) Lév (3)

на *Cydonia oblonga* Mill., листья, телеоморфа, 28.09.2025; листья, анаморфа 10.07.2025.
Podosphaera euphorbiae (Castagne) U. Braun & S. Takam (1)
на *Euphorbia marginata* Pursh., листья, анаморфа, 28.09.2025.
Podosphaera macularis (Wallr.) U. Braun & S. Takam (1)
на *Humulus lupulus* L., листья, анаморфа, 28.09.2025.
Podosphaera pannosa (Wallr.) de Bary, Abh (2)
на *Rosa hybrida*, листья, анаморфа, 30.10.2024; *Rosa hybrida hort «'Sylvia'»* W. Kordes Sohne., листья, анаморфа, 08.10.2025.
Sawadaea bicornis (Link) Homma (3)
на *Acer pseudoplatanus* L., листья, анаморфа, 28.09.2025; листья, телеоморфа, 30.10.2024; *Acer negundo «Flamingo»*, листья, анаморфа, начало закладки телеоморфы, 05.06.2025; *Acer negundo L.*, листья, анаморфа, 30.05.2025.
Sawadaea tulasnei (Fuckel) Homma (1)
на *Acer negundo* L., листья, телеоморфа, 28.09.2025.
Класс Dothideomycetes
Порядок Pleosporales
Семейство Phaeosphaeriaceae
Ampelomyces quisqualis Ces.
на *Golovinomyces cichoracearum* (DC.) Heluta на S*ymphyotrichum novi-belgii* G.L. Nesom., анаморфа, 28.09.2025.

В ходе исследования был идентифицирован 21 вид эризифальных грибов, принадлежащих к 7 родам: *Podosphaera, Phyllactinia, Erysiphe, Golovinomyces, Sawadaea, Blumeria, Neoerysiphe*. Наибольшее видовое разнообразие отмечено в роде *Erysiphe* (7 видов), что подчеркивает его доминирующее положение среди возбудителей мучнистой росы – 33,3 % (рис. 1).

В препаратах мучнистой росы на листьях растения *Symphyotrichum dumosum*, зараженного мучнисторосяным грибом *Golovinomyces cichoracearum,* нами был обнаружен гриб-гиперпаразит *Ampelomyces quisqualis* Ces., являющийся довольно распространенным микопаразитом представителей семейства Erysiphaceae (рис. 2). В течение вегетационного периода может появиться несколько генераций микопаразита *Amp. quisqualis*. На основе выделенной споровой массы *Amp. quisqualis* отечественными учеными был создан довольно эффективный биопрепарат под названием Ампеломицин [12], предназначенный для борьбы с эризифальными грибами путем сдерживания их роста. Препарат применяется на ценных сельскохозяйственных и декоративных культурах, что позволяет сократить количество обработок химическими фунгицидами и не наносить экологического ущерба природе.

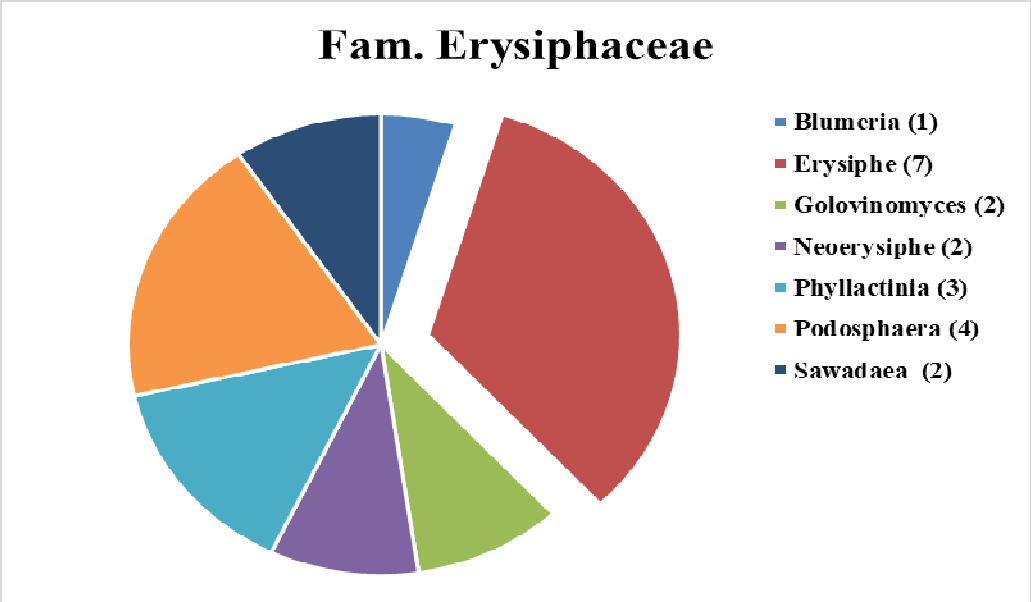
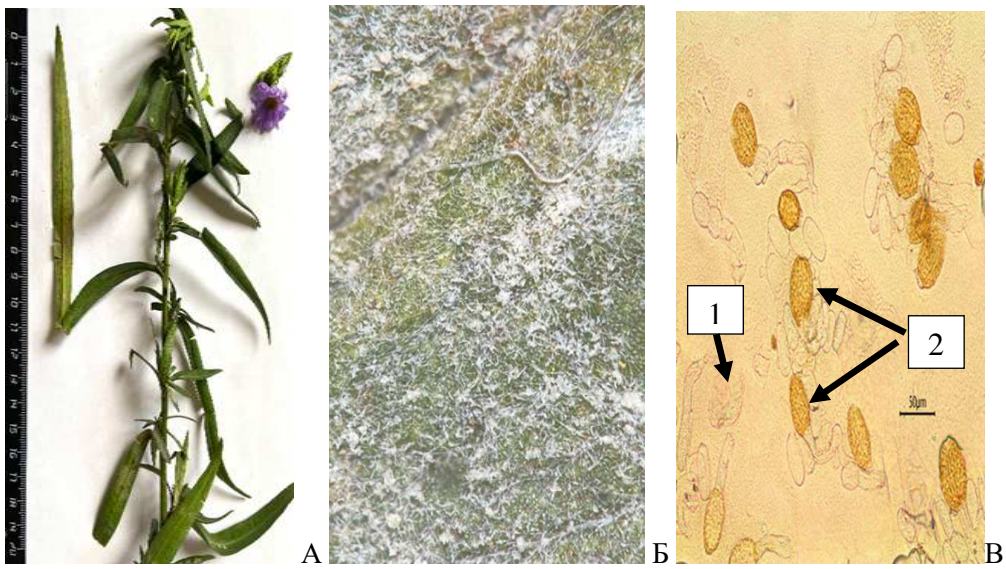


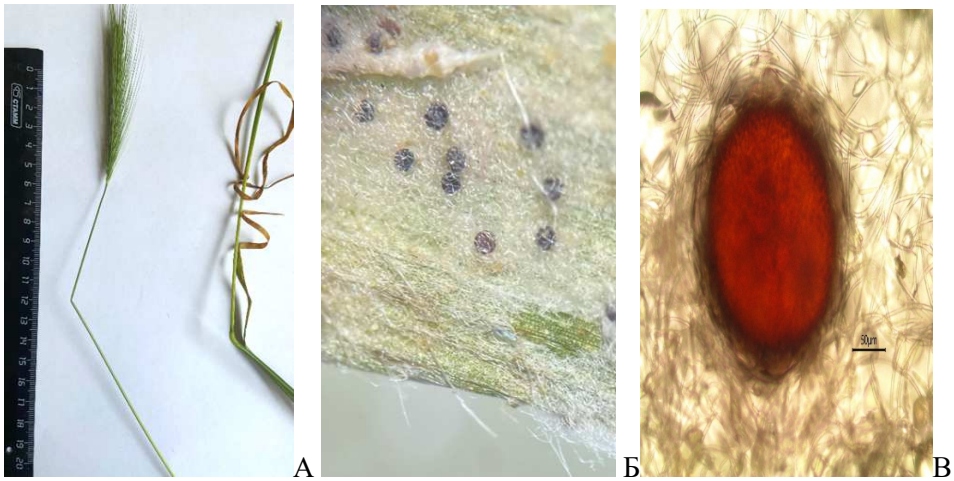
Рис. 1. Распределение видов паразитных грибов из семейства Erysiphaceae по родам.



А Б В

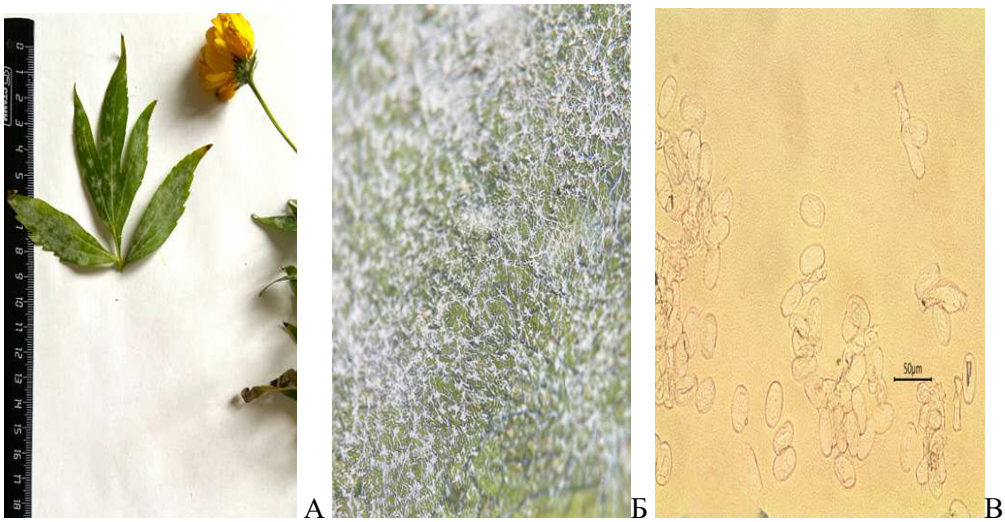
Рис. 2. *Golovinomyces cichoracearum* (DC.) Heluta на *Symphyotrichum dumosum* (L.) G.L. Nesom: А – внешний вид пораженного растения; Б – белый налет мицелия на листе (увел. х4,5); В – конидии эризифального гриба (1) (стадия анаморфы) и пикниды гриба-гиперпаразита *Ampelomyces quisqualis* Ces. (2).

По результатам данных вышеприведенного списка эризифальных грибов наиболее часто встречающимися на территории Ботанического сада являются следующие виды: *Blumeria graminis* (4 балла встречаемости по шкале Гааса) (рис. 3) и *Golovinomyces cichoracearum* (рис. 4). Эти виды характеризуются более широким распространением и регулярной встречаемостью в разных частях обследованной территории БС КФУ.



А Б В

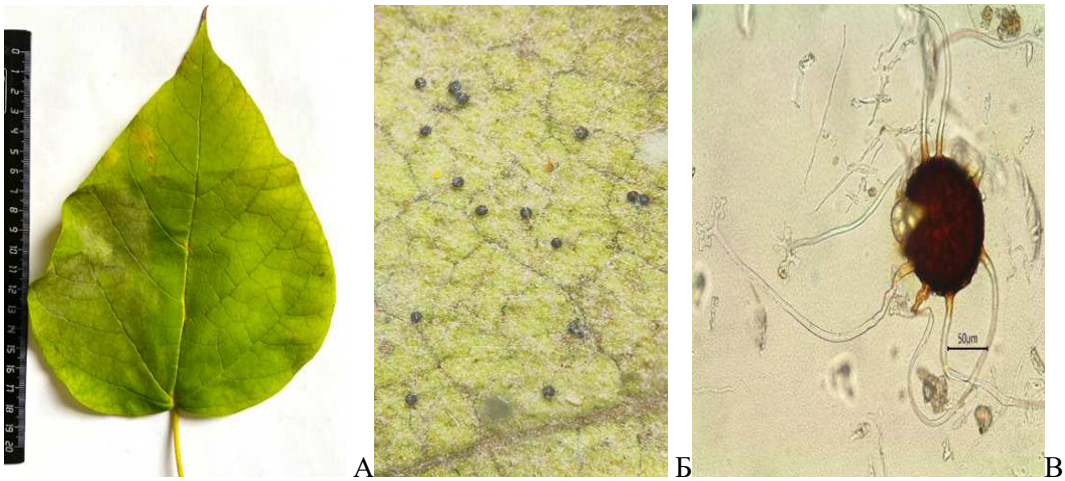
Рис. 3. *Blumeria graminis* (DC.) Speer на *Hordeum leporinum* Link.: А – внешний вид пораженного растения; Б – созревшие плодовые тела на листе (увел. х4,5); В – хазмотеций гриба (стадия телеоморфы).



А Б В

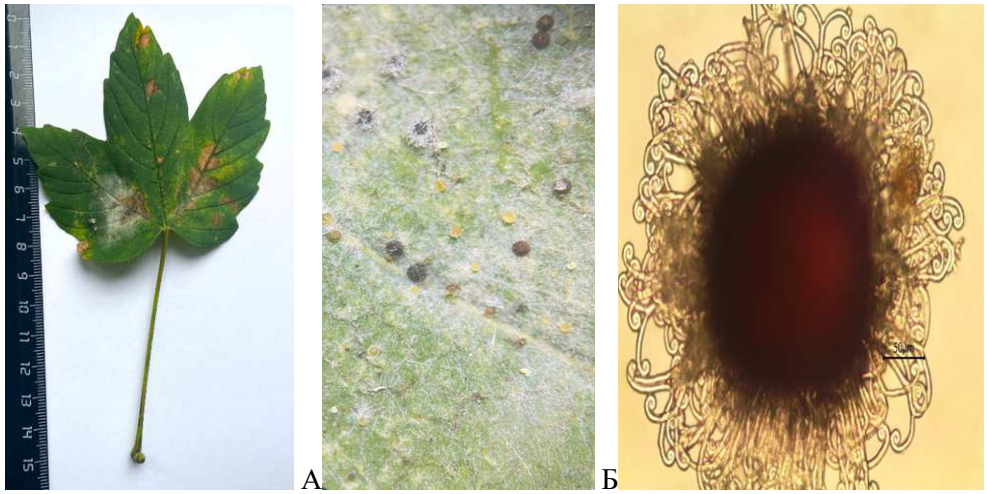
Рис. 4. *Golovinomyces cichoracearum* (DC.) Heluta на *Rudbeckia laciniata var. hortensia* L.H.: А – внешний вид пораженного растения; Б – белый налет мицелия на листе (увел. х4,5); В – конидии гриба (стадия анаморфы).

К группе наименее обильных по шкале Гааса относятся виды, зарегистрированные единично либо только в одном локусе: *Erysiphe convolvuli*, *Erysiphe corylacearum*, *Erysiphe macleayae, Erysiphe syringae*, *Golovinomyces cynoglossi*, *Neoerysiphe galii*, *Sawadaea tulasnei*, а также ряд других видов грибов-паразитов, отмеченных балом «2» – очень рассеянно или баллом «3» – неравномерно, рассеяно. К ним относятся: *Erysiphe elevata* (рис. 5), *Neoerysiphe galeopsidis*, *Podosphaera clandestina*, *Sawadaea bicornis* (рис. 6), *Erysiphe berberidis* (рис. 7) и др.



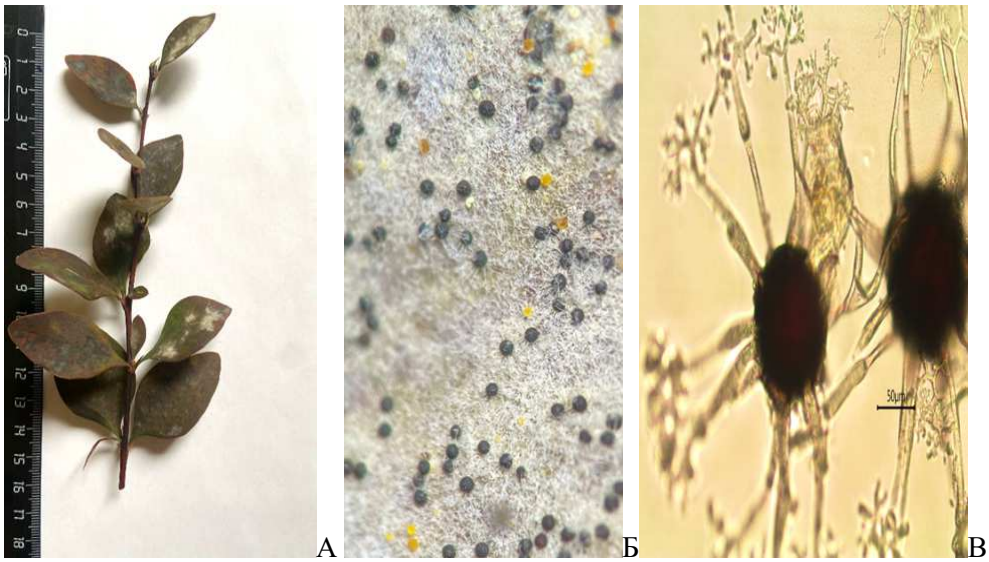
А Б В

Рис. 5. *Erysiphe elevata* (Burrill) U. Braun & S. Takam. на *Catalpa bignonioides* Walter.: А – внешний вид пораженного растения; Б – созревшие плодовые тела на листе (увел. х4,5); В – хазмотеций гриба с аскоспорами (телеоморфа).



А Б В

Рис. 6. *Sawadaea bicornis* (Link) Homma на *Acer pseudoplatanus* L.: А – внешний вид растения; Б – молодые и созревшие плодовые тела на листе (увел. х4,5); В – хазмотеций гриба (телеоморфа).



А Б В

Рис. 7. *Erysiphe berberidis* DC. на *Berberis vulgaris* L.: А – внешний вид пораженного растения; Б – созревшие плодовые тела на листе (увел. х4,5); В – хазмотеций гриба (телеоморфа).

Эризифальные микромицеты зарегистрированы на территории БС КФУ на 29 видах растений, относящихся к 23 родам, 16 семействам и 16 порядкам отдела Покрытосеменные. Из данных, представленных в таблице 1, наибольшее количество видов паразитных грибов приходится на семейства Rosaceae (3 вида), Oleaceae и Betulaceae и Aceraceae по 2 вида соответственно. По количеству видов растений-хозяев лидируют семейства Asteraceae, Poaceae и Rosaceae – по 4 вида, и Berberidaceae, Aceraceae – 3 вида. Остальные семейства высших растений (Betulaceae, Bignoniaceae, Boraginaceae, Cannabaceae, Convolvulaceae, Euphorbiaceae, Fagaceae, Lamiaceae, Papaveraceae, Rubiaceae) представлены единичными видами растений-хозяев.

Таблица 1

Распределение эризифальных грибов на территории Ботанического сада КФУ по семействам растений-хозяев

№ п/п	Семейство питающих растений	Количество	
		видов растений-хозяев	Видов грибов
1.	Aceraceae	3	2
2.	Asteraceae	4	1
3.	Berberidaceae	3	1

Продолжение таблицы 1

4.	Betulaceae	1	2
5.	Bignoniaceae	1	1
6.	Boraginaceae	1	1
7.	Cannabaceae	1	1
8.	Convolvulaceae	1	1
9.	Euphorbiaceae	1	1
10.	Fagaceae	1	1
11.	Lamiaceae	1	1
12.	Oleaceae	2	2
13.	Papaveraceae	1	1
14.	Poaceae	4	1
15.	Rosaceae	4	3
16.	Rubiaceae	1	1

Сведения о распределении видов облигатно-паразитных грибов по семействам растений-хозяев в процентном отношении отражены на рисунке 8. Наибольшее количество видов эризифальных грибов приходится на семейство Rosaceae (14,3 %), значительно меньшее – на Oleaceae, Betulaceae и Aceraceae (28,5 %), Asteraceae, Berberidaceae, Bignoniaceae, Boraginaceae, Cannabaceae, Convolvulaceae, Euphorbiaceae, Fagaceae, Lamiaceae, Papaveraceae, Poaceae, Rubiaceae представлены единичными видами грибов (по 4,8 % каждое).

В целом, на семейства Rosaceae, Aceraceae, Oleaceae, и Betulaceae приходится 43% от общего числа выявленных видов облигатно-паразитных грибов, на остальных двенадцать семейств высших растений приходится 57 %.

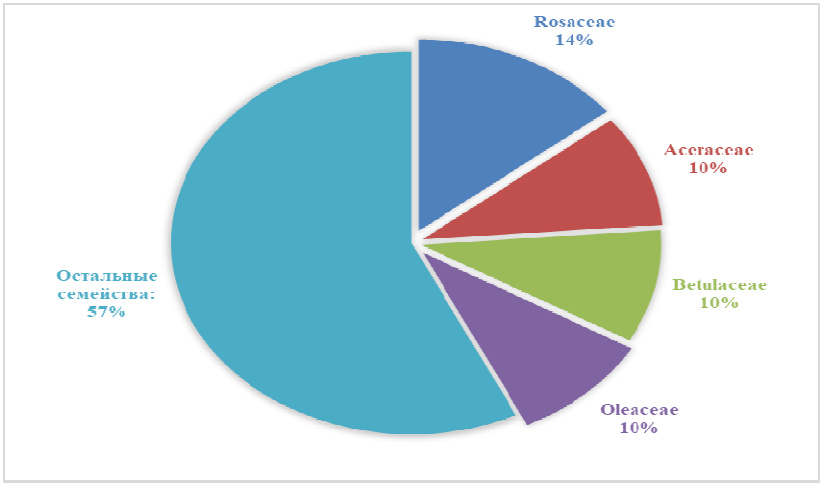
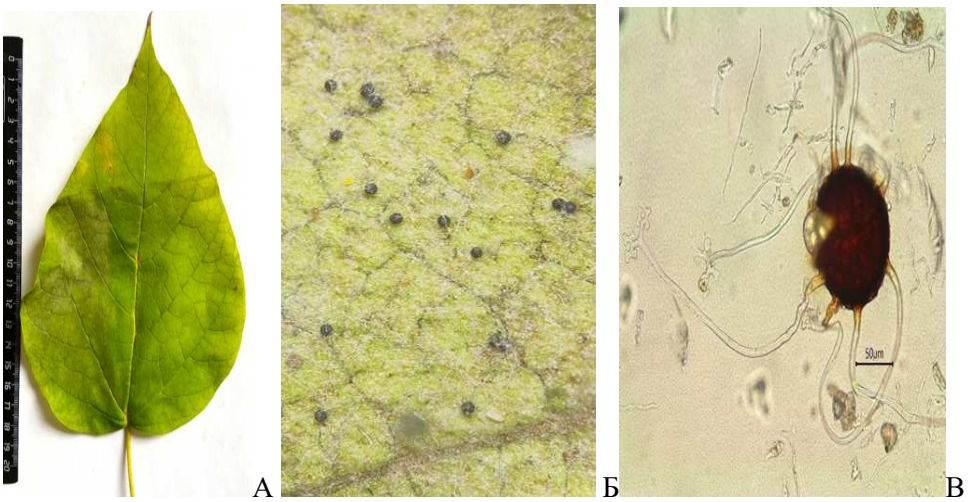


Рис. 8. Соотношение семейств растений-хозяев облигатно-паразитных микромицетов Ботанического сада КФУ, %.

Анализ трофических связей показал выраженную филогенетическую приуроченность облигатно-паразитных грибов к определённым систематическим группам растений-хозяев. Так, *Blumeria graminis* паразитирует исключительно на злаках семейства Poaceae; данный гриб был обнаружен на территории Ботанического сада КФУ на четырех видах растений-хозяев этого семейства.

Виды рода *Erysiphe* найдены на различных семействах высших растений: *Erysiphe alphitoides* выявлен на *Quercus robur* (Fagaceae), *Erysiphe berberidis* на *Berberis thunbergii u Berberis vulgaris* (Berberidaceae), *Erysiphe convolvuli* на *Convolvulus arvensis* (Convolvulaceae), *Erysiphe corylacearum* на *Corylus avellana* (Betulaceae) на адаксиальной стороне листа, *Erysiphe macleayae* на *Chelidonium majus* (Papaveraceae), *Erysiphe syringae* на *Syringa vulgaris* (Oleaceae), *Erysiphe elevata* (рис. 9) развивался на *Catalpa bignonioides* (Bignoniaceae). Таким образом, можно сделать вывод, что виды рода *Erysiphe* обладают широкой хост-специфичностью.



А Б В

Рис. 9. *Erysiphe elevata* (Burrill) U. Braun & S. Takam. на *Catalpa bignonioides* Walter.: А – внешний вид пораженного растения; Б – созревшие плодовые тела на листе (увел. х4,5); В – хазмотеций гриба с аскоспорами (телеоморфа).

Golovinomyces cichoracearum поражает растения из семейства Сложноцветные (Asteraceae) и в Ботаническом саду нами был выявлен данный гриб на четырех видах питающих растений вышеуказанного семейства: *Solidago virgaurea, Symphyotrichum dumosum, Rudbeckia laciniata var. Hortensia* и *Symphyotrichum novi-belgii*. *Erysiphe berberidis* и *Phyllactinia guttata* найдены на видах рода *Berberis*; интенсивность поражения этих растений-хозяев была высокой. Экспозиция Розария сотрудниками БС КФУ в течение вегетационного сезона периодически обрабатывалась фунгицидами, поэтому гриб *Podosphaera pannosa,* который

паразитирует только на различных сортах роз, был подавлен вследствие частых обработок и обнаруживался нами единично.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На территории Ботанического сада КФУ выявлен 21 вид эризифальных грибов из семи родов (*Podosphaera, Phyllactinia, Erysiphe, Golovinomyces, Sawadaea, Blumeria, Neoerysiphe*) с преобладанием рода *Erysiphe* (7 видов), что составляет 33,3 % от общего количества видов грибов-паразитов.
2. Определена частота встречаемости (обилие) эризифальных грибов по шкале Гааса и отмечены наиболее часто встречающиеся возбудители болезней растений, оказывающие негативное влияние на жизнеспособность и декоративные качества растений Ботанического сада.
3. Мучнисторосяные грибы зарегистрированы на 29 видах растений, относящихся к 23 родам, 16 семействам и 16 порядкам отдела Покрытосеменные.
4. Выявлены наиболее поражаемые семейства высших растений: Rosaceae, Aceraceae, Oleaceae и Betulaceae, что составляет 43 % от общего числа обнаруженных видов грибов-паразитов и делает эти группы растений приоритетными для дальнейшего мониторинга и разработки защитных мероприятий.
5. Отмечено присутствие гриба-гиперпаразита *Ampelomyces quisqualis*, что указывает на присутствие естественных механизмов регуляции численности эризифальных грибов.

Список литературы

1. Научное обоснование организации Ботанического сада Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. – Симферополь, 2004. – 63 с.
2. Репецкая А. И. Ботанический сад им. Н. В. Багрова / Репецкая А. И., Кравчук А. С. // Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского. – М. : Новые технологии, 2019. – 296 с.
3. Дзюненко Е. А. Мучнисторосяные грибы Ботанического сада Таврического национального университета им. В.И. Вернадского / Дзюненко Е. А., Просянникова И. Б. // «Экосистемы Крыма, их оптимизация и охрана». – 2008. – Вып. 18. – С. 108–111.
4. Благовещенская Е. Ю. Фитопатогенные микромицеты: учебный определитель / Благовещенская Е. Ю. // Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, биологический факультет. – Москва : Ленанд, 2015. – 232 с.
5. Леонтьев Д. В. Флористический анализ в микологии: учебник для студентов высших учебных заведений. / Леонтьев Д. В. – Харьков: ПП «Ранок-НТ», 2008. – 110 с.
6. Гелюта В. П. Флора грибов Украины. Мучнисторосяные грибы. Определитель. / Гелюта В. П. – Киев: Наук. Думка, 1989. – 256 с.
7. Дудка И. О. Гриби природних зон Криму. / Дудка И. О., Гелюта В. П., Тихоненко Ю. Я. и др. – К. : Фітосоціоцентр, 2004. – 452 с.
8. Braun U. Taxonomic Manual of the Erysiphales (Powdery Mildews). The Netherlands, Utrecht: CBS-KNAW / U. Braun, R. T. A. Cook // Fungal Biodiversity Centre. – 2012. – Vol. 11. – 707 p.
9. Mycobank [Электронная база данных]. – Режим доступа: http://www.mycobank.org (дата обращения: 10.02.2026).
10. Index Fungorum [Электронный международный интернет-ресурс]. – Режим доступа: www. Indexfungorum.com. (дата обращения: 10.02.2026).
11. WFO The Plant List [Электронный международный интернет-ресурс]. – Режим доступа: https://wfoplantlist.org/.(дата обращения: 10.02.2026).

12. Национальный биоресурсный центр (ВКПМ). Всероссийская коллекция промышленных микроорганизмов НИЦ Курчатовский институт [Электронный интернет-ресурс]. – Режим доступа: https://vkpm.genetika.ru/katalog-mikroorganizmov/cat4009005009006/ (дата обращения: 15.02.2026).

POWDERY MILDEW FUNGI OF THE N.V. BAGROV BOTANICAL GARDEN OF THE V.I. VERNADSKY CRIMEAN FEDERAL UNIVERSITY

Prosiannikova I. B., Klimenko D. S.

Federal V. I. Vernadsky Crimean University, Simferopol, Russia
E-mail: aphanisomenon@mail.ru

Since 2005, the study of the species composition of the powdery mildew (erisiphal) fungi of the Botanical Garden of the V. I. Vernadsky Crimean Federal University (BS KFU) has begun. The last time such an inventory was conducted was in 2008 [3]. 18 years have passed since their initial study, and, consequently, it became necessary to conduct additional research on the species composition of this group of parasitic fungi, taking into account the fact that the assortment of ornamental plants of the CFU BS has significantly expanded over the past 15 years. The purpose of this study is to study the species composition and frequency of occurrence of erysipelas CFCs.

Herbarium samples of parasitic fungi on higher plants were collected during the growing seasons of 2024–2025 using a detailed route method in plant communities and expositions of the Botanical Garden. The collected material was processed according to a generally accepted methodology [4, 5]. The nomenclature of micromycetes corresponds to international databases such as Mycobank and Index fungorum [9, 10]. The taxonomic position of the host plants is presented in accordance with the summary "WFO The Plant List" [11]. The study identified 21 species of powdery fungi belonging to 7 genera: *Podosphaera, Phyllactinia*, *Erysiphe, Golovinomyces, Sawadaea, Blumeria, Neoerysiphe*. The greatest species diversity was observed in the genus *Erysiphe* (7 species), which underlines its dominant position among the pathogens of powdery mildew – 33.3 %. In powdery mildew preparations on the leaves of the *Symphyotrichum dumosum* plant infected with the powdery mildew fungus *Golovinomyces cichoracearum*, we discovered the hyperparasitic fungus *Ampelomyces quisqualis* Ces., which is a fairly common mycoparasite of representatives of the Erysiphaceae family. The frequency of occurrence (abundance) of erysipelas fungi on the Gaas scale was determined and the most common plant pathogens that have a negative impact on the viability and decorative qualities of the plants of the Botanical Garden were noted. The most common species on the territory of the Botanical Garden are the following: *Blumeria graminis* (4 points of occurrence on the Gaas scale) (Fig. 2) and *Golovinomyces cichoracearum.* They are characterized by a wider distribution and regular occurrence in different parts of the surveyed territory of the CFU BS.

Erisiphal micromycetes have been registered in the territory of the BS KFU on 29 plant species belonging to 23 genera, 16 families and 16 orders of the Angiosperm department. The most affected families of higher plants have been identified: Rosaceae,

Aceraceae, Oleaceae and Betulaceae, which account for 43 % of the total number of detected species of parasitic fungi, which makes these plant groups a priority for further monitoring and development of protective measures. The remaining twelve families of higher plants account for 57 % of the fungal species found.

Keywords: powdery mildew fungi, species composition of feeding plants, KFU Botanical Garden, Piedmont Crimea.

References

1. *Scientific substantiation of the organization of the Botanical Garden of the Taurida National University named after V. I. Vernadsky* (Simferopol, 2004) (in Russ.).
2. Repetskaya A. I., Kravchuk A. S., *Bagrov Botanical Garden, V. I. Vernadsky Crimean Federal University* (New Technologies, Moscow, 2019) (in Russ.).
3. Dzyunenko E. A., Prosyannikova I. B., Powdery mushrooms of the Botanical Garden of the Tauride National University named after V.I. Vernadsky, *Ecosystems of the Crimea, their optimization and protection*, **18** (2008). (in Russ.).
4. Blagoveshchenskaya E. Y., *Phytopathogenic micromycetes: educational guide* (Publishing house Lenand, Moskow, 2015). (in Russ.).
5. Leontiev D. V., *Floristic analysis in mycology: textbook*. (Publishing house of the Osnova Group, Kharkov, 2007). (in Russ.).
6. Dudka I. O., Geluta V. P., Tichonenko Y. A. et al., *Fungi natural areas Crimea* (Institute of botany named after M.G. Cholododny), (Phytosotsiotsentr, Kiev, 2004). (in Ukr.).
7. Gelyuta V. P., *Flora of Ukraine fungi. Powdery mildews fungi* (Publishing House of Sciences Dumka, Kiev, 1989). (in Russ.).
8. Braun U., Cook R. T. A., *Taxonomic Manual of the Erysiphales* (Powdery Mildews) (Publishing House CBS-KNAW Fungal Biodiversity Centre, Utrecht, The Netherlands), 11 (2012).
9. *Mycobank Database* [electronic resource]. 2004. Access mode: http://www.mycobank.org (reference date: 10.01.2026).
10. *Index Fungorum* [electronic resource]. 2003. Access mode: http://www.indexfungorum.org [website, version 1.00] (reference date: 10.01.2026).
11. *WFO The Plant list* [electronic resource]. 2013. Access mode: http://www.theplantlist.org / (reference date: 10.01.2026).
12. *National Bioresource Center (VKPM). All-Russian collection of industrial microorganisms of the Scientific Research Center Kurchatov Institute* [electronic resource]. Access mode: https: //vkpm .genetika.ru/katalog-mikroorganizmov/cat4009005009006 / (reference date: 02.15.2026). (in Russ.).

Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского
Биология. Химия. Том 12 (78). 2026. № 2. С. 265–276.

УДК 581.1:546.824-31
DOI 10.5281/ZENODO.20795196

РЕАКЦИЯ ОВСА ПОСЕВНОГО НА ПРИСУТСТВИЕ НАНОЧАСТИЦ ДИОКСИДА ТИТАНА В ПИТАТЕЛЬНОМ СУБСТРАТЕ

Сытников Д. М., Мусса А., Косовская М. А, Губарев Ф. А.

Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия
E-mail: sytnikov@list.ru

В вегетационном эксперименте изучали реакцию овса посевного (*Avena sativa* L.) на присутствие в песчаном питательном субстрате наночастиц диоксида титана (TiO_2). Показано, что наночастицы в концентрациях 10, 100 и 1000 мг/кг могут стимулировать ризогенез овса, а также снижать содержание хлорофиллов *a* и *b* в листьях растений при сохранении компенсированной работы фотосинтетического аппарата. Повышенное содержание наночастиц в питательной среде (100 и 1000 мг/кг) приводит к снижению активности каталазы и росту активности пероксидазы в корнях и листьях, что служит показателем развития окислительного стресса и запуска адаптационных механизмов у растений. В этих условиях также наблюдалось увеличение числа зёрен в соцветиях овса, однако при максимальной дозе (1000 мг/кг) отмечалось снижение массы тысячи зёрен на 70 %. Воздействие наночастиц диоксида титана носит дозозависимый характер: от стимуляции отдельных ростовых показателей при низких концентрациях до выраженного фитотоксического эффекта при высоких.
Ключевые слова: *Avena sativa* L., наночастицы диоксида титана, фотосинтетические пигменты, антиоксидантные ферменты, структура урожая, продуктивность растений.

ВВЕДЕНИЕ

Широкое применение наночастиц металлов и их оксидов в промышленности, сельском хозяйстве и медицине, обусловленное их уникальными физико-химическими свойствами (высокая удельная поверхность и химическая активность), сопряжено с рисками загрязнения окружающей среды и негативного воздействия на живые организмы [1–4]. Проникновение наночастиц в клетки зависит от ряда характеристик – размера и формы частиц, их химического состава, поверхностного заряда (дзета-потенциала) и концентрации в суспензии. Важную роль также играют модификации поверхности (покрытие полиэтиленгликолем, целевыми лигандами и т.д.), которые могут целенаправленно регулировать клеточное поглощение. Следует отметить, что наноматериалы размером 1–100 нм проявляют биологическую активность, отличную от свойств того же вещества в макродисперсной форме [4, 5].

Последние исследования подтверждают эффективность использования наночастиц отдельных металлов в отношении растений [6] и животных [7]. Наночастицы диоксида титана (TiO_2) характеризуются рядом достоинств, среди которых фотокаталитическая активность, высокая химическая и термическая стабильность [8], а также сравнительно невысокая стоимость. Тем не менее,

требуется дальнейшее изучение биосовместимости наночастиц с живыми организмами. В частности, необходимо исследовать механизмы их поглощения и накопления, вызываемый у различных организмов окислительный стресс и токсическое действие, а также оценить потенциальные риски для экосистем в целом [2].

Необходимо исследовать отрицательное воздействие наночастиц металлов и их оксидов на различных уровнях биологической организации [9]. По имеющимся данным [10] наночастицы диоксида титана в высоких концентрациях не оказывают токсического действия на некоторые виды бактерий и низших ракообразных, однако их длительное воздействие может негативно сказываться на водных организмах, способствуя биоаккумуляции этих частиц [9]. Известно [2, 11] также, что проникновение наночастиц диоксида титана и других металлов в организм млекопитающих индуцирует токсические эффекты, опосредованные развитием окислительного стресса, запуском воспалительной реакции и последующим повреждением клеток. Единого установленного механизма действия для всех типов наночастиц нет.

Влияние наночастиц диоксида титана на растительные организмы зависит от их концентрации и вида растения. Показаны как положительные (стимуляция прорастания и роста, повышение содержания хлорофилла, фитопротекторные свойства), так и отрицательные (подавление ростовых реакций высокими концентрациями, окислительное повреждение тканей) эффекты [2, 12, 13]. Получены также результаты [14], указывающие на синергическое воздействие наночастиц диоксида титана и нанопластика, пагубно отражающееся на растениях.

Механизмы морфологических, клеточных и молекулярных изменений у растений под влиянием различных концентраций наночастиц металлов, а также сама направленность их воздействия на рост и развитие остаются недостаточно изученными. *Цель* данного исследования – изучить физиолого-биохимические изменения в развитии овса посевного (*Avena sativa* L.) в условиях присутствия различных концентраций наночастиц диоксида титана в питательном субстрате.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования был выбран овёс посевной (*Avena sativa* L.), сорт Скакун. Данный выбор обусловлен высокой устойчивостью сорта к абиотическим стрессам, таким как засуха, и биотическим факторам, включая корончатую ржавчину (*Puccinia coronata*) и пыльную головню (*Ustilago nuda*). Овёс является эффективным индикатором токсических воздействий благодаря своей чувствительности [15]. Он широко применяется в фитотестировании из-за стабильности и воспроизводимости получаемых результатов, рекомендован [16] для оценки уровня загрязнения почв тяжёлыми металлами и прочими веществами антропогенной природы.

Вегетационный опыт проводился в условиях фитотрона при постоянной влажности субстрата выращивания (60 %), контролируемой температуре (22–25 °C) и относительной влажности воздуха около 70 %. Уровень освещения от 20 000 люксов (lx), фотопериод – 24 ч (1–8 сут от посева) или 16 ч (с 9 сут). Семена

высевали в промытый речной песок из расчёта 35 шт. / сосуд (объём сосудов Вагнера – 7 кг). После прореживания в каждом вегетационном сосуде оставляли по 25 растений. Песчаный субстрат перед посевом обогащали питательной смесью Гельригеля [17], содержащей комплекс микроэлементов: H_3BO_3, MoO_3, $MnSO_4$, $CuSO_4$. В состав смеси входила *полная норма азота* (1,0) в виде нитрата кальция – 708 мг $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ на 1 кг песка.

Растения культивировали на песчаном питательном субстрате с добавлением наночастиц диоксида титана (TiO_2) в трёх концентрациях: 10, 100 и 1000 мг/кг. Характеристики наночастиц: размер – 49 нм, насыпная плотность – 0,5–2,0 г/см³ (согласно ТУ 1791-002-36280340-2005). В качестве контроля использовали растения, выращенные на субстрате, не содержащем наночастиц.

Отбор образцов для изучения физиолого-биохимических параметров осуществляли с наступлением следующих фаз развития растений: 1) двух листьев (8-е сут после всходов), 2) кущения (22-е сут), 3) начала колошения (48-е сут) и 4) твёрдой спелости зерна (70-е сут). Исследовали корни и листья растений среднего яруса, без признаков увядания; анализировалась структура урожая.

Содержание хлорофилла и *каротиноидов* определяли на фотометре КФК-3-01 («ЗОМЗ», Россия). Экстракцию проб растительного материала (0,1 г) проводили в диметилсульфоксиде (ДМСО) согласно методу Веллбёрна в течение 120 мин при 40 °С. Оптическую плотность измеряли при длинах волн 465, 649 и 665 нм (толщина кюветы – 1 см).

Для *оценки антиоксидантных свойств* растительных тканей анализировали активность ферментов пероксидазы (КФ 1.11.1.7) и каталазы (КФ 1.11.1.6). Анализ проводили в экстрактах, полученных путём гомогенизации сырого растительного материала в дистиллированной воде с последующим фильтрованием. Определение *пероксидазной активности* проводилось согласно методике [19], где фиксировалось время, необходимое для достижения определенной степени оптической плотности растворов вследствие реакции окисления бензидина с образованием окрашенных соединений. Определения проводили с красным светофильтром при длине волны 670 нм на фотометре марки КФК-3-01 («ЗОМЗ», Россия). При обработке результатов оптическую плотность пересчитывали на 1 г исходного растительного материала и 1 с, используя выражение $\Delta Д_{670}$ $г^{-1} \cdot с^{-1}$. Для оценки *каталазной активности* применяли газометрический способ [19], фиксируя объём выделившегося кислорода, нормируя данные на массу пробы и временной интервал (мл $O_2 \cdot г^{-1} \cdot мин^{-1}$).

Полученные экспериментальные данные обрабатывались *методами статистики*, изложенными в руководстве Доспехова [20]. Данные в таблицах представлены как среднее значение ± стандартная ошибка (SE). Различия между выборками считались статистически достоверными при $p \leq 0,05$ (по критерию НСР).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В вегетационном опыте изучали, как разные концентрации наночастиц диоксида титана (TiO_2) влияют на рост и развитие овса посевного (*Avena sativa* L.). Эксперимент заключался во внесении наночастиц в песчаный субстрат,

предварительно обогащённый питательными веществами, – в трёх тестовых дозировках: 10, 100, 1000 мг/кг.

Анализ данных таблицы 1 показывает, что достоверное влияние наночастиц диоксида титана (TiO_2) на накопление вегетативной массы овса по сравнению с контролем проявилось в фазу кущения. Внесение TiO_2 во всех исследованных концентрациях (10, 100 и 1000 мг/кг) стимулировало ризогенез, что выражалось в увеличении прироста корневой массы. Наиболее значительное увеличение надземной биомассы было зафиксировано при максимальной дозе (1000 мг/кг) также в фазу кущения. С наступлением начала колошения положительный эффект от использования диоксида титана в отношении надземной массы нивелировался. Полученные данные частично согласуются с сообщениями [12, 13] о положительном влиянии диоксида титана на рост растений, включая стимуляцию прорастания семян и увеличение содержания хлорофилла.

Таблица 1

Изменение показателей вегетативной массы (г/растение) овса посевного (*Avena sativa* L.), выращенного на субстрате с содержанием различных концентраций наночастиц диоксида титана

Концентрация наночастиц, мг/кг	Фаза развития растений				
	Двух листьев		Кущение		Начало колошения
	надземная масса	длина стебля, см	надземная масса	масса корня	надземная масса
0 (контроль)	0,22 ± 0,04	20,57 ± 1,74	0,95 ± 0,16	0,27 ± 0,04	2,35 ± 0,51
10	0,21 ± 0,03	19,87 ± 2,03	1,17 ± 0,19	0,59 ± 0,15*	2,77 ± 0,58
100	0,22 ± 0,03	21,27 ± 1,49	1,18 ± 0,17	0,47 ± 0,09*	2,15 ± 0,48
1000	0,22 ± 0,04	21,43 ± 1,57	1,28 ± 0,13*	0,57 ± 0,14*	2,67 ± 0,37

Примечание: «*» – разница достоверна в сравнении с контролем.

Физиологические возможности растений зависят от биохимической организации пигментного комплекса, качественный и количественный состав которого рассматривают [21] как один из возможных показателей адаптированности растений к условиям существования. В ходе исследований установлено, что внесение наночастиц диоксида титана в питательный субстрат приводит к достоверному снижению содержания хлорофиллов *a* и *b* в листьях овса посевного (фазы двух настоящих листьев и кущения), что отражено в таблице 2. Необходимо отметить, что выявленный эффект не зависел от использованных доз (10, 100 и 1000 мг/кг) наночастиц в субстрате, а в фазу колошения также нивелировался вместе с изменениями в нарастании надземной массы растений.

В норме соотношение хлорофиллов *a* и *b* (Chl *a* / Chl *b*) у большинства наземных растений колеблется в пределах 2,0–3,5. Отклонения от этого диапазона могут свидетельствовать об адаптивных перестройках пигментного комплекса [22]. Данный показатель может меняться под воздействием антропогенных факторов и в силу видовых особенностей растений, что отражает

либо преимущественное разрушение одного из пигментов, либо активацию синтеза другого.

Таблица 2

Фотосинтетические пигменты (мг/г сырой массы) в листьях овса посевного (*Avena sativa* L.) при различных концентрациях наночастиц диоксида титана в субстрате выращивания

Концентрация наночастиц, мг/кг	Фаза развития растений								
	Двух листьев			Кущение			Начало колошения		
	a	*b*	*car*	*a*	*b*	*car*	*a*	*b*	*car*
0 (контроль)	2,08 ± 0,02	0,81 ± 0,02	0,33 ± 0,02	2,64 ± 0,06	1,33 ± 0,09	0,34 ± 0,02	1,50 ± 0,27	0,61 ± 0,15	0,20 ± 0,02
10	1,76 ± 0,16*	0,80 ± 0,16	0,26 ± 0,03	2,10 ± 0,11*	0,86 ± 0,06*	0,30 ± 0,02	2,01 ± 0,23	0,71 ± 0,01	0,22 ± 0,01
100	1,84 ± 0,04*	0,75 ± 0,01*	0,27 ± 0,08	2,10 ± 0,30*	0,88 ± 0,12*	0,29 ± 0,03	1,93 ± 0,23	0,79 ± 0,23	0,21 ± 0,01
1000	1,75 ± 0,12*	0,65 ± 0,07*	0,29 ± 0,02	2,38 ± 0,07*	0,95 ± 0,04*	0,35 ± 0,01	2,02 ± 0,25	0,94 ± 0,19	0,19 ± 0,01

Примечание: «*» – разница достоверна в сравнении с контролем.

Внесение наночастиц диоксида титана в субстрат не оказывало статистически значимого влияния на соотношение фотосинтетических пигментов в листьях овса посевного (см. табл. 2). На протяжении исследованных фаз развития растений (фаза двух листьев, кущения и начала колошения) соотношение хлорофиллов *a/b* оставалось в диапазоне 2,0–2,8, что свидетельствует о сохранении компенсированной работы их фотосинтетического аппарата.

Важными компонентами антиоксидантной системы растений, помимо их роли в фотосинтезе, являются каротиноиды. Эти соединения выполняют защитную функцию, нейтрализуя свободные радикалы, которые образуются в клетках листьев и других органов в ходе метаболических процессов [23]. Согласно полученным данным, содержание каротиноидов у *Avena sativa* L. не претерпевало существенных изменений под влиянием наночастиц диоксида титана в питательном субстрате (см. табл. 2).

Ключевую роль в регуляции окислительных процессов клетки играют ферменты пероксидаза и каталаза, обеспечивающие утилизацию пероксида водорода и поддержание окислительно-восстановительного гомеостаза. Изменения в качестве и активности этих ферментов могут служить индикатором реакции растений на неблагоприятные условия окружающей среды и использоваться для оценки их способности адаптироваться к этим условиям [24].

В листьях овса посевного, выращенного на субстрате с добавлением наночастиц диоксида титана в концентрациях 100 и 1000 мг/кг, было зафиксировано достоверное снижение активности каталазы по сравнению с контрольным вариантом на всех фазах развития (табл. 3). В то же время отмечено достоверное повышение активности пероксидазы листьев в фазах кущения и начала колошения.

Так, в фазу начала колошения у растений овса, выращенных на субстрате с максимальной концентрацией наночастиц диоксида титана (1000 мг/кг), зафиксировано статистически значимое снижение активности каталазы до минимального значения – 8,20 ± 0,09 мл $O_2 \cdot г^{-1} \cdot мин^{-1}$. Этот эффект может являться биохимическим маркером развития окислительного стресса в ответ на токсическое воздействие наночастиц, что отражает адаптационные возможности растительного организма в неблагоприятных условиях.

Таблица 3

Влияние различных концентраций наночастиц диоксида титана в субстрате выращивания на активность антиоксидантных ферментов листьев овса посевного (*Avena sativa* L.)

Концентрация наночастиц, мг/кг	Фаза развития растений					
	Двух листьев		Кущение		Начало колошения	
	каталаза, мл $O_2 \cdot г^{-1} \cdot мин^{-1}$	пероксидаза, $\Delta Д_{670} г^{-1} \cdot с^{-1}$	каталаза, мл $O_2 \cdot г^{-1} \cdot мин^{-1}$	пероксидаза, $\Delta Д_{670} г^{-1} \cdot с^{-1}$	каталаза, мл $O_2 \cdot г^{-1} \cdot мин^{-1}$	пероксидаза, $\Delta Д_{670} г^{-1} \cdot с^{-1}$
0 (контроль)	13,89 ± 0,96	0,86 ± 0,02	14,97 ± 0,68	0,73 ± 0,02	13,42 ± 0,11	0,51 ± 0,01
10	13,87 ± 0,49	0,85 ± 0,02	13,87 ± 0,49	0,77 ± 0,02	13,20 ± 0,11	0,61 ± 0,01*
100	11,11 ± 0,48*	0,89 ± 0,01	12,32 ± 0,43*	0,81 ± 0,02*	11,66 ± 0,82*	0,67 ± 0,01*
1000	8,87 ± 0,49*	0,86 ± 0,01	9,99 ± 0,84*	0,83 ± 0,01*	8,20 ± 0,09*	0,70 ± 0,01*

Примечание: «*» – разница достоверна в сравнении с контролем.

Анализ данных, представленных в таблице 4, показывает, что активность антиоксидантных ферментов была распределена неравномерно между органами растения. В корнях овса посевного наблюдался более низкий уровень активности каталазы и пероксидазы по сравнению с листьями надземной части (см. табл. 3). При внесении наночастиц диоксида титана в концентрациях 100 и 1000 мг/кг наблюдались достоверные изменения активности изученных ферментов: активность каталазы уменьшалась, а активность пероксидазы увеличивалась. Обнаруженные эффекты в изменении активности антиоксидантных ферментов в корнях овса посевного в целом соответствовали данным по особенностям их активности в листьях растений (см. табл. 3).

Одним из ключевых механизмов фитотоксического действия наночастиц является индукция окислительного стресса, сопряжённая с избыточным накоплением в растительных тканях активных форм кислорода (АФК). При этом описана [24] двойственная роль наночастиц: они могут сами выступать как триггеры окислительного стресса или как факторы-адаптогены, способствующие подавлению стресса и повышению эффективности антиоксидантной системы растений при действии других негативных факторов. Снижение активности каталазы при одновременном повышении активности пероксидазы в листьях *Avena sativa* L. свидетельствует о развитии окислительного стресса и запуске адаптационных механизмов растения в ответ на токсическое действие повышенных концентраций диоксида титана в питательном субстрате.

Таблица 4

Влияние различных концентраций наночастиц диоксида титана в субстрате выращивания (фаза кущения) на активность антиоксидантных ферментов корней овса посевного (*Avena sativa* L.)

Концентрация наночастиц, мг/кг	Каталаза, мл ($O_2 \cdot г^{-1} \cdot мин^{-1}$)	Пероксидаза ($\Delta Д_{670}\, г^{-1} \cdot с^{-1}$)
0 (контроль)	5,56 ± 0,48	0,19 ± 0,01
10	5,10 ± 0,09	0,21 ± 0,01
100	4,11 ± 0,25*	0,25 ± 0,01*
1000	3,11 ± 0,20*	0,25 ± 0,01*

Примечание: «*» – разница достоверна в сравнении с контролем.

Согласно данным, представленным в таблице 5, внесение в питательный субстрат наночастиц TiO_2 в изучаемом диапазоне концентраций (10–1000 мг/кг) не привело к статистически значимым изменениям основных элементов структуры урожая овса посевного. В частности, высота растений и длина их соцветий оставались на уровне контрольных значений. В то же время концентрации 100 и 1000 мг/кг вызывали достоверное увеличение количества зёрен в метёлке. Однако данный эффект не приводил к увеличению урожайности, поскольку масса тысячи зёрен оставалась сопоставимой с контролем или статистически значимо снижалась.

Таблица 5

Оценка влияния различных концентраций наночастиц диоксида титана, внесённых в питательный субстрат, на элементы структуры урожая овса посевного (*Avena sativa* L.)

Концентрация наночастиц, мг/кг	Высота растения, см	Длина соцветия, см	Зерно		
			шт./соцветие	г/сосуд	масса 1000 шт., г
0 (контроль)	82,17 ± 5,71	13,14 ± 1,24	8,37 ± 1,18	6,52 ± 0,59	31,16 ± 2,82
10	86,45 ± 6,71	13,06 ± 1,68	8,56 ± 1,87	6,03 ± 0,84	28,18 ± 3,92
100	84,92 ± 5,38	14,50 ± 1,68	16,20 ± 2,13*	11,30 ± 0,14*	27,90 ± 0,54
1000	86,65 ± 6,35	13,71 ± 1,38	13,70 ± 2,14*	7,51 ± 0,19	21,93 ± 0,55*

Примечание: «*» – разница достоверна в сравнении с контролем.

Масса тысячи зёрен овса обычно варьирует в зависимости от сорта, климатических условий и агротехнических приёмов, средние показатели колеблются в пределах от 25 до 45 г / 1000 шт. Выращивание овса на питательном субстрате, содержащем 1000 мг/кг наночастиц диоксида титана (см. табл. 5), приводило к снижению массы тысячи зёрен на 70 %. Это свидетельствует об отрицательном влиянии на продукционный процесс высоких доз наночастиц диоксида титана, вносимого в субстрат выращивания растений.

Полученные данные свидетельствуют о том, что снижение урожайности овса посевного (*Avena sativa L.*) обусловлено комплексом физиолого-биохимических изменений. К ним относятся снижение содержания фотосинтетических пигментов на ранних этапах развития и модуляция активности антиоксидантных ферментов. Воздействие наночастиц диоксида титана носит дозозависимый характер: в определённом диапазоне концентраций оно может быть нейтральным или стимулировать ризогенез и формирование зерна, тогда как при высоких дозах проявляется фитотоксичность, ингибирующая продуктивность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Наночастицы диоксида титана обладают преимуществами, такими как фотокаталитическая активность, стабильность и дешевизна получения, однако требуется изучение их биосовместимости с живыми организмами и возможного токсического влияния в экосистемах. Они могут как стимулировать рост растений, так и вызывать окислительный стресс и нежелательные эффекты. При этом механизмы их воздействия на растения и другие организмы остаются недостаточно изученными.
2. Внесённые в субстрат выращивания овса посевного (*Avena sativa* L.) наночастицы диоксида титана снижают содержание хлорофиллов *a* и *b* в листьях растений в фазах двух настоящих листьев и кущения, независимо от используемой концентрации (10, 100 и 1000 мг/кг). В фазу колошения этот эффект нивелировался. Стабильность соотношения хлорофиллов *a/b* в диапазоне 2,0–2,8 на всех этапах онтогенеза свидетельствует о сохранении компенсированной работы фотосинтетического аппарата, несмотря на снижение общего содержания пигментов.
3. Присутствие в питательном субстрате повышенных концентраций наночастиц диоксида титана (100 и 1000 мг/кг) снижает активность каталазы и повышает активность пероксидазы листьев и корней овса посевного, что указывает на проявление окислительного стресса и адаптацию растений к сложившимся условиям существования. Эти изменения могут быть связаны с накоплением активных форм кислорода и ролью наночастиц как триггеров стресса.
4. Содержание в субстрате выращивания овса посевного наночастиц диоксида титана может приводить к стимуляции ризогенеза. Повышенные концентрации наночастиц (100 и 1000 мг/кг) ведут к увеличению количества зёрен в соцветиях, в то же время высота растений и длина их соцветий остаются без изменений. Выращивание овса на питательном субстрате, содержащем 1000 мг/кг наночастиц диоксида титана, снижало массу тысячи зёрен на 70 %, что свидетельствует о токсическом воздействии высоких концентраций наночастиц на растения.

Список литературы

1. Negrescu A. M. Metal oxide nanoparticles: review of synthesis, characterization and biological effects / A. M. Negrescu, M. S. Killian, S. N. V. Raghu [et al.] // Journal of Functional Biomaterials. – 2022. – Vol. 13, Iss. 4. – P. 274. – DOI: 10.3390/jfb13040274.

2. Авалдугубах М. Биологическая роль наночастиц металлов и их оксидов / М. Авалдугубах, Д. М. Сытников, Ф. А. Губарев // Экологический Вестник Северного Кавказа. – 2025. – Т. 21, № 4. – С. 13–28. – EDN AWXMUK.
3. Ahmad F. Unique properties of surface-functionalized nanoparticles for bio-application: functionalization mechanisms and importance in application / F. Ahmad, M. M. Salem-Bekhit, F. Khan [et al.] // Nanomaterials (Basel). – 2022. – Vol. 12, Iss. 8. – P. 1333. – DOI: 10.3390/nano12081333.
4. Дыкман Л. А. Взаимодействие растений с наночастицами благородных металлов / Л. А. Дыкман, С. Ю. Щёголев // Сельскохозяйственная биология. – 2017. – Т. 52, № 1. – С. 13–24. – DOI: 10.15389/agrobiology.2017.1.13rus.
5. Schwab F. Barriers, pathways and processes for uptake, translocation and accumulation of nanomaterials in plants – critical review / F. Schwab, G. Zhai, M. Kern [et al.] // Nanotoxicology. – 2016. – Vol. 10, Iss. 3. – DOI: 10.3109/17435390.2015.1048326.
6. Пономарёв Ю. О. Экономическое обоснование применения нанопорошков металлов и микроэлементов в кормопроизводстве и семеноводстве клевера в Нечернозёмной зоне России / Ю. О. Пономарёв, А. Г. Прудникова, А. Д. Прудников, С. В. Семченкова // Московский экономический журнал. – 2017. – № 1. – С. 109–119. – EDN YKMUCL.
7. Michalak I. The effect of metal-containing nanoparticles on the health, performance and production of livestock animals and poultry / I. Michalak, K. Dziergowska, M. Alagawany // Veterinary Quarterly. – 2022. – Vol. 42, № 1. – P. 68–94. – DOI: 10.1080/01652176.2022.2073399.
8. Структура, свойства и фитопротекторные функции нанопорошков диоксида титана и водных суспензий на их основе / О. А. Шилова, Г. Г. Панова, С. В. Мякин [и др.] // Журнал неорганической химии. – 2021. – Т. 66, № 5. – С. 669–677. – DOI: 10.31857/S0044457X21050184.
9. Токсическое действие наноматериалов на основе металлов на представителей морских экосистем / И. А. Васюкова, О. В. Захарова, В. В. Чайка [и др.] // Российские нанотехнологии. – 2021. – Т. 16, № 2. – С. 175–194. – DOI: 10.1134/S1992722321020175.
10. Toxicity of nanosized and bulk ZnO, CuO and TiO2 to bacteria *Vibrio fischeri* and crustaceans *Daphnia magna* and *Thamnocephalus platyurus* / M. Heinlaan, A. Ivaska, I. Blinova [et al.] // Chemosphere. – 2008. – Vol. 71. – P. 1308–1316. – DOI: 10.1016/j.chemosphere.2007.11.047.
11. Шарафутдинова Л. А. Влияние наночастиц диоксида титана на структурные особенности гиппокампа крыс / Л. А. Шарафутдинова, В. В. Валиуллин // Морфологические ведомости – Morphological Newsletter. – 2018. – Т. 26, № 2. – С. 32–37. – DOI: 10.20340/mv-mn.18(26).02.32-37.
12. Полонский В. И. Оценка воздействия наночастиц диоксида титана на живые организмы / В. И. Полонский, А. А. Асанова // Теоретическая и прикладная экология. – 2018. – № 3. – С. 5–11. – DOI: 10.25750/1995-4301-2018-3-005-011.
13. Влияние наночастиц диоксида титана и оксида алюминия на морфофизиологические параметры растений / Т. П. Астафурова, Ю. Н. Моргалёв, А. П. Зотикова [и др.] // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2011. – № 1 (13). – С. 113–122. – EDN NGAZSR.
14. Titanium dioxide nanoparticles enhance the detrimental effect of polystyrene nanoplastics on cell and plant physiology of *Vicia lens* (L.) Coss. & Germ. seedlings / C. Spanò, L. Giorgetti, S. Bottega [et al.] // Front. Plant Sci. – 2024. – Vol. 15. – P. 1391751. – DOI: 10.3389/fpls.2024.1391751.
15. Сытников Д. М. Реакция овса посевного на присутствие наночастиц алюминия в питательном субстрате / Д. М. Сытников, А. Мусса, Ф. А. Губарев // Учёные записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия. – 2025. – Т. 11 (77), № 1. – С. 179–188. – DOI 10.29039/2413-1725-2025-11-1-179-188.
16. Методика выполнения измерений всхожести семян и длины корней проростков высших растений для определения токсичности техногенно-загрязненных почв. ФР 1.39.2006.02264. – СПб, 2009.
17. Гельригель Г. Опыт с удобрением и вегетационный опыт / Г. Гельригель; Пер. с нем. [и предисл.] С.В. Щусьев. – Одесса : «Славянская» тип. Н. Хрисогелос, 1898. – [2], II, 26 с.
18. Wellburn A. R. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolutions / A. R. Wellburn // J. Plant Physiol. – 1994. – Vol. 144, N 3. – P. 307–313. – DOI: 10.1016/S0176-1617(11)81192-2.
19. Воскресенская О. Л. Большой практикум по биоэкологии. Ч. 1 : учеб. пособие / Мар. гос. ун-т; О. Л. Воскресенская, Е. А. Алябышева, М. Г. Половникова. – Йошкар-Ола, 2006. – 107 с. – ISBN 5-94808-239-3

20. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) : учебник [для студентов высших с.-х. учеб. заведений по агроном. спец.] / Б. А. Доспехов ; Б. А. Доспехов. – Изд. 6-е, стер., перепеч. с 5-го изд. 1985 г. – М.: Альянс, 2011. – 351 с. – ISBN 978-5-903034-96-3.
21. Зотикова А. П. Экофизиологические реакции листового аппарата кедра сибирского на изменение климата / А. П. Зотикова, О. Г. Бендер, Т. И. Рудник // Оптика атмосферы и океана. – 2006. – Т. 19, № 11. – С. 969–972. – EDN KVCEHP.
22. Дымова О. В. Фотосинтетические пигменты в растениях природной флоры таёжной зоны европейского северо-востока России / О. В. Дымова, Т. К. Головко // Физиология растений. – 2019. – Т. 66, № 3. – С. 198–206. – DOI: 10.1134/S0015330319030035.
23. Кавеленова Л. М. К методологии экофизиологических исследований листьев древесных растений / Л. М. Кавеленова, Е. В. Малыхина, С. А. Розно, Ю. В. Смирнов // Поволж. экол. журн. – 2008. – № 3. – С. 200–210. – EDN JWOQFX.
24. Венжик Ю. В. Участие наночастиц металлов и их оксидов в регуляции про- / антиоксидантного баланса у высших растений / Ю. В. Венжик, А. Н. Дерябин // Физиология растений. – 2023. – Т. 70, № 2. – С. 133–147. – DOI: 10.31857/S0015330322600371.

REACTION OF OAT PLANTS TO THE PRESENCE OF TITANIUM DIOXIDE NANOPARTICLES IN THE NUTRIENT SUBSTRATE

Sytnikov D. M., Moussa A., Kosovskaya M. A., Gubarev F. A.

Sevastopol State University, Sevastopol, Russia
E-mail: sytnikov@list.ru

Titanium dioxide nanoparticles have advantages such as photocatalytic activity, stability and low cost, but their biocompatibility with living organisms and toxic effects in ecosystems need to be studied. They can both stimulate plant growth and cause oxidative stress and undesirable effects. However, the mechanisms of their effects on plants and other organisms remain insufficiently studied.

The study was conducted on oat plants (*Avena sativa* L.). The Skakun variety used is resistant to drought, lodging, grain loss, and diseases, including crown rust and loose smut. The pot experiment was carried out in a phytotron at constant substrate moisture (60 %), controlled temperature (22–25 °C), and a relative air humidity of approximately 70 %. Illumination was at least 20,000 lux. Seeds were sown in washed river sand in Wagner vessels with a capacity of 7 kg. A Gelriegel mineral mixture was added to the sandy substrate before sowing. Plants grown on a sandy nutrient substrate containing nanotitanium oxide (TiO_2) at three different concentrations were studied: 10, 100, and 1000 mg/kg. Particle size was 49 nm.

Chlorophyll and carotenoid content were measured using the Wellburn method. Peroxidase activity was determined using a method that records the time required for solutions to reach a certain optical density following the oxidation of benzidine, resulting in the formation of colored compounds. Catalase activity was determined gasometrically and calculated based on the volume of oxygen released. The paper presents average values with standard errors; significant differences between samples were assessed using the least significant difference (LSD) at $p \leq 0,05$.

The reaction of oats to the presence of titanium dioxide (TiO_2) nanoparticles in the plant growing substrate was studied under conditions of vegetation experiments. Nanoparticles introduced into the substrate for growing oats reduce the content of chlorophylls *a* and *b* in plant leaves in the phases of two true leaves and tillering, regardless of the concentration used (10, 100 and 1000 mg/kg). During the heading phase, this effect was leveled out. The chlorophyll *a/b* ratio remained within the normal range (2,0–2,8) in all phases of plant development, which indicates a compensated operation of the photosynthetic apparatus.

The presence of increased concentrations of titanium dioxide nanoparticles (100 and 1000 mg/kg) in the nutrient substrate reduces the activity of catalase and increases the activity of peroxidase in the leaves and roots of oats, which indicates the manifestation of oxidative stress and adaptation of plants to living conditions. These changes are associated with the accumulation of reactive oxygen species and the role of nanoparticles as stress triggers.

The content of titanium dioxide nanoparticles in the oat growing substrate leads to stimulation of rhizogenesis. Increased concentrations of nanoparticles (100 and 1000 mg/kg) lead to an increase in the number of grains in inflorescences, while at the same time the height of plants and the length of their inflorescences remain unchanged. Growing oats on a nutrient substrate containing 1000 mg/kg titanium dioxide nanoparticles leads to a 70 % reduction in the weight of a thousand grains, which indicates a toxic effect on plants.

Keywords: *Avena sativa* L.*,* titanium dioxide nanoparticles, photosynthetic pigments, antioxidant enzymes, crop structure, plant productivity.

References

1. Negrescu A. M., Killian M. S., Raghu S. N. V. Metal oxide nanoparticles: review of synthesis, characterization and biological effects, *Journal of Functional Biomaterials*. **13**, 4 (2022). DOI: 10.3390/jfb13040274.
2. Avaldugubakh M., Sytnikov D. M, Gubarev F. A. Biological role of nanoparticles of metals and their oxides, *Ekologicheskiy vestnik Severnogo Kavkaza* [*The North Caucasus Ecological Herald*]. **21**, 4 (2025). EDN AWXMUK. (*in Russ.*).
3. Ahmad F., Salem-Bekhit M. M., Khan F. [et al.] Unique properties of surface-functionalized nanoparticles for bio-application: functionalization mechanisms and importance in application, *Nanomaterials* (Basel). **12**, 8 (2022). DOI: 10.3390/nano12081333.
4. Dykman L. A., Shchyogolev S. Yu. Interactions of plants with noble metal nanoparticles (review), *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya* [*Agricultural Biology*]. **1** (2017). DOI: 10.15389/agrobiology.2017.1.13rus. (*in Russ.*).
5. Schwab F., Zhai G., Kern M. [et al.] Barriers, pathways and processes for uptake, translocation and accumulation of nanomaterials in plants – Critical review, *Nanotoxicology*. **10**, 3 (2016). DOI: 10.3109/17435390.2015.1048326.
6. Ponomarev Yu. O., Prudnikova A. G., Prudnikov A. D., Semchenkova S. V. Economic justification for the use of nanopowders of metals and microelements in fodder production and clover seed production in the Non-Chernozem zone of Russia, *Moskovskiy ekonomicheskiy zhurnal* [*Moscow Economic Journal*]. **1** (2017). EDN YKMUCL. (*in Russ.*).
7. Michalak I., Dziergowska K., Alagawany M. The effect of metal-containing nanoparticles on the health, performance and production of livestock animals and poultry, *Veterinary Quarterly*. **42**, 1 (2022). DOI: 10.1080/01652176.2022.2073399.

8. Shilova O. A., Kovalenko A. S., Nikolaev A. M. [et al.]. Structure, properties, and phytoprotective functions of titanium dioxide nanopowders and their aqueous suspensions. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. **66**, 5 (2021). DOI 10.1134/S0036023621050181.
9. Vasyukova I. A., Zakharova O. V., Chaika V. V. [et al.], Toxic effect of metal-based nanomaterials on representatives of marine ecosystems: a review. *Nanobiotechnology Reports*. **16**, 2 (2021). DOI 10.1134/S2635167621020178.
10. Heinlaan M., Ivaska A., Blinova I. [et al.], Toxicity of nanosized and bulk ZnO, CuO and TiO2 to bacteria *Vibrio fischeri* and crustaceans *Daphnia magna* and *Thamnocephalus platyurus*. *Chemosphere*. **71**. (2008). DOI: 10.1016/j.chemosphere.2007.11.047.
11. Sharafutdinova L. A., Valiullin V. V. The influence of the titanium dioxide nanoparticles on structural features of the rats hippocampus, *Morfologicheskiye vedomosti* [*Morphological newsletter*]. **26**, 2 (2018). DOI: 10.20340/mv-mn.18(26).02.32-37. (*In Russ*.).
12. Polonskiy V. I., Asanova A. A. Assessment of titanium dioxide nanoparticle effects on living organisms, *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* [*Theoretical and applied ecology*]. **3** (2018). DOI: 10.25750/1995-4301-2018-3-005-011. (*In Russ*.).
13. Astafurova T. P., Morgalev Yu. N., Zotikova A. P. [et al.], Effect of nanoparticles of titanium dioxide and aluminum oxide on some morphophysiological characteristics of plants. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*. *Biologiya* [*Bulletin of Tomsk State University. Biology*]. **1**, 13 (2011). EDN NGAZSR. (*In Russ*.).
14. Spanò C., Giorgetti L., Bottega S. [et al.].Titanium dioxide nanoparticles enhance the detrimental effect of polystyrene nanoplastics on cell and plant physiology of *Vicia lens* (L.) Coss. & Germ. seedlings. *Front. Plant Sci*. **15** (2024). DOI: 10.3389/fpls.2024.1391751.
15. Sytnikov D. M., Moussa A., Gubarev F. A. Reaction of oat plants to the presence of aluminum nanoparticles in the nutrient substrate, *Uchyonye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Biologiya. Khimiya* [*Scientific Notes of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry*]. **11**, 1. (2025). DOI: 10.29039/2413-1725-2025-11-1- 179-188. (*in Russ.*).
16. *Methodology for measuring seed germination and root length of higher plant sprouts to determine the toxicity of technogenically contaminated soils.* FR 1.39.2006.02264. St. Petersburg, 2009. (*in Russ.*).
17. Gelrigel G. *Experiment with fertilizer and vegetation experiment*, 26 p. (Odessa: «Slavic» printing house. N. Chrysogelos, 1898.). (*in Russ.*).
18. Wellburn A. R. The spectral determination of chlorophylls *a* and *b*, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolutions, *J. Plant Physiol*. **144**, 3 (1994). DOI: 10.1016/S0176-1617(11)81192-2.
19. Voskresenskaya O. L., Alyabysheva E. A., Polovnikova A. G. *Large practical course on bioecology. P. I : manual*, 107 p. (Yoshkar-Ola: Mar. state university, 2006). ISBN 5-94808-239-3. (*in Russ.*).
20. Dospekhov B. A. *Field experiment methodology (with the basics of statistical processing of research results) : textbook,* 351 p. (Moskow: Alliance, 2011). ISBN 978-5-903034-96-3. (*in Russ.*).
21. Zotikova A. P., Bender O. G., Rudnic T. I. Physiologic reactions of siberian cedar leaves to variations of climate, *Optika atmosfery i okeana* [*Optics of the Atmosphere and Ocean*]. **19**, 11 (2006). EDN KVCEHP. (*In Russ*.).
22. Dymova O. V., Golovko T. K. Photosynthetic pigments in plants of the natural flora of the taiga zone of the European north-east of Russia, *Fiziol. Rast*. [*Russian Journal of Plant Physiology*]. **66**, 3 (2019). DOI: 10.1134/S0015330319030035. (*in Russ.*).
23. Kavelenova L. M., Malykhina E. V., Rozno S. A., Smirnov Yu. V. On the methodology of tree leaf ecophysiological studies, *Povolzhskiy ekologicheskiy zhurnal* [*Povolzhsky ecological zhournal*]. **3** (2008). EDN JWOQFX. (*in Russ.*).
24. Venzhik Yu. V., Deryabin A. N. Participation of metal nanoparticles and their oxides in the regulation of pro- / antioxidant balance in higher plants, *Fiziologiya rasteniy* [Plant Physiology]. **70**, 2 (2023). DOI: 10.31857/S0015330322600371. (*in Russ.*).

Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского
Биология. Химия. Том 12 (78). 2026. № 2. С. 277–293.

УДК 573.6:57.04:615.214.22
DOI 10.5281/ZENODO.20795302

ИЗМЕНЕНИЕ ЛАТЕНТНОГО ПЕРИОДА БОЛЕВОЙ РЕАКЦИИ КРЫС В ГИПОМАГНИТНЫХ УСЛОВИЯХ

Хусаинов Д. Р., Бульхина С. Д., Туманянц К. Н., Аидинов И. Д., Согрин Д. А.

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», Симферополь, Республика Крым, Россия
E-mail: gangliu@yandex.ru

В настоящей работе была поставлена цель выяснить шестидневную динамику латентного периода болевой реакции крыс (ЛПБР) в гипомагнитных условиях при ежедневной и однократной (на шестой день) его регистрации. Выяснено, что в гипомагнитных условиях с коэффициентом экранирования 7,62 при ежедневной регистрации ЛПБР крыс его значение сокращается, что указывает на усиление болевой чувствительности животных. Эффект сокращения среднего значения ЛПБР на шестой день регистрации наблюдается как при ежедневном тестировании животных в болевых тестах «Горячая пластина» и «Отдергивание хвоста», так и при однократной регистрации. Следовательно, процесс обучения и формирования рефлекса избегания не является ключевым фактором и эффект сокращения значения ЛПБР, в первую очередь, обусловлен воздействием гипомагнитной среды.
Ключевые слова: болевая чувствительность, гипомагнитные условия, магнитосфера Земли.

ВВЕДЕНИЕ

Выяснение особенностей влияния ослабления геомагнитного поля на различные живые системы, определение возможных механизмов этого воздействия является заметной темой многих научных исследований [1–7]. Весомая доля публикаций посвящена изучению функциональных изменений в биологических системах в модельных условиях, которые приближены к характеристикам космического полета [1–3, 8]. Но в своей повседневной жизни многие люди сталкиваются с гипомагнитными условиями с намного меньшими коэффициентами ослабления магнитного поля, которые, также, значительно изменяют функциональное состояние живых систем [9]. В наших предыдущих работах было показано, что в гипомагнитной среде с коэффициентом экранирования 7–8 раз наблюдается существенная перестройка болевой чувствительности крыс: первоначально развивается гиперальгезия, затем показатели возвращаются к исходному уровню и, даже, развивается гипоальгезия [10, 11]. При этом, первичная фаза усиления болевой чувствительность развивается на первой неделе экранирования. Также, нами было показано, что наблюдаемый эффект двунаправленного изменения болевой чувствительности достаточно хорошо воспроизводится при повторении эксперимента, но длительность гипер- и гипоальгезии может отличаться [10]. Кроме того, крайне важным остается вопрос о влиянии процесса обучения крыс, особенно

в момент усиления болевой чувствительности, которая в существенной степени может определятся формирующимся рефлексом активного избегания негативного стимула. В связи с этим, в настоящей работе мы поставили следующую цель: выяснить шестидневную динамику латентного периода болевой реакции крыс в гипомагнитных условиях при ежедневной и однократной (на шестой день) регистрации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Полный экспериментальный период состоял из отборочного этапа, который был реализован 28.10.2024 (понедельник). На отборочном этапе осуществлялась фоновая регистрация латентного периода болевой реакции (ЛПБР) крыс и формировались все необходимые группы животных. После этого отборочного процесса крысы всех групп оставались в стандартных условиях вивария до начала основного экспериментального этапа. Основной исследовательский этап с использованием тестов «Горячая пластина» и «Отдергивание хвоста» длился с 11.11.2024 по 16.11.2024 года. Отметим, что крысы групп магнитного экранирования помещались в гипомагнитные условия 10 ноября 2024 года (воскресенье) для того, чтобы 11 ноября был первый день их нахождения в гипомагнитных условиях.

Исследование латентного периода болевой реакции (ЛПБР) крыс в тесте «Горячая пластина» (“Hot Plate” Bioseb, France) было реализовано на 40-ка крысах-самцах (линия Wistar) возрастом 7 месяцев, которые разделялись на 4 группы по 10 особей:

1 – контроль-ГП 1 (n = 10) – животные находились в нативных условиях вивария и ежедневно тестировались в тесте «Горячая пластина» в течении шести дней (понедельник – суббота);

2 – контроль-ГП 2 (n = 10) – животные находились в нативных условиях вивария и тестировались в тесте «Горячая пластина» один раз: в субботу;

3 – Магнитное экранирование – Горячая пластина 1 (МЭ-ГП 1, n = 10) – животные находились в гипомагнитных условиях и ежедневно тестировались в тесте «Горячая пластина» с понедельника по субботу включительно;

4 – Магнитное экранирование – Горячая пластина 2 (МЭ-ГП 2, n = 10) – животные находились в гипомагнитных условиях и тестировались в тесте «Горячая пластина» один раз: в субботу.

ЛПБР крыс всех групп в тесте «Горячая пластина» регистрировался по стандартной методике: температура пластины 55 ^{0}C, болевая реакция – облизывание лап или подпрыгивание, как правило, с яркой вокализацией. После каждого животного установка тщательно протиралась до суха, выжидалось время до стабилизации температуры платформы на уровне 55 ^{0}C.

Для регистрации ЛПБР в тесте «Отдергивание хвоста» (“Tail flick” Panlab, Spain) также формировались четыре группы крыс по 7 особей в каждой и все экспериментальные условия соответствовали описанным для предыдущих групп животных, но для соответствующей маркировки использовалось слово «Хвост». В тесте «Отдергивание хвоста» для регистрации ЛПБР животные помещались в фиксирующий пенал, фокус светового потока был выставлен на значение 60 единиц

от максимального значения 99. Также, в предварительном отборе выбирались те животные, которые отдергивали хвост в ответ на болевой стимул, а не пытались выбраться из пенала.

Ослабление фонового магнитного поля осуществлялось с помощью камеры, изготовленной из двухслойного железа “динамо”, размером 2×3×2 м. Более подробно характеристики экранирующей камеры описаны нами в предыдущей публикации [11].

Контрольные группы животных в текущем исследовании находились в стандартных условиях вивария. Для определения значений индукции магнитного поля магнитометром Honeywell HMR 2300 (Honeywell Microelectronics & Precision Sensors, США) осуществлялась ее регистрация в виварии, а также внутри экранирующей камеры по месту расположения стеллажей с группами животных. По результатам текущих измерений коэффициент ослабления, рассчитанный по модулю магнитной индукции, составлял 7,62 раза, что сопоставимо с условиями предыдущих исследований [11]. Все результаты проведенных измерений и расчетное значение коэффициента ослабления представлены далее в таблице 1.

Таблица 1

Значения магнитной индукции в виварии и в экранирующей камере (аудитория №328-Б) с указанием коэффициентов ослабления.

Характеристики индукции МП	Виварий	Экранирующая камера	Коэффициент ослабления
По оси X	17,86 мкТл	1,5 мкТл	11,91
По оси Y	20,31 мкТл	0,5 мкТл	40,62
По оси Z	38,78 мкТл	6 мкТл	6,46
Модуль магнитной индукции ($\vec{B}$)	47,28 мкТл	6,2 мкТл	7,62

Суточная длительность нахождения всех животных в гипомагнитных условиях составляла 19 часов, ежедневно с 10.00 до 15.00 животные всех групп в своих домашних клетках размещались в открытом пространстве лаборатории этологии.

Статистический анализ всех массивов осуществлялся в программе GraphPadPrism 8.0 с использованием описательной статистики, соответствие распределения данных закону Гаусса определялось методом «Normality of Residuals». Для всех массивов было показано параметрическое распределение, поэтому для множественного сравнения применялся дисперсионный анализ и критерий Даннета; при попарном сравнении – Т-критерий Стьюдента для независимых выборок.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Первоначально рассмотрим шестидневную динамику ЛПБР контрольных животных, которые тестировались в горячей пластине. Отметим, что фоновое значение ЛПБР составляло 4,00±0,25 с, на 1 день – 4,11±0,19 с без достоверного уровня отличий. Следовательно, несмотря на то, что между фоновым и первым

экспериментальным днем был заметный перерыв, но ЛПБР крыс в этих измерительных позициях был полностью сопоставимым. Значит, болевая чувствительность животных контрольной группы находилась в стабильном состоянии, и зафиксированная величина представляла свойственное крысам контрольной группы значение в первый день недели – понедельник. При ежедневной (в течении шести дней) регистрации ЛПБР в тесте «Горячая пластина», его продолжительность сокращалась и демонстрировала достоверные отличия на 4-тый и 5-тый дни тестирования по сравнению с первым днем регистрации. Реальное значение ЛПБР крыс контрольной группы на 4 день составляло 3,10±0,21 с при $p \leq 0,01$ по сравнению с фоновым днем и на 5 день – 2,91±0,22 с ($p \leq 0,01$), также, по сравнению с фоном.

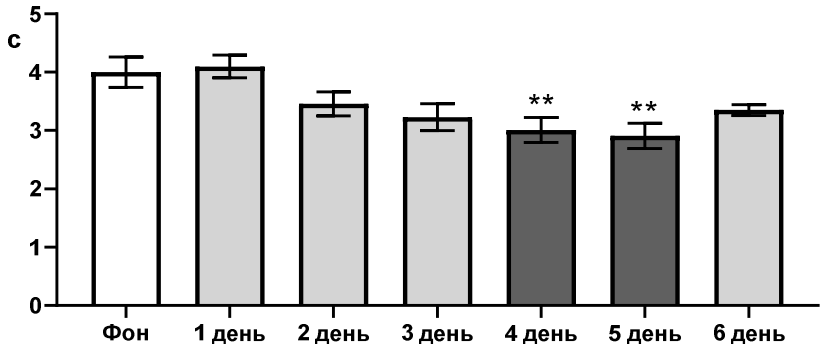


Рис. 1. Шестидневная динамика латентного периода болевой реакции контрольных крыс в тесте «Горячая пластина» (контроль-ГП 1).
Примечания: ** – отличия от показателя фонового дня при $p \leq 0,01$; 1 день – показатель латентного периода болевой реакции в первый день ежедневной регистрации. Далее первая цифра соответствует дню тестирования.

При использовании болевого теста «Отдергивание хвоста» в контрольной группе крыс (контроль-Хвост 1) по шестидневной динамике ЛПБР были получены результаты схожие с теми, что уже описаны для теста «Горячая пластина». Так, к четвертому дню тестирования ЛПБР достоверно сокращался от среднего значения 3,26±0,21 с в фоновый день до 2,47±0,13 с при $p \leq 0,01$. На пятый день регистрации ЛПБР в среднем равнялся 2,74±0,22 с при $p < 0,05$ по сравнению со значением в фоновый день (рис. 2).

Таким образом, по шестидневной динамике ЛПБР крыс-самцов двух контрольных групп показано достоверное снижение этого показателя к четвертому дню тестирования, при этом на шестой день ЛПБР возвращается к фоновому значению. Выявленная зависимость позволяет предположить, что обнаруженные изменения ЛПБР связаны с обучением крыс или соответствуют их естественной биоритмологии болевой чувствительности, или оба эти процесса присутствуют одновременно.

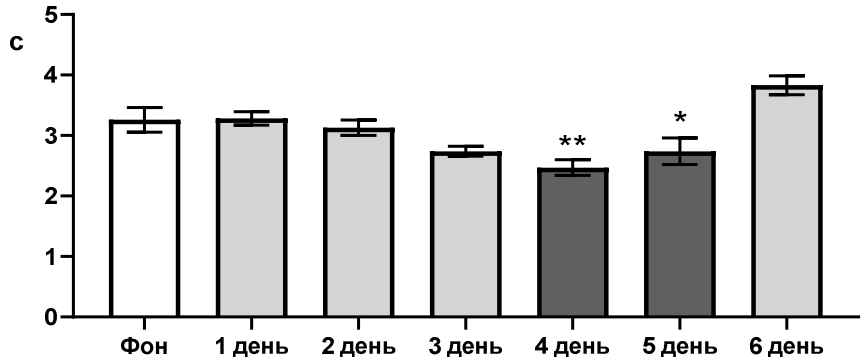


Рис. 2. Шестидневная динамика латентного периода болевой реакции контрольных крыс в тесте «Отдергивание хвоста» (контроль-Хвост 1).
Примечание: обозначения, что и на рисунке 1.

Далее представлены шестидневные динамики ЛПБР крыс-самцов двух групп, которые в течении шести дней находились в гипомагнитных условиях. Величина фонового ЛПБР у животных группы МЭ-ГП 1 в среднем составляла 3,93±0,26 с, на 1 день равнялась 3,46±0,26 с (рисунок 3). При ежедневной регистрации ЛПБР постепенно сокращался и изменения достигали достоверного уровня значимости уже ко второму дню регистрации. Так, на второй день этот показатель составлял 2,80±0,25 с при $p \leq 0,01$ по сравнению с фоновым днем, на 3-тый день – 2,58±0,25 с при $p \leq 0,001$, на 4-тый день – 2,07±0,18 с при $p \leq 0,001$, на 5-тый день – 1,82±0,14 с при $p \leq 0,001$ и на 6 день – 1,59±0,15 с при $p \leq 0,001$.

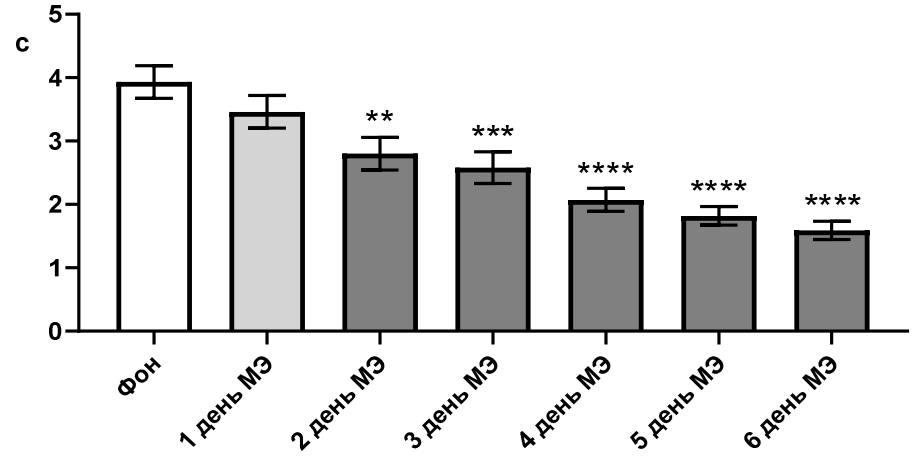


Рис. 3. Шестидневная динамика латентного периода болевой реакции крыс в тесте «Горячая пластина» в гипомагнитных условиях (МЭ-ГП 1).
Примечания: *** – отличия от показателя фонового дня при $p \leq 0,001$; остальные обозначения, что и на рисунке 1.

В шестидневной динамике ЛПБР крыс группы МЭ-Хвост 1 наблюдалось зависимость близкая к таковой у группы МЭ-ГП 1 (рис. 4). К четвертому дню регистрации ЛПБР животных достоверно сокращался от среднего фонового значения 3,35±0,20 с до величины 1,97±0,17 с при $p \leq 0,01$. На пятый день регистрации ЛПБР в среднем составлял 1,84±0,25 с ($p < 0,05$); на шестой день – 1,33±0,16 с ($p \leq 0,001$).

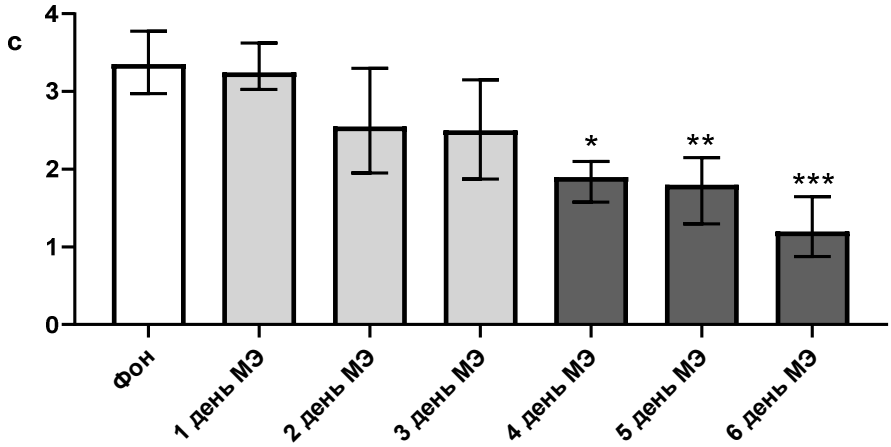


Рис. 4. Шестидневная динамика латентного периода болевой реакции крыс в тесте «Отдергивание хвоста» в гипомагнитных условиях (группа МЭ-Хвост 1).
Примечания: обозначения, что и на рисунке 3.

Полученные результаты подтверждают, что в гипомагнитных условиях ЛПБР крыс-самцов демонстрирует выраженное сокращение по сравнению с фоновым значением и эти изменения, вероятно, более выражены по сравнению с динамикой ЛПБР контрольных животных. Именно для подтверждения этого предположения был проведен статистический анализ ЛПБР контрольных крыс и группы МЭ по каждому из двух болевых тестов.

Сравнение динамики значений ЛПБР крыс группы контроль-ГП 1 и МЭ-ГП 1 визуализировано на рисунке 5. Из представленных на рисунке динамик ЛПБР двух групп видно, что по значению этого показателя достоверные отличия проявляются с 4 дня регистрации болевой реакции в тесте «Горячая пластина». На 4-тый день регистрации ЛПБР в группе контроль-ГП 1 в среднем равнялся 3,10±0,21 с в группе МЭ-ГП 1 в среднем составлял 2,07±0,18 с при уровне значимости отличий $p < 0,05$; на 5-тый день – 2,91±0,22 с (контроль-ГП 1) и 1,82±0,14 с (МЭ-ГП 1) при $p \leq 0,01$; на 6-той день – 3,35±0,11 с (контроль-ГП 1) и 1,59±0,15 с (МЭ-ГП 1) при $p \leq 0,0001$.

Следовательно, гипералъгезия в условиях гипомагнитной среды развивается с гораздо более выраженным уровнем и характеризуется устойчивым трендом в шестидневный период.

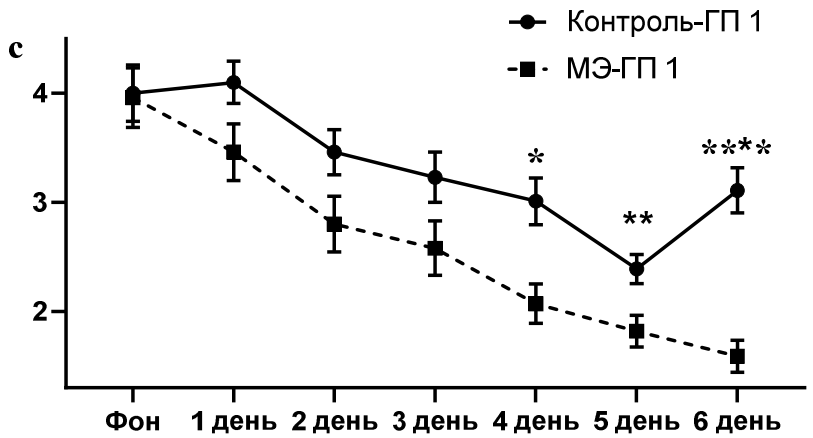


Рис. 5. Шестидневная динамика латентного периода болевой реакции крыс двух групп в тесте «Горячая пластина» (контроль-ГП 1 и МЭ-ГП 1).
Примечания: Контроль-ГП 1 – шестидневная динамика ЛПБР крыс-самцов контрольной группы; МЭ-ГП 1 – шестидневная динамика ЛПБР крыс-самцов, которые находились в условиях гипомагнитной среды; * – отличия от показателя группы «Контроль-ГП 1» при $p<0,05$; ** – отличия от показателя группы «Контроль-ГП 1» при $p\leq0,01$; **** – отличия от показателя группы «Контроль-ГП 1» при $p\leq0,0001$; по оси абсцисс последовательно расположены тестовые дни от фонового до шестого дня.

Сравнение динамики ЛПБР животных группы контроль-Хвост 1 и МЭ-Хвост 1 продемонстрировано на рисунке 6. Четко видно, что значение ЛПБР двух групп начинает демонстрировать достоверный уровень отличий, также, как и в случае с группами контроль-ГП 1 и МЭ-ГП 1, с 4 дня регистрации ЛПБР. Итак, на 4 день ЛПБР в группе контроль-Хвост 1 в среднем равнялся 2,47±0,13 с и в группе МЭ-Хвост 2 в этот день ЛПБР равнялся 1,97±0,17 с при уровне значимости отличий $p<0,05$. На пятый день регистрации ЛПБР в контроле-Хвост 1 в среднем равнялся 2,74±0,22 с, в группе МЭ-Хвост 1 – 1,84±0,25 с при уровне значимости отличий $p\leq0,001$; на шестой день регистрации ЛПБР в группе контроль-Хвост 1 равнялся 3,83±0,16 с и в группе МЭ-Хвост 1 – 1,33±0,16 с при $p\leq0,0001$.

Рассмотренные зависимости подтверждают факт более выраженного сокращения ЛПБР крыс, которые находились в гипомагнитных условиях. Но этот феномен начинает достоверно проявляться с четвертых суток гипомагнитного воздействия, при чем, такая зависимость характерна и для крыс группы МЭ-ГП 1 и крыс группы МЭ-Хвост 1 – для обоих болевых тестов.

Для выяснения значимости процесса обучения крыс на показатель ЛПБР мы провели регистрацию этого показателя болевой чувствительности без ежедневного повторяющегося тестирования, тем самым, минимизируя возможное влияние фактора обучения животных. Результаты этой экспериментальной части текущей работы продемонстрированы на рисунках 7 и 8. На графически представленных зависимостях, видно, что в обоих болевых тестах значение ЛПБР на шестой день воздействия гипомагнитной среды достоверно меньше по сравнению со значением

этого показателя в контрольных группах животных. Отметим, что для адекватности сравнения регистрация ЛПБР в контрольных группах и группах МЭ осуществлялась в один и тот-же день, что указано и на рисунках 7 и 8.

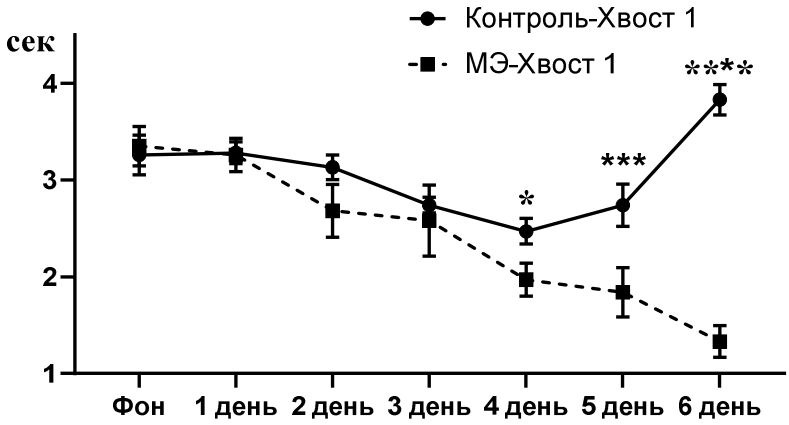


Рис. 6. Шестидневная динамика латентного периода болевой реакции крыс двух групп в тесте «Отдергивание хвоста» (контроль-Хвост 1 и МЭ-Хвост 1).
Примечания: обозначения, что и на рис. 5.

Так, в тесте «Горячая пластина» в контроле-ГП 2 ЛПБР в среднем составлял 4,29±0,26 с, на шестой день гипомагнитного воздействия в среднем равнялся 2,17±0,23 с при уровне значимости отличий p≤0,001. В тесте «Отдергивание хвоста» в контроле-Хвост 2 ЛПБР в среднем равнялся 3,37±0,44 с, на шестой день в группе МЭ-Хвост 2 в среднем составлял 1,80±0,22 с при p≤0,001.

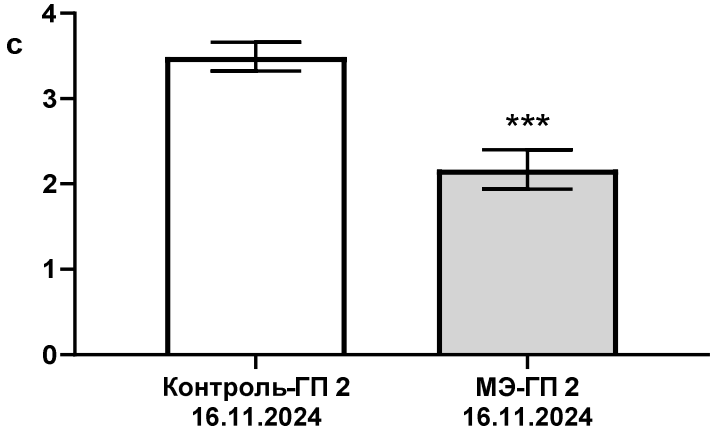


Рис. 7. Латентный период болевой реакции крыс в тесте «Горячая пластина» к концу шестого дня гипомагнитного воздействия.
Примечания: 16.11.2024 – дата регистрации латентного периода болевой реакции крыс; остальные обозначения, что и на рис. 3.

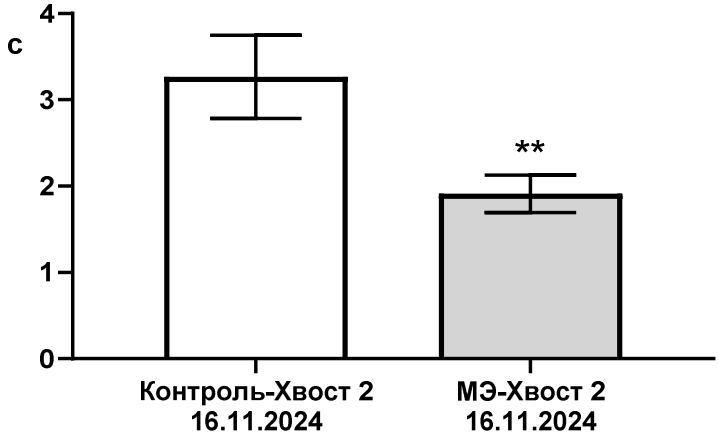


Рис. 8. Латентный период болевой реакции крыс в тесте «Отдергивания хвоста» к концу шестого дня гипомагнитного воздействия.
Примечания: 16.11.2024 – дата регистрации латентного периода болевой реакции крыс; остальные обозначения, что и на рис. 3.

В результате проведенного исследования было показано, что при ежедневном тестировании в двух болевых тестах в течении шести дней у крыс, которые находились в гипомагнитной среде с коэффициентом экранирования 7,62 раза, наблюдалось постепенное усиливающееся сокращение ЛПБР и это полностью совпадает с нашими результатами, которые получены в предыдущих исследованиях [10, 11]. По своей направленности ЛПБР крыс контрольных групп, также, сокращался и в тесте «Горячая пластина», и в тесте «Отдергивание хвоста». Однако, достоверные отличия от фонового значения регистрировались только на четвертые и пятые сутки. Следовательно, гипомагнитная среда заметно усиливает естественный процесс уменьшения ЛПБР крыс. Закономерно возникает вопрос о процессе обучения крыс – формировании рефлекса избегания болевого стимула еще до момента болевого ощущения. Т.е. животное постепенно «научится» демонстрировать имитационное болевое поведение в тесте «Горячая пластина» и, практически, сразу отводить хвост в сторону в тесте «Отдергивание хвоста». При таком процессе обучения ЛПБР должен сократится и оставаться на этом уровне, как минимум, у контрольных животных. Но по результатам настоящего исследования у контрольных животных обеих групп контроль-ГП 1 и контроль-Хвост 1 на шестые сутки значение ЛПБР не отличается от фонового уровня. Предположить, что в условиях ежедневной регистрации животные на шестой день «забыли» все, чему обучились не представляется возможным. Следовательно, играют роль иные механизмы, не связанные с формированием рефлекса активного избегания негативного стимула или в условиях использованных болевых тестов его формирование имеет свои специфические особенности.

При этом, и в гипомагнитных условиях проявляется специфическая реакция животных, которая не укладывается в простое объяснение сокращения ЛПБР за

счет обучения крыс (формирования рефлекса активного избегания негативного стимула). Так, в предыдущих исследованиях при более длительной двухнедельной регистрации болевой чувствительности крыс мы наблюдали выраженное обратное приращение ЛПБР в гипомагнитных условиях [10, 11], что не может быть связано с формированием условного рефлекса избегания. Также, и по результатам текущего исследования сокращение ЛПБР на шестые сутки воздействия гипомагнитных условий наблюдается и при отсутствии ежедневных повторений регистрации болевой чувствительности крыс. Все перечисленные экспериментальные факты указывают на то, что процесс формирования рефлекса активного избегания болевого стимула – обучение крыс не играет первостепенной роли, по крайней мере, в динамике сокращения ЛПБР крыс в гипомагнитных условиях с коэффициентом экранирования 7,62. Однако, это требует дальнейшего детального исследования.

Акцентируем внимание на том, что в исследованиях с повторениями и определенной длительности важнейшее значение имеет биоритмологическая составляющая. Именно поэтому в разделе «Методика» мы детально указывали даты и длительность всех исследовательских этапов, а также дни недели, где это было необходимо. Поэтому легко убедиться, что мы проводили исследование с учетом суточных и недельных ритмов животных. Также, исследование осуществлено, по сути, в рамках одного месяца. Отдельной уязвимой позицией является тот факт, что отборочный этап пришелся на конец октября 28.10.2024 г (понедельник), а основной исследовательский этап проведен в ноябре. Но мы полагаем, что месячные биоритмы не сыграли существенной роли, на что указывает и равенство фоновых значений ЛПБР со значениями первого дня основного экспериментального этапа во всех группах животных.

В связи с этим, по результату настоящего исследования мы подтверждаем усиление болевой чувствительности крыс в течении первых шести дней нахождения в гипомагнитных условиях с коэффициентом экранирования 7,62 раза по сравнению с контрольными животными.

Возникает вопрос: какие процессы могут лежать в основе усиления болевой чувствительности крыс? В исследовательских работах последних лет убедительно показано, что в гипомагнитных условиях развивается оксидативный стресс [5], изменяется содержание активных форм кислорода [12], нарушается функционирование митохондрий [6, 12] и этот эффект наблюдается даже у тихоходок [13]. При этом, оксидативный стресс является важнейшим фактором в формировании различных функциональных нарушений и патологий, в том числе, связан с болевой чувствительностью [14]; влияет на функционирование митохондрий и глобально сокращает адаптационный потенциал организма [15, 16]. Поэтому влияние гипомагнитной среды на болевую чувствительность крыс может быть обусловлено фактором развивающегося оксидативного стресса. Однако, в краткосрочной перспективе эффект гипомагнитной среды, по нашему мнению, в первую очередь будет связан с функциональной активностью белков и последующим изменением экспрессии генов; т.к. эти процессы являются наиболее чувствительными к гипомагнитным воздействиям [4].

Выяснение механизмов влияния гипомагнитных условий, особенно с коэффициентом экранирования в пределах от 2 до 8 раз является крайне актуальной задачей, т.к. именно с этими диапазонами ослабления геомагнитного поля наиболее часто соприкасается современный человек.

Отметим, что в предыдущих исследованиях мы сосредотачивались именно на сравнении динамик болевой чувствительности контрольных и экспериментальных (гипомагнитные условия) животных по отличительной выраженности значений ЛПБР [10], но не уделили полноценного внимания динамике показателя в непосредственных единицах измерения – секундах. Результаты текущего исследования продемонстрировали первоначальное совпадение направленности изменения ЛПБР в контрольных и экспериментальных группах с возможным «расслоением» на шестые сутки, но, что происходит в дальнейшем? Поэтому, для оценки непосредственной динамики ЛПБР мы планируем провести детальный статистический анализ этого показателя именно в секундах, а не в относительных единицах сравнения. Выскажем рабочую гипотезу: первоначально будет наблюдаться сокращение ЛПБР, а потом его приращение, но в гипомагнитных условиях эти изменения будут более выраженными. Во-вторых, мы не исключаем, что предполагаемая динамика будет наблюдаться на общем сокращении ЛПБР – колебания на векторе уменьшения значения в секундах. Выраженность этого вектора будет зависеть от значимости процесса обучения, формирования рефлекса избегания. На данном этапе этот рефлекторный процесс представляется, как сопутствующий, следовательно, общий вектор сокращения ЛПБР должен быть слабовыраженным.

Проведение нового детального анализа наших предыдущих экспериментальных массивов данных позволит подтвердить или опровергнуть положения высказанной гипотезы.

Немаловажным фактором, который мог оказать дополнительное влияние являются текущие характеристики магнитосферы Земли [17]. Мониторинг магнитосферы мы предлагаем провести по Кр индексу, который предоставляется в онлайн режиме Лабораторией Солнечной астрономии ИКИ и ИСЗФ (рис. 9).

Напомним, что предварительный отбор животных проводился 28.10.2024 г. и в этот период состояние магнитосферы находилось в диапазоне – «возбужденное». После все отобранные группы животных содержались в условиях вивария и попали под воздействие двухдневной магнитной бури 09.11 – 10.11.2024 года уровня G1. Отметим, что животные всех групп в это время находились в стандартных условиях вивария, поэтому «вошли» в основной экспериментальный период с одинаковым предшествующим воздействием магнитосферы Земли.

Основной исследовательский этап пришелся на период с 11.11 по 16.11.2024 г. и, как видно на рисунке 9, в эти дни магнитосфера находилась в «спокойном» состоянии, что минимизирует ее неконтролируемое влияние на регистрируемые показатели поведенческой активности крыс в указанном отрезке времени.

Конечно, наиболее уязвимыми к меняющемуся уровню Кр индекса являются животные контрольных групп, но, повторим, что на протяжении всего предшествующего периода животные всех групп находились в однотипных

условиях, а в основной экспериментальный период магнитосфера демонстрировала «спокойное» более или менее стабильное состояние. Следовательно, учитывая высказанные соображения по динамике Кр индекса в г. Симферополе в конце октября и в первой половине ноября 2024 года мы считаем, что этот фактор не оказал значимого влияния на результат исследования.

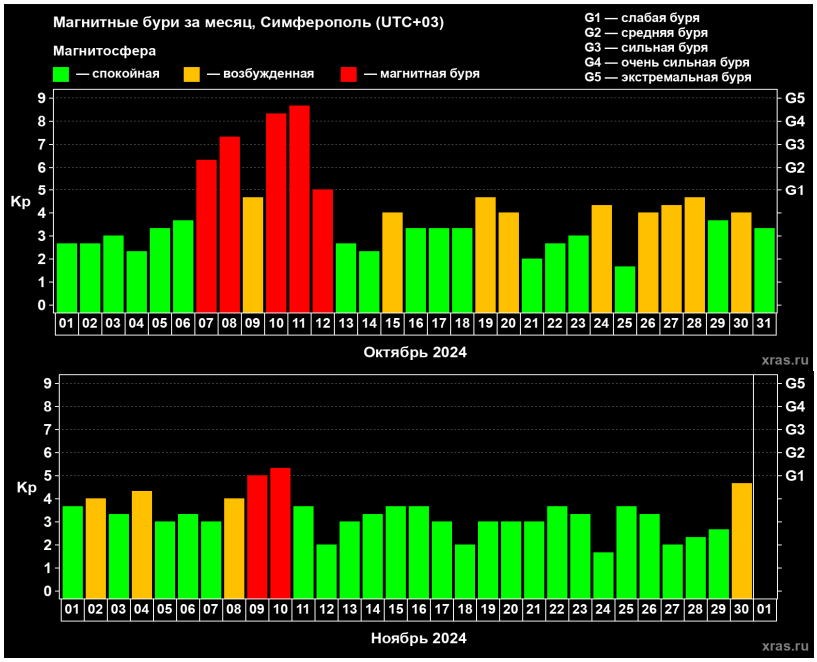


Рис. 9. Динамика Кр индекса в г. Симферополь с 01 октября 2024 года по 30 ноября 2024 года по «Лаборатория Солнечной астрономии ИКИ и ИСЗФ» [18].

Отметим, что невозможность полноценно предсказывать состояние магнитосферы Земли является «Ахиллесовой пятой» исследований, которые связаны с условиями пассивного экранирования и мы полностью это понимаем и принимаем. В текущей работе ситуация благоволила нам и исследовательский период совпадал с достаточно стабильными показателями магнитосферы Земли. Но, с другой стороны, нам крайне интересно повторить исследования по оценке динамики болевой чувствительности крыс на фоне магнитной бури уровня G3 и выше, которая будет достаточно продолжительной. Справедливости ради, мы надеялись, что нам удастся попасть в такой период, но к данному моменту этого не произошло и провести детальное сравнение болевой чувствительности крыс в разных состояниях магнитосферы Земли на данном этапе не представляется возможным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях шестидневного экранирования магнитного поля с суммарным коэффициентом ослабления 7,62 раза постепенно значение ЛПБР крыс сокращается. Этот эффект наблюдается как при ежедневном шестидневном тестировании животных, так и при однократном – на шестой день гипомагнитного воздействия. Следовательно, процесс обучения и формирования рефлекса избегания, с высокой степенью вероятности, не является ключевым фактором и эффект сокращения значения ЛПБР, в первую очередь, обусловлен воздействием гипомагнитной среды.

Работа выполнена на оборудовании ЦКП научным оборудованием «Экспериментальная физиология и биофизика» ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского» в рамках инициативной темы № 126060421664-2 «Закономерности и механизмы адаптации организма к факторам разной природы»

Список литературы

1. Xue X. Biological Effects of Space Hypomagnetic Environment on Circadian Rhythm / X. Xue, Y.F. Ali, W. Luo, C. Liu, G. Zhou, N. A. Liu // Front Physiol. – 2021. – Vol. 12 – P. 643943.
2. Zhang Z. Biological Effects of Hypomagnetic Field: Ground-Based Data for Space Exploration / Z. Zhang, Y. Xue, J. Yang, P. Shang, X. Yuan // Bioelectromagnetics. – 2021. – 42(6). – P. 516–531.
3. Xu Y. Current Overview of the Biological Effects of Combined Space Environmental Factors in Mammals / Y. Xu, W. Pei, W. A. Hu // Front Cell Dev Biol. – 2022. – Vol. 12, No 10. – P. 861006.
4. Sarimov R. M. Hypomagnetic Conditions and Their Biological Action (Review). / Sarimov R. M., Serov D. A., Gudkov S. V. // Biology (Basel). – 2023. – 12(12). – P. 1513. doi: 10.3390/biology12121513. PMID: 38132339; PMCID: PMC10740674.
5. Tian L. The Role of Oxidative Stress in Hypomagnetic Field Effects. / Tian L., Luo Y., Ren J., Zhao C. // Antioxidants (Basel). – 2024. – 13(8). – P. 1017. doi: 10.3390/antiox13081017. PMID: 39199261; PMCID: PMC11352208.
6. Ren J. Mitochondria as key targets underlying hypomagnetic field-induced biological effects. / Ren J., Wang M., Zhao C., Luo Y., Tian L. // iScience. – 2025. – Vol. 29(1). – P. 114389. doi: 10.1016/j.isci.2025.114389. PMID: 41536991; PMCID: PMC12796539.
7. Krylov V. V. Biological effects of weak magnetic fields: can the radical-pair mechanism provide a universal explanation? / Krylov V. V. // Biol Rev Camb Philos Soc. – 2026. – 101(2). – P. 893–910. doi: 10.1111/brv.70108. Epub 2025 Dec 2. PMID: 41331283.
8. Kaspranski R. R. Human Responses to Magnetic and Hypomagnetic Fields: Available Evidence and Potential Risks for Deep Space Travel. / Kaspranski R. R., Binhi V. N., Koshel I. V. // Life (Basel). – 2025 – 15(11). – P. 1766. doi: 10.3390/life15111766. PMID: 41302190; PMCID: PMC12653702.
9. Темурьянц Н. А. Электромагнитное экранирование изменяет поведение крыс / Н. А. Темурьянц, А. С. Костюк, К. Н. Туманянц // Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова. – 2015. – Т. 65, № 2. – С. 222. – DOI 10.7868/S004446771502015X. – EDN TPWRKB.
10. Хусаинов Д. Р. Вариативность болевых реакций крыс в гипомагнитных условиях при троекратно повторяющихся экспериментальных сериях / Д. Р. Хусаинов, К. А. Кормочи, В. Л. Аблякимова // Наука в современном информационном обществе : Материалы XXI международной научно-практической конференции, North Charleston, 10–11 декабря 2019 года. – North Charleston: LuluPress,Inc., 2019. – С. 4–8. – EDN DGXCUJ.
11. Особенности когнитивных процессов крыс в условиях умеренной гипомагнитной среды / Д. Р. Хусаинов, И. И. Коренюк, В. И. Шахматова [и др.] // Биофизика. – 2020. – Т. 65, № 5. – С. 1025–1033. – DOI 10.31857/S000630292005021X. – EDN FHUUPP.
12. Tian L. The effects of different durations of exposure to hypomagnetic field on the number of active mitochondria and ROS levels in the mouse hippocampus. / Tian L., Ren J., Luo Y. // Biochem Biophys

Rep. – 2024 – Vol. 38. – P. 101696. doi: 10.1016/j.bbrep.2024.101696. PMID: 38586825; PMCID: PMC10995802.
13. Nagwani A. K. The effect of hypomagnetic field on survival and mitochondrial functionality of active Paramacrobiotus experimentalis females and males of different age. / Nagwani A. K., Budka A., Łacka A., Kaczmarek Ł., Kmita H. // Front Physiol. – 2023 – Vol. 14. – P. 1253483. doi: 10.3389/fphys.2023.1253483. PMID: 37745239; PMCID: PMC10514487.
14. Федин А. И. Окислительный стресс в патогенезе хронической головной боли. / Федин А. И. // Журнал неврологии и психиатрии им. С. С. Корсакова. – 2024. – 124(10). – С. 35
15. Лысенко В. И. Оксидативный стресс как неспецифический фактор патогенеза органных повреждений (обзор литературы и собственных исследований) / Лысенко В. И. // Медицина неотложных состояний. – 2020. – Vol. 16, No. 1. – P. 24–35.
16. Узбеков М. Г. Окислительный стресс и депрессия: вопросы патогенеза / Узбеков М. Г. // Социальная и клиническая психиатрия. – 2022. – Vol. 32, No. 3. – P. 73–82.
17. Щетинина С. Ю. Влияние геомагнитной активности на состояние здоровья человека / С. Ю. Щетинина, Н. В. Юдичева // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2021. – № 5-1. – С. 167–169. – DOI 10.24412/2500-1000-2021-5-1-167-169. – EDN VZKOAW.
18. Магнитные бури в Симферополе. Лаборатория Солнечной астрономии ИКИ и ИСЗФ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://xras.ru/magnetic_storms.html/simferopol

CHANGES IN THE LATENCY PERIOD OF THE PAIN RESPONSE IN RATS UNDER HYPOMAGNETIC CONDITIONS

Khusainov D. R., Bulkhina S. D., Tumanyants K. N., Aidinov I. D., Sogrin D. A.

V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russian Federation
E-mail: gangliu@yandex.ru

The investigation of the effects of geomagnetic field weakening on various living systems and the identification of potential mechanisms of this influence is a prominent topic in numerous scientific studies [1–7]. In our previous works, it was demonstrated that in a hypomagnetic environment with a shielding factor of 7–8 times, there is a significant reconfiguration of pain sensitivity in rats: initially, hyperalgesia develops, followed by a return to baseline levels, and even the emergence of hypoalgesia [10, 11]. Notably, the initial phase of increased pain sensitivity occurs during the first week of shielding. Furthermore, an important question remains regarding the impact of the learning process in rats, especially at the moment of heightened pain sensitivity, which can be significantly influenced by the developing reflex of active avoidance of negative stimuli. Accordingly, the aim of this study was to investigate the six-day dynamics of the latent period of pain response (LPPR) in rats under hypomagnetic conditions, with daily and single (on the sixth day) measurements.

The study of the latent period of pain response (LPPR) in the "Hot Plate" test (“Hot Plate” Bioseb, France) was conducted on 40 male rats (Wistar line) aged 7 months, divided into 4 groups of 10 individuals each:

Control-HP 1 (n = 10) – animals were kept in native vivarium conditions and tested daily in the "Hot Plate" test for six days (Monday – Saturday);

Control-HP 2 (n = 10) – animals were kept in native vivarium conditions and tested in the "Hot Plate" test once: on Saturday;

Magnetic Shielding – Hot Plate 1 (MS-HP 1, n = 10) – animals were kept in hypomagnetic conditions and tested daily in the "Hot Plate" test from Monday to Saturday inclusive;

Magnetic Shielding – Hot Plate 2 (MS-HP 2, n = 10) – animals were kept in hypomagnetic conditions and tested in the "Hot Plate" test once: on Saturday.

The LPPR of rats in all groups during the "Hot Plate" test was recorded according to standard methodology: the plate temperature was set to 55°C, and the pain response was indicated by paw licking or jumping, usually accompanied by pronounced vocalisation. After each animal, the apparatus was thoroughly wiped dry, and the waiting period for stabilisation of the platform temperature at 55°C was observed.

For the registration of LPPR in the "Tail Flick" test (“Tail flick” Panlab, Spain), four groups of rats were also formed, each consisting of 7 individuals, and all experimental conditions corresponded to those described for the previous groups of animals, but the term "Tail" was used for identification. In the "Tail Flick" test, to record the LPPR, the animals were placed in a restraining box, with the light beam focus set to a value of 60 units out of a maximum of 99. Additionally, during preliminary selection, only those animals that flicked their tails in response to the pain stimulus were chosen, rather than those attempting to escape from the box.

The weakening of the background magnetic field was achieved using a chamber made of double-layer "dynamo" iron, measuring 2×3×2 m. The characteristics of the shielding chamber have been described in detail in our previous publication [11]. According to current measurements, the attenuation factor, calculated by the modulus of magnetic induction, was 7.62 times, comparable to the conditions of previous studies [11].

The comparison of the dynamics of LPPR values between the control-HP 1 group and the MS-HP 1 group is visualised in Figure 5. From the dynamics of LPPR presented for the two groups, it is evident that significant differences in this indicator become apparent from the 4th day of pain response registration in the "Hot Plate" test. On the 4th day of registration, the LPPR in the control-HP 1 group averaged 3.10±0.21 s, while in the MS-HP 1 group it averaged 2.07±0.18 s, with a significance level of $p<0.05$; on the 5th day – 2.91±0.22 s (control-HP 1) and 1.82±0.14 s (MS-HP 1) at $p\leq0.01$; on the 6th day – 3.35±0.11 s (control-HP 1) and 1.59±0.15 s (MS-HP 1) at $p\leq0.0001$.

The comparison of the LPPR dynamics in the control-Tail 1 group and the MS-Tail 1 group is demonstrated in Figure 6. It is clearly visible that the LPPR values of the two groups begin to show a significant level of difference, similar to the case with the control-HP 1 and MS-HP 1 groups, from the 4th day of LPPR registration. Thus, on the 4th day, the LPPR in the control-Tail 1 group averaged 2.47±0.13 s, and in the MS-Tail 2 group, on that day, the LPPR was 1.97±0.17 s at a significance level of $p<0.05$. On the fifth day of LPPR registration, the control-Tail 1 averaged 2.74±0.22 s, while the MS-Tail 1 group was 1.84±0.25 s at $p\leq0.001$; on the sixth day, the LPPR in the control-Tail 1 group was 3.83±0.16 s, and in the MS-Tail 1 group it was 1.33±0.16 s at $p\leq0.0001$.

To elucidate the significance of the learning process in rats on the LPPR indicator, we conducted the registration of this pain sensitivity indicator without daily repeated

testing, thereby minimising the potential influence of the learning factor in the animals. The results of this experimental part of the current work are presented in Figures 7 and 8. The graphically represented dependencies show that in both pain tests, the LPPR value on the sixth day of exposure to the hypomagnetic environment is significantly lower compared to the values in the control groups of animals.

Thus, in the "Hot Plate" test, the LPPR in the control-HP 2 averaged 4.29±0.26 s, while on the sixth day of hypomagnetic exposure, it averaged 2.17±0.23 s at a significance level of $p \leq 0.001$. In the "Tail Flick" test, the LPPR in the control-Tail 2 averaged 3.37±0.44 s, while on the sixth day in the MS-Tail 2 group, it averaged 1.80±0.22 s at $p \leq 0.001$.

Under conditions of six-day magnetic field shielding with a total attenuation factor of 7.62 times, the LPPR value in rats gradually decreases. This effect is observed both during daily six-day testing of the animals and during a single test on the sixth day of hypomagnetic exposure. Consequently, the process of learning and the formation of the avoidance reflex is likely not a key factor; the reduction in LPPR values is primarily attributed to the influence of the hypomagnetic environment.

Keywords: pain sensitivity, hypomagnetic conditions, Earth's magnetosphere.

References

1. Xue X., Ali Y.F., Luo W., Liu C., Zhou G., Liu N.A. Biological Effects of Space Hypomagnetic Environment on Circadian Rhythm, *Front Physiol*., **9**, **12**, 643943. (2021).
2. Zhang Z., Xue Y., Yang J., Shang P., Yuan X. Biological Effects of Hypomagnetic Field: Ground-Based Data for Space Exploration, *Bioelectromagnetics*, **42(6)**, 516 (2021).
3. Xu Y., Pei W., Hu W. A. Current Overview of the Biological Effects of Combined Space Environmental Factors in Mammals, *Front Cell Dev Biol*., **12**, **10**, 861006. (2022).
4. Sarimov R. M., Serov D. A., Gudkov S. V. Hypomagnetic Conditions and Their Biological Action (Review). *Biology (Basel)*, **12(12)**, 1513 (2023) doi: 10.3390/biology12121513. PMID: 38132339; PMCID: PMC10740674.
5. Tian L., Luo Y., Ren J., Zhao C. The Role of Oxidative Stress in Hypomagnetic Field Effects. *Antioxidants (Basel)*, **13(8)**, 1017 (2024) doi: 10.3390/antiox13081017. PMID: 39199261; PMCID: PMC11352208.
6. Ren J., Wang M., Zhao C., Luo Y., Tian L. Mitochondria as key targets underlying hypomagnetic field-induced biological effects. *iScience,* **29(1)**, 114389 (2025) doi: 10.1016/j.isci.2025.114389. PMID: 41536991; PMCID: PMC12796539.
7. Krylov V. V. Biological effects of weak magnetic fields: can the radical-pair mechanism provide a universal explanation? *Biol Rev Camb Philos Soc*., **101(2)**, 893 (2026) doi: 10.1111/brv.70108. Epub 2025 Dec 2. PMID: 41331283.
8. Kaspranski R. R., Binhi V. N., Koshel I. V. Human Responses to Magnetic and Hypomagnetic Fields: Available Evidence and Potential Risks for Deep Space Travel. *Life (Basel),* **15(11)**, 1766 (2025) doi: 10.3390/life15111766. PMID: 41302190; PMCID: PMC12653702.
9. Temuryants N. A., Kostyuk A. S., & Tumanyants K. N. Elektromagnitnoe ekranirovanie izmenyaet povedenie krys [Electromagnetic shielding changes rat behavior], *Zhurnal vysshei nervnoi deyatel'nosti im. I.P. Pavlova*, **65(2)**, 222 (2015). DOI: 10.7868/S004446771502015X. EDN: TPWRKB.
10. Khusainov D. R., Kormochi K. A., & Ablyakimova V. L. *Variativnost' bolevykh reaktsii krys v gipomagnitnykh usloviyakh pri troekratno povtoryayushchikhsya eksperimental'nykh seriyakh* [Variability of pain reactions in rats under hypomagnetic conditions in triplicate experimental series]. In Nauka v sovremennom informatsionnom obshchestve: Materialy XXI mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, 4–8. (North Charleston: LuluPress, 2019). Inc. EDN: DGXCUJ.

11. Khusainov D. R., Korenyuk I. I., Shakhmatova V. I., et al. Osobennosti kognitivnykh protsessov krys v usloviyakh umerennoi gipomagnitnoi sredy [Features of cognitive processes in rats under moderate hypomagnetic conditions], *Biofizika*, **65(5)**, 1025 (2020). DOI: 10.31857/S000630292005021X. EDN: FHUUPP.
12. Tian L., Ren J., Luo Y. The effects of different durations of exposure to hypomagnetic field on the number of active mitochondria and ROS levels in the mouse hippocampus. *Biochem Biophys Rep*., **38**, 101696 (2024) doi: 10.1016/j.bbrep.2024.101696. PMID: 38586825; PMCID: PMC10995802.
13. Nagwani A. K., Budka A., Łacka A., Kaczmarek Ł., Kmita H. The effect of hypomagnetic field on survival and mitochondrial functionality of active Paramacrobiotus experimentalis females and males of different age. *Front Physiol*., **14**, 1253483. (2023) doi: 10.3389/fphys.2023.1253483. PMID: 37745239; PMCID: PMC10514487.
14. Fedin A. I. Oxidative stress in the pathogenesis of chronic headache S.S. Korsakov. *Journal of Neurology and Psychiatry*, **124(10)**, 35 (2024) (In Russ.) https://doi.org/10.17116/jnevro202412410135
15. Lysenko V. I. Oksidativnyi stress kak nespetsificheskii faktor patogeneza organnykh povrezhdenii (obzor literatury i sobstvennykh issledovanii) [Oxidative stress as a nonspecific factor in the pathogenesis of organ damage (review of literature and own research)]. *Meditsina neotlozhnykh sostoyanii*, **16(1)**, 24 (2020).
16. Uzbekov M. G. Okislitel'nyi stress i depressiya: voprosy patogeneza [Oxidative stress and depression: issues of pathogenesis]. *Sotsial'naya i klinicheskaya psikhiatriya*, **32(3)**, 73 (2022).
17. Shchetinina S. Yu., & Yudicheva N. V. Vliyanie geomagnitnoi aktivnosti na sostoyanie zdorov'ya cheloveka [Influence of geomagnetic activity on human health]. *Mezhdunarodnyi zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk*, **(5-1)**, 167 (2021). DOI: 10.24412/2500-1000-2021-5-1-167-169. EDN: VZKOAW.
18. *Magnitnye buri v Simferopole. Laboratoriya Solnechnoi astronomii IKI i ISZF* [Magnetic storms in Simferopol. Laboratory of Solar Astronomy, IKI and ISZF]. Available at: https://xras.ru/magnetic_storms.html/simferopol

Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского
Биология. Химия. Том 12 (78). 2026. № 2. С. 294–307.

УДК 581.14+ 661.162.66
DOI 10.5281/ZENODO.20795526

ВЛИЯНИЕ РЕГУЛЯТОРА РОСТА КОМПЛЕКСНОГО ДЕЙСТВИЯ «ИМПУЛЬС» НА ПОКАЗАТЕЛИ СОЛЕУСТОЙЧИВОСТИ *AVENA SATIVA* L.

Чмелёва С. И., Белоусов В. В., Сидякин А. И., Джелдубаева Э. Р., Туманянц К. Н., Османова Р. С.

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», Симферополь, Республика Крым, Россия
E-mail: chmeleva-s@mail.ru

Выявлено влияние регулятора роста растений комплексного действия «Импульс» на показатели солеустойчивости *Avena sativa* L. Показано, что наилучшая концентрация регулятора роста для прорастания, водного обмена и пигментного состава – 0,01 % и 5 %. Под действием препарата наблюдалось статистически значимое улучшение морфометрических показателей проростков. Длина проростков, длина корневой системы и число корней в вариантах с «Импульсом» 0,01 % + 100 мкл NaCl превышали контроль в 3,8, 2,1 и 1,14 раза соответственно. В вариантах с добавлением «Импульса» 0,01 % в условиях засоления 0,20 М NaCl интенсивность транспирации увеличивалась в среднем в 1,4 раза по сравнению с засолением без обработки, а водный дефицит снижался в 1,6 раза ($p \leq 0,05$), что свидетельствует о частичном восстановлении водного обмена. Полученные результаты позволяют рассматривать использование регуляторов роста комплексного действия в качестве эффективного средства повышения солеустойчивости овса.
Ключевые слова: регулятор роста «Импульс», солеустойчивость, водный дефицит, *Avena Sativa* L.

ВВЕДЕНИЕ

Современное сельское хозяйство сталкивается с рядом экологических и климатических вызовов, которые напрямую влияют на продуктивность сельскохозяйственных культур. Одним из наиболее значимых стрессовых факторов для растений является засоление почвы, которое наблюдается как в регионах с сухим климатом, так и в регионах, где происходит нерациональное применение агротехнологий, таких как чрезмерное орошение, использование некачественной воды и интенсивное использование удобрений. Засоление вызывает осмотический стресс, ионный дисбаланс и накопление токсичных концентраций натрия и хлора в тканях растений, что нарушает фотосинтетические процессы, водный обмен и рост растений [1]. Это сказывается на продуктивности сельскохозяйственных культур [2], что является серьезной проблемой для всемирного сельского хозяйства и требует поиска эффективных методов повышения устойчивости растений к засолению.

Овес посевной является одной из важных зерновых культур [3], широко используемых в пищевой, фармацевтической и кормовой промышленности.

Несмотря на его относительно высокую приспособляемость к различным условиям выращивания, повышенная концентрация солей в почве негативно сказывается на его росте и развитии. Для смягчения последствий солевого стресса применяются различные агротехнические и химические методы, однако их эффективность ограничена, а долговременное использование может приводить к дополнительным экологическим проблемам.

В последние годы активно изучаются подходы к повышению устойчивости растений к абиотическим стрессам, в том числе с использованием регуляторов роста растений (РРР). Показано, что применение рострегулирующих веществ способствует активации антиоксидантной системы, стабилизации клеточных мембран и улучшению водного баланса растений в условиях стресса [4]. Регуляторы роста могут усиливать адаптационные механизмы, повышая устойчивость растений к неблагоприятным условиям среды, включая засоление [5], могут модулировать физиологические и биохимические процессы растений [6], улучшая водный обмен, усиливая антиоксидантную защиту, стабилизируя работу мембран и повышая эффективность фотосинтетической активности.

Несмотря на значительный объем исследований, посвященных влиянию РРР на устойчивость растений к различным видам стресса, остается недостаточно изученным вопрос о специфическом воздействии комплексных регуляторов роста на *Avena sativa* L. в условиях засоления почвы. Многие существующие работы фокусируются на отдельных классах регуляторов роста, таких как гиббереллины, ауксины или абсцизовая кислота [7].

В связи с вышеизложенным целью данной работы явилось оценка влияние регулятора роста растений комплексного действия «Импульс» на показатели солеустойчивости *Avena sativa* L.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальная часть работы проводилась на базе кафедры ботаники и физиологии растений и биотехнологий Института биохимических технологий, экологии и фармации КФУ имени В.И. Вернадского.

Материалом для исследований исследования служили семена и растения овса сорта Борец (*Avena sativa* L .cv‘Борец’). Семена отбирали по средним размерам, предварительно обрабатывали слабым раствором $KMnO_4$ в течение 15 минут с последующим трёхкратным промыванием дистиллированной водой. Далее их замачивали в растворах препарата «Импульс» различной концентрации (0,01 %, 1 %, 5 %) или воде в течение 60 минут.

Проращивание проводили в кюветах на увлажнённой фильтровальной бумаге (по 100 семян в каждом варианте) в трёхкратной повторности. Для моделирования солевого стресса использовали растворы NaCl концентрацией 0,05; 0,10 и 0,20 М. В контрольном варианте применяли отстоянную водопроводную воду.

Схема опыта включала контроль и серии вариантов с обработкой семян препаратом «Импульс» различной концентрации в условиях нормального водоснабжения и солевого стресса.

Подсчитанное количество проросших семян выражали в процентах к общему числу семян в варианте опыта в каждой повторности, а затем находили энергию прорастания, выраженную в процентах к общему количеству семян, взятых для опыта [8]. Согласно ГОСТу, для овса посевного оценку всхожести следует начинать с третьих суток проращивания. Важно учитывать, что показатели, снятые на третьи сутки принято расценивать как энергия прорастания. Оценку всхожести принято проводить на седьмые сутки. Такие морфометрические показатели, как длина проростка, длина корневой системы, количество корней также снимали на седьмые сутки [9].

Контролем служила отстоянная водопроводная вода, для приближения условий к производственным. Эксперимент проводили в трёхкратной повторности для получения достоверных данных.

Оценка солеустойчивости *Avena sativa* L. по всхожести семян. При определении солеустойчивости показателем устойчивости является всхожесть семян [10]. В исследовании оценка солеустойчивости проводилась согласно классификации, предложенной Генкелем, в которой солеустойчивость дифференцируется по проценту всхожести на пять групп, представленных в таблице 1. Всхожесть (%) рассчитывали по формуле:

$$\text{Всхожесть} = (n/N) \times 100, \quad [1]$$

где n – количество проросших семян, N – общее количество семян, взятых для опыта.

Таблица 1

Группы солеустойчивости по схожести семян

Группы солеустойчивости	Процент всхожести семян соответственно группе
I – высокоустойчивые	> 80 %
II – устойчивые	61 – 80 %
III – среднеустойчивые	41 – 60 %
IV – слабо устойчивые	21 – 40 %
V – очень слабоустойчивые	< 20 %

Определение интенсивности транспирации. Интенсивность транспирации рассчитывали по модифицированному методу быстрого взвешивания по Л. А. Иванову [11], с уточнением площади листа по геометрическим параметрам.

С трёх растений были срезаны отдельные листья, после чего измерялись их длина и ширина. Общая площадь вычислялась по формуле:

$$S=\sum(L_n \times W_n \times k), \quad [2]$$

где L_n – длинна n-ого листа, W_n – ширина n-ого листа, k поправочный коэффициент, учитывающий форму листа, мы использовали коэффициент равный 0,75, который обычной принимается для листьев эллиптической формы [12].

Затем листья взвешивали дважды с интервалом в 5 минут. Разница в массе между первым и вторым взвешиванием соответствует количеству испаренной воды.

Интенсивность транспирации IT (г/м2×ч) вычисляли по формуле:

$$IT = n \times 10\,000 \times 60 / S \times t, \quad [3]$$

где n – количество испарившейся воды, г; S – площадь, см2; t – экспозиция, мин; 10000 – коэффициент перевода см2 в м2; 60 – коэффициент перевода минут в часы.

Этот метод позволяет оценить интенсивность транспирации с учётом площади нескольких листьев, что позволяет повысить точность измерений.

Определение водного дефицита. Определение водного дефицита проводилось методом насыщения листьев водой с последующим высушиванием до постоянной массы.

Для анализа использовали листья, отобранные с трёх растений каждого варианта исследования. Сначала измеряли их массу, затем помещали их в чашки Петри, наполненные дистиллированной водой, на 1 час для насыщения влагой и повторно взвешивали. После этого образцы высушивали в сушильном шкафу при температуре 100–105 °С в течении 2-3 часов до получения абсолютно сухого вещества.

Водной дефицит (Wg) рассчитывали по формуле:

$$Wg = (((M2 - M3) - (M1 - M3))/ (M2 - M3)) \times 100, \quad [4]$$

где Wg – водный дефицит, %; (M2 – M3) – количество воды, насыщающее листья, г; (M1 – M3) – исходное содержание воды в листьях, г.

Методика расчёта соответствует общепринятой практике, применяемой в физиологии растений для количественной оценки водоудерживающей способности тканей [11].

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили с использованием программы «GraphPad Prism 8» и «Microsoft Excel». Рассчитывали средние арифметические значения, стандартное отклонение и стандартную ошибку средней арифметической.

Перед проведением теста на достоверность различий между группами провели тест на нормальность Shapiro-Wilk. После подтверждения параметрического распределения данных ($p>0,05$) использовали t критерий Стьюдента.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние регулятора роста комплексного действия «Импульс» на прорастание семян овса посевного *Avena sativa* L. cv'Борец'. Результаты исследования показали, что при обработке семян Avena sativa L. раствором «Импульс» 0,01 % без добавления NaCl энергия прорастания составила 75 %, что на 2,7 % выше контроля, а лабораторная всхожесть – 85 %, что на 2,4 % выше контрольных значений (рис. 1, 2). Более высокие концентрации препарата (1 % и 5 %) оказывали угнетающее действие на начальные этапы роста: энергия прорастания снижалась до 47 % и 34 % соответственно.

При добавлении 0,05 М NaCl эффективность низкой концентрации «Импульса» сохранялась: энергия прорастания составила 74 %, что лишь незначительно ниже, чем в варианте с одним раствором соли (78 %), тогда как всхожесть семян увеличивалась до 85 %, что на 4,9 % выше контроля.

Наиболее выраженное положительное действие препарата в концентрации 0,01 % отмечено при значительном солевом стрессе – 0,20 М NaCl. В этом варианте энергия прорастания увеличивалась до 68 %, что на 94,3 % выше варианта с NaCl, а всхожесть достигала 76 %, превышая его на 65,2 %. Это подтверждает выраженный адаптогенный эффект низкой концентрации препарата в неблагоприятных условиях.

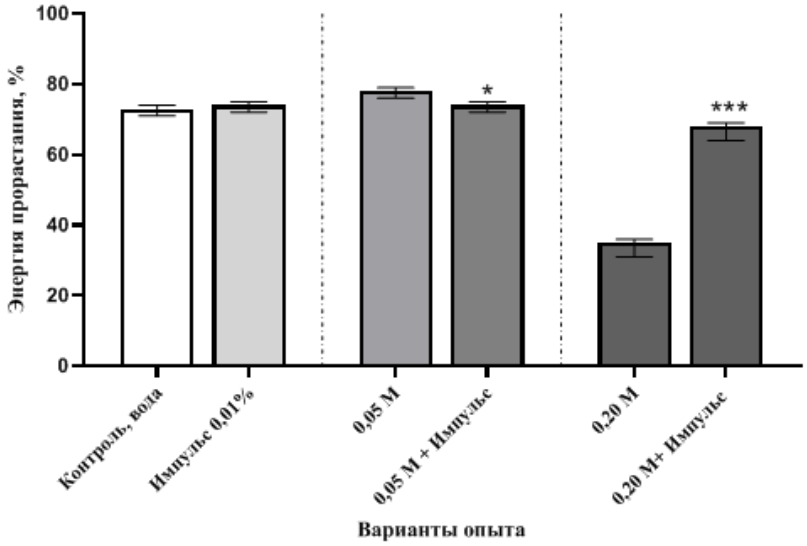


Рис. 1. Влияние регулятора роста «Импульс» в концентрации 0,01 % на энергию прорастания *Avena sativa* L. cv.‘Борец’.
Примечание к рисунку: звездочками отмечены достоверные различия по сравнению с контролем при * P <0,05, ** P <0,01, *** P <0,001.

При повышении концентрации препарата до 1 % и 5 % наблюдалось существенное снижение всхожести во всех вариантах опыта. Так, при использовании 5 % раствора «Импульса» в сочетании с 0,10 М и 0,20 М NaCl всхожесть составила лишь 31 % и 36 % соответственно, что указывает на возможное токсическое действие высоких концентраций регулятора.

Таким образом, предпосевная обработка семян препаратом «Импульс» в концентрации 0,01 % способствует повышению устойчивости проростков овса к солевому стрессу, стимулируя прорастание и повышая всхожесть по сравнению с необработанными семенами.

Влияние регулятора роста «Импульс» на показатели солеустойчивости *Avena sativa* L. cv‘Борец’. В контроле всхожесть семян составила 83,7 %, что соответствует I группе солеустойчивости – высокоустойчивые. Обработка регулятором роста «Импульс» в концентрации 0,01 % вызывала незначительное увеличение всхожести до 85,2 %, что также соответствует I группе. Применение препарата в концентрации 1 % снижало всхожесть до 74,3 % (II группа), а в концентрации 5 % – до 42,3 % (III группа).

При моделировании солевого стресса растворами NaCl 0,05; 0,10 и 0,20 М наблюдалось закономерное снижение всхожести в контрольных вариантах. Однако предварительная обработка семян препаратом «Импульс» изменяла показатели устойчивости. Так, в варианте 0,01 % + 0,05 М NaCl всхожесть достигала 85,2 %, соответствуя I группе и превышая значение солевого контроля без обработки.

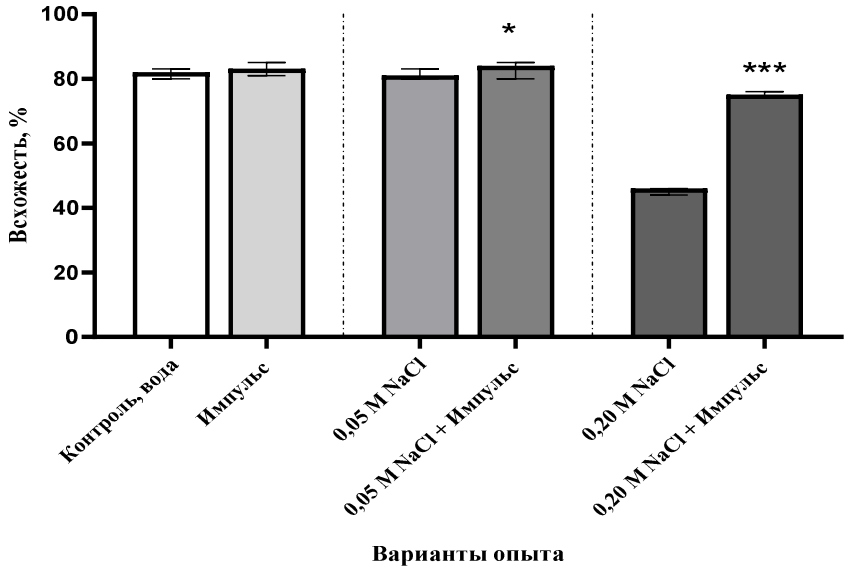


Рис. 2. Влияние регулятора роста «Импульс» 0,01 % на всхожесть семян *Avena sativa* L. cv‘Борец’.
Примечание: те же, что на рис.1.

На фоне 0,10 М NaCl без обработки всхожесть составляла 56,3 % (III группа), тогда как при обработке 0,01 % раствором «Импульс» она возрастала до 76,6 %, что соответствует II группе. Повышение концентрации «Импульса» до 1 % и 5 % в этих условиях, напротив, снижало устойчивость до 15,7 % (V группа) и 36,3 % (IV группа) соответственно.

Наиболее выраженный стресс наблюдался при 0,20 М NaCl. В солевом контроле всхожесть составила 46,3 % (III группа), однако при обработке 0,01 % «Импульсом» она возрастала до 76,6 %, соответствуя II группе.

Таким образом, наиболее эффективной концентрацией регулятора роста «Импульс» является 0,01 %, обеспечивающая сохранение или повышение всхожести в условиях засоления. Более высокие концентрации препарата, напротив, оказывали ингибирующее действие и снижали солеустойчивость овса.

Влияние регулятора «Импульс» на морфометрические показатели овса посевного *Avena sativa* L. cv‘Борец’. В условиях отсутствия солевого стресса обработка семян раствором «Импульс» в концентрации 0,01 % способствовала

незначительному снижению длины проростков на 4,92 % и длины корней на 7,37 % по сравнению с контролем (рис. 3, 4, 5).

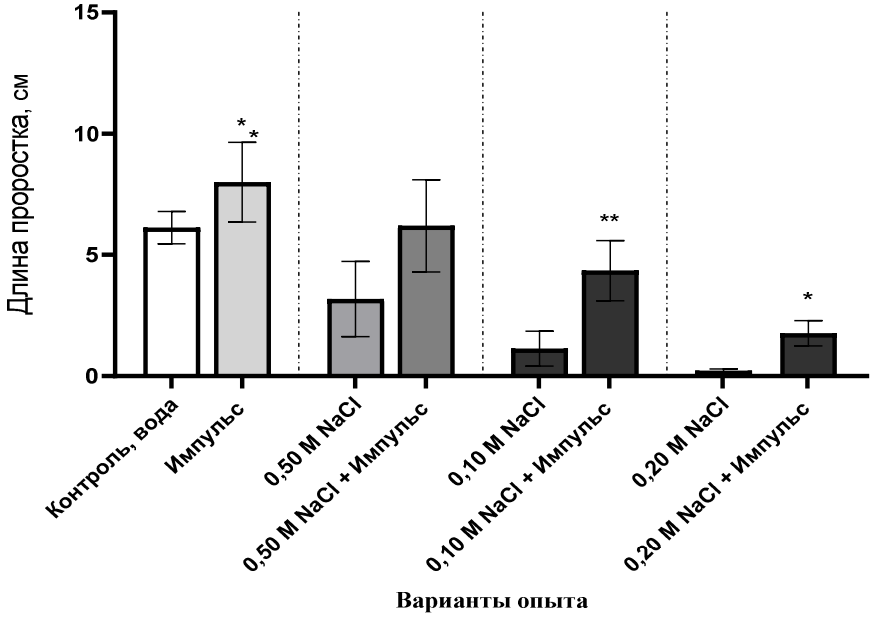


Рис. 3. Влияние регулятора роста «Импульс» 5 % на длину проростка растения *Avena sativa* L. cv‘Борец’.
Примечание: те же, что на рис. 1.

Количество корней также было несколько ниже и составило 90 % от контроля. Повышение концентрации препарата до 1 % существенно не влияло на длину проростков (96,72 % от контроля), однако уменьшало длину корневой системы до 65,26 %. При использовании 5 % раствора, напротив, наблюдалось стимулирование роста надземной и подземной части до 131,15 % и 107,37 % соответственно, а также увеличение числа корней на 12,5 %.

При 0,05 М NaCl низкая концентрация «Импульса» не оказывала существенного влияния на длину проростков и корней, однако увеличивала число корней на 11,11 %. Повышение концентрации до 1 % сопровождалось более выраженным стимулированием роста надземной части – до 144,12 %, при умеренном снижении длины корней до 83,08 %. Наиболее выраженное улучшение всех ростовых параметров отмечено при применении «Импульса» в концентрации 5 %: длина проростка и корней увеличивалась до 182,35 % и 136,92 % соответственно, а число корней – на 8,33 %.

При 0,10 М NaCl морфометрические показатели проростков резко снижались: длина надземной части составляла 0,91 см, длина корней – 3,5 см. Добавление «Импульса» даже в минимальной концентрации 0,01 % обеспечивало значительное восстановление показателей: длина проростка возрастала более чем в 3,8 раза,

корневой системы – в 2,1 раза, а количество корней превышало контрольное значение на 14,29 %. Более высокие концентрации препарата (1 % и 5 %) усиливали положительный эффект, особенно в отношении длины проростков и корней.

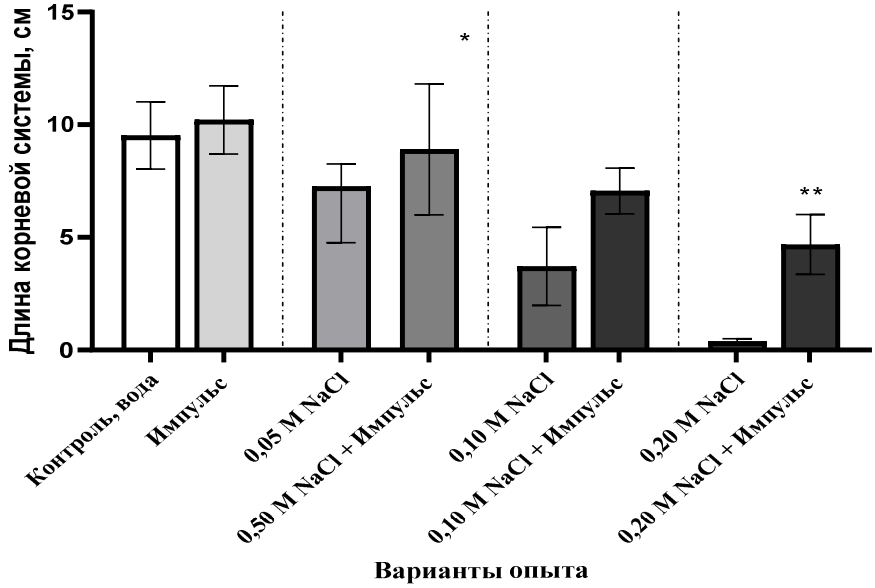


Рис. 4. Влияние регулятора роста «Импульс» 5 % на длину корневой системы растения *Avena sativa* L. cv'Борец'.
Примечание: те же, что на рис. 1.

При 0,20 М NaCl наблюдалось резкое угнетение морфометрических показателей: длина проростков снижалась до 0,2 см, длина корней – до 0,4 см, число корней – до 2,1 шт. Однако даже в этих условиях обработка препаратом приводила к достоверному увеличению всех показателей. Наиболее выраженный эффект отмечен при применении «Импульса» в концентрации 5 %: длина проростка возрастала до 1,8 см, длина корневой системы – до 4,7 см, а число корней увеличивалось почти в 2 раза.

Таким образом, регулятор роста «Импульс» оказывает дозозависимое влияние на ростовые характеристики проростков овса. В стрессовых условиях препарат проявляет адаптогенное действие, значительно улучшая морфометрические параметры даже при высоком уровне засоления.

Влияние регулятора роста растений комплексного действия «Импульс» на показатели водного обмена растений овса посевного *Avena sativa* L. cv'Борец'

В контрольном варианте без соли интенсивность транспирации составляла 118,4±10 мкг/см²·ч, а водный дефицит – 9,30±0,29 %. Добавление NaCl вызывало ожидаемое снижение интенсивности транспирации и увеличение водного дефицита. Так, при 0,20 М NaCl транспирация снижалась почти в 2,5 раза – до 47±3 мкг/см²·ч, а

водный дефицит возрастал более чем вдвое – до 19,75±1,2 % (рис. 5), что свидетельствует о выраженном нарушении водного обмена при солевом стрессе.

Применение препарата «Импульс» в различных концентрациях вызывало неоднозначные изменения. В большинстве случаев наблюдалось увеличение интенсивности транспирации, особенно при наличии соли. Например, при 0,10 М NaCl и концентрации «Импульса» 5 % транспирация достигала 98 мкг/см²·ч, однако водный дефицит при этом оставался повышенным – 11,12 % (рис. 6), что указывает на несбалансированное водопользование.

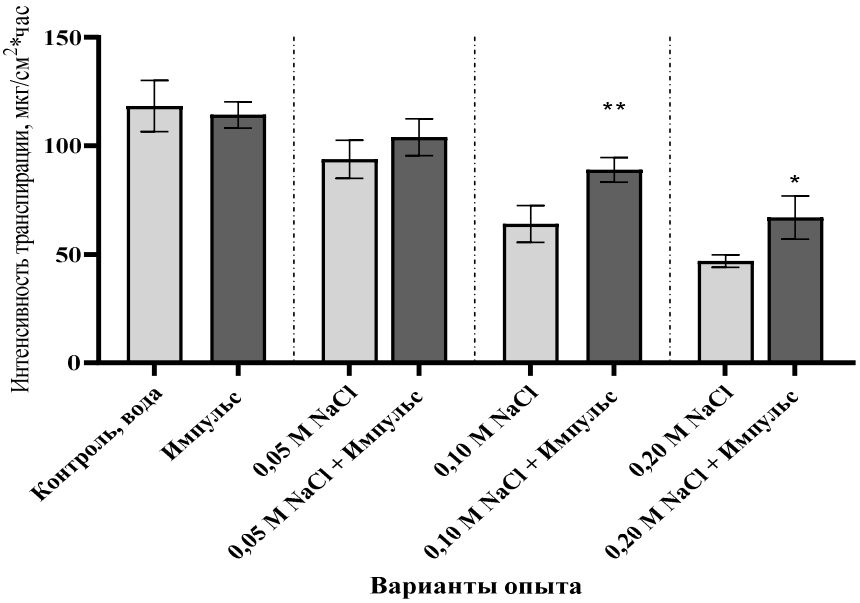


Рис. 5. Влияние регулятора роста растений «Импульс» в концентрации 0,01 % на интенсивность транспирации в листьях овса посевного *Avena sativa* L. cv'Борец'.
Примечание: те же, что на рис. 1.

Наиболее физиологически обоснованное действие отмечено при применении «Импульса» в концентрации 0,01 %. В условиях без соли интенсивность транспирации у обработанных растений составляла 114,3±6 мкг/см²·ч, что соответствует 96,54 % от контроля и может свидетельствовать о более экономичном водопользовании. При 0,05 М NaCl транспирация увеличивалась до 104±8 мкг/см²·ч, а при 0,10 М NaCl – до 89±6 мкг/см²·ч, что указывает на стабилизацию водообмена в условиях осмотического стресса. Даже при 0,20 М NaCl препарат обеспечивал умеренное повышение транспирации до 67±1 мкг/см²·ч.

По показателям водного дефицита наиболее выраженный защитный эффект также наблюдался при концентрации препарата 0,01 %. В условиях без соли водный дефицит снижался до 7,391±0,35 %, что на 20,48 % ниже контроля. При 0,05 М NaCl он уменьшался с 17,82 до 15,49 %, при 0,10 М NaCl – с 19,15 до 8,35±0,50 %, а при 0,20 М NaCl – с 19,75 до 11,55 %.

Таким образом, препарат «Импульс» в оптимальной концентрации 0,01 % улучшает физиологическое состояние растений за счёт стабилизации транспирации и выраженного снижения водного дефицита. Полученные результаты свидетельствуют о его дозозависимом влиянии на прорастание, рост и водный обмен Avena sativa в условиях солевого стресса.

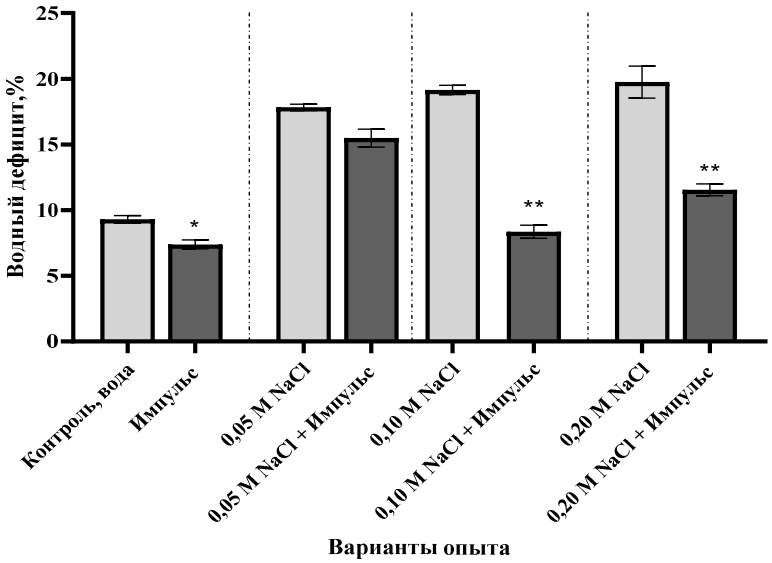


Рис. 6. Влияние регулятора роста растений «Импульс» в концентрации 0,01 % на водный дефицит в листьях овса посевного *Avena sativa* L.
Примечание: те же, что на рис. 1.

Полученные результаты свидетельствуют о выраженном дозозависимом влиянии регулятора роста «Импульс» на прорастание, рост и физиологическое состояние растений A*vena sativa* в условиях солевого стресса. Установлено, что низкая концентрация препарата (0,01 %) оказывает стимулирующее действие на всхожесть семян и энергию прорастания, особенно в условиях повышенной концентрации NaCl, тогда как более высокие дозы (1 % и 5 %) проявляют ингибирующий эффект на начальных этапах онтогенеза.

Выявленный в работе стимулирующий эффект малых концентраций «Импульса» может быть связан с усилением антиоксидантной защиты и стабилизацией клеточных мембран. Отмеченное ингибирующее действие высоких концентраций препарата соответствует концепции дозозависимого эффекта (гормезиса), согласно которой низкие дозы биологически активных веществ стимулируют физиологические процессы, тогда как высокие могут вызывать стресс и угнетение роста.

Результаты морфометрического анализа подтверждают адаптогенное действие препарата в условиях солевого стресса. Значительное увеличение длины проростков и корневой системы при обработке «Импульсом» свидетельствует об активации

ростовых процессов и усилении способности растений к освоению водных ресурсов. Это согласуется с данными о том, что под действием регуляторов роста происходит стимуляция клеточного деления и растяжения, а также улучшение корнеобразования [13].

Таким образом, полученные результаты демонстрируют, что регулятор роста «Импульс» в оптимальной концентрации 0,01 % повышает солеустойчивость *Avena sativ*а за счёт комплексного влияния на прорастание, ростовые процессы и водный обмен. Это позволяет рассматривать данный препарат как перспективный элемент технологии повышения устойчивости сельскохозяйственных культур к абиотическим стрессам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого исследования установлено, что регулятор роста комплексного действия «Импульс» оказывает выраженное дозозависимое влияние на прорастание, ростовые и физиологические показатели растений *Avena sativa* L. в условиях солевого стресса. Показано, что применение препарата в низкой концентрации (0,01 %) способствует повышению энергии прорастания и лабораторной всхожести семян, особенно в условиях засоления. При этом в условиях выраженного солевого стресса (0,10–0,20 М NaCl) обработка семян «Импульсом» обеспечивает значительное увеличение всхожести и перевод растений в более высокие группы солеустойчивости по классификации Генкеля. В то же время повышение концентрации препарата до 1 % и 5 % приводит к снижению всхожести и проявлению ингибирующего эффекта.

Морфометрический анализ показал, что регулятор роста способствует улучшению роста проростков, особенно в стрессовых условиях, что выражается в увеличении длины надземной и корневой части, а также числа корней. Установлено, что при высоких уровнях засоления препарат способен частично компенсировать угнетающее действие NaCl и активизировать ростовые процессы.

Исследование показателей водного обмена выявило, что применение «Импульса» в оптимальной концентрации способствует снижению водного дефицита и стабилизации транспирационной активности растений, что свидетельствует об улучшении водного статуса и повышении устойчивости к осмотическому стрессу.

Таким образом, регулятор роста «Импульс» в концентрации 0,01 % проявляет выраженные адаптогенные свойства и повышает солеустойчивость *Avena sativa* L. за счёт комплексного влияния на прорастание, рост и водный обмен. Полученные результаты обосновывают перспективность использования данного препарата в технологиях предпосевной обработки семян для повышения устойчивости сельскохозяйственных культур к засолению почв.

Список литературы

1. Менделева В. П. Влияние хлоридного загрязнения на морфометрические показатели овса посевного (*Avena sativa* L.) / В. П. Менделева, И. В. Волкова // Аграрные ландшафты, их устойчивость и особенности развития. – 2020. – С. 198–200.

2. Voko M. P. Seed priming with vermicompost leachate, Ecklonia maxima extract-Kelpak® and smoke-water induce heat stress amelioration and growth in Vigna unguiculata L. seedlings / M. P. Voko, et al. // South African Journal of Botany. – 2022. – Vol. 147. – P. 686–696.
3. Солдатова В. Ю. Биотестирование фитотоксичности почвогрунтов г. Якутска с использованием тест-объекта овса посевного *Avena sativa* L. / В. Ю. Солдатова, Е. Г. Шадрина, С. Д. Карпова // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2018. – № 2. – С. 76–86.
4. Khan M. I. R. Salicylic acid-induced abiotic stress tolerance and underlying mechanisms in plants / M. I. R. Khan, M. Fatma, T. S. Per, N. A. Anjum, N. A. Khan // Frontiers in Plant Science. – 2015. – Vol. 6. – Article 462. DOI: 10.3389/fpls.2015.00462.
5. Шаповал О. А. Регуляторы роста растений в агротехнологиях / О. А. Шаповал, И. П. Можарова, А. А. Коршунов // Защита и карантин растений. – 2014. – № 6. – С. 56–78.
6. Колупаев Ю. Е. Конститутивная и индуцированная холодом устойчивость проростков ржи и пшеницы к окислительному стрессу / Ю. Е. Колупаев и др. // Физиология растений. – 2016. – Т. 63, № 3. – С. 346–358.
7. Третьякова О. И. Влияние полимерных рострегуляторов на морфофизиологические параметры риса в условиях засоления / О. И. Третьякова, Н. А. Макарова, С. П. Доценко // Научный журнал КубГАУ. – 2016. – № 118. – С. 1061–1074.
8. ГОСТ 12038-84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести (с изм. № 1, 2). – Введ. 30.06.1986. – М.: Изд-во стандартов, 2011. – 7 с.
9. Черепанов А. В. Лабораторная оценка устойчивости коллекционных образцов овса к хлоридному засолению / А. В. Черепанов, Н. А. Боме // Генофонд и селекция растений: материалы VII Международной конференции, посвященной 95-летию академика РАН П. Л. Гончарова, Новосибирск, 10–12 апреля 2024 г. – Новосибирск: ИЦиГ СО РАН, 2024. – С. 399–403. DOI: 10.18699/GPB2024-102.
10. Генкель П. А. О повышении солеустойчивости растений при засолении почвы сульфатами / П. А. Генкель // Известия АН СССР. Серия биологическая. – 1960. – № 4.
11. Киселева И. С. Физиология растений: учеб.-метод. пособие / И. С. Киселева, М. Г. Малева, Г. Г. Борисова, Н. В. Чукина, А. С. Тугбаева; под общ. ред. И. С. Киселевой. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 120 с.
12. Манаенков А. О. Определение уровня загрязнения почвы с помощью биоиндикатора овса / А. О. Манаенков, В. С. Бобрик // Russian Journal of Biological Research. – 2023. – Т. 10, № 1. – С. 3–9. DOI: 10.13187/ejbr.2023.1.3.
13. Taiz L. Plant Physiology and Development / L. Taiz, E. Zeiger, I. M. Møller, A. Murphy. – 7th ed. – Oxford: Oxford University Press, 2018. – 737 p.

EFFECT OF THE COMPLEX GROWTH REGULATOR “IMPULSE” ON SALT TOLERANCE INDICATORS OF *AVENA SATIVA* L.

Chmeleva S. I., Belousov V. V., Sidyakin A. I., Dzheldubaeva E. R., Tumanyants K. N., Osmanova R. S.

V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Crimea, Russia
E-mail: chmeleva-s@mail.ru

Modern agricultural conditions are characterized by the increasing impact of abiotic stresses, among which soil salinization is one of the most significant factors affecting plant growth, development, and productivity. Therefore, the search for effective approaches to enhance plant tolerance to salt stress, including the use of plant growth regulators, is highly relevant.

The aim of this study was to evaluate the effect of the complex growth regulator “Impulse” on salt tolerance indicators of oat (*Avena sativa* L.) cultivar ‘Borets’. The influence of different concentrations of the preparation (0.01 %, 1 %, and 5 %) on seed germination energy, laboratory germination rate, morphometric parameters of seedlings (shoot length, root length, and root number), as well as water exchange parameters (transpiration intensity and water deficit) under model salt stress conditions (0.05, 0.10, and 0.20 M NaCl) was investigated.

It was found that pre-sowing seed treatment with “Impulse” at a concentration of 0.01 % had a pronounced stimulating effect on seed germination, increasing both germination energy and laboratory germination under normal and saline conditions. Under salinity, an increase in plant salt tolerance was observed, manifested by a shift to higher tolerance groups according to Genkel’s classification. In contrast, higher concentrations of the preparation (1 % and 5 %) exhibited inhibitory effects, reducing germination and tolerance indicators.

Morphometric analysis showed that the application of “Impulse” improved seedling growth, especially under stress conditions, as evidenced by increased shoot length, root length, and root number. The most pronounced effect was observed at the lowest concentration, which partially compensated for the inhibitory effects of salt stress.

The study of water exchange parameters demonstrated that treatment with “Impulse” at 0.01 % reduced water deficit and stabilized transpiration activity, indicating improved water balance and enhanced resistance to osmotic stress. Under high NaCl concentrations, the preparation provided partial recovery of physiological parameters.

Thus, the growth regulator “Impulse” at an optimal concentration of 0.01 % exhibits pronounced adaptogenic properties and enhances salt tolerance of *Avena sativa* L. through a комплексное воздействие on germination, growth processes, and water exchange. The obtained results substantiate the перспективность of using this preparation in pre-sowing seed treatment technologies to improve crop resistance to soil salinization.

***Keywords*:** growth regulator "Impulse", salt resistance, water deficiency, *Avena Sativa* L.

References

1. Mendeleva V. P., Volkova I. V. The Effect of Chloride Pollution on Morphometric Indicators of Oat (*Avena sativa* L.). Agrarian Landscapes, *Their Stability and Features of Development*, 198 (2020).
2. Voko M. P., et al. Seed Priming with Vermicompost Leachate, Ecklonia maxima Extract-Kelpak® and Smoke-Water Induce Heat Stress Amelioration and Growth in *Vigna unguiculata* L. Seedlings. *South African Journal of Botany*, **147**, 686 (2022).
3. Soldatova V. Yu., Shadrina E. G., Karpova S. D. Biotesting of Phytotoxicity of Soils of Yakutsk Using Oat (*Avena sativa* L.) as a Test Object. *Natural Resources of the Arctic and Subarctic*, **2**, 76 (2018).
4. Khan M. I. R., Fatma M., Per T. S., Anjum N. A., Khan N. A. Salicylic Acid-Induced Abiotic Stress Tolerance and Underlying Mechanisms in Plants. *Frontiers in Plant Science*, **6**, 462 (2015). DOI: 10.3389/fpls.2015.00462.
5. Shapoval O. A., Mozharova I. P., Korshunov A. A. Plant Growth Regulators in Agricultural Technologies. *Plant Protection and Quarantine*, **6**, 56 (2014).
6. Kolupaev Yu. E., et al. Constitutive and Cold-Induced Resistance of Rye and Wheat Seedlings to Oxidative Stress. *Russian Journal of Plant Physiology*, **63(3)**, 346 (2016).

7. Tretyakova O. I., Makarova N. A., Dotsenko S. P. Effect of Polymer Growth Regulators on Morphophysiological Parameters of Rice under Salinity Conditions. *Scientific Journal of KubSAU*, **118**, 1061 (2016).
8. *State Standard GOST 12038-84. Seeds of Agricultural Crops. Methods for Determination of Germination* (with Amendments No. 1, 2). 7 (Moscow, Standards Publishing House, 2011).
9. Cherepanov A. V., Bome N. A. *Laboratory Assessment of Salt Tolerance of Oat Collection Samples under Chloride Salinity.* Gene Pool and Plant Breeding: Proceedings of the VII International Conference, Novosibirsk, 399 (2024). DOI: 10.18699/GPB2024-102.
10. Genkel P. A. On Increasing Plant Salt Resistance under Sulfate Soil Salinization. *Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Biological Series*, **4** (1960).
11. Kiseleva I. S., Maleva M. G., Borisova G. G., Chukina N. V., Tugbaeva A. S. *Plant Physiology*, 120 (Yekaterinburg, Ural University Press, 2018).
12. Manaenkov A. O., Bobrik V. S. Determination of Soil Pollution Level Using Oat as a Bioindicator. *Russian Journal of Biological Research*, **10(1)**, 3 (2023). DOI: 10.13187/ejbr.2023.1.3.
13. Taiz L., Zeiger E., Møller I. M., Murphy A. *Plant Physiology and Development,* 737 (Oxford University Press, 2018).

Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского
Биология. Химия. Том 12 (78). 2026. № 2. С. 308–326.

УДК 616.379-008.64: 57.084.1
DOI 10.5281/ZENODO.20795666

ИЗМЕНЕНИЕ КОЖНОЙ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ И ТКАНЕВОГО МЕТАБОЛИЗМА ПРИ РАЗВИТИИ АЛЛОКСАН-ИНДУЦИРОВАННОГО ДИАБЕТА У КРЫС

Чуян Е. Н., Муртазаева А. М., Ливенцов С. Ю.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского», Симферополь, Республика Крым, Россия
E-mail: elena-chuyan@rambler.ru

Проведено исследование изменений кожной микроциркуляции и тканевого метаболизма на модели аллоксан-индуцированного диабета у крыс. Показано, что аллоксан-индуцированный диабет у крыс сопровождается выраженными и прогрессирующими нарушениями кожной микроциркуляции и тканевого метаболизма, характеризующимися вазоконстрикцией микрососудов, гипертензией, нарушениями окислительно-восстановительного баланса. Полученные результаты расширяют представление о патогенезе сосудистых осложнений (диабетических макро- и микроангиопатий) при сахарном диабете 1 типа и обосновывают необходимость комплексной оценки микроциркуляторных и метаболических нарушений.
Ключевые слова: сахарный диабет 1 типа, аллоксан-индуцированный диабет, вазоактивное действие, тканевая микроциркуляция, тканевой метаболизм, сосудистый тонус, вазоконстрикция, артериальное давление.

ВВЕДЕНИЕ

Сахарный диабет (СД) относится к числу наиболее приоритетных медико-социальных проблем современного здравоохранения. Это обусловлено его высокой распространённостью и хроническим неуклонно прогрессирующим течением, а также развитием тяжёлых, зачастую необратимых осложнений, которые приводят к ранней инвалидизации и смерти пациентов. Патогенетической основой СД выступает дефицит инсулина: абсолютный – при СД 1 типа (СД1, вследствие аутоиммунной деструкции β-клеток) и относительный – при СД 2 типа [1, 2]. Клиническая манифестация заболевания напрямую связана с синдромом хронической гипергликемии, возникающей из-за нарушения углеводного обмена [3]. По мере прогрессирования диабета гипергликемия инициирует каскад системных метаболических расстройств, поражая различные органы и ткани. При этом наибольшей угрозой для пациентов признаны осложнения со стороны сердечно-сосудистой системы и почек.

При СД1 центральным звеном патогенеза выступает стойкая гипергликемия, которая запускает цепь взаимосвязанных патобиохимических реакций (полиоловый

путь, образование конечных продуктов гликозилирования, активация протеинкиназы С) [4]. Эти изменения закономерно приводят к специфическим сосудистым осложнениям. Важно подчеркнуть, что уже на ранних стадиях заболевания, задолго до развёрнутой клинической картины поздних осложнений, формируются функциональные нарушения микроциркуляции (МЦ) [5]. Именно расстройства микрогемодинамики лежат в основе таких серьёзных проявлений диабета, как диабетическая стопа, ангиопатия, ретинопатия и нейропатия [6]. Данные состояния не только значительно снижают качество жизни, но и нередко служат прямой причиной инвалидизации пациентов трудоспособного возраста [7].

В связи с этим раннее выявление изменений микроциркуляции приобретает ключевое, прогностическое значение. Своевременная диагностика сосудистой дисфункции на доклинической стадии позволяет предотвратить или существенно отсрочить развитие необратимых осложнений [5]. Удобным и клинически оправданным объектом для неинвазивной оценки функции микрососудов служит кожа. Обнаруживаемая при этом кожная микрососудистая дисфункция рассматривается в современной литературе как надёжный маркер системного поражения организма.

Особого внимания заслуживает тот факт, что микроциркуляторные расстройства при диабете развиваются не изолированно, а в тесной и взаимно отягощающей связи с изменениями тканевого метаболизма (ТМ). Хроническая гипергликемия запускает каскад метаболических сдвигов, включающий нарушение окислительно-восстановительного гомеостаза, избыточное накопление восстановленных пиридиннуклеотидов (НАДН) и угнетение активности флавиновых коферментов (ФАД) [8]. Указанные процессы, в свою очередь, усугубляют эндотелиальную дисфункцию, повышают сосудистый тонус, способствуют агрегации форменных элементов крови и, в конечном итоге, приводят к стойкому снижению перфузии тканей. Таким образом, метаболические сдвиги повреждают микроциркуляцию, а ухудшение перфузии дополнительно нарушает тканевой метаболизм.

В связи с этим, ***целью исследования*** явилось выявление изменений показателей кожной микроциркуляции и тканевого метаболизма у крыс на модели аллоксан-индуцированного диабета.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальную часть настоящего исследования выполняли в Центре коллективного пользования научным оборудованием «Экспериментальная физиология и биофизика» кафедры физиологии человека и животных и биофизики Института биохимических технологий, экологии и фармации ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского».

Лабораторные крысы содержались в виварии в условиях стандартного свето-темнового режима при температуре 18–22 °С. Использовали подстил «Рехофикс МК 2000» на основе кукурузных початков (ООО «Зилубаг», Россия). Животным был обеспечен свободный доступ к воде и полноценному гранулированному корму ЛБК-120 (ЗАО «Тосненский комбикормовый завод», Россия). Все процедуры с

животными соответствовали требованиям ГОСТ Р 53434-2009, ГОСТ 33215-2014, правилам лабораторной практики при проведении доклинических исследований, этическим стандартам, утверждённым правовыми актами Российской Федерации, ГОСТ 33215-2014 «Руководство по содержанию и уходу за лабораторными животными, правилам оборудования помещений и организации процедур», рекомендациям Комиссии по биоэтике ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского».

В исследование включались половозрелые самцы крыс (n=35) линии *Wistar* (ФГУП «Питомник лабораторных животных «Рапполово») без внешних признаков заболеваний, физических отклонений и травм массой 240–290 г., характеризующихся средней двигательной активностью и низкой эмоциональной реакцией при исследовании в тесте «открытое поле» (IR Actimeter, Pan Lab Harvard Apparatus с программным обеспечением Actitrack 2 (Pan Lab Harvard Apparatus, Испания).

Экспериментальные животные демонстрировали признаки здорового состояния, никогда ранее не участвовали в исследованиях, прошли карантин продолжительностью не менее 14 дней и адаптацию к условиям эксперимента, рукам исследователя (хэндлинг) и экспериментальным манипуляциям, а именно процедурам регистрации показателей артериального давления (АД), кожной МЦ и ТМ.

Дизайн эксперимента. Отобранных для эксперимента животных рандомным образом («методом конвертов») разделили на 2 группы: 1 (n=10) – контрольная; 2 (n=25) – экспериментальная с аллоксан-индуцированным диабетом, который создавали парентеральным введением раствора аллоксан-моногидрата ($C_4H_2N_2O_4 \cdot H_2O$; производитель – «Диаэм», Россия) Препарат вводили внутрибрюшинно по 100 мг/кг в физиологическом растворе (0,2 мл) трижды с интервалом в 24 часа, что обеспечивало суммарную диабетогенную дозу 300 мг/кг [9, 10]. Животные 1 контрольной группы (n=10) получали эквивалентный объём физиологического раствора (0,2 мл) в те же сроки (рис. 1).

На 1, 18, 35 и 49 сутки экспериментального исследования, т. е. до (1 сутки) и на 14, 31, 45 сутки после введения суммарной диабетогенной дозы аллоксана у всех животных регистрировали систолическое (САД, мм рт. ст.) и диастолическое (ДАД, мм рт. ст.) АД (NIBP200A «Biopac Systems, Inc.», США с программным обеспечением «AcqKnowledge 4.2 for MP150»); показатели МЦ и ТМ.

Показатели МЦ определяли методом лазерной допплеровской флуометрии (ЛДФ) с помощью лазерного анализатора кровотока «ЛАЗМА-МЦ» (производство НПП «Лазма», Россия). Для исключения движений во время диагностики исследуемое животное помещали в пенал (АЕ1001-R0, НПК «Открытая Наука», Россия), размер которого подбирали так, чтобы животное могло свободно дышать, и ни одна часть тела не была плотно зажата. Показатели МЦ снимали с основания хвоста, лишенного плотного волосяного покрова, который фиксировали на ровной поверхности на одной линии с телом в горизонтальном положении тканевым пластырем. Оптоволоконный зонд прибора «ЛАЗМА-МЦ-1» крепили у основания хвоста крысы перпендикулярно с помощью тканевого пластыря.

В ходе исследования оценивали неосцилляторные показатели: показатель микроциркуляции (ПМ, перф. ед.); среднее квадратичное отклонение (СКО, перф. ед.); коэффициент вариации (Кв, %), осцилляторные показатели: нормированные амплитуды колебаний эндотелиального (Аэ), миогенного (Ам), нейрогенного (Ан), дыхательного (Ад) и сердечного (Ас) ритмов, значения которых рассчитывали с помощью компьютерной программы обработки ЛДФ-граммы LDF 2.20.0.507WL. Амплитудно-частотные характеристики осцилляций кожного кровотока у крыс имеют определенные особенности [11]. Методика исследования и анализа показателей кожной МЦ у крыс подробно описана в нашей работе [12].

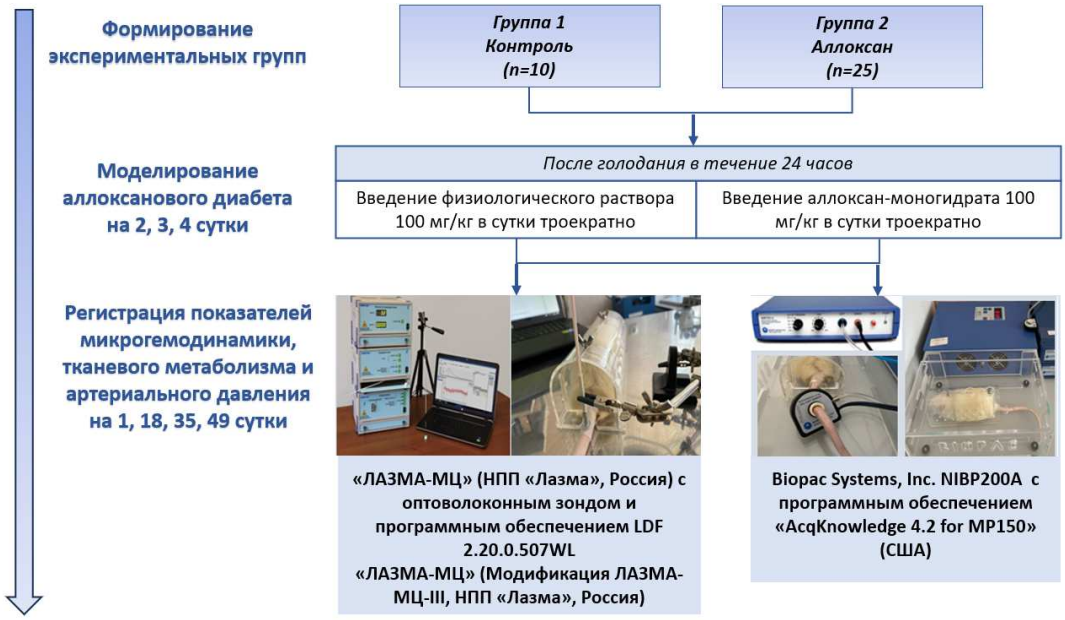


Рис. 1. Дизайн экспериментального исследования.
Примечание: контроль – контрольная группа крыс; аллоксан – группа крыс с аллоксан-индуцированным диабетом; n – количество крыс.

Ввиду вариабельности значений амплитуд (А, перф. ед.) колебаний анализируемых ритмов, используются их нормированные величины (Анорм, перф. ед.), что дает возможность исключить влияние посторонних факторов на проведение исследований и сравнивать величины амплитуд у разных животных:

$$А_{норм} = А / 3СКО, \quad (1)$$

где А – амплитуда колебаний скорости кровотока анализируемого ритма; СКО – среднеквадратическое отклонение амплитуды скорости кровотока от среднего арифметического значения.

Использование программы LDF 2.20.0.507WL дает возможность автоматически рассчитывать нормированные амплитуды колебаний скорости кровотока для каждого диапазона частот.

Рассчитывали показатели нейрогенного (НТ) и миогенного (МТ) тонусов [13, 14]:

$$НТ = СКО*АДср / Ан*ПМ, \quad (2)$$

где СКО – среднее квадратичное отклонение показателя микроциркуляции, АДср – среднее артериальное давление, Ан – значение амплитуды колебаний перфузии в нейрогенном диапазоне.

$$МТ = СКО*АДср / Ам*ПМ, \quad (3)$$

где Ам – значение амплитуды колебаний перфузии в миогенном диапазоне.

Среднее артериальное давление у животных (АДср, мм рт. ст.) рассчитывали по формуле:

$$АДср = ДАД + 1/3(САД - ДАД), \quad (4)$$

где ДАД – диастолическое артериальное давление, САД – систолическое артериальное давление.

Сумму максимальных амплитуд (Amax) в эндотелиальном, нейрогенном, миогенном и сердечном частотных диапазонах расценивали как мощность механизмов, обеспечивающих приток крови в микроциркуляторное русло по формуле:

$$\Sigma Amax = Аэ + Ан + Ам + Ас, \quad (5)$$

где Аэ – значение амплитуды колебаний перфузии в эндотелиальном диапазоне; Ас – значение амплитуды колебаний перфузии в сердечном диапазоне.

Рассчитывали соотношение притока крови к венозному оттоку, поскольку изменение Ад обусловлено периодическими колебаниями в венозном отделе МЦ:

$$С = \Sigma А / Ад, \quad (6)$$

где Ад – значение амплитуды колебаний перфузии в дыхательном диапазоне.

Для диагностики состояния ТМ у крыс использовали метод лазерной флуоресцентной спектроскопии (ЛФС) с помощью лазерного анализатора кровотока «ЛАЗМА-МЦ» (модификация ЛАЗМА-МЦ-III, производство НПП «Лазма», Россия), позволяющий исследовать изменения флуоресценции восстановленного никотинамидадениндинуклеотида (НАДН) и окисленного флавинадениндинуклеотида (ФАД) [13].

Для расчёта редокс-соотношения (РО), отражающего окислительно-восстановительное соотношение в митохондриальном матриксе, использовали формулу:

$$РО = (If\ NADH / If\ FAD) \times (Il\ FAD / Il\ NADH), \quad (7)$$

где If NADH и If FAD – амплитуды флуоресценции коферментов НАДН и ФАД; Il FAD, Il NADH – амплитуды возбуждения флуоресценции коферментов ФАД и НАДН.

Статистическую и графическую обработку экспериментальных данных осуществляли с помощью программ Graph Pad Prism 8 и «Microsoft Excel 2007». Поскольку распределение данных не соответствовало нормальному (критерий Шапиро-Уилка), значимость различий между группами оценивали с помощью непараметрического критерия Манна-Уитни. Различия считались достоверными при $p<0,05$. Данные на рисунках и в тексте представлены в виде медианы и нижнего и верхнего квартилей (Me (Q25:Q75)), а также в процентах, рассчитанных относительно значений контрольной группы, принятых за 100 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как показали результаты исследования, у животных у 1 группы (контрольной) во все сроки наблюдения, а у 2 группы до введения аллоксана значения исследуемых показателей АД, МЦ и ТМ были в пределах физиологической нормы и согласуются с результатами наших предыдущих исследований [12, 15, 16].

На 18, 35, 49 сутки исследования после введения диабетогенной суммарной дозы аллоксана наблюдалось статистически значимое повышение значений САД на 3,28 % (p=0,004), 4,35 % (p=0,009), 2,76 % (p=0,037) и ДАД на 12,39 % (p<0,001), 5,16 % (p=0,011), 8,81 % (p=0,046) соответственно относительно показателей контрольной группы животных (рис. 2).

При СД часто наблюдается гипертензивная реакция, что значительно увеличивает риск сердечно-сосудистых и почечных осложнений. Указанные гемодинамические сдвиги, вероятно, связаны с активацией симпатической нервной системы, задержкой натрия и воды, а также с повышением жёсткости сосудистой стенки, что является характерным проявлением диабетической макроангиопатии и создаёт дополнительную нагрузку на микроциркуляторное русло (МЦР) [17–19].

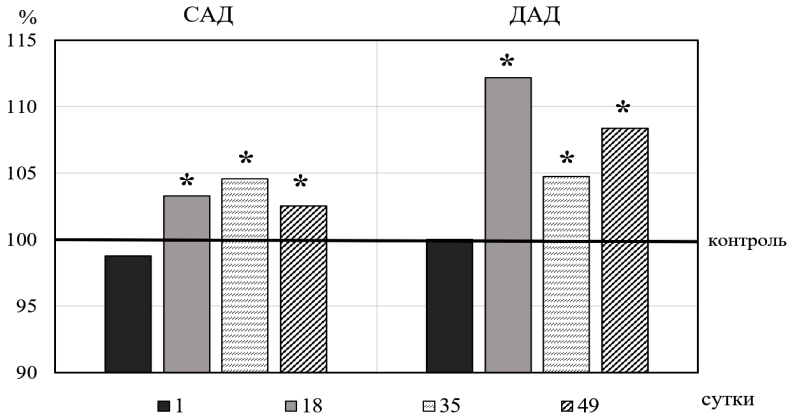


Рис. 2. Динамика показателей систолического (САД) и диастолического (ДАД) артериального давления у крыс с аллоксан-индуцированным диабетом в разные сроки эксперимента относительно значений в контрольной группе животных, принятых за 100 %.

Примечание: * – статистически значимое отличие по критерию Манна-Уитни относительно значений показателей у крыс контрольной группы.

После формирования аллоксан-индуцированного диабета у крыс 2 группы произошли и существенные изменения кожной МЦ. Так, на 18, 35, 49 сутки экспериментального исследования наблюдали статистически значимое снижение значения амплитуд эндотелиального ритма (Аэ) на 50,00 % (p<0,001), 68,24 % (p=0,017) и 48,72 % (p=0,015) относительно значений показателя у крыс контрольной группы (рис. 3).

Эндотелиальные колебания локализуются преимущественно в артериолах, где сосудистый эндотелий является активно секретирующим органом, обеспечивающим

непрерывное высвобождение основного гуморального вазодилататора оксида азота (NO) при участии NO-синтазы, который играет ключевую роль в поддержании сосудистого тонуса и регуляции кровотока. Эндотелиальный NO-зависимый (около 0,01 Гц) диапазон флуктуаций обусловлен именно периодическими изменениями концентрации NO [13, 14, 20, 21].

Таким образом, снижение Аэ у крыс с аллоксановым диабетом свидетельствует об угнетении базальной секреции NO, что закономерно вызывает вазоконстрикторную реакцию.

Подтверждением этому является и изменение в ЛДФ-граммах крыс 2 группы амплитуд колебаний эндотелиально-независимого происхождения. Так, на 18, 35, 49 сутки у крыс экспериментальной группы значения амплитуды нейрогенных ритмов (Ан) достоверно снизились на 53,20 % ($p<0,001$), 66,15 % ($p=0,017$), 51,25 % $p=0,016$; рис. 3), что сопровождалось статистически значимым повышением НТ на 108,67 % ($p=0,036$), 128,17 % ($p=0,017$), 43,88 % ($p=0,042$; рис. 4).

Нейрогенные колебания локализуются в артериолах и артериолярных сегментах артериоло-венулярных анастомозов, т. е. сосудах, иннервируемых симпатическими адренергическими волокнами, отражают активность со стороны симпатических адренергических нервных волокон на гладкомышечные стенки микрососудов и характеризуют уровень нутритивного кровотока. Выявленные изменения ЛДФ-граммы свидетельствуют об усилении вазоконстрикторного контроля артериолярного тонуса симпатическими нервами, повышении периферического сопротивления и снижении циркуляции крови по артериоло-венулярным шунтам [21].

На 18, 35 и 49 сутки у крыс экспериментальной группы зарегистрировано снижение амплитуд миогенного ритма (Ам), которые регистрируются на уровне проксимальных артериол, прекапиллярных сфинктеров и обусловлены периодической активностью гладкомышечных волокон артериол, приводя к изменению диаметра их просвета (вазомоции), а также коррелируют с числом функционирующих капилляров [13, 14, 21], на 58,85 % ($p<0,001$), 71,28 % ($p=0,017$) и 49,48 % ($p=0,017$), что сопровождалось достоверным повышением значений МТ на 188,46 % ($p=0,036$), 253,98 % ($p=0,011$) и 32,88 % ($p=0,042$) соответственно по отношению к значениям в контрольной группе животных, что свидетельствует о констрикции метартериол и прекапиллярных сфинктеров, которые в коже выполняют распределительную функцию и вносят максимальный вклад в формирование внутрисосудистого сопротивления на микроциркуляторном уровне.

Таким образом, снижение выработки NO в эндотелии, усиление симпатических адренергических влияний на гладкую мускулатуру, уменьшение числа функционирующих капилляров, повышение внутрисосудистого сопротивления в МЦР свидетельствуют о развитии вазоконстрикции микрососудов при аллоксан-индуцированном диабете.

На 18, 35 и 49 сутки экспериментального исследования зафиксировано снижение амплитуд сердечного ритма (Ас) на 62,19 % ($p<0,001$), 41,46 % ($p=0,017$) и 59,17 % ($p=0,016$; рис. 3).

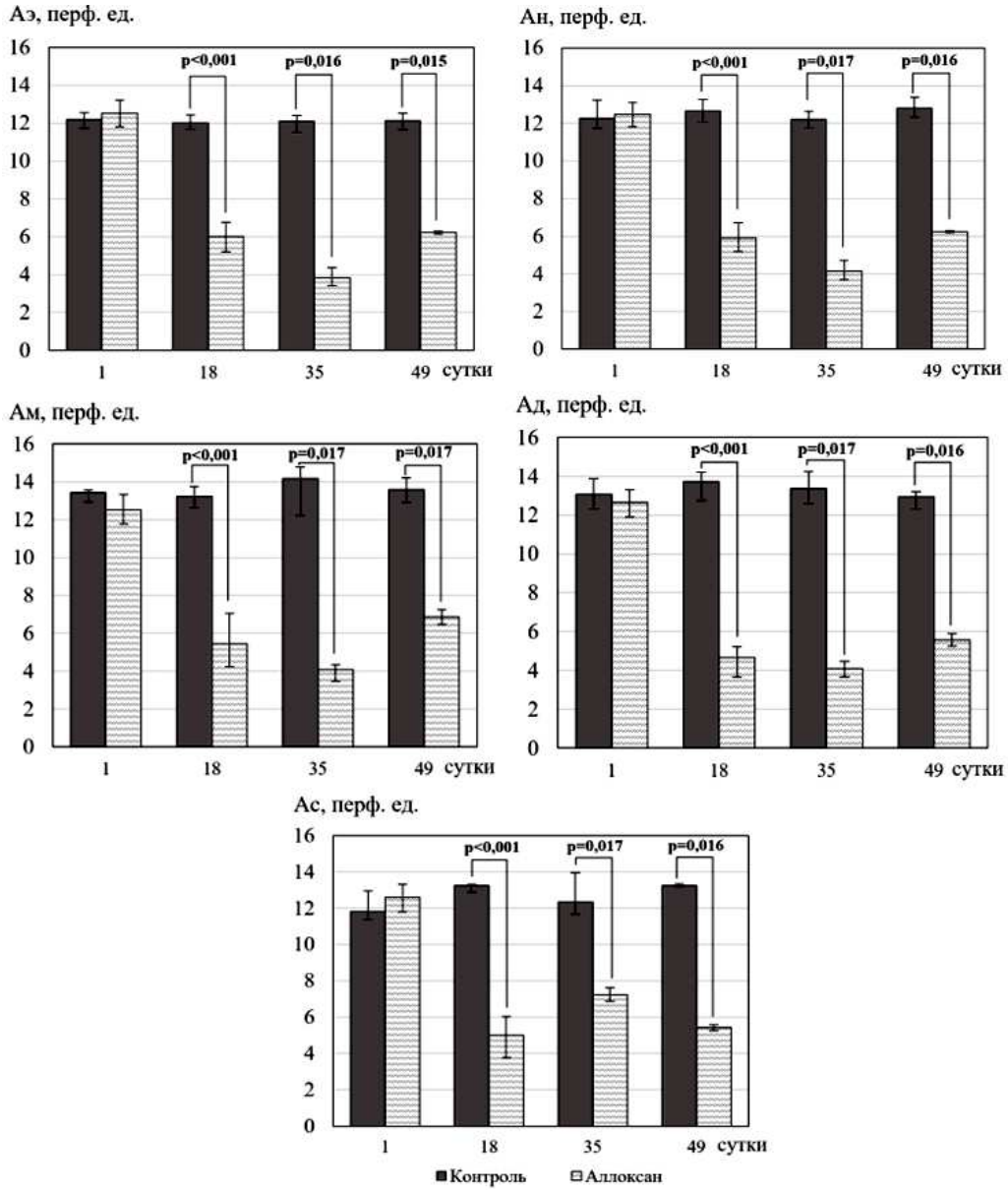


Рис. 3. Динамика амплитуд эндотелиальных (Аэ), нейрогенных (Ан), миогенных (Ам), дыхательных (Ад), сердечных (Ас) колебаний у крыс контрольной (Контроль) и экспериментальной групп с аллоксан-индуцированным диабетом (Аллоксан) в разные сроки эксперимента (1, 18, 35, 49 сутки).

Примечание: значения представлены в виде медианы и квартилей (Q1 – нижняя граница и Q3 – верхняя граница межквартильного диапазона); p – статистически значимое отличие по критерию Манна-Уитни относительно значений показателей у крыс контрольной группы.

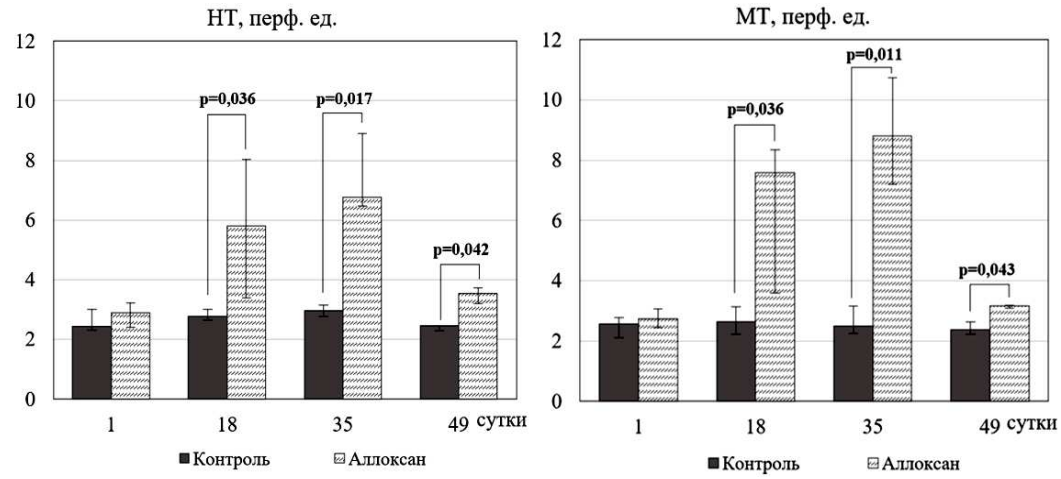


Рис. 4. Динамика нейрогенного (НТ) и миогенного (МТ) компонентов тонуса у крыс контрольной (Контроль) и экспериментальной групп с аллоксан-индуцированным диабетом (Аллоксан) в разные сроки эксперимента (1, 18, 35, 49 сутки).
Примечание: те же, что на рис. 3.

Сердечные волны ЛДФ-граммы локализуются в артериолах и капиллярах и отражают перфузионное давление в микрососудах, обусловленное сердечным выбросом, и состоянием тонуса сосудов, обеспечивающих сопротивление артериальному притоку крови [13, 14], а снижение их амплитуд указывает на уменьшение притока крови в МЦР у крыс с аллоксан-индуцированным диабетом.

Значения амплитуд дыхательного ритма (Ад) достоверно снизились на 18, 35 и 49 суткам на 66,06 % ($p<0,001$), 69,44 % ($p=0,017$) и 57,02 % ($p=0,016$) соответственно у крыс экспериментальной группы.

Дыхательные колебания локализуются в венулах и венозном отделе МЦР и представляют собой модуляцию кровотока, обусловленную трансмиссией колебаний внутригрудного давления и влиянием дыхания на вегетативную регуляцию сердечного ритма [22, 23]. Происхождение дыхательных волн объясняется пассивной механической трансмиссией колебаний внутригрудного давления и центральным вегетативным взаимодействием дыхательного и сосудодвигательного центров.

Таким образом, снижение Ад в совокупности с изменениями ранее упомянутых механизмов свидетельствует об уменьшении дыхательной модуляции венозного кровотока и, как следствие – затрудненном венулярном оттоке крови.

Снижение мощности эндотелиального, нейрогенного, миогенного и сердечного механизмов регуляции, обеспечивающих приток крови в МЦР, привело к уменьшению суммарного притока крови (ΣА) у крыс экспериментальной группы на 18, 35 и 49 сутки на 53,03 % ($p<0,001$), 60,62 % ($p=0,017$) и 51,66 % ($p=0,017$; рис. 5) соответственно.

Одновременно зафиксировано достоверное повышение соотношения ΣА/Ад на 18 и 35 сутки на 36,87 % (p<0,001) и 31,66 % (p=0,030). Данное соотношение отражает дисбаланс между артериальным притоком и венулярным оттоком крови [13, 14], его повышение указывает на то, что при сниженном объёме притекающей крови её отток из МЦР оказывается затруднённым. Это состояние является прямым следствием вазоконстрикции, охватывающей приносящие артериолы, прекапиллярные сфинктеры, что уменьшает приток крови в капилляры, так и венулы, что увеличивает сопротивление оттоку крови из МЦР. В результате уменьшается просвет артериол и артериоло-венулярных анастомозов, возрастает посткапиллярное сопротивление, и микроциркуляторное давление повышается [13, 16]. Выраженное нарушение венозного оттока способствует усугублению микроциркуляторной дисфункции и повышению гидростатического давления, отёку тканей и дальнейшему снижению перфузионного градиента.

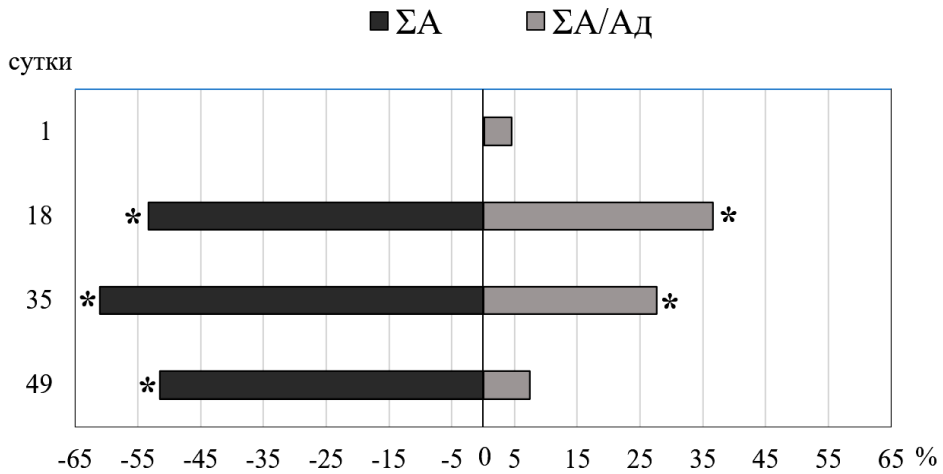


Рис. 5. Изменение притока крови (ΣА) и соотношения притока крови к венозному оттоку (ΣА/Ад) в микроциркуляторном русле крыс экспериментальной группы с аллоксан-индуцированным диабетом в разные сроки эксперимента (1, 18, 35, 49 сутки) относительно значений в контрольной группе животных, принятых за 100 %.

Примечание: те же, что на рис. 2.

Наблюдаемые изменения сопровождались статистически значимым снижением ПМ у крыс экспериментальной группы на 18, 35 и 49 сутки на 46,28 % (p<0,001), 56,59 % (p=0,016) и 53,47 % (p=0,016; рис. 6) соответственно, что свидетельствует о снижении уровня перфузии МЦР [24].

СКО снизилось на 49,20 % (p<0,001), 63,11 % (p=0,017) и 66,44 % (p=0,016) на 18, 35 и 49 сутки соответственно. Кв также достоверно снизился на 18, 35, 49 сутки на 31,68 % (p<0,001), 51,56 % (p=0,017), 54,99 % (p=0,016) относительно значений в контрольной группе [25]. Данный показатель характеризует относительную вариабельность микрокровотока и позволяет оценить соотношение между СКО и

ПМ, отражая степень гетерогенности капиллярного кровотока, независимо от абсолютных значений перфузии [13, 14].

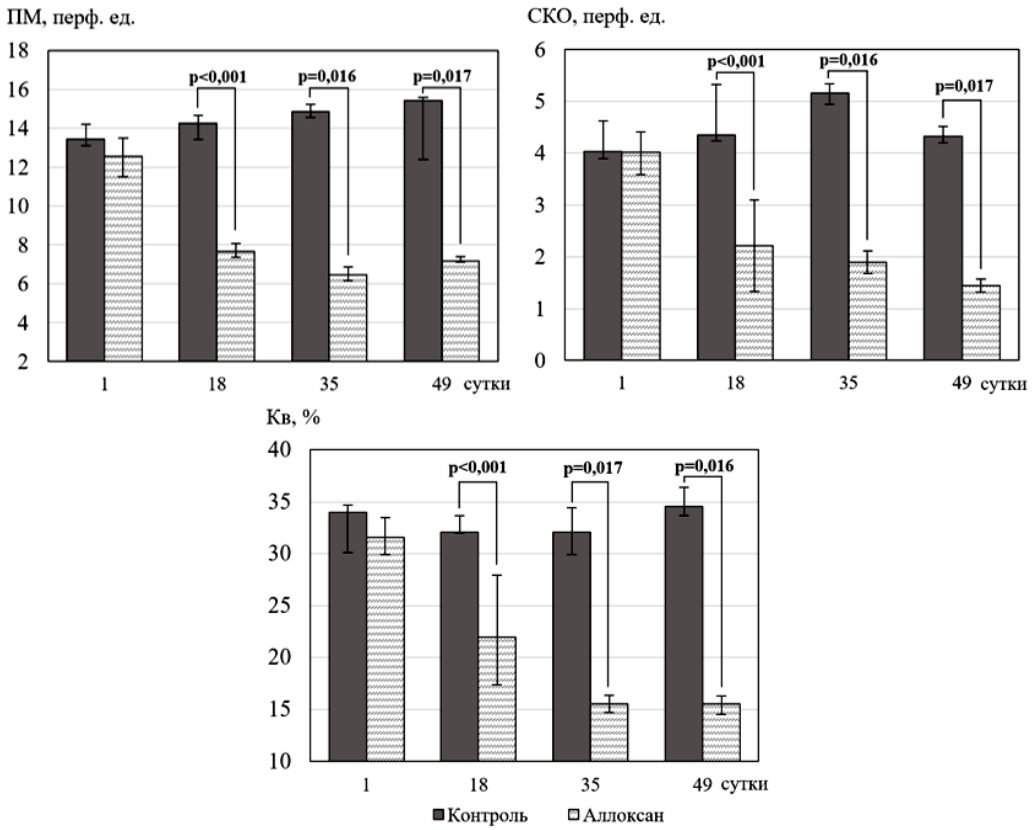


Рис. 6. Динамика показателя микроциркуляции (ПМ), среднего квадратичного отклонения (СКО) и коэффициента вариации (Кв) у крыс контрольной (Контроль) и экспериментальной групп с аллоксан-индуцированным диабетом (Аллоксан) в разные сроки эксперимента (1, 18, 35, 49 сутки).
Примечание: те же, что на рис. 3.

Таким образом, данные изменения неосцилляторных показателей ЛДФ-граммы указывают на снижение перфузии МЦР и утрату гетерогенности капиллярного кровотока, что подтверждает развитие реакции вазоконстрикции, развивающейся на фоне аллоксан-индуцированного диабета.

На 18, 35 и 49 сутки исследования зафиксировано повышение НАДН на 142,76 % (p=0,030), 15,86 % (p=0,030), 100,00 % (p=0,022) на фоне снижения ФАД на 36,71 % (p=0,003), 17,97 % (p=0,016), 38,02 % (p=0,017; рис. 7) соответственно.

Данные кофакторы играют важную роль в реакциях энергетического метаболизма в качестве переносчиков электронов и, обладая флюоресценцией, служат основой для анализа метаболических процессов в живых клетках и тканях.

НАДН находится в клетке в свободном и связанном с белками состоянии. Свободная форма локализуется в цитозоле и отличается от связанной с белком формы спектром эмиссии. Основная флюоресценция испускается связанной формой НАДН, локализованной в митохондриях, тогда как вклад свободной формы относительно мал [26]. Если НАДН локализован в основном в митохондриях и участвует преимущественно в энергетическом обмене клетки, то ФАД содержится как в цитоплазме, так и в митохондриях и задействован помимо окислительного фосфорилирования в различных биохимических процессах (утилизация глутатиона, липогенез, перекисное окисление липидов, антиоксидантные реакции, синтез ацетил-коэнзима А, аскорбат-глутатионовый цикл, пентозофосфатный цикл) [27]. Разнонаправленное изменение НАДН и ФАД свидетельствует об увеличении гликолиза, цикла трикарбоновых кислот и β-окисления жирных кислот, являющихся источниками НАДН, при одновременном угнетении окислительного фосфорилирования [28, 29].

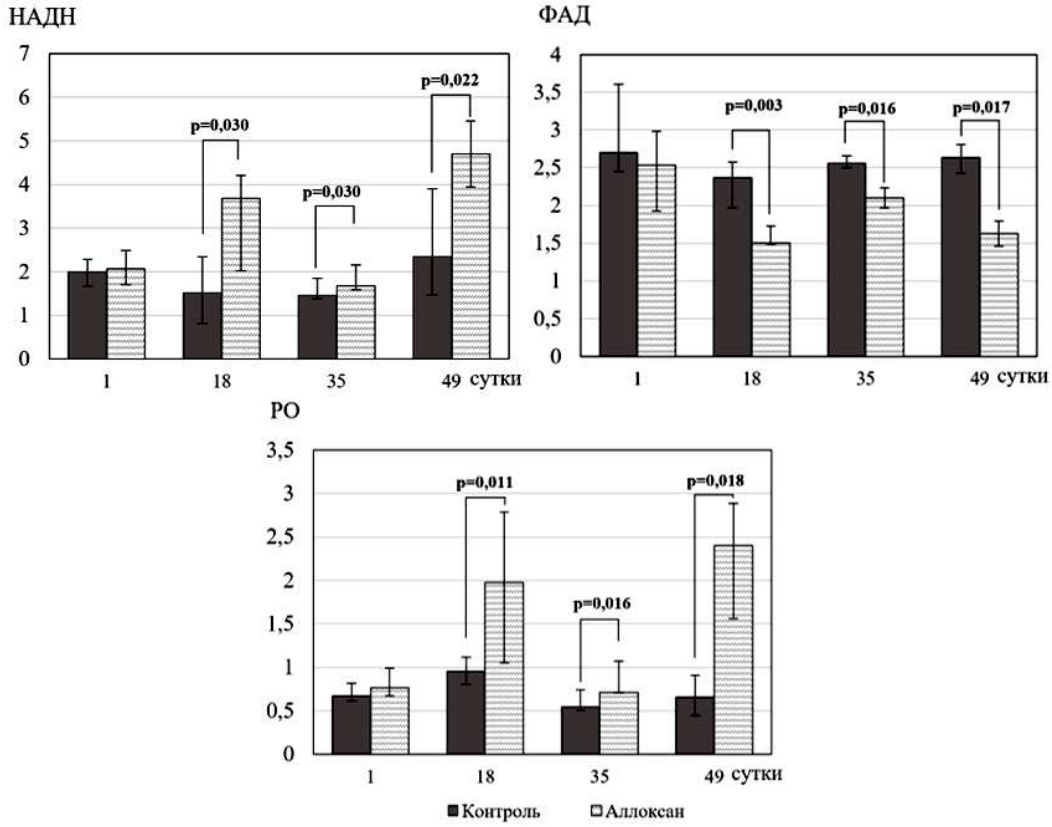


Рис. 7. Динамика показателей НАДН, ФАД и редокс-отношения (РО) у крыс контрольной (Контроль) и экспериментальной групп с аллоксан-индуцированным диабетом (Аллоксан) в разные сроки эксперимента (1, 18, 35, 49 сутки).
Примечание: те же, что на рис. 3.

Поскольку НАДН и ФАД являются единственными формами переносчиков электронов, проявляющими флуоресценцию, отношение их интенсивности флуоресценции (редокс-отношение, РО) обычно используется для оценки метаболического профиля клетки или ткани. На 18, 35 и 49 сутки у крыс с аллоксан-индуцированным диабетом регистрировали достоверное повышение РО на 107,55 % (p=0,011), 31,08 % (p=0,016) и 263,33 % (p=0,018) относительно такового у крыс контрольной группы, что указывает на редокс-дисбаланс, характеризующийся накоплением восстановленного НАДН на фоне истощения пула окисленного ФАД [30]. Поскольку основная масса НАДН образуется при гликолизе, а ФАД – при окислительном фосфорилировании, высокое редокс-отношение указывает на преобладание гликолитического пути над окислительным фосфорилированием [31].

Таким образом, проведённое исследование показало, что аллоксан-индуцированный диабет у крыс сопровождается выраженными и прогрессирующими нарушениями МЦ и ТМ. Описанные изменения характерны для диабетической микроангиопатии, которая проявляется в виде нефропатии, нейропатии и ретинопатии [6, 19, 32].

Показано, что при СД микрососудистая дисфункция проявляется гораздо раньше, чем структурные изменения в сердечно-сосудистой системе [19, 32, 33]. Ключевым звеном развития диабетических осложнений является гипергликемия, которая приводит к нарушению биосинтеза NO за счёт усиления окислительного стресса и воспаления, снижения активности факторов вазодилатации и увеличения продукции активных форм кислорода [19, 32]. Гипергликемия приводит к оксидативному стрессу, активации воспалительных процессов и нарушению барьерной функции эндотелия [34]. Эти изменения запускают каскад патологических реакций, приводящих к старению или гибели клеток и, как следствие, способствуют развитию диабетических микрососудистых заболеваний [19, 32]. Именно эндотелиальная дисфункция рассматривается как один из наиболее ранних и «центральных» механизмов диабетической микроангиопатии: нарушается баланс вазодилататоров/вазоконстрикторов; снижается биодоступность NO; увеличивается проницаемость эндотелия; нарушается микроциркуляторная реактивность.

Особого внимания заслуживают выявленные в настоящем исследовании изменения со стороны тканевого метаболизма. При СД нарушается баланс между окислительно-восстановительными коферментами. НАДН вырабатывается в избытке из-за активации гликолиза и цикла Кребса в результате гипергликемии [35]. В β-клетках поджелудочной железы накопление избытка НАДН ингибирует ферменты, продуцирующие его из $НАД^+$, что способствует образованию активных форм кислорода, количество которых возрастает пропорционально объёму НАДН [29]. Окислители перегружают антиоксидантные системы клетки, что приводит к митохондриальной дисфункции, повреждению ДНК, липидов и белков [36]. Именно окислительный стресс является одной из наиболее подтверждённых причин микрососудистых осложнений СД, нарушающих эндотелиальную функцию, усиливающих воспаление, способствующих фиброзу и микрососудистой дисрегуляции [29]

Исходя из результатов исследования, становится очевидным, что раннее, неинвазивное комплексное выявление нарушений кожной микрогемодинамики и тканевого метаболизма при СД открывает перспективу ранней диагностики и предотвращения тяжёлых необратимых осложнений (диабетической стопы, ангиопатии, ретинопатии), поскольку, как показывают наши и литературные данные, изменения кожной микрогемодинамики при СД, включающие снижение базальной перфузии и нарушения реактивности (эндотелий- и нейрогенно-зависимых компонентов), могут проявляться рано и коррелировать с метаболическими и другими осложнениями [37]. Установлено, что классические диабетические микроангиопатии (ретинопатия, нефропатия, нейропатия) имеют общие механизмы микрососудистого поражения [38]. Механизмы сосудистых осложнений при диабете (микроангиопатии) тесно связаны с эндотелиальной дисфункцией, оксидативным стрессом, воспалением и AGE–RAGE каскадами (сигнальный путь, который запускается при взаимодействии конечных продуктов гликирования (AGEs) с их рецептором RAGE (*receptor for advanced glycation end products*), что патогенетически объясняет наблюдаемые изменения кожной МЦ [32].

Полученные данные подтверждают ключевую роль гипергликемии в развитии нарушения окислительно-восстановительного баланса, микроциркуляторной дисфункции при аллоксан-индуцированном диабете, расширяют представления о патогенезе сосудистых осложнений СД и могут быть использованы для оценки эффективности потенциальных антидиабетических и ангиопротекторных средств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Аллоксан-индуцированный диабет у крыс сопровождается выраженными и прогрессирующими нарушениями кожной микрогемодинамики и тканевого метаболизма, заключающимися в гипертензии, угнетении эндотелиального, нейрогенного и миогенного механизмов регуляции, вазоконстрикции микрососудов, нарушении окислительно-восстановительного баланса, что свидетельствует о развитии диабетических макро- и микроангиопатий, митохондриальной дисфункции и окислительного стресса.
2. Анализ динамики показателей кожной микроциркуляции у крыс с аллоксан-индуцированным диабетом выявил прогрессирующий характер нарушений, связанных с развитием эндотелиальной дисфункции, снижением выработки NO в эндотелии, усилением симпатических адренергических влияний на гладкую мускулатуру сосудов, угнетением вазомоторной активности гладкой мускулатуры микрососудов, повышением периферического внутрисосудистого сопротивления, базального тонуса артериол и посткапиллярного сопротивления, снижением общей перфузии, нутритивного кровотока, притока крови в артериолы на фоне уменьшения венулярного оттока, что свидетельствует о прогрессирующей вазоконстрикции и формировании стойкой, хронической микроциркуляторной дисфункции – диабетической микроангиопатии.
3. Анализ динамики показателей тканевого метаболизма у крыс с аллоксан-индуцированным диабетом выявил повышение уровня восстановленного

никотинамидадениндинуклеотида (НАДН, максимально на 142,76 % (p=0,030) на 18 сутки наблюдения), увеличение редокс-отношения (максимально на 263,33 % (p=0,018) на 49 сутки наблюдения) на фоне снижения содержания флавинадениндинуклеотида (ФАД, максимально на 38,02 % (p=0,017) на 49 сутки наблюдения) относительно значений этих показателей у крыс контрольной группы, что свидетельствует о преобладании гликолитического пути над окислительным фосфорилированием, нарушении окислительно-восстановительного баланса и работы митохондриального дыхательного комплекса, усугубляющих эндотелиальную дисфункцию.

Список литературы

1. Дедов И. И. Сахарный диабет типа 1. Реалии и перспективы / И. И. Дедов, М. В. Шестакова // Москва : МИА, 2016. – 504 с.
2. Ong K. L. Global, regional, and national burden of diabetes from 1990 to 2021, with projections of prevalence to 2050: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021 / K. L. Ong, L. K. Stafford, S. A. McLaughlin, E. J. Boyko // The Lancet. – 2023. – Vol. 402, No. 10397. – P. 203–234.
3. Аннайева О. Т. Сахарный диабет: этиология и патогенез / О. Т. Аннайева // Символ науки. – 2025. – № 1–1–2. – С. 93–94.
4. Клыпа Т. В. Гипергликемия критических состояний / Т. В. Клыпа, М. С. Орехова, Л. И. Забросаева // Сахарный диабет. – 2015. – 18(1). – С. 33–41.
5. Fuchs D. The association between diabetes and dermal microvascular dysfunction non-invasively assessed by laser Doppler with local thermal hyperemia: a systematic review with meta-analysis / D. Fuchs, P. P. Dupon, L. A. Schaap, R. Draijer // Cardiovasc Diabetol. – 2017. – 16(1). – P. 11.
6. Mengstie M. A. Endogenous advanced glycation end products in the pathogenesis of chronic diabetic complications / M. A. Mengstie, E. Chekol Abebe, A. Behaile Teklemariam, A. Tilahun Mulu, M. M. Agidew, M. Teshome Azezew, E. A. Zewde, A. Agegnehu Teshome // Front Mol Biosci. – 2022. – 1002710.
7. Булава Е. В. Факторы прогрессирования диабетической ретинопатии и развития макулярного отека после трансплантации поджелудочной железы / Е. В. Булава, Г. Ш. Аржиматова, М. В. Гусаков, И. В. Дмитриев // Сахарный диабет. – 2025. – 28(3). – С. 252–261.
8. Mordes J. P. LEW.1WR1 rats develop autoimmune diabetes spontaneously and in response to environmental perturbation / J. P. Mordes, D. L. Guberski, J. H. Leif, B. A. Woda, J. F. Flanagan, D. L. Greiner, E. H. Kislauskis, R. S. Tirabassi // Diabetes. – 2005. – 54(9). – P. 2727–2733.
9. Данилова И. Г. Способ моделирования аллоксанового диабета / И. Г. Данилова, И. Ф. Гетте : пат. № 2534411 Рос. Федерация. – Заявл. 27.11.2014; опубл. 27.11.2014. – Бюл. № 33.
10. Чуян Е. Н. Метаболические нарушения у крыс с аллоксан-индуцированным диабетом / Е. Н. Чуян, С. Ю. Ливенцов, Н. И. Дворецкая // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия. – 2025. – № 2. – С. 281–302.
11. Humeau A. Time-frequency analysis of laser Doppler flowmetry signals recorded in response to a progressive pressure applied locally on anaesthetized healthy rats / A. Humeau, A. Koptka, P. Abraham // Phys Med Biol. – 2004. – 49(5). – P. 843–857.
12. Чуян Е. Н. Изменение показателей микро- и центральной гемодинамики у крыс при действии ацетилсалициловой кислоты и ее координационных соединений с металлами / Е. Н. Чуян, И. С. Миронюк, М. Ю. Раваева, Т. В. Гришина, И. В. Черетаев, С. Е. Чернобай // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2021. – 20(4). – С. 75–86.
13. Козлов В. И. Лазерная допплеровская флоуметрия в оценке состояния и расстройств микроциркуляции крови / В. И. Козлов, Г. А. Азизов, О. А. Гурова, Ф.Б. Литвин – М. : РУДН, 2012. – 32 с.
14. Крупаткин А. И. Лазерная допплеровская флоуметрия микроциркуляции крови / А. И. Крупаткин, В. В. Сидоров. – М. : Медицина. – 2005. – 254 с.

15. Чуян Е. Н. Показатели кардиореспираторной системы крыс при действии ацетилсалициловой кислоты и ее комплексных соединений с металлами / Е. Н. Чуян, И. С. Миронюк, М. Ю. Раваева, И. В. Черетаев, Т. В. Гришина // Ученые записки Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского. Биология. Химия. – 2020. – С. 267–280.
16. Раваева М. Ю. Тканевой окислительный метаболизм и микрогемодинамика кожи у крыс, находящихся в условиях воздействия стресс-факторов разной продолжительности и их комбинаций / М. Ю. Раваева, И. В. Черетаев, Е. Н. Чуян, П. А. Галенко-Ярошевский, Э. Р. Джелдубаева, И.С. Миронюк // Обзоры по клинической фармакологии и лекарственной терапии. – 2023. – 21(4). – С. 357–366.
17. Потешкина Н. Г. Лечение артериальной гипертензии при сахарном диабете / Н. Г. Потешкина, Е. Ю. Мирина // РМЖ. – 2010. – С. 565.
18. Bulum T. Blood pressure is associated with diabetic retinopathy in type 1 but not in type 2 diabetes / T. Bulum, M. Tomić, R. Vrabec // Acta Clin Croat. – 2022. – P. 14–22.
19. Jan Y. K. Diagnosis, pathophysiology and management of microvascular dysfunction in diabetes mellitus / Y. K. Jan, N. Kelhofer, T. Tu // Diagnostics (Basel). – 2024. – 14(24). – P. 2830.
20. Roumenina L. T. Endothelial cells: source, barrier, and target of defensive mediators / L. T. Roumenina, J. Rayes, M. Frimat, V. Fremeaux-Bacchi // Immunol Rev. – 2016. – 274. – P. 307–329.
21. Kralj L. Wavelet analysis of laser Doppler microcirculatory signals: Current applications and limitations / L. Kralj, H. Lenasi // Frontiers in Physiology. – 2023. – 70(3). – P. 1–15.
22. Dremin V. Dynamic evaluation of blood flow microcirculation by combined use of the laser Doppler flowmetry and high-speed videocapillaroscopy methods / V. Dremin, I. Kozlov, M. Volkov // J Biophotonics. – 2019. – 12(6).
23. Mizeva I. Spatial heterogeneity of cutaneous blood flow respiratory-related oscillations quantified via laser speckle contrast imaging / I. Mizeva, E. Potapova, V. Dremin // PLoS ONE. – 2021. – P. 1–15.
24. Сидоров В. В. Система локальных анализаторов для неинвазивной диагностики общего состояния компартментов микроциркуляторно-тканевой системы кожи человека / В. В. Сидоров, Ю. Л. Рыбаков, В. М. Гукасов, Г. С. Евтушенко // Медицинская техника. – 2021. – 6(330). – С. 4–6.
25. Крупаткин А. И. Колебания кровотока – новый диагностический язык в исследовании микроциркуляции / А. И. Крупаткин // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2014. – 13(1). – С. 83–99.
26. Chorvat D. Multi-wavelength fluorescence lifetime spectroscopy: a new approach to the study of endogenous fluorescence in living cells and tissues / D. Chorvat, A. Chorvatova // Laser Phys Lett – 2009. – 6(3). – P. 175–193.
27. Blacker T. S. Separating NADH and NADPH fluorescence in live cells and tissues using FLIM / T. S. Blacker, Z. F. Mann, J. E. Gale, M. Ziegler, A. J. Bain, G. Szabadkai, M. R. Duchen // Nat Commun. – 2014. – 5(1). – P. 3936
28. Lukina M. M. Metabolical imaging for the study of oncological processes (review) / M. M. Lukina, M. V. Shirmanova, T. F. Sergeeva, E. V. Zagaynova // Sovremennye tehnologii v medicine. – 2016. – 8(4). – С. 113–121.
29. Xie N. NAD+ metabolism: pathophysiologic mechanisms and therapeutic potential / N. Xie, L. Zhang, W. Gao [et al.] // Sig Transduct Target Ther. – 2020. – 227 p.
30. Georgakoudi I. Optical imaging using endogenous contrast to assess metabolic state / I. Georgakoudi, K. P. Quinn // Annu Rev Biomed Eng. – 2012. – P. 351–367.
31. Staniszewski K. Surface fluorescence studies of tissue mitochondrial redox state in isolated perfused rat lungs / K. Staniszewski, S. H. Audi, R. Sepehr, E. R. Jacobs, M. Ranji // Ann Biomed Eng. – 2013. – 41(4). – P. 827–836.
32. Yang D. R. Endothelial dysfunction in vascular complications of diabetes: a comprehensive review of mechanisms and implications / D. R. Yang, M. Y. Wang, C. L. Zhang, Y. Wang // Front Endocrinol. – 2024. – Vol. 15. – P. 1359255.
33. Love K. M. Predictors of arterial stiffness in adolescents and adults with type 1 diabetes: a cross-sectional study / K. M. Love, W. B. Horton, J. T. Patrie // BMJ Open Diabetes Res Care. – 2022. – 10(1). – e002491.

34. Salvatore T. Coronary microvascular dysfunction in diabetes mellitus: pathogenetic mechanisms and potential therapeutic options / T. Salvatore, R. Galiero, A. Caturano // Biomedicines. – 2022. – 10(9). – P. 2274.
35. Yan L. J. NADH/NAD+ Redox Imbalance and Diabetic Kidney Disease / L. J. Yan // Biomolecules. – 2021. – 11(5). – P. 730.
36. Wu J. Sources and implications of NADH/NAD(+) redox imbalance in diabetes and its complications / J. Wu, Z. Jin, H. Zheng, L. J. Yan // Diabetes Metab Syndr Obes. – 2016. – P. 145–153.
37. Sorelli M. Assessment of cutaneous microcirculation by laser Doppler flowmetry in type 1 diabetes / M. Sorelli, P. Francia, L. Bocchi, A. De Bellis, R. Anichini // Microvasc Res. – 2019. – 124. – P. 91–96.
38. Madonna R. Diabetic microangiopathy: Pathogenetic insights and novel therapeutic approaches / R. Madonna, C. R. Balistreri, Y. J. Geng, R. De Caterina // Vasc Pharmacol. – 2017. – 90. – P. 1–7.

CHANGES IN SKIN MICROCIRCULATION AND TISSUE METABOLISM DURING THE DEVELOPMENT OF ALLOXAN-INDUCED DIABETES IN RATS

Chuyan E. N., Murtazaeva A. M., Liventsov S. Yu.

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Crimean Federal University named after V. I. Vernadsky", Simferopol, Republic of Crimea, Russia
E-mail: elena-chuyan@rambler.ru

A study was conducted on changes in skin microcirculation and tissue metabolism in a rat model of alloxan-induced diabetes. It was shown that alloxan-induced diabetes in rats is accompanied by pronounced and progressive disturbances of skin microhemodynamics and tissue metabolism, including hypertension, suppression of endothelial, neurogenic, and myogenic regulatory mechanisms, vasoconstriction of microvessels, and an imbalance in redox status, indicating the development of diabetic macro- and microangiopathies, mitochondrial dysfunction, and oxidative stress. Analysis of the dynamics of skin microcirculation parameters in rats with alloxan-induced diabetes revealed a progressive pattern of disturbances associated with endothelial dysfunction, attenuation of sympathetic adrenergic influences on vascular smooth muscle, suppression of vasomotor activity of microvascular smooth muscle, increased peripheral resistance, elevated basal arteriolar tone and postcapillary resistance, reduced total perfusion and nutritive blood flow, reduced arterial inflow in the presence of impaired venular outflow, and a decreased number of functioning capillaries. These findings indicate progressive vasoconstriction and the formation of a persistent, chronic microcirculatory dysfunction – diabetic microangiopathy. Analysis of the dynamics of tissue metabolism parameters in rats with alloxan-induced diabetes revealed an increase in the level of reduced nicotinamide adenine dinucleotide (NADH) by 142,76 % ($p = 0,030$) on day 18 of observation, an increase in the redox ratio by 263,33 % ($p = 0,018$) on day 49 of observation, along with a decrease in flavin adenine dinucleotide (FAD) by 38,02 % ($p = 0,017$) on day 49 of observation, relative to the values of these parameters in the control group rats. These results indicate a predominance of the glycolytic pathway over oxidative phosphorylation,

a disturbance of the redox balance and function of the mitochondrial respiratory chain, thereby exacerbating endothelial dysfunction.

***Keywords*:** type 1 diabetes mellitus, alloxan-induced diabetes, vasoactive action, tissue microcirculation, tissue metabolism, vascular tone, vasoconstriction, blood pressure.

References

1. Dedov I. I., Shestakova M. V. *Saharnyj diabet tipa 1. Realii i perspektivy* (Moskva : MIA 2016).
2. Ong K. L., Stafford L. K., McLaughlin S. A., Boyko E. J. Global, regional, and national burden of diabetes from 1990 to 2021, with projections of prevalence to 2050: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021, *The Lancet*, **402**, 10397 (2023).
3. Annajeva O. T. *Saharnyj diabet: etiologija i patogenez*, 1–1–2 (Simvol nauki, 2025).
4. Klypa T. V., Orehova M. S., Zabrosaeva L. I. Giperglikemija kriticheskih sostojanij, *Saharnyj diabet*, **18**, 1 (2015).
5. Fuchs D., Dupon P. P., Schaap L. A., Draijer R. The association between diabetes and dermal microvascular dysfunction non-invasively assessed by laser Doppler with local thermal hyperemia: a systematic review with meta-analysis, *Cardiovasc Diabetol*, **16**, 1 (2017).
6. Mengstie M. A., Chekol Abebe E., Behaile Teklemariam A. [et al.] Endogenous advanced glycation end products in the pathogenesis of chronic diabetic complications, *Front Mol Biosci* (2022).
7. Bulava E. V., Arzhimatova G. Sh., Gusakov M. V., Dmitriev I. V. Faktory progressirovanija diabeticheskoj retinopatii i razvitija makuljarnogo oteka posle transplantacii podzheludochnoj zhelezy, *Saharnyj diabet, 28*, 3 (2025).
8. Mordes J. P., Guberski D. L., Leif J. H. [et al.] LEW.1WR1 rats develop autoimmune diabetes spontaneously and in response to environmental perturbation, *Diabetes*, **54**, 9 (2005).
9. Danilova I. G., Gette I. F. *Sposob modelirovanija alloksanovogo diabeta*, Patent № 2534411, 2014.
10. Chujan E. N., Livencov S. Ju., Dvoreckaja N. I. Metabolicheskie narushenija u krys s alloksan-inducirovannym diabetom, *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Biologija. Himija*, 2 (2025).
11. Humeau A., Koпtka A., Abraham P. Time-frequency analysis of laser Doppler flowmetry signals recorded in response to a progressive pressure applied locally on anaesthetized healthy rats, *Phys Med Biol*, **49**, **5** (2004).
12. Chujan E. N., Mironjuk I. S., Ravaeva M. Ju. [et al.] Izmenenie pokazatelej mikro- i central'noj gemodinamiki u krys pri dejstvii acetilsalicilovoj kisloty i ee koordinacionnyh soedinenij s metallami, *Regionarnoe krovoobrashhenie i mikrocirkuljacija*, **20**, 4 (2021).
13. Kozlov V. I., Azizov G. A., Gurova O. A., Litvin F. B. *Lazernaja dopplerovskaja floumetrija v ocenke sostojanija i rasstrojstv mikrocirkuljacii krovi* (M. : RUDN, 2012).
14. Krupatkin A. I., Sidorov V. V. *Lazernaja dopplerovskaja floumetrija mikrocirkuljacii krovi* (M. : Medicina, 2005).
15. Chujan E. N., Mironjuk I. S., Ravaeva M. Ju., Cheretaev I. V., Grishina T. V. Pokazateli kardiorespiratornoj sistemy krys pri dejstvii acetilsalicilovoj kisloty i ee kompleksnyh soedinenij s metallami, *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta im. V. I. Vernadskogo. Biologija. Himija* (2020).
16. Ravaeva M. Ju., Cheretaev I. V., Chujan E. N. [et al.] Tkanevoj okislitel'nyj metabolizm i mikrogemodinamika kozhi u krys, nahodjashhihsja v uslovijah vozdejstvija stress-faktorov raznoj prodolzhitel'nosti i ih kombinacij, *Obzory po klinicheskoj farmakologii i lekarstvennoj terapii*, **21**, 4 (2023).
17. Poteshkina N. G., Mirina E. Ju. Lechenie arterial'noj gipertenzii pri saharnom diabete, *RMZh,* 565 (2010).
18. Bulum T., Tomić M., Vrabec R. Blood pressure is associated with diabetic retinopathy in type 1 but not in type 2 diabetes, *Acta Clin Croat,* 265, 14 (2022).
19. Jan Y. K., Kelhofer N., Tu T. Diagnosis, pathophysiology and management of microvascular dysfunction in diabetes mellitus, *Diagnostics (Basel)*, **14**, 24 (2024).
20. Roumenina L. T., Rayes J., Frimat M., Fremeaux-Bacchi V. Endothelial cells: source, barrier, and target of defensive mediators, *Immunol Rev*, 274 (2016).

21. Kralj L., Lenasi H. Wavelet analysis of laser Doppler microcirculatory signals: Current applications and limitations, *Frontiers in Physiology*, **70**, 3 (2023).
22. Dremin V., Kozlov I., Volkov M. Dynamic evaluation of blood flow microcirculation by combined use of the laser Doppler flowmetry and high-speed videocapillaroscopy methods, *J Biophotonics*, **12**, 6 (2019).
23. Mizeva I., Potapova E., Dremin V. Spatial heterogeneity of cutaneous blood flow respiratory-related oscillations quantified via laser speckle contrast imaging, *PLoS ONE,* 267 (2021).
24. Sidorov V. V., Rybakov Ju. L., Gukasov V. M., Evtushenko G. S. Sistema lokal'nyh analizatorov dlja neinvazivnoj diagnostiki obshhego sostojanija kompartmentov mikrocirkuljatorno-tkanevoj sistemy kozhi cheloveka, *Medicinskaja tehnika*, **6**, 330 (2021).
25. Krupatkin A. I. Kolebanija krovotoka – novyj diagnosticheskij jazyk v issledovanii mikrocirkuljacii, *Regionarnoe krovoobrashhenie i mikrocirkuljacija*, **13**, 1 (2014).
26. Chorvat D., Chorvatova A. Multi-wavelength fluorescence lifetime spectroscopy: a new approach to the study of endogenous fluorescence in living cells and tissues, *Laser Phys Lett*, **6**, 3 (2009).
27. Blacker T. S., Mann Z. F., Gale J. E. [et al.] Separating NADH and NADPH fluorescence in live cells and tissues using FLIM, *Nat Commun,* **5(1)**, 3936 (2014).
28. Lukina M. M., Shirmanova M. V., Sergeeva T. F., Zagaynova E. V. Metabolical imaging for the study of oncological processes (review), *Sovremennye tehnologii v medicine*, **8**, 4 (2016).
29. Xie N., Zhang L., Gao W. [et al.] NAD+ metabolism: pathophysiologic mechanisms and therapeutic potential, *Sig Transduct Target Ther,* 227 (2020).
30. Georgakoudi I., Quinn K. P. Optical imaging using endogenous contrast to assess metabolic state, *Annu Rev Biomed Eng*, 351 (2012).
31. Staniszewski K., Audi S. H., Sepehr R., Jacobs E. R., Ranji M. Surface fluorescence studies of tissue mitochondrial redox state in isolated perfused rat lungs, *Ann Biomed Eng*, **41**, 4 (2013).
32. Yang D. R., Wang M. Y., Zhang C. L., Wang Y. Endothelial dysfunction in vascular complications of diabetes: a comprehensive review of mechanisms and implications, *Front Endocrinol,* **15**, 1359255. (2024).
33. Love K. M., Horton W. B., Patrie J. T. Predictors of arterial stiffness in adolescents and adults with type 1 diabetes: a cross-sectional study, *BMJ Open Diabetes Res Care*, **10**, 1 (2022).
34. Salvatore T., Galiero R., Caturano A. Coronary microvascular dysfunction in diabetes mellitus: pathogenetic mechanisms and potential therapeutic options, *Biomedicines*, **10**, 9 (2022).
35. Yan L. J. NADH/NAD+ Redox Imbalance and Diabetic Kidney Disease, *Biomolecules*, **11**, 5 (2021).
36. Wu J., Jin Z., Zheng H., Yan L. J. Sources and implications of NADH/NAD(+) redox imbalance in diabetes and its complications, *Diabetes Metab Syndr Obes* (2016).
37. Sorelli M., Francia P., Bocchi L., De Bellis A., Anichini R. Assessment of cutaneous microcirculation by laser Doppler flowmetry in type 1 diabetes, *Microvasc Res*, 124 (2019).
38. Madonna R., Balistreri C. R., Geng Y. J., De Caterina R. Diabetic microangiopathy: Pathogenetic insights and novel therapeutic approaches, *Vasc Pharmacol*, 90 (2017).

Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского
Биология. Химия. Том 12 (78). 2026. № 2. С. 327–340.

УДК 537.531:616·001
DOI 10.5281/ZENODO.20795764

ВЛИЯНИЕ НИЗКОИНТЕНСИВНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАНЕВОГО ПРОЦЕССА

Ярмолюк Н. С., Джелдубаева Э. Р., Туманянц К. Н., Юнусова Э. С.

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского», Симферополь, Республика Крым, Российская Федерация
E-mail: nat_yarm@mail.ru

Показано влияние низкоинтенсивного электромагнитного излучения крайне высокой частоты (ЭМИ КВЧ), слабого электромагнитного экранирования (ЭМЭ) и их комбинированного действия на процессы регенерации кожной раны у крыс линии Wistar. Оценку динамики раневого процесса проводили по морфометрическим показателям длины, ширины и площади раны в течение 18 суток наблюдения. Установлено, что воздействие исследуемых электромагнитных факторов способствует ускорению процессов ранозаживления по сравнению с контрольной группой. Полученные результаты свидетельствуют о способности низкоинтенсивных электромагнитных воздействий модулировать процессы воспаления и пролиферации в зоне повреждения. Полученные данные подтверждают перспективность использования низкоинтенсивных электромагнитных факторов в качестве немедикаментозного метода стимуляции регенерации тканей.
Ключевые слова: электромагнитное излучения крайне высокой частоты, электромагнитное экранирование, раны, крысы.

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос лечения ран и ускорения процессов восстановления тканей по-прежнему остается важной задачей, как для практической медицины, так и для экспериментальных исследований. Даже при современном уровне развития лекарственной терапии, проблема эффективного заживления, особенно при сложных и длительно незаживающих ранах, до конца не решена. По этой причине сохраняется интерес к поиску новых способов стимуляции регенерации, в том числе немедикаментозных методов воздействия. Хронические раны нередко приводят к тяжелым осложнениям и остаются серьезной проблемой не только в медицине человека, но и в ветеринарной практике [1, 2].

Для изучения процессов заживления большое значение имеют эксперименты на лабораторных животных. Такие модели позволяют проследить, как изменяются ткани на разных этапах регенерации, а также оценить действие различных методов лечения еще до их внедрения в клиническую практику. Благодаря моделированию ран можно более подробно исследовать механизмы восстановления тканей и особенности течения патологического процесса [3].

В последние годы исследователи все чаще обращают внимание на влияние низкоинтенсивных электромагнитных воздействий на организм. По данным научных работ, подобные факторы способны оказывать влияние на клеточную активность, процессы обмена веществ, микроциркуляцию и восстановление поврежденных тканей. Установлено, что воздействие электромагнитного излучения малой мощности инициирует адаптивные реакции организма, сопровождающиеся активизацией процессов восстановления [4].

Особый интерес представляет изучение морфологических изменений в зоне раневого дефекта под воздействием ЭМИ, поскольку именно морфологические показатели позволяют объективно оценить интенсивность регенерации, скорость эпителизации и формирование грануляционной ткани. Ряд исследований демонстрирует, что электромагнитное воздействие способно изменять пролиферативную активность клеток и экспрессию факторов роста, участвующих в регуляции репаративных процессов [5].

Согласно литературным данным, КВЧ-воздействие способно изменять работу клеточных мембран, влиять на состояние микроциркуляции и антиоксидантной системы, а также стимулировать процессы тканевой регенерации [6]. В последние годы появились данные о том, что снижение уровня фонового электромагнитного поля может сопровождаться изменением метаболической активности клеток, интенсивности свободнорадикальных процессов и морфофункционального состояния тканей. В экспериментальных работах показано, что условия ЭМЭ способны влиять на скорость регенерации, иммунные реакции и уровень адаптационно-компенсаторных процессов у лабораторных животных [7].

В связи с этим, целью данной работы явилось изучение влияния электромагнитного излучения крайне высокой частоты, слабого электромагнитного экранирования и их комбинированного действия на динамику морфологических показателей ран у крыс.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальная работа проводилась на 40 половозрелых самцах крыс линии Wistar массой 250–300 г. Содержание животных осуществлялось в соответствии с требованиями ГОСТ 33216-2014 и действующими нормативными рекомендациями по уходу и содержанию лабораторных животных. При выполнении исследования строго соблюдались положения законодательства Российской Федерации, биоэтические нормы и нормативные документы, включая ГОСТ 31887-2012 «Принципы надлежащей лабораторной практики (GLP)». Все манипуляции с участием животных проводились в соответствии с утверждёнными стандартными операционными процедурами и были одобрены локальным комитетом по биоэтике ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского» (протокол № 5, 2022 г.).

Животные были случайным образом распределены на четыре группы по 10 особей в каждой. Всем крысам моделировали кожную рану путем нанесения продольного разреза длиной 3 см в области холки с формированием полнослойного кожного дефекта по методике Masson-Meyers и соавт. [8].

Животные первой группы служили биологическим контролем (К) и в течение 18 суток содержались в стандартных условиях вивария. Крысы второй группы (КВЧ) ежедневно подвергались воздействию низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ, которое осуществлялось в утренние часы в течение 30 минут на затылочно-воротниковую область на протяжении 18 дней эксперимента. Животные третьей экспериментальной группы (ЭМЭ) содержались в экранирующей камере в течение всего наблюдения, экспозиция составляла 22 часа в сутки. Особи четвертой группы (ЭМЭ+КВЧ) находились в одинаковых условиях с крысами третьей группы, но дополнительно подвергались воздействию ЭМИ КВЧ одновременно с животными второй группы.

В качестве оценки основных морфологических параметров оценивали размер раны: длину, ширину и площадь. Визуальный осмотр проводился при хорошем освещении, длину и ширину измеряли цифровым штангециркулем. Также отмечались цвет, влажность, наличие экссудата, кровотечение, корки и другие видимые признаки. Оценка площади заживления раны – один из ключевых параметров, позволяющий объективно судить о процессе регенерации. Измерения площади выполняли на фотографиях в программе ImageJ с использованием шкалы TS-M1 PW106011 (1div=0.01mm) stage micrometer, используя метод наложения точечных морфометрических сеток [9].



Рис. 1. Пример измерения длины и ширины раны цифровым штангенциркулем.

Воздействие низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ проводилось с помощью аппарата «КВЧ. РАМЕД-ЭКСПЕРТ – 01» (7,1 мм, 0,1 мВт/см^2; локализация – затылочно-воротниковая область, экспозиция 30 минут, продолжительность – 18 суток).

Ослабление электромагнитного поля достигалось применением экранирующей камеры, изготовленной из железа «Динамо». Коэффициент экранирования

постоянной компоненты магнитного поля (МП), составлял по вертикальной составляющей 4,4, по горизонтальной – 20. Коэффициент экранирования внутри камеры для частот от 10^{-4} до 30 Гц находится в пределах трех-четырех, на промышленной частоте 50 Гц и кратных гармониках 150 и 250 Гц – около трех. На более высоких частотах имела место лишь тенденция к ослаблению [10].

Статистическая обработка полученных данных выполнялась с использованием программ GraphPad Prism 8 и MS Excel 2010. Проверку нормальности распределения количественных показателей осуществляли с применением критерия Шапиро–Уилка. Поскольку большинство исследуемых параметров не соответствовало нормальному распределению, межгрупповое сравнение выполняли с использованием непараметрического критерия Краскела–Уоллиса с последующим апостериорным анализом по критерию Данна. Результаты считали статистически значимыми при уровне значимости $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследования установлено, что воздействие электромагнитных факторов оказывает стимулирующее влияние на процессы репаративной регенерации кожной раны у экспериментальных животных. Во всех опытных группах наблюдалось ускорение уменьшения линейных размеров и площади раневого дефекта по сравнению с контрольной группой, однако выраженность эффекта зависела от характера физического воздействия.

Так, во второй группе животных (КВЧ) на восьмые сутки эксперимента длина раны уменьшается относительно контроля на 15% ($p<0,05$), на девятые – на 20 % ($p<0,05$), на десятые – на 23 % ($p<0,05$), на 11-е – на 28 % ($p<0,05$), на 12-е – на 33 % ($p<0,05$) и на 13-е сутки эксперимента на 32 % ($p<0,05$) (рис. 2).

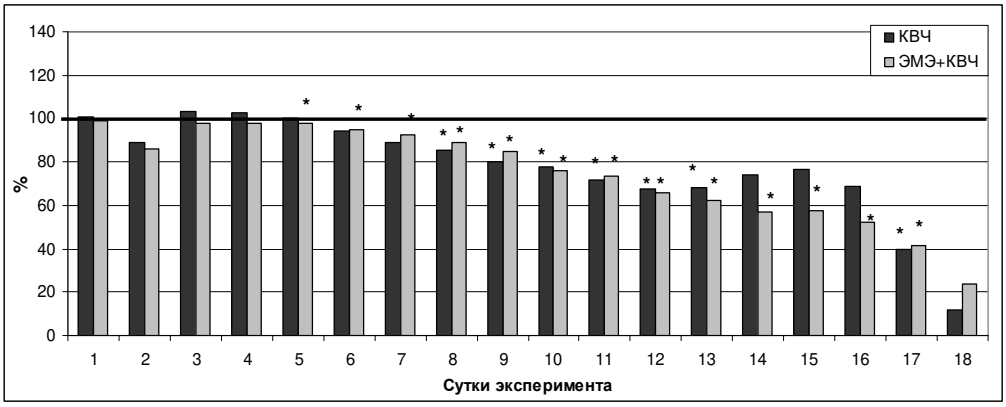


Рис. 2. Динамика длины раны в процессе регенерации под влиянием ЭМИ КВЧ и комбинированного действия ЭМИ КВЧ и ЭМЭ в процентах относительно контрольных значений.

Примечание: * – достоверность значений относительно контрольной группы (* – $p<0,05$).

При изолированном действии слабого ЭМЭ в третьей группе животных также наблюдается уменьшение длины раны в процессе регенерации, начиная с девятых суток эксперимента. Так, длина раны уменьшается относительно контроля на 14 % ($p<0,05$) на девятые сутки наблюдения и на 20 % ($p<0,05$) на десятые сутки. Далее достоверные изменения отмечаются на 14-е сутки наблюдения, когда длина раны уменьшается относительно контроля на 29 % ($p<0,05$), на 16-е сутки отмечается уменьшение длины в условиях ЭМЭ на 22 % ($p<0,05$) и на 17-е сутки наблюдения на 17 % ($p<0,05$) относительно контрольных значений (рис. 3).

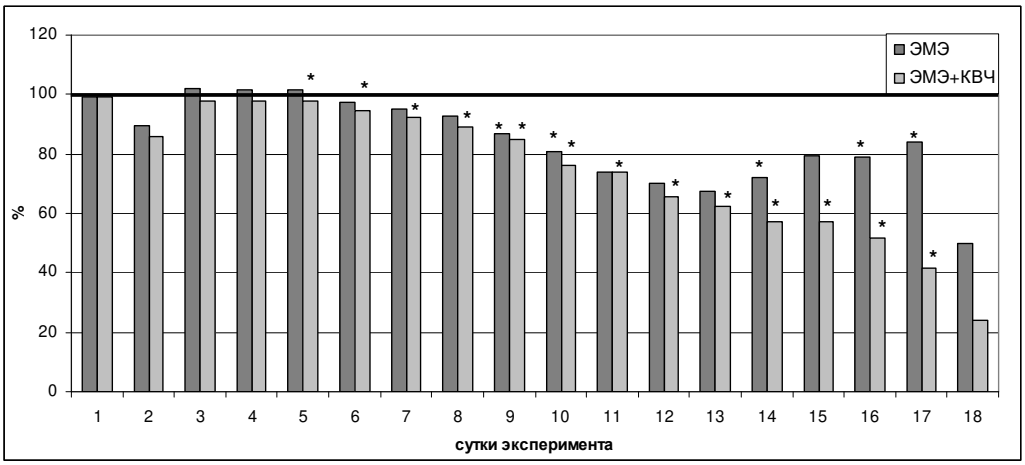


Рис. 3. Динамика длины раны в процессе регенерации в условиях слабого ЭМЭ и комбинированного действия ЭМИ КВЧ и ЭМЭ в процентах относительно контрольных значений.
Примечание: * – достоверность значений относительно контрольной группы (* – $p<0,05$).

При комбинированном воздействии ЭМИ КВЧ И ЭМЭ у животных четвертой группы длина раны уменьшается относительно контроля на пятые сутки эксперимента на 3 % ($p<0,05$), на шестые сутки на 6 % ($p<0,05$), на седьмые – на 8 % ($p<0,05$), на восьмые – на 11 % ($p<0,05$), на девятые сутки на 15 % ($p<0,05$), на 10 сутки на 24 % ($p<0,05$), на 11-е сутки длина раны была меньше на 27 % ($p<0,05$), на 12-е сутки на 35 % ($p<0,05$), на 13-е – на 38 % ($p<0,05$), на 14-е и 15-е сутки на 43 % ($p<0,05$), на 16-е сутки на 49 % ($p<0,05$) и на 17-е сутки на 59 % ($p<0,05$). Таким образом, при комбинированном воздействии ЭМИ КВЧ и ЭМЭ улучшение заживления раны в длину относительно контроля наблюдается, начиная с пятых суток эксперимента, что на трое суток раньше, чем в группе КВЧ (рис. 2), и на четверо суток раньше, чем в группе изолированного действия ЭМЭ (рис 3).

Таким образом, наиболее раннее уменьшение длины раны отмечалось при комбинированном воздействии ЭМИ КВЧ и ЭМЭ. Достоверные различия относительно контрольной группы регистрировались уже с пятых суток эксперимента, что свидетельствует об ускорении течения ранних фаз репаративного

процесса. При этом изолированное воздействие ЭМИ КВЧ также сопровождалось выраженным ускорением сокращения раневого дефекта, однако статистически значимые изменения возникали позже. В условиях изолированного действия ЭМЭ положительная динамика была менее выраженной и развивалась преимущественно на более поздних сроках наблюдения.

При влиянии ЭМИ КВЧ на раны крыс отмечено, что на четвертые сутки эксперимента в группе КВЧ ширина раны уменьшается на 31 % ($p<0,05$) относительно контроля (рис. 4). На пятые сутки на 33 % ($p<0,05$), на шестые сутки – на 37 % ($p<0,05$). Далее достоверные значения отмечаются на 10 сутки наблюдения, когда ширина раны уменьшается на 42% ($p<0,05$) и на 17-е сутки на 59 % ($p<0,05$) относительно контроля. Таким образом, КВЧ-воздействие обеспечивало значительное ускорение сокращения ширины раны, особенно на этапах пролиферации.

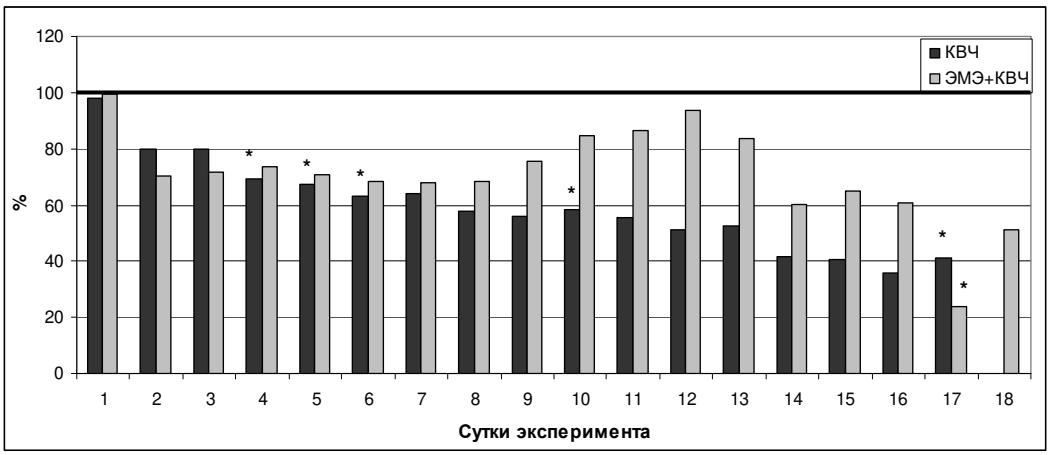


Рис. 4. Динамика ширины раны в процессе регенерации под влиянием ЭМИ КВЧ и комбинированного действия ЭМИ КВЧ и ЭМЭ в процентах относительно контрольных значений.

Примечание: * – достоверность значений относительно контрольной группы (* -- $p<0,05$).

В условиях действия слабого ЭМЭ на четвертые-пятые сутки эксперимента ширина уменьшается относительно контроля на 29 % ($p<0,05$), на шестые сутки на 30 % ($p<0,05$), на седьмые сутки – 28 % ($p<0,05$), на восьмые сутки – на 24 % ($p<0,05$) и на 17-е сутки – на 58 % ($p<0,05$) (рис. 5). Таким образом, ЭМЭ оказывало умеренное стимулирующее влияние на процессы регенерации.

При комбинированном воздействии ЭМИ КВЧ и ЭМЭ на протяжении всего эксперимента наблюдается тенденция к уменьшению ширины раны относительно контрольных значений, и только на 17-е сутки эксперимента ширина раны достоверно уменьшается на 76 % ($p<0,05$) относительно соответствующего значения в контрольной группе (рис. 4, рис. 5).

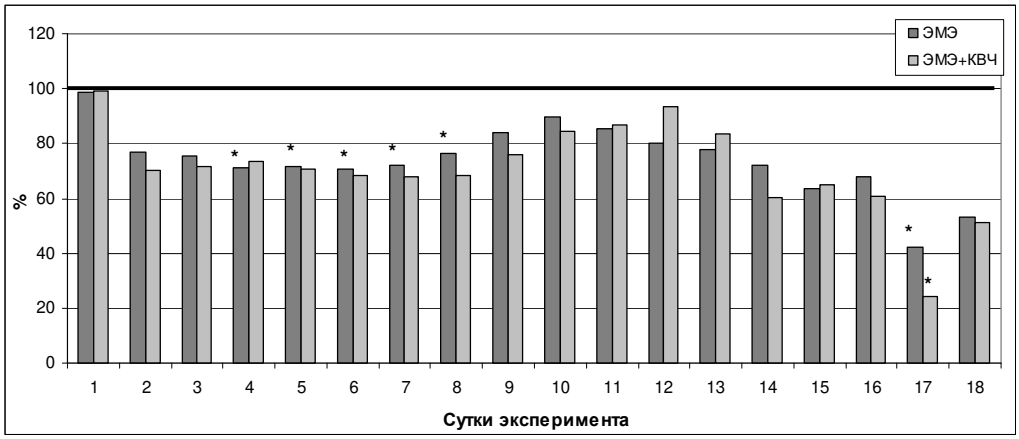


Рис. 5. Динамика ширины раны в процессе регенерации в условиях слабого ЭМЭ и комбинированного действия ЭМИ КВЧ и ЭМЭ в процентах относительно контрольных значений.

Примечание: * – достоверность значений относительно контрольной группы (* – $p<0,05$).

Таким образом, во всех экспериментальных группах наблюдалось ускорение уменьшения ширины раны по сравнению с контролем, однако наиболее выраженный эффект отмечался при изолированном действии факторов. При этом КВЧ-излучение демонстрировало высокий уровень эффективности, превосходя ЭМЭ. Наиболее значимые различия между группами проявлялись в период с 4 по 10 сутки, что соответствует фазе активной пролиферации и эпителизации раневого процесса. При комбинированном воздействии ЭМИ КВЧ и ЭМЭ наиболее выраженное уменьшение данного показателя наблюдалось к концу эксперимента.

Анализируя динамику изменения площади раны в процессе регенерации можно заключить, что в контрольной группе уменьшение площади раны проходит наиболее медленно, чем в группах, которые подвергаются действию электромагнитных факторов.

Во второй группе животных, подвергавшихся воздействию ЭМИ КВЧ, отмечается более быстрое уменьшение площади раны по сравнению с контрольной группой. Так, на шестые сутки наблюдения отмечено значимое уменьшение раны на 48 % ($p<0,05$). Затем уменьшение раневой площади наблюдается на девятые сутки на 55 % ($p<0,05$), на десятые сутки на 57 % ($p<0,05$), на одиннадцатые сутки на 63 % ($p<0,05$) и на двенадцатые сутки на 65 % ($p<0,05$). Далее снижение отмечено на 17-е сутки наблюдения, когда площадь раны уменьшается относительно контрольных значений на 86 % ($p<0,05$). Таким образом, в группе ЭМИ КВЧ сокращение раневой зоны наступает быстрее, чем в контрольной группе (рис. 6).

Следует отметить, что, начиная с пятых суток наблюдения, отмечено достоверное изменение площади раневой поверхности в группе КВЧ относительно животных, подвергавшихся комбинированному воздействию изучаемых факторов. С пятых по 16-е сутки наблюдения сокращение площади раны во второй группе

животных варьировалось от 2 % ($p<0,05$) до 64 % ($p<0,05$) относительно четвертой группы (ЭМЭ+КВЧ) животных.

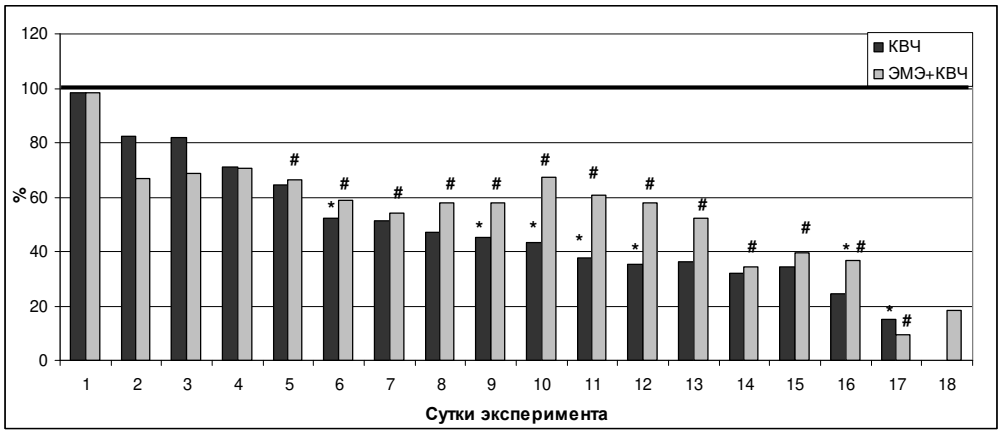


Рис. 6. Динамика площади раны в процессе регенерации под влиянием ЭМИ КВЧ и комбинированного действия ЭМИ КВЧ и ЭМЭ в процентах относительно контрольных значений.

Примечание: * – достоверность значений относительно контрольной группы (* – $p<0,05$).
– достоверность различий относительно группы ЭМИ КВЧ (# – $p<0,05$).

Схожая картина отмечается в группе изолированного действия слабого ЭМЭ, когда на шестые сутки эксперимента отмечено снижение на 36 % ($p<0,05$), на седьмые сутки – на 40 % ($p<0,05$), на восьмые сутки – на 34 % ($p<0,05$), на девятые сутки на 27 % ($p<0,05$), на десятые сутки на 28 % ($p<0,05$), на 11-е сутки на 39 % ($p<0,05$) и на 12-е сутки на 41 % ($p<0,05$). В последующие дни наблюдения отмечается тенденции к уменьшению площади раневой поверхности, а на 17-е сутки выявлено снижение изучаемого показателя относительно контрольных значений на 76 % ($p<0,05$) (рис. 7).

Таким образом, в группе ЭМЭ уменьшение площади раны происходит подобно ранозаживлению в группе ЭМИ КВЧ, но при этом значительно быстрее, чем в контроле.

Кроме того выявлены достоверные изменения площади раны в группе ЭМЭ относительно группы, подвергавшейся комбинированному воздействию факторов.

В четвертой группе животных при комбинированном действии ЭМИ КВЧ и ЭМЭ в течение всего эксперимента отмечена лишь тенденция к уменьшению площади раны, только на 16-е сутки эксперимента отмечено значимое уменьшение площади раневой поверхности на 64 % ($p<0,05$).

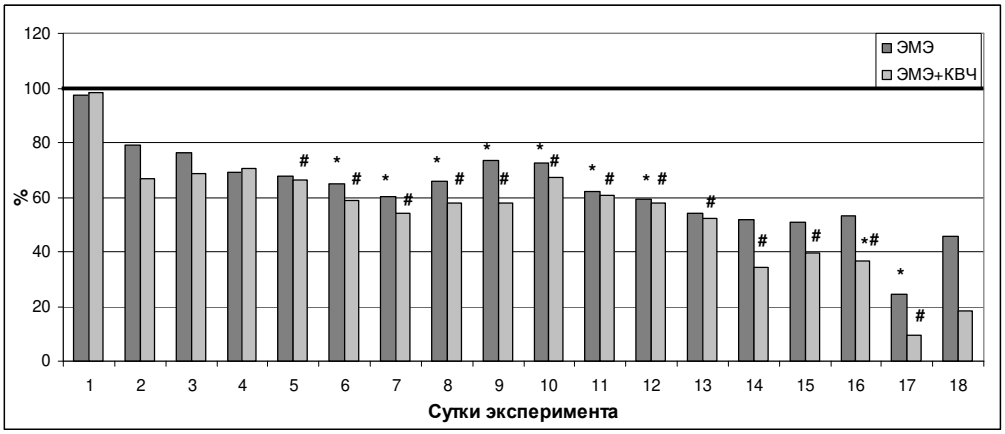


Рис. 7. Динамика площади раны в процессе регенерации в условиях слабого ЭМЭ и комбинированного действия ЭМИ КВЧ и ЭМЭ в процентах относительно контрольных значений.

Примечание: * – достоверность значений относительно контрольной группы (* – $p<0,05$).
– достоверность различий относительно группы ЭМЭ (# – $p<0,05$)

Таким образом, полученные результаты показывают, что комбинированное воздействие ЭМИ КВЧ и ЭМЭ преимущественно влияет на ранние этапы репаративного процесса, способствуя ускорению сокращения линейных размеров раны, тогда как изолированное воздействие ЭМИ КВЧ обеспечивает более выраженное уменьшение общей площади раневого дефекта. Это свидетельствует о различном механизме влияния исследуемых физических факторов на процессы воспаления, пролиферации и ремоделирования тканей.

Известно, что процесс ранозаживления представляет собой сложную многоэтапную реакцию организма, направленную на восстановление анатомической целостности и функциональной активности повреждённых тканей. Он включает последовательные и частично перекрывающиеся фазы гемостаза, воспаления, пролиферации (формирования грануляционной ткани и ангиогенеза) и ремоделирования. Эффективность регенерации определяется координацией клеточной миграции, активностью фибробластов, синтезом компонентов внеклеточного матрикса, ангиогенезом и регуляцией воспалительного ответа. Нарушение любого из этих этапов может привести к хронизации раневого процесса.

Биологическая эффективность электромагнитных полей (ЭМП) определяется совокупностью их физических параметров: частотой, интенсивностью (напряжённостью электрического или магнитного поля), длительностью воздействия, режимом (непрерывное/импульсное), а также температурными условиями. Современные исследования показывают, что изменение этих параметров приводит к различным, иногда противоположным, биологическим эффектам: от стимуляции пролиферации и дифференцировки до индукции апоптоза и некроза [11].

В некоторых исследованиях указывается, что комбинированное воздействие нескольких физических факторов не всегда сопровождается усилением биологического эффекта, а в ряде случаев может приводить к конкурирующему или разнонаправленному влиянию на клеточные механизмы регенерации [12].

Показано, что возможным механизмом положительного влияния низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ является улучшение микроциркуляции и активация ангиогенеза в зоне повреждения. Кроме того, КВЧ-воздействие способно модулировать функциональную активность клеток воспалительного инфильтрата и фибробластов, ускоряя переход воспалительной фазы в пролиферативную. Ускорение эпителизации и более активное формирование грануляционной ткани обусловлены усилением метаболической активности клеток и оптимизацией локального тканевого кровотока.

Известно, что воздействие низкоинтенсивных электромагнитных полей способно оказывать вазоактивный эффект, улучшая локальную гемодинамику и усиливая доставку кислорода и питательных веществ в область повреждения. Показано, что электромагнитные воздействия способствуют активации эндотелиальных клеток и стимуляции синтеза сосудистого эндотелиального фактора роста, что приводит к усилению ангиогенеза и ускорению формирования грануляционной ткани. Усиление ангиогенеза рассматривается как один из ключевых механизмов ускоренного заживления ран под действием физических факторов [13].

Кроме того, современные исследования свидетельствуют о способности электромагнитных полей модулировать активность воспалительного процесса. Установлено, что низкоинтенсивные электромагнитные воздействия могут снижать выраженность провоспалительной реакции за счёт регуляции продукции цитокинов IL-1β, IL-6 и TNF-α, а также уменьшения оксидативного стресса в зоне повреждения. Снижение интенсивности воспалительной реакции способствует более быстрому переходу к пролиферативной фазе раневого процесса и ускоряет восстановление тканей [14].

Полученные данные согласуются с результатами экспериментальных исследований, посвящённых изучению влияния импульсных электромагнитных полей на процессы регенерации тканей. Так, в исследовании Athanasiou A. (2007) установлено, что ежедневное воздействие импульсного электромагнитного поля у животных с полнослойными кожными ранами сопровождалось ускорением сокращения площади дефекта, более активным формированием грануляционной ткани и ускоренной эпителизацией [15]. Аналогичные результаты были получены в работе Jiao M. (2019), где применение низкочастотного электромагнитного поля (15 Гц, 34 мТл) способствовало уменьшению воспалительных изменений, стимуляции ангиогенеза и ускорению репарации слизистой оболочки желудка у крыс [16].

Следует отметить, что положительное влияние низкоинтенсивных электромагнитных воздействий на процессы репарации рассматривается не только в экспериментальной, но и в клинической медицине. В настоящее время методы электромагнитной физиотерапии применяются при лечении хронических ран, трофических язв, ожогов и послеоперационных дефектов мягких тканей. По данным

систематических обзоров, использование импульсных электромагнитных полей способствует сокращению сроков эпителизации, уменьшению воспалительных изменений и повышению функциональной полноценности регенерирующей ткани [16]. В связи с этим результаты настоящего исследования представляют интерес с позиции разработки новых подходов к немедикаментозной стимуляции процессов ранозаживления.

Таким образом, результаты проведённого исследования свидетельствуют о том, что воздействие ЭМИ КВЧ и ЭМЭ способствует ускорению процессов регенерации кожной раны. Наиболее выраженный регенераторный эффект выявлен при изолированном воздействии ЭМИ КВЧ, тогда как комбинированное применение ЭМИ КВЧ и ЭМЭ обеспечивало более раннее развитие положительной динамики раневого процесса. Полученные данные подтверждают перспективность использования низкоинтенсивных электромагнитных воздействий в качестве немедикаментозного метода стимуляции ранозаживления и обосновывают необходимость дальнейших исследований в данной области.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования можно заключить, что применение низкоинтенсивных электромагнитных факторов оказывает стимулирующее влияние на процессы регенерации кожных ран у крыс. Выявлено, что в экспериментальных группах отмечается статистически значимое сокращение сроков полного закрытия раневого дефекта по сравнению с контрольной группой.

Таким образом, полученные результаты могут служить основой для разработки новых высокоэффективных физиотерапевтических методов лечения ран, что позволит сократить сроки госпитализации и снизить риск осложнений в воспалительном периоде.

Работа выполнена на оборудовании ЦКП научным оборудованием «Экспериментальная физиология и биофизика» ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского» в рамках инициативной темы № 126060421664-2 «Закономерности и механизмы адаптации организма к факторам разной природы»

Список литературы

1. Dunn L. Murine model of wound healing. / Dunn L., Prosser H. C., Tan J.T., Vanags L.Z., Ng M. K., Bursill C.A. // J Vis Exp. – 2013. – (75). – e50265. doi: 10.3791/50265. PMID: 23748713; PMCID: PMC3724564.
2. Ashrafi M. The efficacy of electrical stimulation in experimentally induced cutaneous wounds in animals. / Ashrafi M., Alonso-Rasgado T., Baguneid M., Bayat A. // Vet Dermatol. – 2016. – 4. – 235-e57. doi: 10.1111/vde.12328. Epub 2016 May 18. PMID: 27189048.
3. Dovnar R. I. Modeling of Skin Wounds in Laboratory Animals / Dovnar R. I. // Novosti Khirurgii. – 2021. – Vol 29 (4). – P. 480–489.
4. Королев Ю. Н. Влияние низкоинтенсивного электромагнитного излучения на структурно-метаболические процессы у здоровых крыс. / Королев Ю. Н., Михайлик Л. В., Никулина Л. А. // Вестник восстановительной медицины. – 2019. – № 6 (94). – С. 60–62.
5. Керея А. В. Пролиферативная активность клеток костного мозга крыс после облучения наносекундным импульсно-периодическим микроволновым излучением. / Керея А. В., Гостюхина

А. А., Межерицкий С. А., Большаков М. А., Зайцев К. В., Кутенков О. П., Ростов В. В. // Современные вопросы биомедицины. – 2019. – Т. 3(2). – С. 6–22.
6. Девятков Н. Д. Миллиметровые волны в биологии и медицине / Девятков Н. Д., Голант М. Б., Бецкий О.В. – М.: Радио и связь, 1991. – 169 с.
7. Prato F. S. Possible mechanisms by which extremely low frequency magnetic fields affect biological systems. / Prato F. S., Carson J. J., Ossenkopp K. P. // Bioelectromagnetics. – 1995. –Vol. 16(4). – P. 231–244. DOI: 10.1002/bem.2250160405
8. Masson-Meyers D. S. Experimental models and methods for cutaneous wound healing assessment. / Masson-Meyers D. S., Andrade T. A. M., Caetano G. F., et al. // International Journal of Experimental Pathology. – 2020 – 101(1–2) – P. 21–37.
9. Мустафина Л. Р. Частный курс гистологии: учебное пособие: в 2 частях / Л. Р. Мустафина, А. В. Герасимов, А. В. Потапов [и др.]. – Томск: СибГМУ, 2022. – 169 с.
10. Метод получения крайне слабых постоянного магнитного и электрического полей и хорошо воспроизводимого комбинированного магнитного поля для биологических исследований / Н.И. Богатина, Н.В. Шейкина, В.С. Мартынюк [и др.] // Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. Серия «Биология. Химия». – 2010. – Т. 23, №2. – С. 125.
11. Trzyna A. The dynamic(s) of adipose stem cell system, their survival, and cessation under the Influence of electromagnetic fields. / Trzyna A., Bądziul D. B., Jakubczyk P., Bocak D. S., Cholewa M., Banaś-Ząbczyk A. // J Med Phys. – 2021. – 46(3) – P. 148–153. doi: 10.4103/jmp.JMP_10_21. Epub 2021 Sep 8. PMID: 34703098; PMCID: PMC8491311.
12. Funk R. H. Electromagnetic effects – From cell biology to medicine. / Funk R. H., Monsees T., Ozkucur N. // Prog Histochem Cytochem. – 2009. – Vol. 43(4). – P. 177–264. doi: 10.1016/j.proghi.2008.07.001
13. Tepper O. M. Electromagnetic fields increase in vitro and in vivo angiogenesis through endothelial release of FGF-2. / Tepper O. M., Callaghan M. J., Chang E. I., Galiano R. D., Bhatt K. A., Baharestani S., Gan J., Simon B., Hopper R. A., Levine J. P., Gurtner G. C. // FASEB J. – 2004. – Vol. 18(11). – P. 1231–3. doi: 10.1096/fj.03-0847fje
14. Athanasiou A. The effect of pulsed electromagnetic fields on secondary skin wound healing: an experimental study. / Athanasiou A., Karkambounas S., Batistatou A., Lykoudis E., Katsaraki A., Kartsiouni T., Papalois A., Evangelou A. // Bioelectromagnetics. – 2007. – 28(5). – P. 362–8. doi: 10.1002/bem.20303. PMID: 17486634
15. Jiao M. Effects of Low-Frequency Pulsed Electromagnetic Fields on High-Altitude Stress Ulcer Healing in Rats. / Jiao M., Yin H., Hu J., Xu W., Zhang X., Zhang P. // Biomed Res Int. – 2019. – 2019. – 6354054. doi: 10.1155/2019/6354054. PMID: 31309108; PMCID: PMC6594348.
16. Guo L. Meta-analysis of clinical efficacy of pulsed radio frequency energy treatment. / Guo L., Kubat N. J., Nelson T. R., Isenberg R. A. // Ann Surg. – 2012. – Vol. 255(3). – P. 457–67. doi: 10.1097/SLA.0b013e3182447b5d

INFLUENCE OF LOW-INTENSITY ELECTROMAGNETIC EXPOSURE ON MORPHOLOGICAL INDICATORS OF THE WOUND PROCESS

Yarmolyuk N. S., Dzheldubaeva E. R., Tumanyants K. N., Yunusova E. S.

V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russian Federation
E-mail: nat_yarm@mail.ru

In recent years, more and more attention has been paid to the study of the biological effects of low-intensity electromagnetic influences, which can modulate cellular proliferation, microcirculation, metabolic activity, and tissue regeneration processes. Experimental studies show that low-intensity electromagnetic radiation (EMR) can cause

adaptive and compensatory structural and metabolic changes in tissues, accompanied by the activation of regenerative processes. Of particular interest is the study of morphological changes in the wound defect zone under the influence of EMR, since it is the morphological indicators that allow an objective assessment of the intensity of regeneration, the rate of epithelization and the formation of granulation tissue. A number of studies demonstrate that electromagnetic exposure can alter the proliferative activity of cells and the expression of growth factors involved in the regulation of reparative processes.

Among the physical factors, researchers pay special attention to low-intensity extremely high-frequency (EHF) electromagnetic radiation and weak electromagnetic shielding (EMS). According to literature data, EHF radiation can alter the functional activity of cell membranes, affect microcirculation, the activity of the antioxidant system, and tissue regeneration processes. In recent years, there have been reports that a decrease in the background electromagnetic field can lead to changes in cellular metabolic activity, the intensity of free radical processes, and the morphofunctional state of tissues. Experimental studies have shown that EME conditions can affect the rate of regeneration, immune responses, and the level of adaptive and compensatory processes in laboratory animals.

In this regard, the purpose of this work was to study the effect of extremely high-frequency electromagnetic radiation, weak electromagnetic shielding, and their combined effect on the dynamics of morphological indicators of wounds in rats.

The animals were randomly divided into four groups of 10 animals each. All rats were subjected to a skin wound model by making a 3 cm long longitudinal incision in the withers area, creating a full-thickness skin defect using the Masson-Meyers et al. technique.

The animals of the first group served as biological controls (C) and were kept in standard vivarium conditions for 18 days. The rats of the second group (EHF) were exposed to low-intensity EHF EMIs daily for 30 minutes in the morning on the occipital-collar region for 18 days of the experiment. The animals of the third experimental group (EME) were kept in a shielding chamber during the entire observation period, with an exposure of 22 hours per day. The individuals in the fourth group (EMF+EHF) were exposed to the same conditions as the rats in the third group, but they were also exposed to EMF+EHF simultaneously with the animals in the second group.

As a result of the conducted research, it can be concluded that the use of low-intensity electromagnetic factors has a stimulating effect on the regeneration processes of skin wounds in rats. It was found that the experimental groups showed a statistically significant reduction in the time required for complete closure of the wound defect compared to the control group. Thus, the obtained results can serve as a basis for the development of new highly effective physiotherapeutic methods for treating wounds, which will help to reduce the duration of hospitalization and the risk of complications during the inflammatory period.

***Keywords*:** extremely high frequency electromagnetic radiation, electromagnetic shielding, wounds, and rats.

References

1. Dunn L., Prosser H. C., Tan J.T., Vanags L.Z., Ng M. K., Bursill C. A. Murine model of wound healing, *J Vis Exp*., (**75**), e50265 (2013). doi: 10.3791/50265. PMID: 23748713; PMCID: PMC3724564.

2. Ashrafi M., Alonso-Rasgado T., Baguneid M., Bayat A. The efficacy of electrical stimulation in experimentally induced cutaneous wounds in animals, *Vet Dermatol*., **4**, 235-e57 (2016). doi: 10.1111/vde.12328. Epub 2016 May 18. PMID: 27189048.
3. Dovnar R. I. Modeling of Skin Wounds in Laboratory Animals, *Novosti Khirurgii,* **29 (4)**, 480 (2021).
4. Korolev Yu. N., Mikhailik L. V., Nikulina L. A. Influence of low-intensity electromagnetic radiation on structural and metabolic processes in healthy rats, *Bulletin of Restorative Medicine*, **6 (94)**, 60 (2019).
5. Kereya A. V., Gostyukhina A. A., Mezheritsky S. A., Bolshakov M. A., Zaitsev K. V., Kutenkov O. P., Rostov V. V. Proliferative activity of rat bone marrow cells after exposure to nanosecond pulse-periodic microwave radiation, *Modern Issues of Biomedicine,* **3(2)**, 6 (2019).
6. Devyatkov N. D., Golant M. B., and Betsky O. V. *Millimeter Waves in Biology and Medicine*, 169 p. (Moscow: Radio and Communications, 1991).
7. Prato F. S., Carson J. J., Ossenkopp K. P.Possible mechanisms by which extremely low frequency magnetic fields affect biological systems, *Bioelectromagnetics,* **16(4)**, 231 (1995). DOI: 10.1002/bem.2250160405
8. Masson-Meyers D. S., Andrade T. A. M., Caetano G. F., et al. Experimental models and methods for cutaneous wound healing assessment, *International Journal of Experimental Pathology,* **101(1–2)**, 21 (2020).
9. Mustafina L. R., Gerasimov A. V., Potapov A. V. [et al.]. *Private Course of Histology*: Textbook: in 2 parts, 169 p. (Tomsk: SibGMU, 2022).
10. Bogatina N. I., Sheikina N. V., Martynyuk V. S. [et al.] A method for obtaining extremely weak permanent magnetic and electric fields and a well-reproducible combined magnetic field for biological research, *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Tauride National University. The series "Biology. Chemistry"*, **23**, **2**, 125. (2010).
11. Trzyna A., Bądziul D. B., Jakubczyk P., Bocak D. S., Cholewa M., Banaś-Ząbczyk A. The dynamic(s) of adipose stem cell system, their survival, and cessation under the Influence of electromagnetic fields, *J Med Phys*., **46(3)**, 148 (2021). doi: 10.4103/jmp.JMP_10_21. Epub 2021 Sep 8. PMID: 34703098; PMCID: PMC8491311.
12. Funk R. H., Monsees T., Ozkucur N. Electromagnetic effects – From cell biology to medicine, *Prog Histochem Cytochem*., **43(4)**, 177 (2009). doi: 10.1016/j.proghi.2008.07.001
13. Tepper O. M., Callaghan M. J., Chang E. I., Galiano R. D., Bhatt K. A., Baharestani S., Gan J., Simon B., Hopper R. A., Levine J. P., Gurtner G. C. Electromagnetic fields increase in vitro and in vivo angiogenesis through endothelial release of FGF-2, *FASEB J.,* **18(11)**, 1231 (2004). doi: 10.1096/fj.03-0847fje
14. Athanasiou A., Karkambounas S., Batistatou A., Lykoudis E., Katsaraki A., Kartsiouni T., Papalois A., Evangelou A. The effect of pulsed electromagnetic fields on secondary skin wound healing: an experimental study, *Bioelectromagnetics,* **28(5)**, 362 (2007). doi: 10.1002/bem.20303. PMID: 17486634
15. Jiao M., Yin H., Hu J., Xu W., Zhang X., Zhang P. Effects of Low-Frequency Pulsed Electromagnetic Fields on High-Altitude Stress Ulcer Healing in Rats, *Biomed Res Int*., **2019**, 6354054. (2019). doi: 10.1155/2019/6354054. PMID: 31309108; PMCID: PMC6594348.
16. Guo L., Kubat N. J., Nelson T. R., Isenberg R. A. Meta-analysis of clinical efficacy of pulsed radio frequency energy treatment, *Ann Surg*., **255(3)**, 457 (2012). doi: 10.1097/SLA.0b013e3182447b5d.

ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского
Биология. Химия. Том 12 (78). 2026. № 2. С. 341–356.

УДК 547.918:543.422:582.5/.9

DOI 10.5281/ZENODO.20795953

ТРИТЕРПЕНОВЫЕ ГЛИКОЗИДЫ ARALIACEAE. VI. МЕТОДЫ ЯМР-СПЕКТРОСКОПИИ В УСТАНОВЛЕНИИ СТРУКТУРЫ ТРИТЕРПЕНОВЫХ ГЛИКОЗИДОВ АРАЛИЕВЫХ: ОДНО- И ДВУМЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ^{13}C-ЯМР

Гришковец В. И.

Институт биохимических технологий, экологии и фармации (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского», Симферополь, Россия
E-mail: vladgri56@yandex.ru

Рассмотрено применение современных методов одно- и двумерной спектроскопи ^{13}C-ЯМР в установлении строения тритерпеновых гликозидов растений семества Аралиевые (*Araliaceae* Juss.) а примере одного из новых, выделенных нами из *Kalopanax septemlobum*, гликозидов – 3-O-β-D-ксилопиранозил-(1→3)-O-α-L-рамнопиранозил-(1→2)-O-α-L-арабинопиранозил-28-O-α-L-рамнопиранозил-(1→4)-O-β-D-6-O-ацетилглюкопиранозил-(1→6)-O-β-D-глюкопиранозилового эфира хедерагенина. Рассмотрены принципы отнесения сигналов в одно-и двумерных спектрах ^{13}C-ЯМР применительно к тритерпеновым гликозидам. Детально рассмотрено использование двумерных методик HSQC и HMBC.

Ключевые слова: Araliaceae, тритерпеновые гликозиды, одно- и двумерная спектроскопия ^{13}C-ЯМР, методики ^{13}C-ЯМР-APT, HSQC, HMBC.

ВВЕДЕНИЕ

В предыдущей статье [1] рассматривалось применение одно- и двумерных вариантов спектроскопии ^{1}H-ЯМР в структурных исследования тритерпеновых гликозидов Аралиевых (*Araliaceae* Juss.). В настоящее статье рассматриваются возможности использования одно- и двумерных вариантов спектроскопии ^{13}C-ЯМР.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

ЯМР-спектры получены на приборах "Bruker" WM-250, "Varian" VXR-300, "Bruker" AM-300, "Bruker" AM-400, "Bruker" DRX-500. Для двумерных экспериментов использовались стандартные методики ^{13}C-ЯМР, ^{13}C-ЯМР-APT, HSQC, HMBC (пакет стандартных программ фирмы "Bruker"). Время смешивания

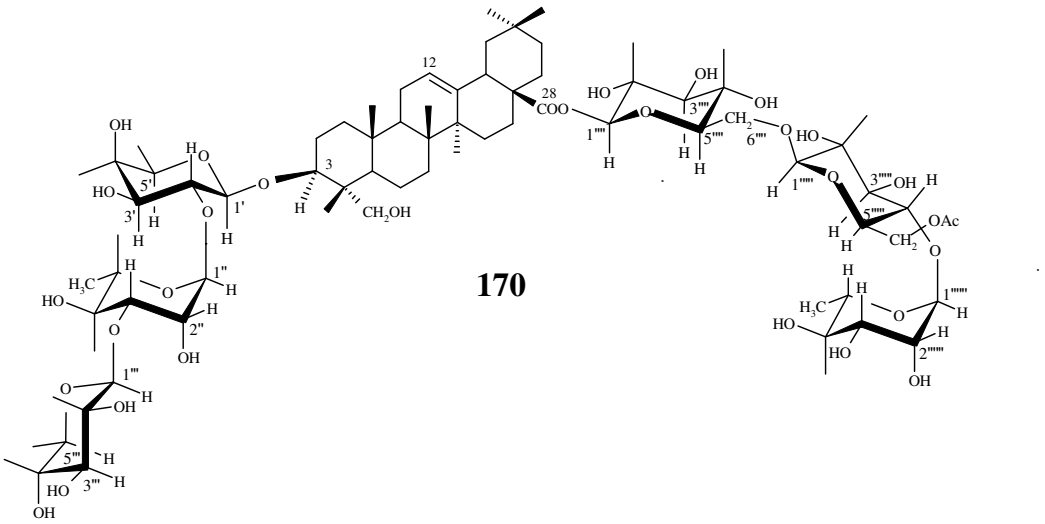
(спин-локинга) в двумерных экспериментах ROESY составляло 200 мс. Для ЯМР-исследования гликозиды предварительно подвергали троекратной обработке дейтерометанолом или смесью дейтерометанола и тяжелой воды (4:1) каждый раз в течение суток с последующей отгонкой растворителей досуха. Использовали растворы гликозидов в пиридине-d_5 или их полных ацетатов в дейтерохлороформе с добавлением внутреннего эталона – тетраметилсилана.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Спектры ^{13}C-ЯМР с полным подавлением спин-спинового взаимодействия с протонами наиболее информативны для установления структур гликозидов. Это объясняется рядом хорошо известных причин – очень высокой воспроизводимостью значений химических сдвигов сигналов С-атомов (±0,1–0,2 м.д.), слабой зависимостью химических сдвигов от внешних факторов (температура, концентрация, наличие примесей), узкой шириной линий и широким спектральным диапазоном, практически исключающим их перекрывание. Все это делает спектроскопию ^{13}C-ЯМР прежде всего очень ценной в идентификации известных соединений по величинам химических сдвигов сигналов. При этом степень надежности идентификации является исключительно высокой. Такой способ идентификации постоянно использовался нами при выделении гликозидов с уже установленными нами или другими авторами структурами после получения первичной информации путем идентификации гликозидов по хроматографической подвижности и идентификации продуктов полного кислотного и щелочного гидролизов. В ряде случаев такой подход позволял выявить изомерные соединения, например гликозиды урсоловой кислоты в смеси с гликозидами олеаноловой кислоты, которые хроматографически неразделимы, 23-О-глюкозилированные производные хедерагенина вместо обычно встречающихся 3-О-глюкозидов, гликозиды с различными положениями нативных ацетатных групп, изомерные гликозиды с остатком галактозы вместо остатка глюкозы и так далее. На рис. 1 приведены фрагменты обзорного спектра ^{13}C-ЯМР гликозида **170**.

Анализ обзорного спектра ^{13}C-ЯМР прежде всего позволял выявлять наличие сигналов карбонильных С-атомов в области выше 160 м.д. – а именно сигналов атомов углерода альдегидной группы в гликозидах гипсогенина (~210 м.д.), свободной карбоксильной группы агликона (~180 м.д.), гликозилированной карбоксильной группы агликона (~176 м.д.), карбоксильных остатков глюкуроновой кислоты (~170–174 м.д.), карбонильных С-атомов ацетильных групп (~171 м.д.). Анализ области 107–150 м.д. позволял выявить сигналы олефиновых и ароматических С-атомов и сделать предварительные заключения об их принадлежности. Так, наиболее часто встречающийся тип двойной связи у С-12 ($\Delta^{12,13}$) в тритерпеноидах β-амиринового ряда характеризуется значениями химических сдвигов ~123 и ~145 м.д. для атомов С-12 и С-13, соответственно. Тритерпеноиды α-амиринового ряда с таким же типом двойной связи – значениями соответственно ~126 и 139 м.д. Тритерпеноиды лупанового ряда с 20(29)-двойной связью характеризуются химическими сдвигами в ~151 и ~110 м.д. для атомов С-20

и С-29, соответственно. 30-Нортритерпеноиды имеют дополнительную 20(29)-двойную связь с химическими сдвигами С-атомов в ~148 и ~108 м.д.



170

Xyl-[3]Rha-[2]Ara-[3]Hederagenin[28]-Glc[6]-(6-OAc-Glc)[4]-Rha

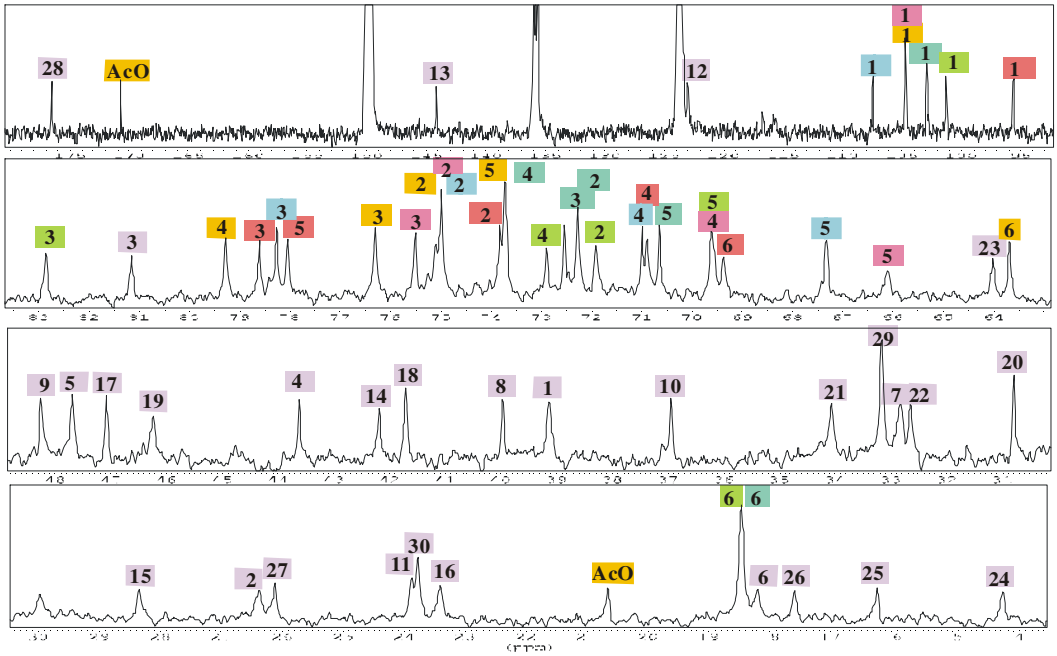


Рис. 1. Фрагменты обзорного спектра ^{13}С-ЯМР гликозида **170**.

Следующая высокоинформативная область углеродного спектра 95–109 м.д., в которой в тритерпеновых гликозидах располагаются исключительно сигналы аномерных С-атомов углеводных остатков, так что простой анализ сигналов в этой области однозначно указывает на количество моносахаридных остатков в молекуле гликозида. Анализ величин химических сдвигов сигналов в этой области позволяет сделать предварительные заключения и о природе моносахаридных остатков. Так в самой низкопольной части этой области (108–109 м.д.) распогагается сигнал С-1 арабинофуранозы, в области 106–108 м.д.– сигнал С-1 ксилопиранозы, в области 104–107 м.д. – сигналы С-1 остатков глюкуронопиранозы, галактопиранозы, арабинопиранозы и глюкопиранозы, в области 101–103 м.д – С-1 рамнопиранозы и в области 95–97 м.д. – С-1 глюкопиранозы, связанной ацилгликозидной связью с агликоном. Однако ситуация несколько усложняется в случае 2-О-ацетилированных или 2-О-гликозилированных сахаров, так как при этом сигнал С-1 испытывает высокопольный сдвиг (β-эффект замещения) на 1,5–2 м.д.

В области 61–88 м.д. располагаются сигналы прочих скелетных протонов моносахаридных остатков. Однако в самой низкопольной части этой области (87–88 м.д.) может находиться лишь сигнал атома С-4 арабинофуранозы, в области 78,5–85 м.д. – сигналы С-2 и С-3 арабинофуранозы и лишь сигналы гликозилированных С-атомов сахаров в пиранозной форме, в области 61–79 м.д. – сигналы как незамещенных, так и замещенных (гликозилированных, ацилированных) атомов С-2–С-5 сахаров, а в области 61–70 м.д. – сигналы атомов С-6 гексопираноз, С-5 пентопираноз, арабинофуранозы и рамнопиранозы и С-4 арабинопиранозы и галактопиранозы. К сожалению, в область 61–88 м.д. попадают и сигналы агликонных С-атомов, у которых имеется гидроксильная группа, что иногда существенно усложняет анализ этой части спектра. В оставшейся высокопольной области спектра 12–57 м.д. располагаются сигналы остальных С-атомов агликонных частей гликозидов и сигналы С-6 остатков рамноз (~18–19 м.д.).

Следует отметить, что полные отнесения сигналов в спектрах ^{13}С-ЯМР без привлечения специальных методик, обсуждаемых ниже, удавалось выполнить лишь в случае идентификации известных гликозидов по литературным данным для химических сдвигов, или же при отсутствии полных данных – путем идентификации по химическим сдвигам С-атомов отдельных независимых фрагментов гликозида (углеводных цепей и соответственно замещенной агликонной части). Установление строения новых соединений путем лишь идентификации всех отдельных фрагментов по химическим сдвигам их атомов обычно выполнялось лишь в простых случаях (не более трех–четырех углеводных остатков), а, как правило, подтверждалось с использованием обсуждаемых ниже методик двумерной спектроскопии.

Отнесения сигналов путем идентификации фрагментов гликозида (особенно агликонной части) в обычном спектре ^{13}С-ЯМР существенно облегчались при дополнительном использовании одномерных спектров ^{13}С с "редактированием". Обычно использовалась стандартная методика APT-редактирования [2], то есть эксперимент по *J*-модулированному спиновому эху с переключаемым декаплером и задержкой $\tau = 1/J$, где *J* – среднее значение величины прямой КССВ $^{1}J_{CH}$ ~150 Гц), в

которой фазы сигналов С-атомов с нечетным числом протонов (CH и CH_3) одинаковы, но противоположны фазам сигналов С-атомов с четным числом протонов (четвертичные С и CH_2), то есть имеют положительные и отрицательные амплитуды. На рис. 2 приведены фрагменты ^{13}С-ЯМР спектра гликозида **170** с АРТ-редактированием. В большинстве случаев такого упрощенного редактирования было достаточно, поскольку сигналы метильных групп обычно расположены в выскопольной области ниже 34 м.д. В более сложных случаях и при установлении строения новых соединений для получения подспектра только четвертичных С-атомов использовали аналогичную методику по *J*-модулированному спиновому эху с переключаемым декаплером и значением $\tau = 1/2J$, при котором амплитуды сигналов всех протонированных С-атомов оказываются близкими к нулевым [3].

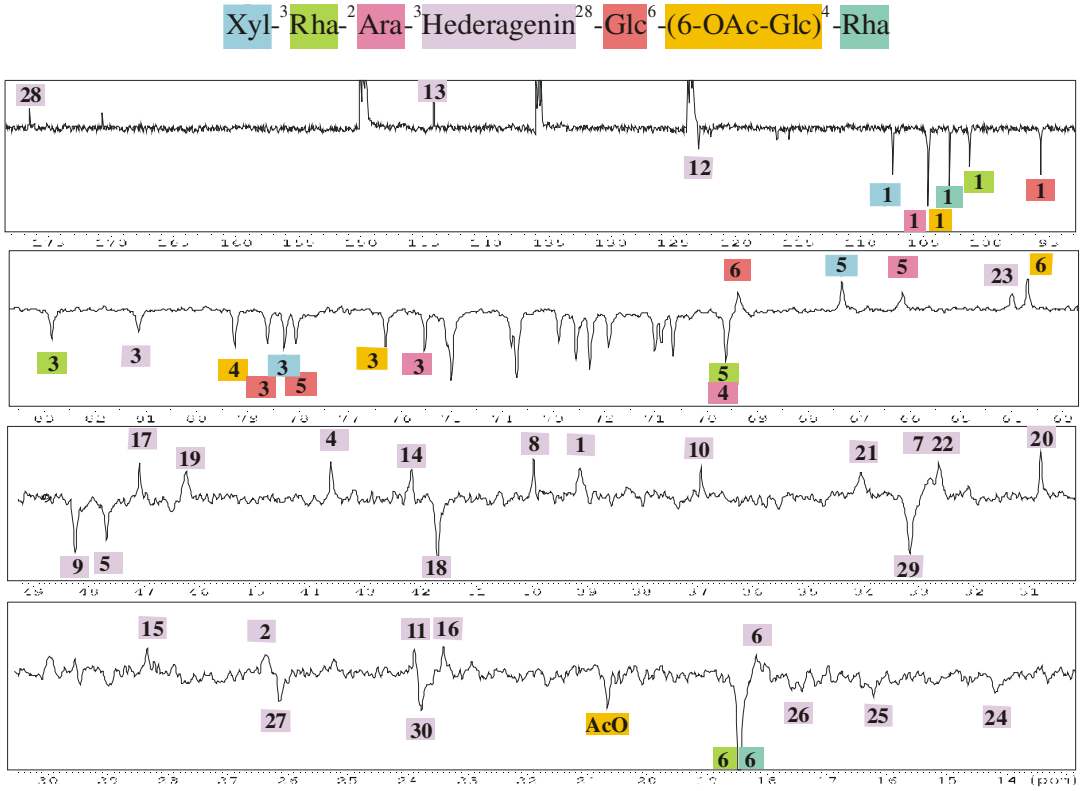


Рис. 2. Фрагменты спектра ^{13}С-ЯМР гликозида **170** с АРТ-редактированием.

В ряде случаев для определения величин прямых КССВ $^1J_{CH}$ получали спектры ^{13}С-ЯМР без подавления спин-спинового взаимодействия с протонами. Например, для наиболее часто встречающегося дисахаридного фрагмента Rha_p-(1→2)-Ara_p- для дублетных сигналов аномерных С-атомов при 101,7 и 104,3 м.д. определены прямые КССВ $^1J_{CH}$, составляющие 160 и 171 Гц для С-1 рамнозы и С-1 арабинозы,

соответственно. Такие значения КССВ однозначно определяют аксиальное положение атома кислорода у С-1 рамнозы и экваториальное – у С-1 арабинозы [4] и, следовательно, α-конфигурацию гликозидной связи остатка рамнозы (конформация $^1C_4$ для L-ряда) и α-конфигурацию гликозидной связи остатка арабинозы (конформация $^4C_1$ для L-ряда) [4]. Такие типы конформаций моносахаридных остатков подтверждаются и величинами КССВ в спектре ПМР. Другим примером использования "неразвязанных" углеродных спектров является наблюдение сигналов С-атома метиленовой группы концевой двойной связи. Необходимость строгого доказательства ее присутствия в гликозидах 30-нортритерпеноидов и гликозидах лупанового ряда вытекала из того, что сигнал олефинового (=$\underline{C}H_2$) С-атома находится как раз в низкопольной границе области сигналов аномерных С-атомов (107–110 м.д.). В спектре ЯМР ^{13}C таких соединений без спиновой развязки от протонов интересующему С-атому соответствует триплет с КССВ J_{CH} 152 Гц, соответствующей sp^2-гибридному атому углерода, который с учетом величины химического сдвига однозначно является олефиновым С-атомом в группе =CH_2.

Как указывалось выше, для отнесения сигналов в одномерном углеродном спектре обязательно необходима какая-либо априорная информация о структуре фрагментов и данные по химическим сдвигам сигналов С-атомов в аналогичных фрагментах иных соединений, полученные тем или иным способом. Однако во многих случаях такие данные или отсутствуют или не являются надежными, поскольку отнесения обычно выполнены косвенными методами (расчетами, сопоставлением данных по различным производным, анализом ^{13}C-ЯМР-спектров с частичной релаксацией и тому подобное). На первых этапах нашей работы до появления двумерных корреляционных методик однозначные отнесения сигналов в ^{13}C-ЯМР-спектрах выполнялись с использованием методики селективного гетероядерного двойного резонанса $^{13}C_i$-{^1H_i} путем последовательных экспериментов с облучением протонов, сигналы которых относились гомоядерным двойным резонансом ^1H_i-{^1H_j}, как было описано выше. Однако такой подход крайне трудоемок и применялся только к не очень сложным углеводным цепям.

Использование двумерной гетероядерной корреляционной спектроскопии HETCOSY [5] практически полностью решило проблему однозначного отнесения сигналов в углеродном спектре (по крайней мере для углеводных частей) по кросс-пикам сигналов непосредственно связанных С- и Н-атомов, поскольку обычно имеются однозначные отнесения сигналов протонов в ПМР-спектре, выполненные с помощью корреляционных методик COSY, TOCSY и ROESY [1]. Существенным недостатком спектроскопии HETCOSY, ограничивающим ее применение, является очень низкая чувствительность, поскольку в реальном времени наблюдаются сигналы углеродных атомов, что всегда требует большого количества вещества и приборного времени.

В значительной степени вышеуказанные проблемы решились с появлением обращенной корреляционной методики HSQC (гетероядерная корреляция через одну связь) [6] в которой в периоды регистрации наблюдаются протоны, что значительно повысило чувствительность этого эксперимента в сравнении с HETCOSY. Большинство отнесений сигналов С-атомов в углеводных и агликонных

частях выделенных гликозидов были выполнены с использованием именно этой корреляционной методики. На рис. 3–5 приведены фрагменты HSQC-спектров гликозида **170**.

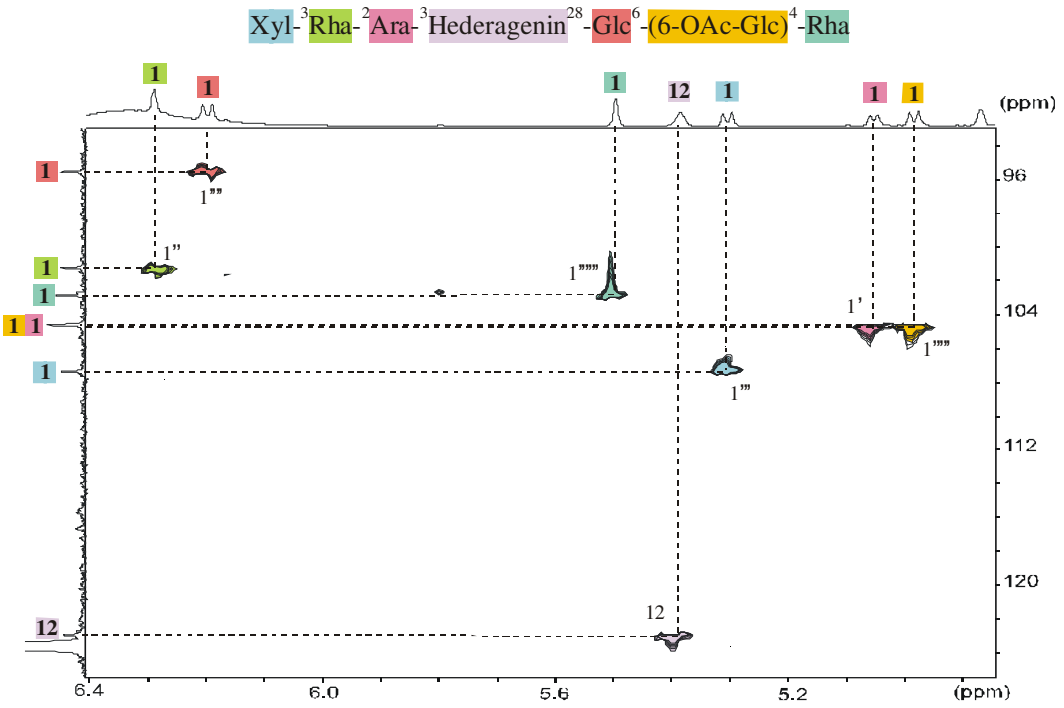


Рис. 3. Фрагмент спектра HSQC (область аномерных C-H корреляций) гликозида **170**.

Однозначное выполнение отнесений сигналов С-атомов с помощью методики HSQC было затруднено в тех случаях, когда протонные химические сдвиги разных атомов имеют одинаковые или очень близкие значения. В этих случаях приходилось использовать дополнительную информацию и приблизительно оценивать возможные химические сдвиги сигналов определяемых углеродных атомов. Наиболее ценными для отнесений сигналов С-атомов углеводных фрагментов изначально являлись высоконадежные данные по химическим сдвигам С-атомов в незамещенных метилгликозидах сахаров [7] и обобщенные данные по эффектам гликозилирования в углеводных и агликонных частях [8, 9] или же в гликозилирующих и гликозилируемых частях [10].

Возможности полного и однозначного отнесения углеродных сигналов углеводных частей гликозида с помощью методики HSQC позволяют и однозначно решить целый ряд структурных задач. Прежде всего по легко отмечаемым значительным α-эффектам гликозилирования (до +10–11 м.д. на С-атомах гликозилируемых спиртовых групп и до –4 м.д. на карбонильном С-атоме

гликозилируемой карбоксильной группы) на С-атомах агликонной части гликозида в сравнении с литературными или собственными данными для свободных (негликозилированных) агликонов однозначно определяются места присоединения углеводных фрагментов. Обычно это гидроксильная группа у атома С-3 или значительно реже у С-23 или С-28 в монодесмозидных гликозидах и гидроксильные группы у С-3 и С-28 или значительно реже у С-23 и С-28 в бисдесмозидных гликозидах. Несмотря на наличие в ряде случаев иных гидроксильных групп в агликонной части гликозида (у С-16, С-27), присоединения углеводных частей по ним обнаружено не было.

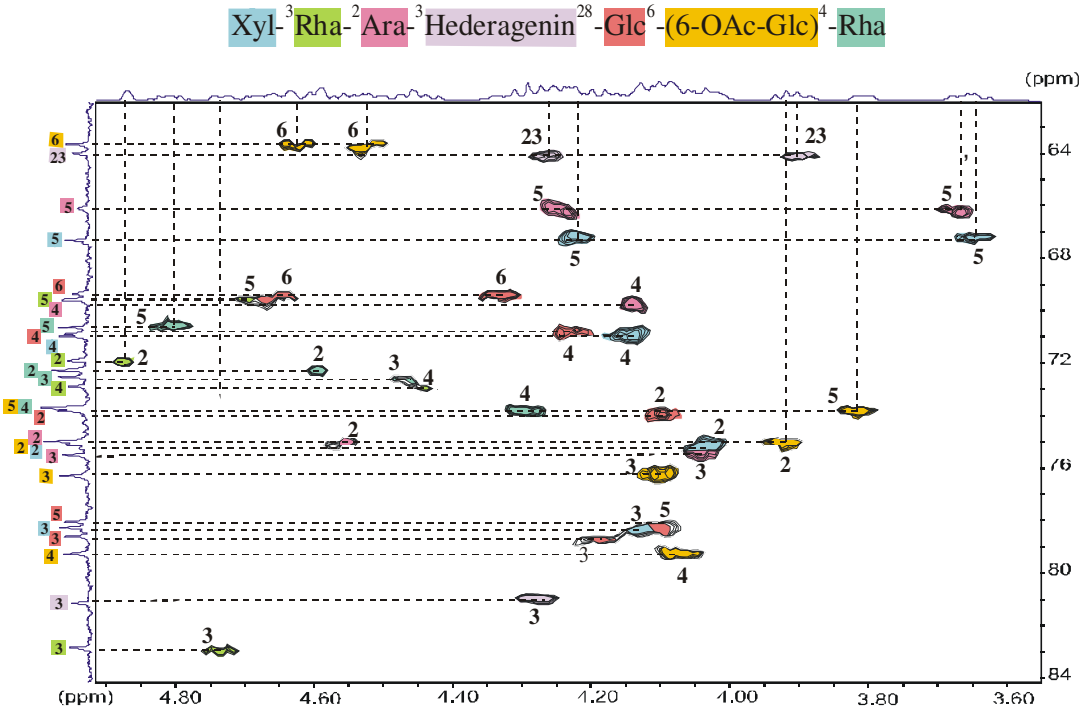


Рис. 4. Фрагмент спектра HSQC (область углеводных С-Н корреляций) гликозида **170**.

В случае присоединения углеводного фрагмента по гидроксильной группе у асимметрического С-3(*S*) атома агликона анализ величин β-эффектов гликозилирования (на атомах С-2 и С-4 агликона) позволяет однозначно определить абсолютную (*R/S*) конфигурацию аномерного С-атома непосредственно связанного углеводного остатка. Так, авторы серии работ, в которых исследовались α- и β-эффекты гликозилирования различными D- и L-сахарами первичных, вторичных и циклических вторичных спиртов (циклогексанол, D- и L-ментолы) [11–13] , а также эффекты гликозилирования в синтетических 3-О-α-D- и α-L-арабинопиранозидах олеаноловой кислоты [14] установили, что при *R*-конфигурации аномерного С-атома

и *S*-конфигурации гликозилируемого атома положительный α-эффект составляет около 10 м.д., а отрицательные β-эффекты как на С-2, так и на С-4 находятся в пределах 1–2,9 м.д., а при *S*-конфигурации аномерного С-атома и *S*-конфигурации гликозилируемого атома (или *R*- и *R*-конфигурациях соответственно) положительный α-эффект составляет около 4–6 м.д., а отрицательные β-эффекты на С-2 значительно больше, чем в первом случае, и составляют 5–7 м.д., а на С-4 – около 2 м.д. При этом закономерно отличаются и химические сдвиги аномерных С-атомов гликозилирующих остатков. Во всех выделенных нами гликозидах наблюдаемые эффекты гликозилирования на атомах С-2–С-4 агликонных частей и химические сдвиги аномерных С-атомов соответствуют *R*-конфигурации аномерных центров. С учетом α- или β-конфигураций гликозидных связей, определяемых на основе КССВ $J_{1,2}$ или данных спектра ROESY (обсуждается выше), *R*-конфигурация аномерного центра соответствует остаткам β-D-ксило-, β-D-глюко-, β-D-глюкуронопираноз и α-L-арабинопиранозы.

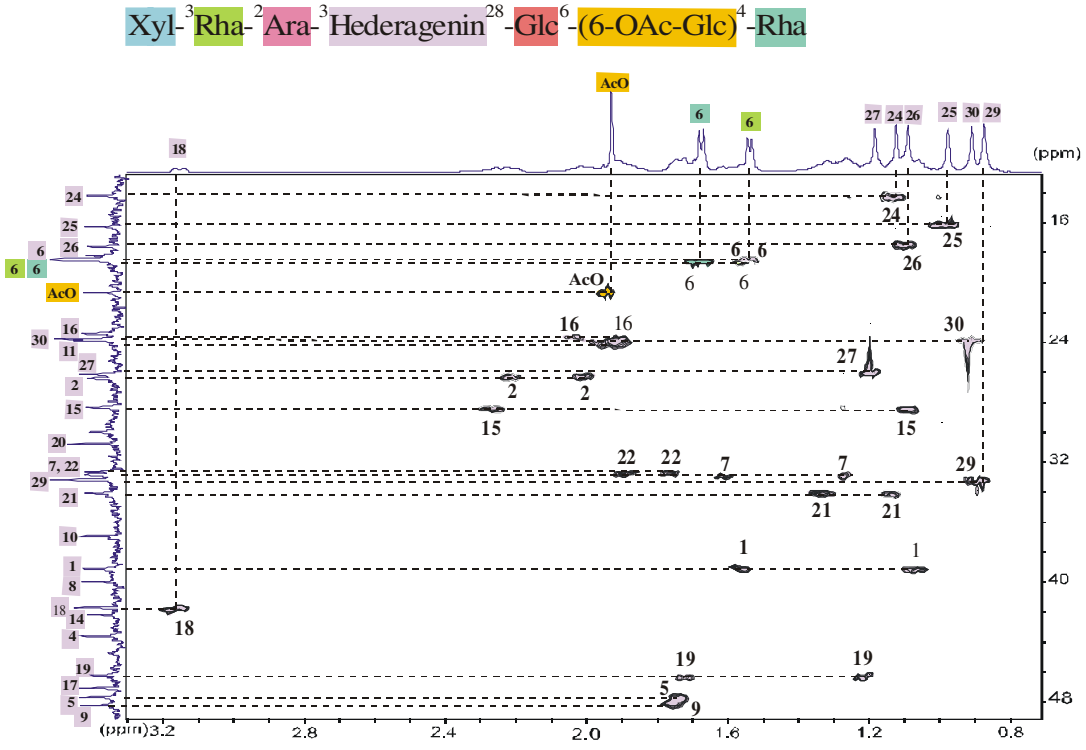


Рис. 5. Фрагмент спектра HSQC (область агликонных С-Н корреляций) гликозида **170**.

Анализ установленных с помощью HSQC химических сдвигов сигналов углеводных С-атомов проводился путем сравнения с химическими сдвигами незамещенных гликозидов сахаров для выявления эффектов гликозилирования.

Эффекты гликозилирования при образовании дисахаридов к настоящему времени всесторонне и тщательно изучены и теоретически объяснены на основе конформационного анализа и учета как индуктивных эффектов (определяющих главным образом α-эффекты), так и эффектов пространственного протон-протонного взаимодействия аномерного Н-атома гликозилирующего остатка и экваториальных $C_{\beta,\beta'}$-Н атомов гликозилируемого остатка (определяющих β-эффекты) с учетом соотношения абсолютных стереохимических конфигураций гликозилирующего и гликозилируемого атомов и ряда других факторов. Так, α-эффекты гликозилирования (на гликозилируемых С-атомах) положительны и обычно составляют от 5 до 11 м.д., напротив, β-эффекты на соседних С-атомах отрицательны и обычно не превышают 3 м.д. Эти закономерности при анализе найденных химических сдвигов сигналов С-атомов углеводных частей позволяли однозначно определять типы гликозидных связей (по обнаруживаемым α- и β-эффектам в сравнении с незамещенными гликозидами) или же определять концевые моносахаридные остатки, на которых эффекты гликозилирования отсутствуют.

Данный способ определения типов гликозидных связей является прямым и наиболее надежным. Однако следует отметить, что в случае линейных трисахаридных и более длинных углеводных фрагментов или в случае разветвленных трисахаридных фрагментов анализ эффектов гликозилирования естественно не может дать информации о том, какой именно углеводный фрагмент гликозилирует в определенное положение, поскольку эффекты гликозилирования от различных углеводных фрагментов обычно одинаковы. Однако такая информация обычно легко получается при анализе двумерных спектров ROESY [1] или двумерных спектров HMBC (обсуждается ниже) или же с использованием данных химических и биохимических методов (частичного гидролиза) расщепления. Как и в случае гликозилирования агликона, анализ абсолютных величин α- и β-эффектов на последующих моносахаридных остатках позволяет в большинстве случаев подтвердить и их абсолютные конфигурации (принадлежности к D- или L-рядам) как это предложено и экспериментально подтверждено в вышеупомянутой работе [10].

Кроме установления типов гликозидных связей анализ наблюдаемых величин химических сдвигов и эффектов замещения позволяет установить и места присоединения ацильных групп в углеводных частях гликозидов. Наблюдаемые при этом α-эффекты ацилирования в любые положения положительны и обычно составляют от 1,5 до 3,5 м.д., что заметно меньше α-эффектов гликозилирования, тогда как β-эффекты, как и в случае гликозилирования всегда отрицательны и составляют от –2,2 до –3,5 м.д, что обычно даже несколько больше, чем в случае гликозилирования.

Следует также отметить, что кроме очень больших возможностей методики HSQC в отнесении химических сдвигов сигналов С-атомов эти двумерные спектры следует признать и в качестве наиболее надежного способа идентификации сложных природных соединений, поскольку в них представлены одновременно как углеродные, так и протонные химические сдвиги всех CH_n группировок.

Несмотря на значительные возможности методики HSQC в отнесении сигналов С-атомов углеводных частей гликозидов, при отнесении сигналов С-атомов

агликонных частей часто возникают определенные трудности. Обычно не возникает проблем лишь в тех случаях, когда химические сдвиги сигналов С-атомов приблизительно известны и требуется лишь их дополнительное подтверждение (или однозначные отнесения близкорасположенных сигналов). Кроме того, обычно не возникает проблем при отнесении сигналов в низкопольной области спектра или же в тех случаях, когда сигналы соответствующих протонов надежно установлены с помощью методик COSY, TOCSY и ROESY. Однако даже сочетание трех вышеперечисленных методик далеко не всегда дает положительные результаты для высокопольной области спектра (ниже 57 м.д.), где находится большинство сигналов агликонных С-атомов. В таких случаях, в частности при установлении структуры новых агликонов, особенно эффективной оказалась двумерная гетероядерная корреляционная методика HMBC [15], основанная на наблюдении корреляций протонов с углеродами через несколько химических связей. В данной методике наиболее эффективно проявляются корреляции через 3 связи (особенно в случае s-*транс*-расположения Н- и С-атомов), но в ряде случаев наблюдаются корреляции через две или четыре связи.

Обычно анализ спектра HMBC агликонной части начинают с однозначно идентифицируемого в относительно низкопольной области сигнала протона Н-3, у которого наблюдаются кросс-пики с атомами и группами кольца А: С-1, С-5, С-23 и С-24. Иногда наблюдается и кросс-пик через 2 связи с атомом С-4. Аналогично от С-3 прослеживаются корреляции с протонами у вышеперечисленных С-атомов. Далее от Н-5 или Н-1 прослеживаются кросс-пики с С-25, С-9 и с С-7 от Н-5, то есть атомами и группами кольца В. Аналогично проводятся отнесения для кросс-пиков между С- и Н-атомами других колец. Для проверки найденных решений делают "обратные" ходы и находят корреляции от протонов (или атомов углерода) метильных групп С-23-С-27, С-29 и С-30 или от низкопольных сигналов атомов С(Н)-12, С(Н)-13, С-28 и от С(Н)-атомов агликона с оксигруппами или от других групп, сигналы которых расположенны в низкопольных областях.

Для углеводных частей гликозидов методика HMBC позволяет в большинстве случаев определить или подтвердить типы гликозидных связей, поскольку обычно легко обнаруживаются кросс-пики через три связи между аномерным протоном Н-1 гликозилирующего моносахаридного остатка и соответствующим гликозилируемым С-атомом (и наоборот между аномерным С-атомом и соответствующим скелетным протоном у гликозилируемого С-атома). Однако, естественно, прослеживаются кросс-пики и с атомами одного и того же (собственного) моносахаридного остатка, например от Н-1 с С-2, С-3 и иногда даже С-4. На рис. 6 приведен фрагмент HMBC-спектра гликозида **170**, а на рис. 7 – схема структурно информативных корреляций, прослеженных в спектре HMBC для углеводных частей гликозида **170**.

По получаемой информации в отношении типов гликозидных связей применение методики HMBC к углеводной части в определенном смысле подобно методике ROESY и иногда может удачно дополнять ее при неоднозначностях интерпретации в том или ином случае. Однако сложности в отнесении кросс-пиков в большинстве случаев заставляет отдавать предпочтение методике ROESY.

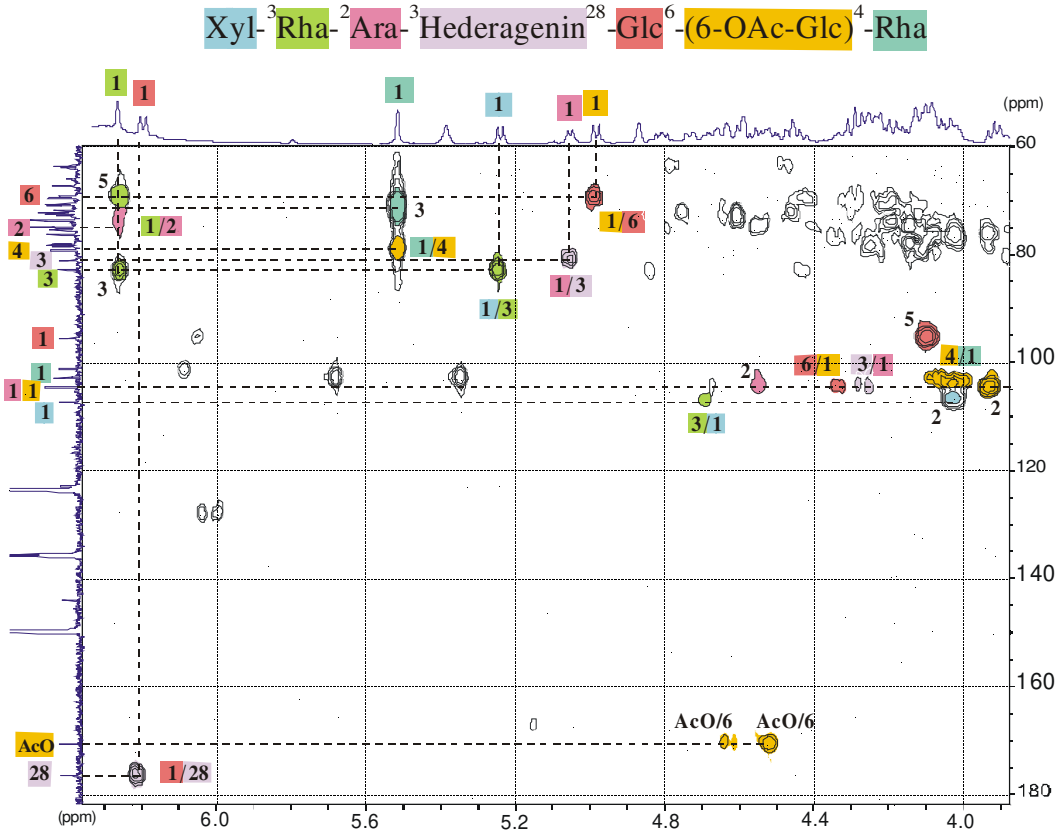


Рис. 6. Фрагмент HMBC-спектра гликозида 170.

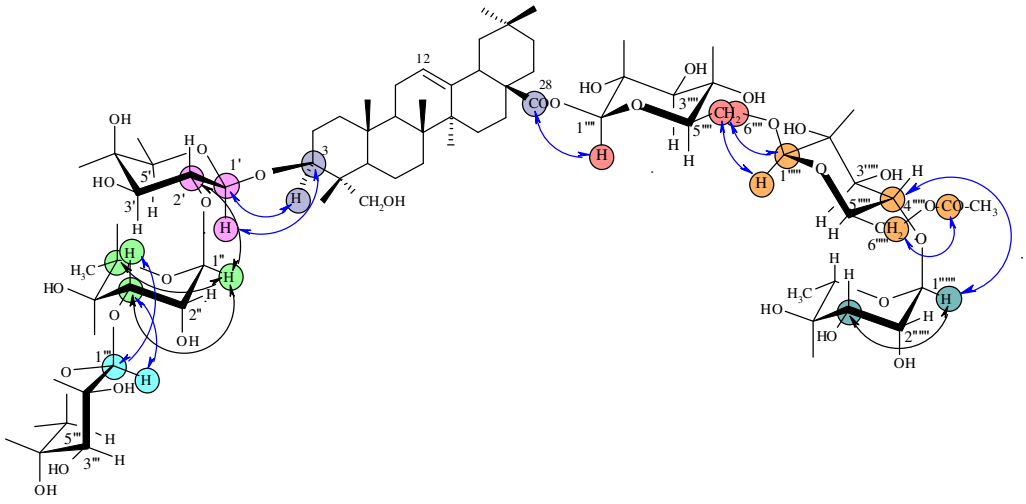


Рис. 7. Схема прослеженных корреляций для углеводных частей в спектре HMBC гликозида **170**.

Следует отметить, что методика HMBC является чрезвычайно эффективной в установлении строения гликозидов и особенно их агликонных частей, поскольку позволяет получить информацию, не даваемую иными вышеописанными корреляционными методами. Однако данную методику отличает довольно низкая чувствительность и в большинстве случаев значительная сложность, а иногда и неоднозначность в интерпретации кросс-пиков, что обусловлено с одной стороны не строго фиксированным числом связей между коррелирующими атомами, а с другой стороны химической природой изучаемых объектов, включающих главным образом конденсированные циклические системы, что естественным образом создает множество путей передачи поляризации.

В качестве иллюстрации методики HMBC на Рис. 8 приведена схема прослеженных корреляций в агликонной части гликозидов 30-нортритерпеноидов, а на рис. 9 – в агликонной части гликозида 23,27-дигидроксибетулиновой кислоты.

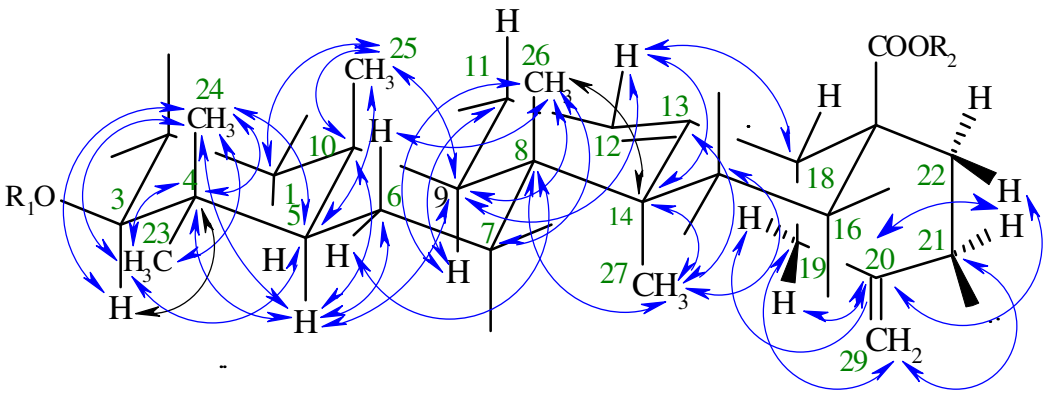


Рис. 8. Схема прослеженных корреляций в спектрах HMBC гликозидов 30-нортритерпеноидов.

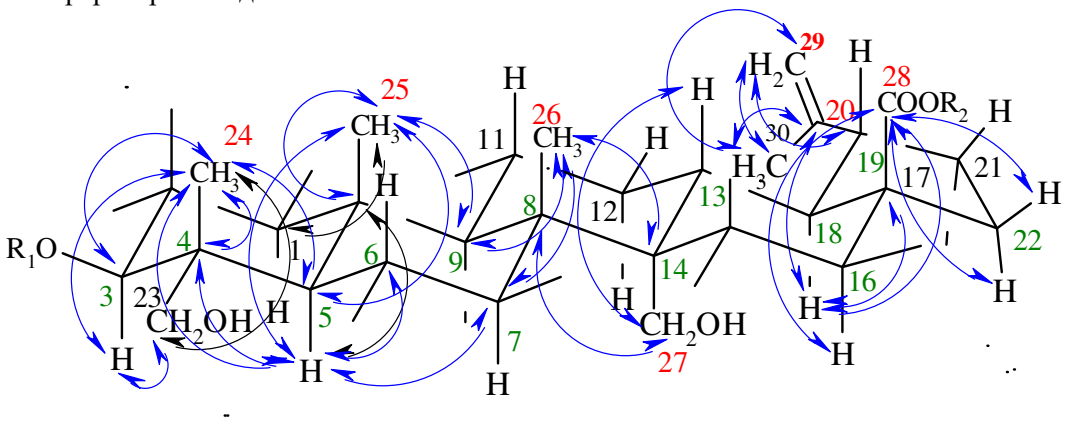


Рис. 9. Схема прослеженных корреляций в спектре HMBC гликозида 23,27-дигидроксибетулиновой кислоты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассмотрено применение современных методов одно- и двумерной спектроскопи ^{13}C-ЯМР в установлении строения тритерпеновых гликозидов растений семества Аралиевые на примере одного из новых, выделенных нами из *Kalopanax septemlobum*, гликозидов – 3-O-β-D-ксилопиранозил-(1→3)-O-α-L-рамнопиранозил-(1→2)-O-α-L-арабинопиранозил-28-O-α-L-рамнопиранозил-(1→4)-O-β-D-6-O-ацетилглюкопиранозил-(1→6)-O-β-D-глюкопиранозилового эфира хедерагенина.
2. Рассмотрены принципы отнесения сигналов в одно-и двумерных спектрах ^{13}C-ЯМР применительно к тритерпеновым гликозидам.
3. Детально рассмотрено использование двумерных методик HSQC и HMBC.

Список литературы

1. Гришковец В. И. Тритерпеновые гликозиды Araliaceae. V. Методы ЯМР-спектроскопии в установлении структуры тритерпеновых гликозидов аралиевых. Одно- и двумерная спектроскопия ^{1}H-ЯМР / В. И. Гришковец // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия. – 2026. – Т. 12 (78), № 1. – С. 292–304.
2. Patt S. L. Atteched proton test for carbon-13 NMR / S. L. Patt, J. N. Shoolery // J. Magn. Reson. – 1982. – Vol. 46. – P. 435–438.
3. Levitt M. H. The illusions spin decoupling / M. H. Levitt, G. Bodenhausen, R. R. Ernst // J. Magn. Reson. – 1983. – Vol. 53, № 3. – P. 443–461.
4. Bock K. Assignment of anomeric structure to carbohydrates through geminal C13-H coupling constants / K. Bock, I. Lundt, C. Pedersen // Tetrahedron Lett. – 1973. – № 13. – P. 1037–1040.
5. Bodenhausen G. Correlation of protonated carbon-13 NMR spectra by heteronuclear two-dimentional spectroscopy / G. Bodenhausen, R. Freeman // J. Magn. Reson. – 1977. – Vol. 28. – P. 471–475.
6. Bax A. New NMR techniques for structure determination and resonance assignments of complex carbohydrates / A. Bax, W. Egan, P. Kovac // J. Carbohydr. Chem. – 1984. – Vol. 3. – P. 593–597.
7. Gorin P. A. J. Further studies on the assignment of signals in 13C magnetic resonance spectra of aldoses and derived methyl glycosides / P. A. J. Gorin, M. Mazurek // Can. J. Chem. – 1975. – Vol. 53. – P. 1212–1215.
8. Tori K. Glycosidation shift in carbon-13 NMR spectroscopy: Carbon-13 signal shift from aglycon and glucose to glucoside / K. Tori, S. Seo, Y. Yoshimura [и др.] // Tetrahedron Lett. – 1977. – P. 179–180.
9. Seo S. Determination of absolute configuration of secondary hydroxy group in a chiral secondary alcohol using glycosidation shift in carbon-13 NMR spectroscopy / S. Seo, Y. Tomita, K. Tori [и др.] // J. Amer. Chem. Soc. – 1978. – Vol. 100. – P. 3331–3339.
10. Shashkov A. S. Stereochemical factors determing the effects of glycosilation on the ^{13}C chemical shifts in carbohydrates / A. S. Shashkov, G. M. Lipkind, Yu. A. Knirel [и др.] // Magnetic Resonance in Cmemistry. – 1988. – Vol. 26. – P. 735–747.
11. Kasai R. Carbon-13 chemical shifts of isoprenoid-β-D-glucopyranosides and -β-mannopyranosides. Stereochemical influences of aglycone alcohols / R. Kasai, M. Suzuo, J. Asakawa [и др.] // Tetrahedron Lett. – 1977. – P. 175–177.
12. Kasai R. 13C-NMR study of α- and -β-anomeric pairs of D-mannopyranosides and L-rhamnopyranosides / R. Kasai, M. Okihara, J. Asakawa [и др.] // Tetrahedron. – 1979. – Vol. 35. – P. 1427–1431.
13. Mizutani K. 13C-NMR spectroscopy of of α- and -β-anomeric series of alkyl L-arabinopyranosides / K. Mizutani, R. Kasai, O. Tanaka // Carbohydr. Res. – 1980. – Vol. 87. – P. 19–21.
14. Tsuda Y. Lycopodium triterpenoids. (11). The structures of inundoside-A, -B, -C, -D1, -D2, -E, -F, and -G, triterpenoid-glycosides occuring in Lycopodium inundatum L. / Y. Tsuda, M. Kaneda, N. Yasufuku [и др.] // Chem. Pharm. Bull. – 1981. – Vol. 29, № 8. – P. 2123–2134.

15. Bax A. 1H and 13C assignments from sensitivity enhanced detection of heteronuclear multiple-bond connectivity by 2D multiple-quantum NMR / A. Bax, M. F. Summers // J. Amer. Chem. Soc. – 1986. – Vol. 108. – P. 2093–2095.

TRITERPENE GLUCOSIDES OF ARALIACEAE. VI. NMR SPECTROSCOPIC METHODS IN THE STRUCTURAL ELUCIDATION OF ARALIACEAE TRITERPENE GLYCOSIDES: ONE- AND TWO-DIMENSIONAL ^{13}C-NMR SPECTROSCOPY

Grishkovets V. I.

V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Crimea, Russian Federation
E-mail: vladgri56@yandex.ru

^{13}C NMR spectra with complete proton decoupling are the most informative for the structural elucidation of glycosides. This is explained by several well-established factors: the very high reproducibility of ^{13}C chemical shift values (±0.1–0.2 ppm), their weak dependence on external parameters (temperature, concentration, presence of impurities), the narrow line widths, and the wide spectral range, which practically eliminates overlap. Altogether, these features make ^{13}C NMR spectroscopy particularly valuable for the identification of known compounds on the basis of ^{13}C chemical shift data.

Signal assignments through identification of glycoside fragments (especially the aglycone portion) in conventional ^{13}C NMR spectra were significantly facilitated by the additional use of one-dimensional ^{13}C experiments with editing. The standard APT (Attached Proton Test) editing protocol was commonly employed. In some cases, spectra without proton decoupling were also recorded in order to measure one-bond $^{1}J_{CH}$ coupling constants.

The use of two-dimensional heteronuclear correlation spectroscopy (HETCOSY) virtually solved the problem of unambiguous signal assignment in ^{13}C spectra (at least for the carbohydrate moieties) by cross-peaks of directly bonded C–H pairs, since proton resonances are usually well assigned in ^{1}H NMR spectra with the aid of correlation methods such as COSY, TOCSY, and ROESY. A major limitation of HETCOSY, however, is its very low sensitivity, as signals of carbon nuclei are directly detected, which requires substantial amounts of material and instrument time.

These limitations were largely overcome with the development of the inverse-detected heteronuclear correlation method HSQC (Heteronuclear Single Quantum Correlation), in which proton signals are detected during acquisition, thereby greatly improving sensitivity compared to HETCOSY. Most assignments of ^{13}C resonances in both the carbohydrate and aglycone portions of the isolated glycosides were carried out using this correlation method.

In structural studies of new aglycones, the two-dimensional heteronuclear correlation technique HMBC (Heteronuclear Multiple Bond Correlation) proved particularly effective. This method detects correlations of protons with carbons separated

by multiple bonds. The most prominent correlations are observed across three bonds (especially in cases of s-trans arrangements of H and C atoms), although two- and four-bond correlations are also frequently detectable.

For the carbohydrate moieties of glycosides, HMBC most often allows the determination or confirmation of the glycosidic linkage types, since three-bond cross-peaks are readily observed between the anomeric proton (H-1) of the glycosylating sugar residue and the glycosylated carbon atom, and conversely, between the anomeric carbon atom and the corresponding skeletal proton of the glycosylated carbon.

Keywords: Araliaceae, triterpene glycosides, one- and two-dimensional ^{13}C-NMR spectroscopy, ^{13}C-ЯМР-АРТ, HSQC, HMBC methods.

References

1. Grishkovets V. I. Triterpene glycosides of Araliaceae. V. NMR Spectroscopic Methods in the Structural Elucidation of Araliaceae Triterpene Glycosides: One- and Two-Dimensional ^{1}H-NMR Spectroscopy, *Scientific notes of the Crimean Federal University named after V. I. Vernadsky. Biology. Chemistry*, **12** (1), 292 (2026). (*in Russ.*).
2. Patt S. L., Shoolery J. N., Atteched proton test for carbon-13 NMR, *J. Magn. Reson*., **46**, 435 (1982).
3. Levitt M. H., Bodenhausen G., Ernst R. R., The illusions spin decoupling, *J. Magn. Reson*., **53** (3), 443 (1983).
4. Bock K., Lundt I., Pedersen C., Assignment of anomeric structure to carbohydrates through geminal C13-H coupling constants, *Tetrahedron Lett*., (13), 1037 (1973).
5. Bodenhausen G., Freeman R., Correlation of protonated carbon-13 NMR spectra by heteronuclear two-dimentional spectroscopy, *J. Magn. Reson*., **28**, 471 (1977).
6. Bax A., Egan W., Kovac P., New NMR techniques for structure determination and resonance assignments of complex carbohydrates, *J. Carbohydr. Chem*., **3**, 593 (1984).
7. Gorin P. A. J., Mazurek M., Further studies on the assignment of signals in 13C magnetic resonance spectra of aldoses and derived methyl glycosides, *Can. J. Chem*., **53**, 1212 (1975).
8. Tori K., Seo S., Yoshimura Y., Arita H., Tomita Y., Glycosidation shift in carbon-13 NMR spectroscopy: Carbon-13 signal shift from aglycon and glucose to glucoside, *Tetrahedron Lett*., 179 (1977).
9. Seo S., Tomita Y., Tori K., Yoshimura Y., Determination of absolute configuration of secondary hydroxy group in a chiral secondary alcohol using glycosidation shift in carbon-13 NMR spectroscopy, *J. Amer. Chem. Soc*., **100**, 3331 (1978).
10. Shashkov A. S., Lipkind G. M., Knirel Yu. A., Kochetkov N. K., Stereochemical factors determing the effects of glycosilation on the 13C chemical shifts in carbohydrates, *Magnetic Resonance in Cmemistry*., **26**, 735 (1988).
11. Kasai R., Suzuo M., Asakawa J., Tanaka O., Carbon-13 chemical shifts of isoprenoid-β-D-glucopyranosides and -β-mannopyranosides. *Stereochemical influences of aglycone alcohols, Tetrahedron Lett*., 175 (1977).
12. Kasai R., Okihara M., Asakawa J., Mizutani K., Tanaka O., 13C-NMR study of α- and -β-anomeric pairs of D-mannopyranosides and L-rhamnopyranosides, *Tetrahedron*, **35**, 1427 (1979).
13. Mizutani K., Kasai R., Tanaka O., 13C-NMR spectroscopy of of α- and -β-anomeric series of alkyl L-arabinopyranosides, *Carbohydr. Res*., **87**, 19 (1980).
14. Tsuda Y., Kaneda M., Yasufuku N., Shimizu Y., Lycopodium triterpenoids. (11). The structures of inundoside-A, -B, -C, -D1, -D2, -E, -F, and -G, triterpenoid-glycosides occuring in Lycopodium inundatum L., *Chem. Pharm. Bull*., **29** (8), 2123 (1981).
15. Bax A., Summers M. F., 1H and 13C assignments from sensitivity enhanced detection of heteronuclear multiple-bond connectivity by 2D multiple-quantum NMR, *J. Amer. Chem. Soc*., **108**, 2093 (1986).

Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского
Биология. Химия. Том 12 (78). 2026. № 2. С. 357–366.

УДК 547.918:543.422:582.5/.9
DOI 10.5281/ZENODO.20796049

ТРИТЕРПЕНОВЫЕ ГЛИКОЗИДЫ ARALIACEAE. VII. ПОЛНЫЕ ОТНЕСЕНИЯ СИГНАЛОВ В ^{1}H- И ^{13}C-ЯМР СПЕКТРАХ АГЛИКОННЫХ ЧАСТЕЙ ГЛИКОЗИДОВ ОЛЕАНОЛОВОЙ, ЭХИНОЦИСТОВОЙ КИСЛОТ И ХЕДЕРАГЕНИНА

Гришковец В. И.

Институт биохимических технологий, экологии и фармации (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского», Симферополь, Россия
E-mail: vladgri56@yandex.ru

В настоящее статье на основе использования одно- и двумерных вариантов спектроскопии ЯМР выполнены полные и однозначные отнесения сигналов ^{1}H- и ^{13}C-атомов в агликонных частях гликозидов β-амиринового ряда – олеаноловой, эхиноцистовой кислот и хедерагенина. Приведены усредненные данные по величинам химических сдвигов сигналов ^{1}H- и ^{13}C-атомов агликоннных частей гликозидов олеаноловой, эхиноцистовой кислот и хедерагенина различного типа замещения.
Ключевые слова: Araliaceae, тритерпеновые гликозиды, гликозиды олеаноловой кислоты, гликозиды эхиноцистовой кислоты, гликозиды хедерагенина, спектроскопия ^{1}H- и ^{13}C-ЯМР.

ВВЕДЕНИЕ

В предыдущих статьях [1, 2] рассматривалось применение одно- и двумерных вариантов спектроскопии ^{1}H-ЯМР и ^{13}C-ЯМР в структурных исследования тритерпеновых гликозидов Аралиевых. В настоящее статье рассматриваются возможности использования одно- и двумерных вариантов спектроскопии ЯМР для полных и однозначных отнесений сигналов ^{1}H- и ^{13}C-атомов в агликонных частях гликозидов β-амиринового ряда, а именно олеаноловой, эхиноцистовой кислот и хедерагенина.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

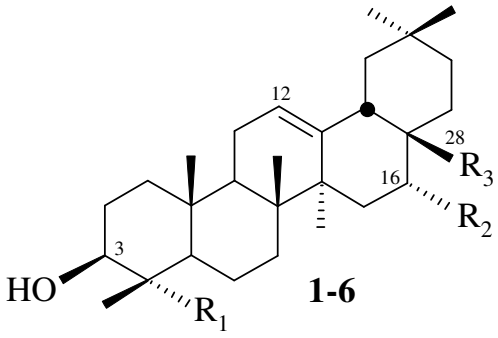
ЯМР-спектры получены на приборах "Bruker" WM-250, "Varian" VXR-300, "Bruker" AM-300, "Bruker" AM-400, "Bruker" DRX-500. Для двумерных экспериментов использовались стандартные методики ^{13}C-ЯМР, ^{13}C-ЯМР-АРТ, HSQC, HMBC (пакет стандартных программ фирмы "Bruker"). Использовали растворы гликозидов в пиридине-d_5 с добавлением внутреннего эталона – тетраметилсилана.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

К настоящему времени из растений семейства Аралиевые (*Araliaceae* Juss.) выделено значительное количество гликозидов и установлены их полные структуры. Это гликозиды более чем 60 тритерпеновых агликонов и их число непрерывно возрастает. В изученных видах растений семейства обнаружены тритерпеновые гликозиды α-амиринового, β-амиринового, лупанового, циклоартанового и даммаранового рядов [3]. При этом в растениях семейства Аралиевые существенно преобладают гликозиды β-амиринового ряда и прежде всего гликозиды олеаноловой кислоты (**1**) и хедерагенина (**4**). В таблице 1 приведены структуры агликонов β-амиринового ряда в выделенных нами гликозидах аралиевых [4, 5]

Таблица 1

Структуры агликонов β-амиринового ряда



1-6

Соединение	R_1	R_2	R_3	Тривиальное название
1	$-CH_3$	-H	-COOH	олеаноловая кислота
2	$-CH_3$	-OH	-COOH	эхиноцистовая кислота
3	$-CH_3$	-H	$-CH_2OH$	эритродиол
4	$-CH_2OH$	-H	-COOH	хедерагенин
5	$-CH_2OH$	-OH	-COOH	каулофиллогенин
6	-CHO	-H	-COOH	гипсогенин

Отнесения сигналов в спектрах ^{13}C-ЯМР олеаноловой (**1**), эхиноцистовой (**2**) кислот и хедерагенина (**4**) хорошо известны, начиная с первой работы по полным, (но для ряда атомов не однозначным) отнесениям сигналов углеродных атомов в

производных олеан-12-ена [6]. На основе этой работы для гликозидов олеаноловой кислоты и хедерагенина даются отнесения сигналов в подавляющем большинстве статей, цитированных, например, в [3]. Однако гликозиды эхиноцистовой кислоты редко встречаются в аралиевых, и ее идентификацию мы проводили путем сопоставления химических сдвигов атомов ^{13}C с достаточно новыми и надежными литературными данными для гликозидов эхиноцистовой кислоты, выделенных из видов семейства сложноцветных (*Compositae*), например [7].

Следует отметить, что "полные" отнесения, приведенные у разных авторов, часто значительно расходятся, особенно в отношении близкорасположенных сигналов С-атомов (атомы 17 и 19, 7, 22 и 29, 15 и 23, 2 и 27, 11, 16 и 30 для олеаноловой кислоты; 5 и 9, 11 и 19, 14 и 18, 7, 22 и 29, 2 и 27, 11, 16 и 30 для хедерагенина; 9, 17 и 19, 14 и 18, 1, 4 и 8, 15 и 21, 7 и 29 для эхиноцистовой кислоты). Значительная часть расхождений была устранена нами при использовании спектров ^{13}C-ЯМР с АРТ-редактированием. С использованием методик COSY, TOCSY, HSQC, HMBC и ROESY мы выполнили действительно полные и однозначные отнесения, как в углеродных, так и в протонных (^{1}H-ЯМР), спектрах агликонных частей гликозидов олеаноловой, эхиноцистовой кислот и хедерагенина различного типа замещения (Табл. 2–5). Для агликонных частей гликозидов в спектрах ^{1}H-ЯМР ранее в литературных источниках даны отнесения сигналов лишь для разэкранированных протонов (винильных, аллильных, у углеродов с гетероатомами) и изредка – для протонов метильных групп. В ходе работы удалось выполнить отнесения сигналгов и всех остальных скелетных протонов агликонных остатков гликозидов. В таблицах 2–5 приведены усредненные значения химических сдвигов сигналов, прежде всего атомов ^{13}C. Усреднения проводились как по собственным данным, так и по многочисленным литературным источникам. При этом отклонения от усредненных значений хим. свдигов атомов ^{13}C обычно не превышают ±0,1–0,2 м.д.

Таблица 2

Усредненные химические сдвиги (δ, м.д., C_5D_5N) атомов ^{13}C и ^{1}H агликонных частей гликозидов олеаноловой кислоты разного типа замещения

№ атома	H→^{3}Agl^{28}←H	$^{-}O_3S$→^{3}Agl^{28}←H	R→^{3}Agl^{28}←H	$^{-}O_3S$→^{3}Agl^{28}←R	R→^{3}Agl^{28}←R	R→^{3}Agl^{28}←R
1	39,0	38,8	38,8	38,8	38,8	1,47 0,89
2	28,1	25,1	26,5	25,0	26,5	2,09 1,83
3	78,1	84,9	88,7	85,2	88,7	3,34
4	39,4	39,0	39,5	39,0	39,5	–
5	55,9	56,4	56,0	56,4	55,9	0,78
6	18,8	18,8	18,5	18,8	18,5	1,47 1,28

Продолжение таблицы 2

7	33,3	33,1	33,3	33,2	33,1	1,46 1,34
8	39,8	39,8	39,8	39,9	39,9	–
9	48,2	48,0	48,0	48,0	48,0	1,61
10	37,4	37,3	37,0	37,2	36,9	–
11	23,8	23,8	23,8	23,8	23,7	1,90 1,90
12	122,5	122,5	122,5	122,9	122,6	5,43
13	144,9	144,8	144,8	144,3	144,1	–
14	42,2	42,2	42,2	42,2	42,1	–
15	28,4	28,3	28,3	28,3	28,2	2,27 1,19
16	23,8	23,8	23,8	23,5	23,4	2,11 1,96
17	46,7	46,7	46,7	47,1	47,0	–
18	42,1	42,0	42,0	41,7	41,8	3,17
19	46,6	46,6	46,6	46,3	46,3	1,77 1,23
20	31,0	31,0	30,9	30,8	30,8	–
21	34,3	34,3	34,3	34,1	34,0	1,37 1,12
22	33,3	33,3	33,3	32,6	32,7	1,86 1,76
23	28,8	28,9	28,2	28,9	28,2	1,28
24	16,5	17,3	17,0	17,2	16,9	1,00
25	15,5	15,6	15,5	15,6	15,5	0,86
26	17,4	17,3	17,4	17,5	17,5	1,07
27	26,2	26,3	26,3	26,2	26,1	1,27
28	180,2	180,1	180,1	176,8	176,5	–
29	33,3	33,3	33,3	33,2	33,1	0,93
30	23,8	23,8	23,8	23,8	23,7	0,90

Таблица 3

Усредненные химические сдвиги (δ, м.д., C_5D_5N) атомов ^{13}C и ^{1}H агликонных частей гликозидов эхиноцистовой кислоты разного типа замещения

№ атома	$H\rightarrow{}^{3}Agl^{28}\leftarrow H$	$^{-}O_3S\rightarrow{}^{3}Agl^{28}\leftarrow H$	$R\rightarrow{}^{3}Agl^{28}\leftarrow H$	$^{-}O_3S\rightarrow{}^{3}Agl^{28}\leftarrow R$	$R\rightarrow{}^{3}Agl^{28}\leftarrow R$	$R\rightarrow{}^{3}Agl^{28}\leftarrow R$
1	38,9	38,8	38,9	38,9	39,0	1,55 0,97
2	28,0	25,1	26,4	25,0	26,5	2,06 1,83
3	78,0	84,8	88,9	84,9	89,0	3,30
4	39,3	38,8	39,3	38,9	39,4	–
5	55,8	56,4	56,2	56,4	56,2	0,78
6	18,8	18,7	18,6	18,7	18,5	1,44 1,28
7	33,5	33,3	33,4	33,4	33,4	1,56 1,38
8	39,8	39,8	39,8	39,9	40,0	–
9	47,2	47,1	47,2	47,1	47,2	1,74
10	37,3	37,2	37,1	37,2	37,0	–
11	23,7	23,8	23,8	23,8	23,8	1,96 1,96
12	122,4	122,5	122,6	122,7	122,9	5,55
13	144,9	144,8	144,7	144,5	144,6	–
14	42,0	41,9	42,1	42,0	42,0	–
15	36,0	36,1	36,1	36,0	36,0	2,43 1,72
16	74,6	74,7	74,8	74,3	74,4	5,20
17	48,8	48,8	48,9	49,1	49,1	–
18	41,3	41,3	41,3	41,2	41,2	3,45
19	47,2	47,2	47,2	47,1	47,0	2,71 1,32
20	30,9	30,9	30,9	30,8	30,7	–
21	36,0	36,0	36,1	35,9	35,9	2,37 1,28
22	32,7	32,6	32,5	32,2	32,1	2,35 2,10
23	28,7	28,8	28,1	28,7	28,0	1,22
24	16,5	17,2	16,9	17,1	16,9	0,99

Продолжение таблицы 3

25	15,6	15,6	15,5	15,7	15,7	0,91
26	17,4	17,2	17,4	17,5	17,5	1,07
27	27,1	27,2	27,2	27,2	27,1	1,69
28	179,8	180,0	180,3	176,1	176,2	–
29	33,3	33,3	33,2	33,2	33,1	0,93
30	24,7	24,6	24,6	24,6	24,6	0,99

Таблица 4

Усредненные химические сдвиги (δ, м.д., C_5D_5N) атомов ^{13}C и ^{1}H агликонных частей гликозидов хедерагенина разного типа замещения (часть 1)

№ атома	H→^{3}Agl^{28}←H	R→^{3}Agl^{28}←H	H→^{3}Agl^{28}←R	R→^{3}Agl^{28}←R	R→^{3}Agl^{28}←R
1	38,8	38,9	38,8	38,9	1,56 1,04
2	27,7	26,0	27,6	26,0	2,20 1,98
3	73,6	82,0	73,6	82,1	4,25
4	42,9	43,5	42,9	43,5	–
5	48,8	47,8	48,6	47,7	1,70
6	18,5	18,3	18,6	18,3	1,66 1,30
7	33,0	33,0	32,8	32,9	1,60 1,28
8	39,8	39,8	39,9	40,0	–
9	48,2	48,2	48,1	48,3	1,74
10	37,3	36,9	37,3	37,0	–
11	23,7	23,8	23,8	23,9	1,92
12	122,4	122,6	122,8	122,9	5,40
13	144,8	144,8	144,2	144,2	–
14	42,2	42,1	42,2	42,2	–
15	28,4	28,3	28,3	28,4	2,25 1,08
16	23,7	23,8	23,4	23,5	2,03 1,90
17	46,6	46,7	47,1	47,1	–

Продолжение таблицы 4

18	42,0	42,0	41,7	41,8	3,15
19	46,5	46,5	46,3	46,3	1,70 1,20
20	30,9	30,9	30,7	30,8	–
21	34,3	34,3	34,0	34,1	1,31 1,11
22	33,3	33,2	32,5	32,6	1,85 1,72
23	68,3	64,4	67,9	64,6	4,20 3,80
24	13,1	13,7	13,0	13,8	1,00
25	16,0	16,1	16,1	16,3	0,96
26	17,3	17,4	17,6	17,6	1,08
27	26,1	26,2	26,1	26,2	1,18
28	180,1	180,2	176,7	176,6	–
29	33,3	33,2	33,1	33,2	0,87
30	23,7	23,8	23,7	23,8	0,90

Таблица 5

Усредненные химические сдвиги (δ, м.д., C_5D_5N) атомов ^{13}C и ^{1}H агликонных частей гликозидов хедерагенина разного типа замещения (часть 2)

№ атома	$R\rightarrow^{23}Agl^{28}\leftarrow H$	$R\rightarrow^{23}Agl^{28}\leftarrow R$	$R\rightarrow^{23}Agl^{28}\leftarrow R$
1	38.8	38,7	1,50 0,91
2	27.1	27,1	1,93 1,88
3	72.1	72,1	4,22
4	43.0	43,0	–
5	48.4	48,4	1,49
6	18.6	18,6	1,68 1,31
7	32.9	32,9	1,65 1,35
8	39.9	39,9	–
9	48.2	48,1	1,68
10	37.2	37,2	–

Продолжение таблицы 5

11	24.0	24,2	1,95 1,92
12	122.6	122,9	5,37
13	144.9	144,5	–
14	42.2	42,2	–
15	28.4	28,4	2,22 1,19
16	23.7	23,3	2,05 1,95
17	46.7	47,2	–
18	42.0	41,8	3,16
19	46.5	46,4	1,73 1,24
20	30.9	30,8	–
21	34.3	34,1	1,35 1,13
22	33.2	32,5	1,87 1,75
23	74.6	74,5	4,01 3,95
24	13.2	13,3	0,98
25	16.2	16,2	0,96
26	17.5	17,6	1,10
27	26.3	26,3	1,19
28	180.2	177,0	–
29	33.2	33,2	0,92
30	23.8	23,9	0,93

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе использования одно- и двумерных вариантов спектроскопии ЯМР выполнены полные и однозначные отнесения сигналов ^{1}H- и ^{13}C-атомов в агликонных частях гликозидов β-амиринового ряда – олеаноловой, эхиноцистовой кислот и хедерагенина.
2. Приведены усредненные данные по величинам химических сдвигов сигналов ^{1}H- и ^{13}C-атомов агликоннных частей гликозидов олеаноловой, эхиноцистовой кислот и хедерагенина различного типа замещения.

Список литературы

1. Гришковец В. И. Тритерпеновые гликозиды Araliaceae. V. Методы ЯМР-спектроскопии в установлении структуры тритерпеновых гликозидов аралиевых. Одно- и двумерная спектроскопия ^{1}H-ЯМР / В. И. Гришковец // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия. – 2026. – Т. 12 (78), № 1. – С. 292–304.
2. Гришковец В. И. Тритерпеновые гликозиды Araliaceae. VI. Методы ЯМР-спектроскопии в установлении структуры тритерпеновых гликозидов Аралиевых. Одно- и двумерная спектроскопия ^{13}C-ЯМР / В. И. Гришковец // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия. – 2026. – Т. 12 (78), № 2. – С. 341–356.
3. Hostettmann K. Saponins / K. Hostettmann, A. Marston. – Cambrige: Cambrige University Press, 1995. – 548 p.
4. Гришковец В. И. Тритерпеновые гликозиды аралиевых: выделение, установление строения, биологическая активность и хемотаксономическое значение : Автореф. дис. … д-ра хим. наук. / В. И. Гришковец. – Одесса, 2004. – 36 с.
5. Гришковец В. И. Тритерпеновые гликозиды Аралиевых: структуры выделенных тритерпеновых гликозидов / В. И. Гришковец, В. Я. Чирва, В. В. Качала [и др.] // Труды Никитского ботанического сада. – 2007. – Т. 128. – С. 90–102.
6. Tori K. Carbon-13 NMR spectra of olean-12-enes. Full signal assignments including quaternary carbon signals assigned by use of indirect ^{13}C,^{1}H spin couplings / K. Tori, S. Seo, A. Shimaoka, [и др.] // Tetrahedron Lett. – 1974. – № 48. – P. 4227–4230.
7. Nagao T. Studies on the constituents of Aster scaber Thunb. II. Structures of echinocystic acid glycosides isolated from the root / T. Nagao, R. Tanaka, H. Shimokawa [и др.] // Chem. Pharm. Bull. – 1991. – Vol. 39, № 7. – P. 1719–1725.

TRITERPENE GLUCOSIDES OF ARALIACEAE. VII. COMPLETE ASSIGNMENTS OF ^{1}H- AND ^{13}C-NMR SPECTRA OF AGLICONE PARTS OF GLYCOSIDES OF OLEANOLIC, ECHINOCYSTIC ACIDS AND HEDERAGENIN

Grishkovets V. I.

V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Crimea, Russian Federation
E-mail: vladgri56@yandex.ru

In the present article, based on the application of one- and two-dimensional NMR spectroscopy techniques, complete and unambiguous signal assignments have been performed for the 1H and 13C nuclei within the aglycone moieties of β-amyrin-series glycosides–specifically, oleanolic acid, echinocystic acid, and hederagenin. Averaged chemical shift data are presented for the 1H and 13C nuclei of the aglycone moieties of oleanolic acid, echinocystic acid, and hederagenin glycosides featuring various substitution patterns.

Signal assignments reported by various authors often differ significantly, particularly regarding closely spaced signals from carbon atoms (atoms 17 and 19; 7, 22, and 29; 15 and 23; 2 and 27; 11, 16, and 30 for oleanolic acid; 5 and 9; 11 and 19; 14 and 18; 7, 22,

and 29; 2 and 27; 11, 16, and 30 for hederagenin; and 9; 17 and 19; 14 and 18; 1, 4, and 8; 15 and 21; 7 and 29 for echinocystic acid). We resolved a significant portion of these discrepancies through the use of 13C NMR spectra with APT editing.

Utilizing COSY, TOCSY, HSQC, HMBC, and ROESY techniques, we performed truly complete and unambiguous assignments in both the carbon and proton (^{1}H NMR) spectra of the aglycone moieties of glycosides of oleanolic acid, echinocystic acid, and hederagenin featuring various substitution patterns.

Tables present averaged chemical shift values, primarily for ^{13}C nuclei. These averages were derived from a combination of our own experimental data and numerous literature sources. In this context, deviations from the averaged ^{13}C chemical shift values typically do not exceed ±0.1–0.2 ppm.

Keywords: Araliaceae, triterpene glycosides, oleanolic acid glycosides, echinocystic acid glycosides, hederagenin glycosides, ^{1}H and ^{13}C NMR spectroscopy.

References

1. Grishkovets V. I. Triterpene glycosides of Araliaceae. V. NMR Spectroscopic Methods in the Structural Elucidation of Araliaceae Triterpene Glycosides: One- and Two-Dimensional ^{1}H-NMR Spectroscopy, *Scientific notes of the Crimean Federal University named after V. I. Vernadsky. Biology. Chemistry*, **12** (1), 292 (2026). (*in Russ.*).
2. Grishkovets V. I. Triterpene glycosides of Araliaceae. VI. NMR Spectroscopic Methods in the Structural Elucidation of Araliaceae Triterpene Glycosides: One- and Two-Dimensional ^{13}C-NMR Spectroscopy, *Scientific notes of the Crimean Federal University named after V. I. Vernadsky. Biology. Chemistry*, **12** (2), 341 (2026). (*in Russ.*).
3. Hostettmann K., Marston A., *Saponins*, 548 p. (Cambrige University Press, Cambrige, 1995).
4. Grishkovets V. I. Triterpene glycosides of *Araliaceae*: isolation, structure determination, biological activity and chemotaxonomic significance, Author's abstract of dissertation for academic degree of doctor of chemical sciences, 36 p. (Odessa, 2004). (*in Ukr*.).
5. Grishkovets V. I., Chirva V. Ya., Kachala V. V., Shashkov A. S. Triterpene Glycosides of the *Araliaceae*: Structures of the Isolated Triterpene Glycosides, *Proceedings of the Nikitsky Botanical Garden*, **128**, 90 (2007). (*in Russ*.).
6. Tori K., Seo S., Shimaoka A., Tomita Y., Carbon-13 NMR spectra of olean-12-enes. Full signal assignments including quaternary carbon signals assigned by use of indirect ^{13}C,^{1}H spin couplings, *Tetrahedron Lett*., **48**. 4227 (1974).
7. Nagao T., Tanaka R., Shimokawa H., Okabe H., Studies on the constituents of Aster scaber Thunb. II. Structures of echinocystic acid glycosides isolated from the root, *Chem. Pharm. Bull*., **39** (7), 1719 (1991).

Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского
Биология. Химия. Том 12 (78). 2026. № 2. С. 367–376.

УДК 543.42:615.361:615.074
DOI 10.5281/ZENODO.20796139

ВЫТЯЖКА ИЗ СЕМЕННЫХ ЖЕЛЕЗ ОРГАНОТЕРАПЕВТИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ Д. КАЛЕНИЧЕНКО: НОВЫЕ ДАННЫЕ О ЛЕКАРСТВЕННОМ ПРЕПАРАТЕ НАЧАЛА XX ВЕКА

Яковишин Л. А.

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Россия
E-mail: chemsevntu@rambler.ru

Проведен ИК-спектроскопический анализ жидкого образца лекарственного препарата Алкогольная вытяжка из семенных желез Органотерапевтической лаборатории Д. Калениченко, произведенного в начале XX в. в Москве. Кроме того, проанализированы высушенный образец этого препарата, осадок, находящийся в препарате, темный налет на склянке и налет на пробке. Показано, что в ИК-спектре препарата присутствуют полосы поглощения, характерные для аминокислот, белков, биогенных аминов, карбоновых кислот, углеводов и жиров. В жидкой вытяжке из семенных желез и ее осадке процессы окисления веществ были замедленны. Подтверждено наличие жиров в осадке препарата.
Ключевые слова: алкогольная вытяжка из семенных желез Органотерапевтической лаборатории Д. Калениченко, секаровская жидкость, Д. К. Калениченко, органопрепараты, фармацевтический анализ, ИК-Фурье-спектроскопия.

ВВЕДЕНИЕ

Органопрепараты, т.е. средства на основе экстрактов из различных органов животных и их компонентов, были особо популярны в конце XIX – начале XX века [1, 2]. Наиболее известными из них были вытяжки из семенных желез. Такие лекарственные средства включали множество веществ: белки, ферменты, аминокислоты, липиды, углеводы, антиоксиданты, гормоны, биогенные полиамины, витамины, минеральные вещества и др. [3–6].

Одним из известных российских органопрепаратов того времени было средство Алкогольная вытяжка из семенных желез (секаровская жидкость) Liquor testiculorum spirituos (рис. 1), которую производила Органотерапевтическая лаборатория Д. Калениченко в Москве в начале XX века [7, 8]. Первоначально препарат имел название Спермин лаборатории Д. Калениченко, бывшей доктора А. Тельнихина. Затем название изменили и исключили из него слово «спермин» и упоминание доктора А. Тельнихина.

Как утверждалось производителем (рис. 2), препарат применялся при множестве болезней: неврастении, истерии, невралгии, бессоннице, старческой дряхлости, подагре, ревматизме, малокровии, артериосклерозе, туберкулёзе, диабете, головных болях, половом бессилии и расстройстве сердечной

деятельности. Назначали его еще после родов, операций, кровопотерь и перенесенных болезней (инфлюэнцы, сифилиса и других заболеваний) [7, 8].



Рис. 1. Склянка из-под Алкогольной вытяжки из семенных желез Органотерапевтической лаборатории Д. Калениченко (фото автора статьи).

Ранее нами была изучена дошедшая до нашего времени сухая пленка препарата Алкогольная вытяжка из семенных желез Органотерапевтической лаборатории Д. Калениченко [9]. Данная статья посвящена ИК-спектроскопическому исследованию другого образца данного лекарственного средства, сохранившегося в жидком виде, и их сравнительному анализу.



Рис. 2. Реклама препарата Алкогольная вытяжка из семенных желез Органотерапевтической лаборатории Д. Калениченко (начало XX века).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Вещества. Использовали образец лекарственного препарата Алкогольная вытяжка из семенных желез (секаровская жидкость) Liquor testiculorum spirituos Органотерапевтической лаборатории Д. Калениченко (г. Москва, Россия), выпущенного в начале XX в. Образцу около 110–120 лет. Препарат сохранился в виде жидкости бежевого цвета с коричневым осадком. Он был укупорен корковой пробкой с подложенной вощеной бумагой.

Препарат фильтровали, полученный коричневый осадок и часть фильтрата сушили 20 ч при 30° С. Методом ИК-спектроскопии анализировали оставшуюся часть жидкого профильтрованного препарата, высушенный жидкий профильтрованный препарат, высушенный коричневый осадок в препарате, темный налет на стенках склянки и черный налет с пробки.

ИК-Фурье-спектроскопия. ИК-спектры получены на ИК-Фурье-спектрометре ФТ-801 (СИМЕКС, Россия) с универсальной оптической приставкой НПВО-А (нарушенного полного внутреннего отражения) с алмазным элементом и встроенным мини-монитором. Для получения ИК-спектров жидких проб их наносили в виде капли на алмазный элемент. Спектры получены в области 4000–550 $см^{-1}$ (спектральное разрешение 4 $см^{-1}$; 25 сканов). Для работы с ИК-спектрометром ФТ-801 использовали программу ZaIR 3.5 (СИМЕКС, Россия).

ИК-спектр жидкого препарата Алкогольная вытяжка из семенных желез (ν, $см^{-1}$): 3328 (OH, NH, NH_3^+), 3248 (OH, NH, NH_3^+), 2916 (CH), 2851 (CH), 1632 (H–O–H, C=O, C=C, NH).

ИК-спектр высушенного жидкого препарата Алкогольная вытяжка из семенных желез (ν, $см^{-1}$): 3304 (OH, NH, NH_3^+), 2952 (CH), 2919 (CH), 2851 (CH), 1718 (C=O), 1639 (NH_3^+, аминокислотная полоса I – NH_3^+, амид I – C=O), 1630 (NH_3^+, аминокислотная полоса I – NH_3^+, амид I – C=O, H–O–H, NH), 1611 (COO^-), 1562 (NH_3^+, NH, аминокислотная полоса II – NH_3^+, амид II – NH), 1552 (NH_3^+, NH, аминокислотная полоса II – NH_3^+, амид II – NH), 1508 (Ar), 1410 (OH, COO^-, CH), 1315 (CH), 1245 (CH), 1041 (C–OH, C–N), 860 (CH), 596 (OH, CH, NH).

ИК-спектр коричневого осадка препарата Алкогольная вытяжка из семенных желез (ν, $см^{-1}$): 3278 (OH, NH, NH_3^+), 2952 (CH), 2916 (CH), 2867 (CH), 2849 (CH), 2676 (OH), 1734 (C=O), 1719 (C=O), 1638 (NH_3^+, аминокислотная полоса I – NH_3^+, амид I – C=O), 1561 (NH_3^+, NH, аминокислотная полоса II – NH_3^+, амид II – NH), 1542 (COO^-), 1509 (Ar), 1490 (Ar), 1458 (CH), 1434 (CH), 1419 (OH, COO^-), 1377 (CH), 1314 (CH), 1235 (CH), 1018 (C–OH, C–N), 873 (CH), 718 (CH), 662 (HO–C–O, CH), 643 (CH), 596 (OH, CH, NH).

ИК-спектр темного налета препарата Алкогольная вытяжка из семенных желез (ν, $см^{-1}$): 3342 (OH, NH, NH_3^+), 3293 (OH, NH, NH_3^+), 2954 (CH), 2916 (CH), 2872 (CH), 2848 (CH), 1735 (C=O), 1639 (NH_3^+, аминокислотная полоса I – NH_3^+, амид I – C=O), 1630 (NH_3^+, аминокислотная полоса I – NH_3^+, амид I – C=O, H–O–H, NH), 1574 (COO^-), 1538 (COO^-), 1467 (CH), 1434 (CH), 1420 (OH, COO^-), 1377 (CH), 1334 (CH), 1317 (CH), 1301 (CH), 1220 (CH), 1143 (C–OH, C–N), 1081 (C–OH, C–N), 1049 (C–OH, C–N), 975 (C–OH, =CH), 934 (OH), 719 (CH), 661 (HO–C–O, CH), 592 (OH, CH, NH).

ИК-спектр черного налета с пробки препарата Алкогольная вытяжка из семенных желез (ν, $см^{-1}$): 3247 (OH, NH, NH_3^+), 2921 (CH), 2850 (CH), 1742 (C=O), 1736 (C=O), 1718 (C=O), 1655 (C=C), 1638 (NH_3^+, аминокислотная полоса I – NH_3^+, амид I – C=O), 1618 (H–O–H, NH), 1578 (COO^-), 1543 (COO^-), 1509 (Ar), 1499 (Ar), 1458 (CH), 1438 (COO^-), 1420 (COO^-, OH), 1382 (CH), 1335 (CH), 1297 (CH), 1284 (C–O), 1210 (CH), 1133 (C–OH, C–N), 1074 (C–OH, C–N), 1025 (C–OH, C–N), 937

(OH), 911 (CH), 882 (CH), 843 (CH), 651 (CH, NH, H–O–H, OH), 624 (OH, NH), 598 (OH, CH, NH), 584 (CH).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Образец лекарственного препарата алкогольная вытяжка из семенных желез Liquor testiculorum spirituos органотерапевтической лаборатории Д. Калениченко представлял собой жидкость бежевого цвета с коричневым осадком, находившуюся во флаконе белого стекла с локальным темно-коричневым налетом (рис. 1). Склянка была укупорена корковой пробкой с подложенной вощеной бумагой. На внутренней поверхности пробки имелся черный налет.

В анализируемом образце профильтрованного жидкого препарата Алкогольная вытяжка из семенных желез этиловый спирт отсутствует, что подтверждается сравнением их ИК-спектров (рис. 3, спектры **1** и **2**). В препарате осталась в качестве растворителя только вода.

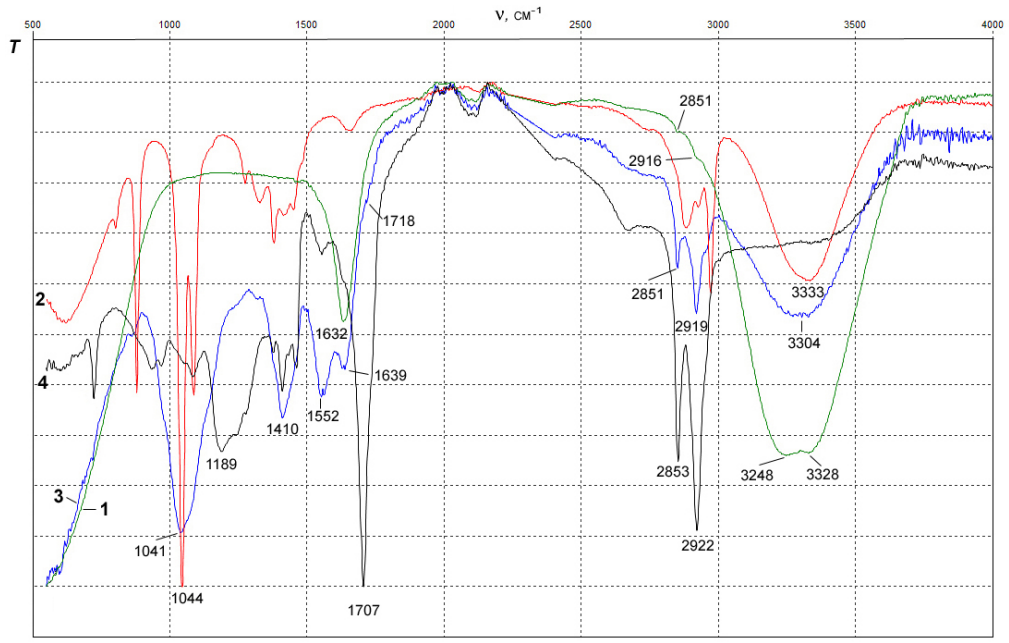


Рис. 3. ИК-спектры профильтрованного жидкого препарата Алкогольная вытяжка из семенных желез (спектр **1**), 96 % водного этанола (спектр **2**), высушенного образца жидкого профильтрованного препарата (спектр **3**) и пленки [9] препарата (спектр **4**).

В ИК-спектре жидкого препарата (рис. 3, спектр **1**) наблюдается уширенная полоса поглощения ассоциированных OH- и NH-групп с максимумами при 3328 и 3248 $см^{-1}$, сильно перекрывающая полосы поглощения CH-связей при 2916 и 2851 $см^{-1}$. Интенсивная полоса поглощения при 1632 $см^{-1}$ отнесена к

деформационным колебаниям молекул воды и связей N–H, а также валентным колебаниям связей C=O и C=C. Широкой полосе в области ниже 1000 $см^{-1}$ в основном отвечает поглощение неплоских деформационных колебаний ассоциированных связей O–H вращательных колебаний молекул воды, а также органических компонентов препарата.

В ИК-спектре высушенного образца жидкого профильтрованного препарата (рис. 3, спектр **3**) присутствует широкая полоса поглощения при 3304 $см^{-1}$, обусловленная валентными колебаниями связей OH, NH и NH_3^+. Полосы поглощения валентных колебаний связей C–H присутствуют при 2952, 2919 и 2851 $см^{-1}$. Уширенная полоса средней интенсивности при 1410 $см^{-1}$ отнесена к поглощению O–H, COO^- и C–H. Деформационным колебаниям связей C–H еще соответствуют полосы поглощения при 1315 и 1245 $см^{-1}$.

Полосы поглощения при 1562 и 1552 $см^{-1}$ отнесены к деформационным колебаниям групп NH_3^+ и NH биогенных аминов. Полосы 1639 и 1630 $см^{-1}$ могут быть связаны с асимметричными деформационными колебаниями их группы NH_3^+.

В ИК-спектре высушенного образца препарата также обнаружены полосы поглощения цвиттер-ионной формы аминокислот: аминокислотная полоса I при 1639 $см^{-1}$ и 1630 $см^{-1}$ (асимметричные деформационные колебания NH_3^+), аминокислотная полоса II (симметричные деформационные колебания NH_3^+) при 1562 и 1552 $см^{-1}$, а также полосы асимметричных и симметричных валентных колебаний карбоксилата COO^- при 1611 и 1410 $см^{-1}$ соответственно (рис. 3, спектр **3**). В данных областях находятся полосы поглощения пептидной связи –CO–NH–: полосы амид I (1639 и 1630 $см^{-1}$; связи C=O) и амид II (1562 и 1552 $см^{-1}$; связи NH). Колебаниям ароматического кольца соответствует слабая полоса поглощения при 1508 $см^{-1}$.

Полоса поглощения C=O у сложных эфиров обычно находится в области 1735–1750 $см^{-1}$ [10]. Однако в этой области поглощение в спектре высушенного препарата не наблюдается. При длительном хранении жиры автокаталитически гидролизуются с образованием свободных высших карбоновых кислот. Липиды также подвергаются окислению, среди продуктов которого появляются карбоновые кислоты. Образующиеся при этом карбоновые кислоты могут ассоциироваться в димеры. Поглощение C=O в COOH димерных форм обнаруживается в области около 1710 $см^{-1}$ [11]. Действительно, в ИК-спектре высушенного препарата имеется полоса поглощения C=O-групп при 1718 $см^{-1}$. У ранее изученной нами сохранившейся пленки Вытяжки из семенных желез лаборатории Д. Калениченко [9] самой интенсивной является полоса поглощения C=O карбоновых кислот при 1707 $см^{-1}$ (рис. 3, спектр **4**).

В отличие от высушенной жидкой фазы (рис. 4, спектр **1**), в коричневом осадке препарата имелись сложные эфиры. Об этом свидетельствует полоса их поглощения при 1734 $см^{-1}$ (рис. 4, спектр **2**), имеющая несколько большую интенсивность, чем полоса C=O карбоновых кислот при 1719 $см^{-1}$. Очевидно, что вода ограниченно проникала в твердую фазу осадка. Это способствовало сохранности жиров, находящихся в ней. Полоса поглощения связей C=O в сложных эфирах также

наблюдалась в ИК-спектрах сухого темного налета препарата (при 1735 $см^{-1}$) и черного налета с его пробки (при 1742 и 1736 $см^{-1}$) (рис. 5, спектры **1** и **2**).

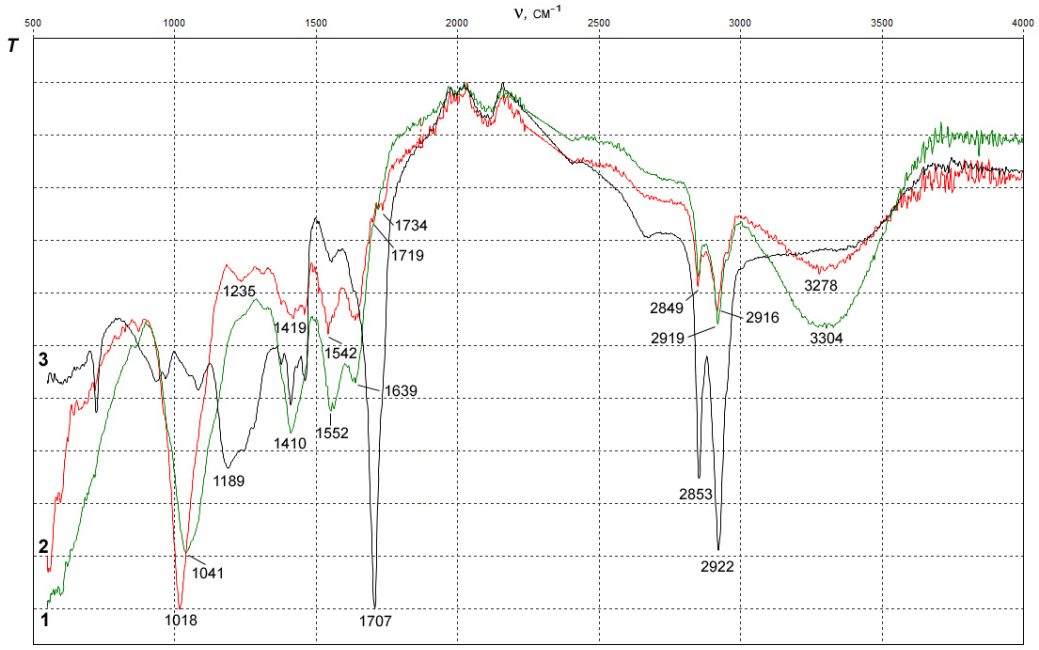


Рис. 4. ИК-спектры высушенного образца жидкого профильтрованного препарата Алкогольная вытяжка из семенных желез (спектр **1**), коричневого осадка препарата (спектр **2**) и пленки [9] препарата (спектр **3**).

Известно, что непредельные карбоновые кислоты со временем автоокисляются, образуя сначала гидропероксиды, а потом эпоксиды, карбоновые кислоты и прочие соединения [12]. В спектре высушенного препарата в области 1190 $см^{-1}$ отсутствует поглощение гидропероксидов [13] и эпоксидов [14] (рис. 4, спектр **1**). Но в спектре ранее изученной его пленки [9] наблюдалась достаточно интенсивная широкая полоса поглощения связей С–О при 1189 $см^{-1}$ (рис. 4, спектр **3**), вызванная накоплением продуктов окисления (гидропероксидов и эпоксидов). Таким образом, в жидком препарате реакции окисления веществ были замедленны из-за меньшего доступа кислорода воздуха. Известно, что при отсутствии контакта с воздухом и действия света непредельные карбоновые кислоты могут достаточно длительно сохраняться [15]. В нашем случае герметичность склянки препарата не была полностью утрачена. Кроме того, в спектрах сухого темно-коричневого налета препарата (рис. 5, спектр **1**) и черного налета с его пробки (рис. 5, спектр **2**) в области 1190 $см^{-1}$ также не наблюдается поглощение.

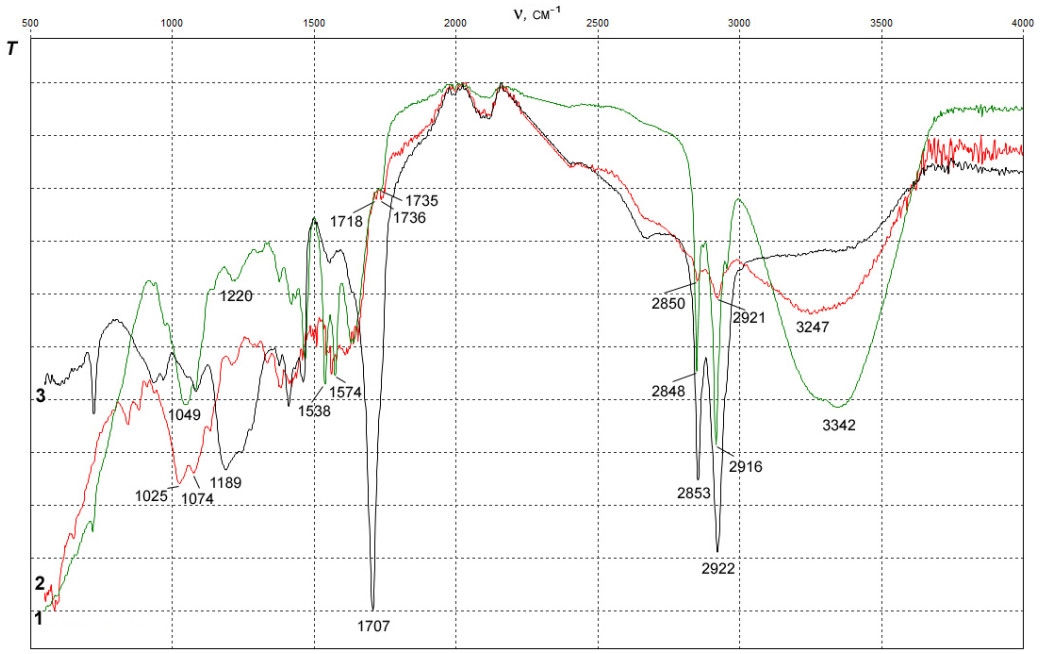


Рис. 5. ИК-спектры высушенного темного налета препарата на стенках склянки (спектр **1**), черного налета с пробки (спектр **2**) и пленки [9] препарата (спектр **3**).

В спектре высушенного препарата широкая интенсивная полоса поглощения при 1041 $см^{-1}$ обусловлена колебаниям связей C–OH и C–N (рис. 4, спектр **1**). Аналогичное поглощение у коричневого осадка препарата наблюдается при 1018 $см^{-1}$ (рис. 4, спектр **2**), у темного налета на склянке – при 1143, 1081, 1049 и 975 $см^{-1}$ (рис. 5, спектр **1**), а у черного налета на пробке – при 1133, 1074 и 1025 $см^{-1}$ (рис. 5, спектр **2**).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые проведен детальный ИК-спектроскопический анализ образца жидкого лекарственного препарата Алкогольная вытяжка из семенных желез Органотерапевтической лаборатории Д. Калениченко (г. Москва, начало XX в.).
2. В ИК-спектре препарата присутствуют полосы поглощения, характерные для аминокислот, белков, биогенных аминов, углеводов, карбоновых кислот и жиров. При этом установлено, что в жидком препарате и его осадке процессы окисления веществ были замедленны. Кроме того, наблюдалось сохранение жиров в осадке препарата.

Список литературы

1. Успенский Д. М. Органотерапия. Целебные свойства органов животных. Новые способы лечения болезней по методу Brown-Séquard'a / Д. М. Успенский. – СПб.: тип. князя В. П. Мещерского, 1896. – 402 с.

2. Poehl A. Rational organotherapy with reference to urosemiology / A. Poehl, P. J. Tarchanoff, Alf. Poehl [et al.]. – Philadelphia: P. Blakiston's Son & Co., 1906. – 239 p.
3. Juyena N. S. Seminal plasma: an essential attribute to spermatozoa / N. S. Juyena, C. Stelletta // J. Androl. – 2012. – Vol. 33, № 4. – P. 536–551.
4. Mann T. The biochemistry of semen / T. Mann. – London: Methuen; New York: Wiley, 1954. – 240 p.
5. Picard J. Y. Biochemical analysis of bovine testicular anti-Müllerian hormone / J. Y. Picard, C. Goulut, R. Bourrillon, N. Josso // FEBS Lett. – 1986. – Vol. 195, № 1–2. – P. 73–76.
6. Kesterson H. Nutrient analysis of raw beef variety meat items / H. Kesterson, D. R. Woerner, T. E. Engle [et al.] // Meat Muscle Biol. – 2018. – Vol. 2, № 2. – 35.
7. Органотерапевтический способ лечения болезней // Русская воля. – 1917. – № 176. – 27 июля. – С. 6.
8. Лечение сперминoм и вытяжками из семенных желез животных – отнюдь не одно и тоже // Саратовский вестник. – 1912. – № 257. – 21 нояб. – С. 5.
9. Яковишин Л. А. Анализ лекарственного препарата Алкогольная вытяжка из семенных желез (секаровская жидкость) Д. Калениченко начала XX века / Л. А. Яковишин // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия. – 2024. – Т. 10 (76), № 2. – С. 316–326.
10. Казицына Л. А. Применение УФ-, ИК-, ЯМР- и масс-спектроскопии в органической химии / Л. А. Казицына, Н. Б. Куплетская. – М.: Изд-во МГУ, 1979. – 240 с.
11. Наканиси К. Инфракрасные спектры и строение органических соединений / К. Наканиси. – М.: Мир, 1965. – 216 с.
12. Thomas A. Fats and fatty oils. Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry / A. Thomas, B. Matthäus, H.-J. Fiebig. – Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2015. – P. 1–84.
13. Shreve O. D. Infrared absorption spectra of some hydroperoxides, peroxides, and related compounds / O. D. Shreve, M. R. Heether, H. B. Knight [et al.] // Anal. Chem. – 1951. – Vol. 23, № 2. – P. 282–285.
14. Rahman M. A. Sustainable approach for catalytic green epoxidation of oleic acid with applied ion exchange resin / M. A. Rahman, N. M. Mubarak, I. S. Azmi [et al.] // Sci. Rep. – 2023. – Vol. 13, № 1. – 15470.
15. Яцишина Е. Б. Комплексное исследование покрытия волос древнеегипетских мумий / Е. Б. Яцишина, В. М. Пожидаев, Я. Э. Сергеева [и др.] // Журн. аналит. химии. – 2020. – Т. 75, № 2. – С. 171–184

EXTRACT FROM THE SEMINAL GLANDS OF D. KALENICHENKO ORGANOTHERAPEUTIC LABORATORY: NEW DATA ABOUT A MEDICINAL PREPARATION FROM THE EARLY 20TH CENTURY

Yakovishin L. A.

Sevastopol State University, Sevastopol, Russia
E-mail: chemsevntu@rambler.ru

One of the well-known Russian organ preparations of that time was the Alcoholic extract from the seminal glands (Sekar's liquid) (*Liquor testiculorum spirituos*), which was produced by the Organotherapeutic Laboratory of D. Kalenichenko in Moscow at the beginning of the 20th century.

They examined a sample of the medicine Alcoholic extract from the seminal glands that was approximately 110–120 years old. In the IR spectrum of the liquid drug, a

broadened absorption band of associated OH and NH groups with maxima at 3328 and 3248 cm^{-1} is observed, strongly overlapping the absorption bands of CH bonds at 2916 and 2851 cm^{-1}. The intense absorption band at 1632 cm^{-1} is attributed to the deformation vibrations of water molecules and N–H bonds, as well as the stretching vibrations of C=O and C=C bonds. The broad band in the region below 1000 cm^{-1} mainly corresponds to the absorption of out-of-plane deformation vibrations of associated O–H bonds, rotational vibrations of water molecules, and organic components of the preparation.

Unsaturated carboxylic acids are known to autooxidize over time, forming first hydroperoxides and then epoxides, carboxylic acids, and other compounds. The IR spectrum of the dried preparation shows no absorption of hydroperoxides or epoxides at 1190 cm^{-1}. Thus, oxidation reactions in the liquid preparation were slowed due to reduced access to atmospheric oxygen.

Unlike the dried liquid phase of the preparation, its precipitate contained esters. This is evidenced by their absorption band at 1734 cm^{-1}, which is slightly more intense than the C=O band of carboxylic acids at 1719 cm^{-1}. Clearly, water had limited penetration into the solid phase of the precipitate. This contributed to the preservation of the fats present within it. The absorption band of C=O bonds in esters was also observed in the IR spectrum of the dry dark deposit of the preparation on the walls of the bottle in which it was located (at 1735 cm^{-1}).

Thus, the IR spectrum of the preparation Extract from the seminal glands of D. Kalenichenko organotherapeutic laboratory contains absorption bands characteristic of amino acids, proteins, biogenic amines, carbohydrates, carboxylic acids, and fats. Furthermore, it was established that oxidation processes were slowed in the liquid preparation and its sediment. Furthermore, the preservation of fats in the sediment was observed.

***Keywords*:** Alcoholic extract from the seminal glands of D. Kalenichenko Organotherapeutic Laboratory, Brown-Séquard liquid, D. K. Kalenichenko, organopreparations, pharmaceutical analysis, IR-Fourier spectroscopy.

References

1. Uspensky D. M., *Organotherapy. Healing properties of animal organs. New methods of treating diseases using the Brown-Séquard method*, 402 p. (Prince V. P. Meshchersky, St. Petersburg, 1896). (*in Russ.*).
2. Poehl A., Tarchanoff P. J., Poehl Alf., Wachs P., *Rational organotherapy with reference to urosemiology*, 239 p. (P. Blakiston's Son & Co., Philadelphia, 1906).
3. Juyena N. S., Stelletta C., Seminal plasma: an essential attribute to spermatozoa, *J. Androl.*, **33** (4), 536 (2012).
4. Mann T., *The biochemistry of semen*, 240 p. (Methuen, London; Wiley, New York, 1954).
5. Picard J. Y., Goulut C., Bourrillon R., Josso N., Biochemical analysis of bovine testicular anti-Müllerian hormone, *FEBS Lett.*, **195** (1–2), 73 (1986).
6. Kesterson H., Woerner D. R., Engle T. E., Martin J. N., Delmore R. J., Belk K. E., Nutrient analysis of raw beef variety meat items, *Meat Muscle Biol.*, **2** (2), 35 (2018).
7. Organotherapeutic method of treating diseases, *Russian will*, **176**, 6 (1917). (*in Russ.*).
8. Treatment with spermine and extracts from the seminal glands of animals is by no means the same thing, *Saratov Bulletin*, **257**, 5 (1912). (*in Russ.*).
9. Yakovishin L. A., Analysis of the drug Alcoholic extract from the seminal glands (Brown-Séquard liquid) D. Kalenichenko of the early 20th century, *Scientific Notes of V. I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry*, **10** (2), 316 (2024). (*in Russ.*).

10. Kazitsyna L. A., Kupletskaia N. B., *Application of UV, IR, NMR and mass spectroscopy in organic chemistry*, 240 p. (Izd-vo MSU, Moscow, 1979). (*in Russ.*).
11. Nakanishi K., *Infrared spectra and structure of organic compounds*, 216 p. (Mir, Moscow, 1965). (*in Russ.*).
12. Thomas A., Matthäus B., Fiebig H.-J., *Fats and fatty oils. Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry*, 84 p. (Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2015).
13. Shreve O. D., Heether M. R., Knight H. B., Swern D., Infrared absorption spectra of some hydroperoxides, peroxides, and related compounds, *Anal. Chem.*, **23** (2), 282 (1951).
14. Rahman M. A., Mubarak N. M., Azmi I. S., Jalil M. J., Sustainable approach for catalytic green epoxidation of oleic acid with applied ion exchange resin, *Sci. Rep*., **13** (1), 15470 (2023).
15. Yatsishina E. B., Pozhidaev V. M., Sergeeva Y. E., Malakhov S. N., Slushnaya I. S., An integrated study of the hair coating of ancient egyptian mummies, *J. Analyt. Chem.*, **75** (2), 262 (2020). (*in Russ.*).

Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского
Биология. Химия. Том 12 (78). 2026. № 2. С. 377–385.

УДК 547.918:547.972:35:543.42
DOI 10.5281/ZENODO.20796394

ПАРАМЕТРЫ ВОДОРОДНЫХ СВЯЗЕЙ В МОЛЕКУЛЯРНЫХ КОМПЛЕКСАХ КВЕРЦЕТИНА И РУТИНА С ТРИТЕРПЕНОВЫМИ ГЛИКОЗИДАМИ

Яковишин Л. А.[1], Ратников В. Д.[1], Гришковец В. И.[2], Корж Е. Н.[1]

[1]ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Россия
[2]ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского», Симферополь, Республика Крым, Россия
E-mail: chemsevntu@rambler.ru

Рассчитаны энергия и длина водородных мостиков в молекулярных комплексах кверцетина (Quer) и рутина (Rut) с тритерпеновыми глюкозидами α-хедерином (гликозид **1**), хедерасапонином С (глюкозид **2**) и глицирамом GC (моноаммонийной солью глицирризиновой кислоты). Вычисления выполнены с привлечением метода ИК-Фурье-спектроскопии.
Ключевые слова: водородная связь, кверцетин, рутин, α-хедерин, хедерасапонин С, глицирризиновая кислота, глицирам, супрамолекулярный комплекс, ИК-Фурье-спектроскопия.

ВВЕДЕНИЕ

Кверцетин (3,3′,4′,5,7-пентагидроксифлавон, Quer; рис. 1) и его гликозид рутин (кверцетин-3-*O*-рутинозид, Rut; рис. 1) относятся к числу наиболее изученных флавоноидов. Quer и Rut широко распространены в растительном мире и обладают разнообразным спектром биологической активности (антиоксидантной, противовоспалительной, спазмолитической, противоопухолевой, нейропротекторной и др.) [1].

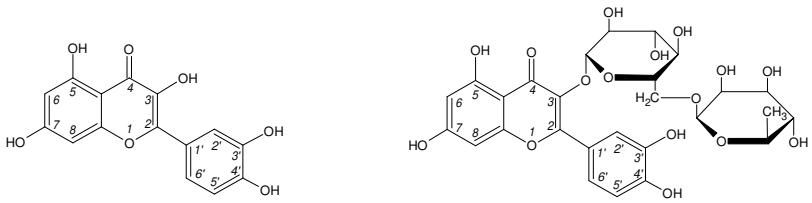


Рис. 1. Кверцетин (Quer) и рутин (Rut).

Несмотря на высокий терапевтический потенциал, практическое применение Quer и Rut существенно ограничено их низкой биодоступностью, связанной с

плохой растворимостью в воде и ограниченной проницаемостью через биологические мембраны [2, 3]. Перспективным способом устранения этой проблемы является включение Quer и Rut в различные системы доставки. К числу систем такого типа относятся комплексы с циклодекстринами, фосфолипидные системы (фитосомы), липосомы, липидные наночастицы и полимерные мицеллы [2, 3]. Кроме того, инновационным решением может служить использование тритерпеновых гликозидов разнообразного строения в качестве молекулярных контейнеров для фармацевтических субстанций [4–9], в том числе и для Quer и Rut [10–12].

Водородные связи лежат в основе образования супрамолекулярных комплексов и обеспечивают их структурную организацию [13]. Энтальпия образования комплекса является количественной мерой энергии водородной связи и характеризует термодинамическую стабильность [14]. Известно, что при формировании комплексов тритерпеновых гликозидов образуются межмолекулярные водородные связи [4–7, 10–12, 15]. Однако параметры водородных связей комплексов Quer и Rut с тритерпеновыми сапонинами не установлены, поэтому данная статья посвящена их определению для комплексов с гликозидами плюща **1** и **2** и солодки GC (Рис. 2).

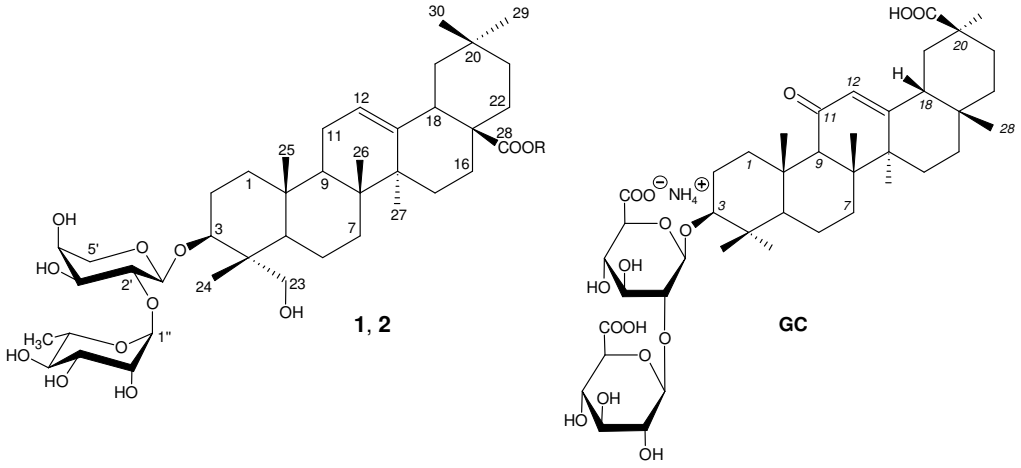


Рис. 2. α-Хедерин (гликозид **1**: R = H), хедерасапонин C (гликозид **2**: R = ←βGlc*p*-(6←1)-βGlc*p*-(4←1)-αRha*p*) и моноаммонийная соль глицирризиновой кислоты (глицирам, GC).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Использовали образцы GC (Calbiochem, США; чистота ≥95 % по ВЭЖХ), Quer (Реахим, чда) и Rut (Sigma-Aldrich, США; чистота ≥95 % по ВЭЖХ) без предварительной подготовки. Гликозиды **1** и **2** были выделены из листьев плющей

обыкновенного *Hedera helix* L. и канарского *Hedera canariensis* Willd. (Araliaceae Juss.) [11].

Молекулярные комплексы препаративно синтезировали жидкофазным способом. Для этого смешивали по 1 ммоль гликозидов **1**, **2** и GC и Quer с 50 мл смеси 96 % водного этанола с хлороформом, взятых в соотношении 1:1 по объему. Комплекс Rut–GC получали путем смешивания по 1 ммоль GC и Rut с 50 мл 70 % водного этанола (по объему). Смеси выдерживали при 50 °C в течение 1,5 ч при постоянном перемешивании. Органические растворители удаляли в вакууме.

ИК-спектры (табл. 1) сняты с твердых образцов на ИК-Фурье-спектрометре ФТ-801 (СИМЕКС, Россия) с универсальной оптической приставкой НПВО-А с алмазным элементом и встроенным мини-монитором в области 4000–550 $см^{-1}$ (спектральное разрешение 4 $см^{-1}$; 25 сканов). Для работы с ИК-спектрометром ФТ-801 использовали программу ZaIR 3.5 (СИМЕКС, Россия).

Таблица 1

ИК-спектры комплексов Quer и Rut с тритерпеновыми гликозидами 1, 2 и GC и их индивидуальных компонентов

Связь	Поглощение связи в комплексе, $см^{-1}$								
	Quer–**1**	Quer–**2**	Quer–GC	Rut–GC	Quer	Rut	**1**	**2**	GC
OH	3337	3281	3406, 3205	3284	3400, 3261	3415, 3343	3402	3329	3212
CH	2926, 2882	2921, 2883, 2856	2927, 2862	2956, 2919, 2850	2990, 2901, 2843, 2782, 2707	2954, 2914, 2847	2940, 2929	2918	2944, 2928, 2911, 2862
$C=O_{сапонина}$	1687	1717	1722, 1692, 1641	1730, 1715, 1682			1703	1722	1726, 1710, 1692, 1642
$C=O_{Quer(Rut)}$	1664	1655	1658	1639	1660	1656			
$C=C_{Ar}$	1610, 1561, 1521, 1459, 1449	1608, 1561, 1520, 1458, 1449	1611, 1566, 1511, 1461, 1450	1509, 1451	1607, 1562, 1518, 1461, 1448	1596, 1572, 1552, 1502, 1453			
CH	1449	1449	1450	1451	1448	1453, 1426	1461, 1433	1461, 1433	1451
COO^-			1592, 1410	1584, 1411					1588, 1414
NH_4^+			1425	1424					1428

Продолжение таблицы 1

CH			1380, 1358, 1343, 1309				1380, 1364, 1358, 1342, 1320, 1304, 1265, 1234, 1206	1380, 1357, 1342, 1255, 1231, 1201	1390, 1358, 1350, 1324, 1304, 1279, 1258, 1211
C–OH	1408, 1382	1408, 1379	1380	1360	1407, 1380	1405, 1360	1380	1380	1390
C–O–C, C–OH	1262, 1199, 1168, 1130, 1074, 1051, 1029, 1014	1260, 1199, 1168, 1130, 1027, 1013	1260, 1199, 1165, 1029	1301, 1275, 1235, 1201, 1168, 1073, 1047, 1030	1258, 1197, 1167, 1130, 1092, 1013	1294 1234, 1203, 1168, 1149, 1123, 1093, 1059, 1041, 1013, 999	1186, 1125, 1075, 1049, 1028	1024	1162, 1032
=CH		983	978	982			984	983	980
CH_{Ar}	942, 864, 841, 816, 795, 721, 638, 602	912, 864, 839, 815, 781, 720, 682, 654, 639, 602	945, 866, 840, 818, 791, 719, 679, 635, 598	929, 878, 806, 786, 717, 691, 598	941, 864, 841, 819, 794, 721, 679, 638, 602	967, 943, 880, 848, 826, 807, 794, 727, 719, 707, 688			946, 879, 868, 818, 786, 749, 692, 684, 677
OH	674	675	669	655	670	655	661	650	657

Расчет термодинамических параметров водородных связей, образующихся при комплексообразовании, выполнен на основе ИК-спектров по изменению величины поглощения валентных колебаний $\nu_{O–H}$ [16–18]. Результаты приведены в табл. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При сопоставлении ИК-спектров комплексов со спектрами индивидуальных компонентов (табл. 1, рис. 3 и 4) найдены низкочастотные сдвиги полос поглощения валентных колебаний связей O–H, вызванных наличием водородных связей. Дополнительно наблюдаются смещения полос поглощения валентных колебаний связей C–O в группах C–O–C и C–OH.

Кроме того, отмечены низкочастотные сдвиги полос поглощения валентных колебаний связей C=O у гликозида **1** (комплекс Quer–**1**) и GC (комплекс Quer–GC) и

этих же связей у Quer (комплекс Quer–**2**) и Rut (комплекс Rut–GC). Это указывает на вовлечение карбонильных групп у соответствующих компонентов комплексов в образование Н-связей.

Таким образом, наблюдаемые изменения в ИК-спектрах подтверждают появление между молекулами гликозидов и Quer (Rut) водородных связей типа: $C{=}O_{\text{гликозид 1 (GC)}}\cdots H{-}O_{\text{Quer}}$, $C{=}O_{\text{Quer}}\cdots H{-}O_{\text{гликозид 2}}$, $C{=}O_{GC}\cdots H{-}O_{\text{Rut}}$ и $C{=}O_{\text{Rut}}\cdots H{-}O_{GC}$. Также водородные связи могут образоваться и между ОН-группами соответствующих компонентов комплексов: (H)O···H–O. Такие межмолекулярные контакты стабилизируют образующиеся супрамолекулярные комплексы.

Таблица 2

Термодинамические характеристики межмолекулярных водородных связей при образовании комплексов Quer и Rut с тритерпеновыми гликозидами 1, 2 и GC

Комплекс	ν_{OH} комплекса, $см^{-1}$	$\Delta\nu$, $см^{-1}$ (ν_0 = 3700 $см^{-1}$)	*E* водородной связи		Длина водородного мостика O···H–O, нм
			ккал/моль	кДж/моль	
Quer–**1**	3337	363	-6,13	-25,65	0,276
Quer–**2**	3281	419	-7,08	-29,62	0,274
Quer–GC	3406	294	-4,97	-20,79	0,277
	3205	495	-8,36	-34,98	0,273
Rut–GC	3284	416	-7,03	-29,41	0,275

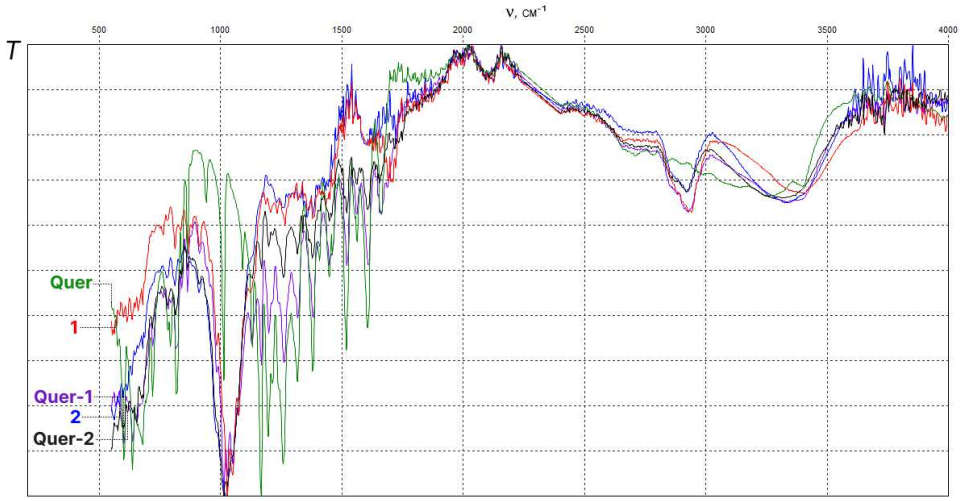


Рис. 3. ИК-спектры гликозидов **1** и **2**, Quer и их молекулярных комплексов Quer–**1** и Quer–**2** (приставка НПВО).

Изменение величины поглощения валентных колебаний ν_{O-H} при образовании водородных связей позволяет рассчитать их термодинамические характеристики (энергию и длину) [16–18]. Для полученных комплексов энергия водородных связей имеет значения -(34,98–20,79) кДж/моль, а расстояние между атомами кислорода в водородном мостике O···H–O равно 0,273–0,277 нм (табл. 2). Это соответствует сильным Н-связям, для которых энергия составляет 15–20 кДж/моль и более [19].

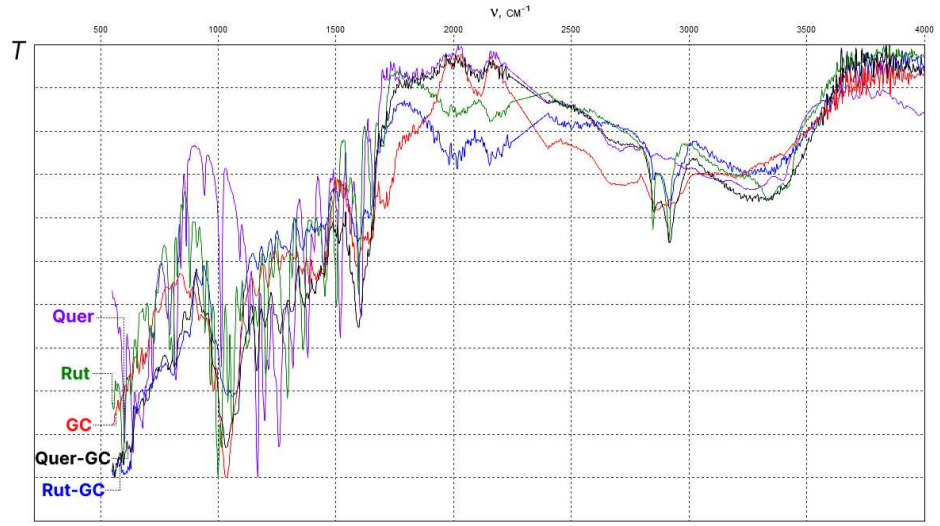


Рис. 4. ИК-спектры GC, Quer, Rut и их молекулярных комплексов Quer–GC и Rut–GC (приставка НПВО).

Наличие наиболее сильной водородной связи среди всех изученных комплексов отмечено для комплекса Quer–GC (-34,98 кДж/моль). Этот же комплекс имеет наибольшую константу устойчивости $(8,4\pm0,7)\cdot10^5$ [12]. Расчет показал, что у комплексов гликозидов плюща с Quer несколько сильнее водородная связь в комплексе гликозида **2** (-29,62 кДж/моль).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Жидкофазным способом получены молекулярные комплексы Quer–**1**, Quer–**2**, Quer–GC и Rut–GC.
2. На основе изменения величины поглощения валентных колебаний ν_{O-H} в ИК-спектрах рассчитаны энергия водородных связей и длина водородного мостика в синтезированных комплексах. Наиболее сильная водородная связь отмечена для комплекса Quer с GC (-34,98 кДж/моль).

Список литературы

1. Dias M. C. Plant flavonoids: chemical characteristics and biological activity / M. C. Dias, D. C. G. A. Pinto, A. M. S. Silva // Molecules. – 2021. – Vol. 26, № 17. – P. 5377.
2. Liu L. Improving quercetin bioavailability: a systematic review and meta-analysis of human intervention studies / L. Liu, E. Barber, N. J. Kellow [et al.] // Food Chemistry. – 2025. – Vol. 477. – P. 143630.
3. Gullón B. Rutin: a review on extraction, identification and purification methods, biological activities and approaches to enhance its bioavailability / B. Gullón, T. A. Lú-Chau, M. T. Moreira [et al.] // Trends in Food Science & Technology. – 2017. – Vol. 67. – P. 220–235.
4. Gibadullina N. N. Molecular complexes of triterpene glycosides with 5-fluorouracil sodium salt: spectral characterization and cytotoxic activity / N. N. Gibadullina, L. A. Yakovishin, V. I. Grishkovets [et al.] // Russ. Chem. Bull. – 2024. – Vol. 73, № 1. – P. 179–188.
5. Yakovishin L. A. New molecular complexes of glycyrrhizic acid monoammonium salt (glycyram) with fluoroquinolone antibiotics / L. A. Yakovishin, S. V. Bukharov, V. M. Babaev [et al.] // Curr. Bioact. Compd. – 2024. – Vol. 20, № 2. – e310823220526.
6. Tolstikova T. G. The complexes of drugs with carbohydrate-containing plant metabolites as pharmacologically promising agents / T. G. Tolstikova, M. V. Khvostov, A. O. Bryzgalov // Mini Rev. Med. Chem. – 2009. – Vol. 9, № 11. – P. 1317–1328.
7. Polyakov N. E. Glycyrrhizic acid as a novel drug delivery vector: synergy of drug transport and efficacy / N. E. Polyakov, T. V. Leshina // Open Conf. Proc. J. – 2011. – Vol. 2. – P. 64–72.
8. Толстиков Г. А. Солодка: Биоразнообразие, химия, применение в медицине / Г. А. Толстиков, Л. А. Балтина, В. П. Гранкина [и др.]. – Новосибирск: Гео, 2007. – 311 с.
9. Толстикова Т. Г. На пути к низкодозным лекарствам / Т. Г. Толстикова, А. Г. Толстиков, Г. А. Толстиков // Вестник РАН. – 2007. – Т. 77, № 10. – С. 867–874.
10. Yakovishin L. A. New molecular complex of ammonium glycyrrhizate with rutin / L. A. Yakovishin, V. D. Ratnikov, P. I. Bazhan [et al.] // Chimica Techno Acta. – 2022. – Vol. 9, № 1. – 20229101.
11. Яковишин Л. А. Параметры новых супрамолекулярных комплексов кверцетина с главными тритерпеновыми гликозидами плюща / Л. А. Яковишин, В. Д. Ратников, П. И. Бажан [и др.] // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия. – 2021. – Т. 7 (73), № 1 – С. 277–283.
12. Яковишин Л. А. Молекулярный комплекс кверцетина с глицирамом: спектрофотометрический анализ / Л. А. Яковишин, В. И. Гришковец // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия. – 2019. – Т. 5 (71), № 1. – С. 262–267.
13. Schneider H.-J. Supramolecular complexations of natural products / H.-J. Schneider, P. Agrawal, A. K. Yatsimirsky // Chem. Soc. Rev. – 2013. – Vol. 42, № 16. – P. 6777–6800.
14. Iogansen A. V. Direct proportionality of the hydrogen bonding energy and the intensification of the stretching ν(XH) vibration in infrared spectra / A. V. Iogansen // Spectrochim. Acta A. – 1999. – Vol. 55, № 7–8. – P. 1585–1612.
15. Yakovishin L. A. Molecular complexes of triterpenes and their glycosides with cyclodextrins: recent advances and application prospects / L. A. Yakovishin // Studies in Natural Products Chemistry. – 2024. – Vol. 82. – P. 367–404.
16. Селеменев В. Ф. Гидратация и межмолекулярные взаимодействия в карбоновых кислотах / В. Ф. Селеменев, О. Б. Рудаков, Н. В. Мироненко [и др.] // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 373–387.
17. Чечета О. В. Исследование водородных связей α-токоферола методом ИК-спектроскопии / О. В. Чечета, Е. Ф. Сафонова, А. И. Сливкин // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. – 2010. – № 2. – С. 164–167.
18. Колосова О. А. Изучение возможности применения ИК-спектроскопии для идентификации сырья валериан сомнительной и волжской / О. А. Колосова, О. В. Тринеева // Разработка и регистрация лекарственных средств. – 2022. – Т. 11, № 3. – С. 162–172.
19. Tinoco I. Jr. Physical Chemistry: Principles and Applications in Biological Sciences / I. Tinoco Jr., K. Sauer, J. C. Wang [et al.]. – London: Pearson Education, 2014. – 695 p.

PARAMETERS OF HYDROGEN BONDS IN MOLECULAR COMPLEXES OF QUERCETIN AND RUTIN WITH TRITERPENE GLYCOSIDES

Yakovishin L. A.[1], Ratnikov V. D.[1], Grishkovets V. I.[2], Korzh E. N.[1]

[1]Sevastopol State University, Sevastopol, Russia
[2]V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia
E-mail: chemsevntu@rambler.ru

Quercetin (Quer) and its glycoside rutin (Rut) are among the most studied flavonoids. Molecular complexes of Quer with glycyram (glycyrrhizic acid monoammonium salt, GC) and ivy glycosides α-hederin (**1**) and hederasaponin C (**2**), as well as Rut with GC, were obtained.

When comparing the IR spectra of the complexes with the spectra of the individual components, low-frequency shifts in the absorption bands of O–H and C=O stretching vibrations caused by the presence of hydrogen bonds were found. Additionally, shifts in the absorption bands of the C–O stretching vibrations in the C–O–C and C–OH groups were observed.

Thus, the observed changes in the IR spectra confirm the formation of hydrogen bonds between the glycoside molecules and Quer (Rut): $C{=}O_{\text{glycoside 1 (GC)}}\cdots H{-}O_{\text{Quer}}$, $C{=}O_{\text{Quer}}\cdots H{-}O_{\text{glycoside 2}}$, $C{=}O_{GC}\cdots H{-}O_{Rut}$ and $C{=}O_{Rut}\cdots H{-}O_{GC}$. Furthermore, hydrogen bonds can also form between the OH groups of the corresponding components of the complexes: (H)O···H–O. Such intermolecular contacts stabilize the resulting supramolecular complexes.

The change in the absorption value of ν_{O-H} stretching vibrations during the formation of hydrogen bonds allows us to calculate their thermodynamic characteristics (energy and length). For the obtained complexes, the energy of hydrogen bonds has values of -(34.98–20.79) kJ/mol, and the distance between oxygen atoms in the hydrogen bridge O···H–O is 0.273–0.277 nm. This corresponds to strong H-bonds, for which the energy is 15–20 kJ/mol or more.

The presence of the strongest hydrogen bond among all the studied complexes was noted for the Quer–GC complex (-34.98 kJ/mol). This complex also has the highest stability constant $(8.4\pm0.7)\cdot10^5$. Calculations showed that the ivy glycosides complexes with Quer have a somewhat stronger hydrogen bond in the complex of glycoside **2** (-29.62 kJ/mol).

***Keywords*:** hydrogen bond, quercetin, rutin, α-hederin, hederasaponin C, glycyrrhizic acid, glycyram, supramolecular complex, FTIR spectroscopy.

References

1. Dias M. C., Pinto D. C. G. A., Silva A. M. S., Plant flavonoids: chemical characteristics and biological activity, *Molecules*, **26** (17), 5377 (2021).
2. Liu L., Barber E., Kellow N. J., Williamson G., Improving quercetin bioavailability: a systematic review and meta-analysis of human intervention studies, *Food Chemistry*, **477**, 143630 (2025).
3. Gullón B., Lú-Chau T. A., Moreira M. T., Lema J. M., Eibes G., Rutin: a review on extraction, identification and purification methods, biological activities and approaches to enhance its bioavailability, *Trends in Food Science & Technology*, **67**, 220 (2017).

4. Gibadullina N. N., Yakovishin L. A., Grishkovets V. I., Spirikhin L. V., Vakhitov V. A., Ishmetova D. V., Dokichev V. A., Molecular complexes of triterpene glycosides with 5-fluorouracil sodium salt: spectral characterization and cytotoxic activity, *Russ. Chem. Bull.*, **73** (1), 179 (2024).
5. Yakovishin L. A., Bukharov S. V., Babaev V. M., Nikitina E. V., Bulatova E. S., New molecular complexes of glycyrrhizic acid monoammonium salt (glycyram) with fluoroquinolone antibiotics, *Curr. Bioact. Compd.*, **20** (2), e310823220526 (2024).
6. Tolstikova T. G., Khvostov M. V., Bryzgalov A. O., The complexes of drugs with carbohydrate-containing plant metabolites as pharmacologically promising agents, *Mini Rev. Med. Chem*., **9** (11), 1317 (2009).
7. Polyakov N. E., Leshina T. V., Glycyrrhizic acid as a novel drug delivery vector: synergy of drug transport and efficacy, *Open Conf. Proc. J*., **2**, 64 (2011).
8. Tolstikov G. A., Baltina L. A., Grankina V. P., Kondratenko R. M., Tolstikova T. G., *Licorice: Biodiversity, chemistry, and application in medicine*, 311 p. (Geo, Novosibirsk, 2007). (*in Russ*.).
9. Tolstikova T. G., Tolstikov A. G., Tolstikov G. A., On the way to low-dose drugs, *Vestnik RAN*, **77** (10), 867 (2007). (*in Russ*.).
10. Yakovishin L. A., Ratnikov V. D., Bazhan P. I., Zaitsev G. P., New molecular complex of ammonium glycyrrhizate with rutin, *Chimica Techno Acta*, **9** (1), 20229101 (2022).
11. Yakovishin L. A., Ratnikov V. D., Bazhan P. I., Grishkovets V. I., Parameters of new supramolecular complexes of quercetin with ivy major triterpene glycosides, *Scientific Notes of V. I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry*, **7** (1), 277 (2021). (*in Russ*.).
12. Yakovishin L. A., Grishkovets V. I., Molecular complex of quercetin with glycyram: spectrophotometric analysis, *Scientific Notes of V. I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry*, **5** (1), 262 (2019). (*in Russ*.).
13. Schneider H.-J., Agrawal P., Yatsimirsky A. K., Supramolecular complexations of natural products, *Chem. Soc. Rev.*, **42** (16), 6777 (2013).
14. Iogansen A. V., Direct proportionality of the hydrogen bonding energy and the intensification of the stretching ν(XH) vibration in infrared spectra, *Spectrochim. Acta A*, **55** (7–8), 1585 (1999).
15. Yakovishin L. A., Molecular complexes of triterpenes and their glycosides with cyclodextrins: recent advances and application prospects, *Studies in Natural Products Chemistry*, **82**, 367 (2024).
16. Selemenev V. F., Rudakov O. B., Mironenko N. V., Karpov S. I., Semenov V. N., Belanova N. A., Sinyaeva L. A., Lukin A. N., Hydration and intermolecular interactions in carboxylic acids, *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy = Condensed Matter and Interphases*, **22** (3), 373 (2020). (*in Russ*.).
17. Checheta O. V., Safonova E. F., Slivkin A. I., Study of hydrogen bonds of α-tocopherol by IR spectroscopy, *Proceedings of Voronezh State University. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy*, **2**, 164 (2010). (*in Russ*.).
18. Kolosova O. A., Trineeva O. V., Studying the possibility of application IR spectroscopy for raw material identification *Valeriana wolgensis* Kazak. and *Valeriana dudia* L., *Drug development & registration*, **11** (3), 162 (2022). (*in Russ*.).
19. Tinoco I. Jr., Sauer K., Wang J. C., Puglisi J. D., Harbison G., Rovnyak D., *Physical chemistry: principles and applications in biological sciences*, 695 p. (Pearson Education, London, 2014).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Аидинов Ислям Джевдетович — Институт биохимических технологий, экологии и фармации (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», аспирант 1-го курса направления подготовки 1.5.5. Физиология человека и животных, e-mail: aidinov20022@mail.ru

Александрова Асель Биляловна — Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеохимии, e-mail: adabl@mail.ru

Белоусов Виктор Владимирович — Институт биохимических технологий, экологии и фармации (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского», аспирант кафедры ботаники и физиологии растений и биотехнологий

Бенескриптов Александр Васильевич — Институт биохимических технологий, экологии и фармации (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», выпускник направления подготовки 06.03.01 Биология

Борисенко Даниил Александрович — Институт биохимических технологий, экологии и фармации (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», обучающийся направления подготовки 06.03.01 Биология

Бранчукова Полина Викторовна — Кубанский государственный медицинский университет, студентка лечебного факультета, e-mail: yulia-kashina@yandex.ru

Бульхина Суфия Джавдатовна — Институт биохимических технологий, экологии и фармации (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», выпускница кафедры физиологии человека и животных и биофизики направления подготовки 06.03.01 Биология

Бушов Юрий Валентинович — Институт биологии, экологии, почвоведения, сельского и лесного хозяйства Национального исследовательского Томского государственного университета, профессор, доктор биологических наук, профессор кафедры физиологии человека и животных, e-mail: bushov@bio.tsu.ru

Бычкова Евгения Александровна — ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», магистрант, факультет биотехнологии и биологии, e-mail: bychkovazhenya21@yandex.ru

Виниченко Лиана Арсеновна — ФГБОУ ВО «Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга», младший научный сотрудник лаборатории биогеохимии и рекреационных ресурсов, e-mail: vinichenkola@kamgu.ru

Волкова Карина Евгеньевна — ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный педагогический университет» Министерства просвещения Российской Федерации, студент, кафедра анатомии, физиологии и безопасности жизнедеятельности, e-mail: kv7332645@gmail.com

Гордеева Карина Андреевна — Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, научный сотрудник лаборатории экологии почв, e-mail: Karina_869@mail.ru

Гришковец Владимир Иванович — Институт биохимических технологий, экологии и фармации (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского», доктор химических наук, профессор кафедры «Общая химия», e-mail: vladgri56@yandex.ru

Громова Наталья Васильевна — ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доцент, кандидат биологических наук, заведующая кафедрой «Общей генетики, генной инженерии и биоинженерии», e-mail: lady.gromovana@yandex.ru

Губарев Фёдор Александрович — Севастопольский государственный университет, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Энергетические системы и комплексы традиционных и возобновляемых источников»

Гурнаков Никита Васильевич — Институт биохимических технологий, экологии и фармации (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», студент кафедры физиологии человека и животных и биофизики, e-mail: gora.nik2016@yandex.ru

Джелдубаева Эльвиза Рашидовна — Институт биохимических технологий, экологии и фармации (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского», кандидат биологических наук, доцент кафедры физиологии человека и животных и биофизики

Дроганова Ангелина Витальевна — ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», магистрант, факультет биотехнологии и биологии, e-mail: angelinadrog3002@gmail.com

Каримов Денис Дмитриевич — ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», кандидат биологических наук, заведующий лабораторией генетики отдела токсикологии и генетики с экспериментальной клиникой лабораторных животных, e-mail: lich-tsar@mail.ru

Каримов Денис Олегович — ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», кандидат медицинских наук, заведующий отделом токсикологии и генетики с экспериментальной клиникой лабораторных животных; ФГБНУ «Национальный НИИ общественного здоровья имени Н. А. Семашко», ведущий научный сотрудник отдела исследований общественного здоровья e-mail: karimovdo@gmail.com.

Кашина Юлия Викторовна — Кубанский государственный медицинский университет, доцент кафедры нормальной физиологии, e-mail: yulia-kashina@yandex.ru

Кашина Юлия Олеговна — Кубанский государственный медицинский университет, студентка лечебного факультета, e-mail: yulia-kashina@yandex.ru

Клименко Дарья Сергеевна — Институт биохимических технологий, экологии и фармации (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», кафедра ботаники и физиологии растений и биотехнологий, бакалавр 4 курса очной формы обучения направления подготовки 06.03.01 Биология

Кобечинская Валентина Григорьевна — Институт биохимических технологий, экологии и фармации (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», кандидат биологических наук, доцент, e-mail: valekohome@mail.ru

Ковальчук Игорь Олегович — Институт биохимических технологий, экологии и фармации (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», обучающийся направления подготовки 06.03.01 Биология

Коловская Влада Олеговна — Кубанский государственный медицинский университет, ассистент кафедры нормальной физиологии

Корж Елена Николаевна — ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», кандидат химических наук, доцент кафедры «Химия и химические технологии»

Косовская Мария Алексеевна — Севастопольский государственный университет, старший преподаватель кафедры «Радиоэкология и экологическая безопасность»

Костромитин Иван Сергеевич — Институт биохимических технологий, экологии и фармации (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», аспирант каедры общей биологии и генетики

Кузьмина Анастасия Андреевна — ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», магистрант, факультет биотехнологии и биологии, e-mail: kuz5434mina@mail.ru.

Кулагина Валентина Ивановна — Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экологии почв, e-mail: viksoil@mail.ru.

Куличенко Александр Михайлович — Институт биохимических технологий, экологии и фармации (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», старший научный сотрудник кафедры физиологии человека и животных и биофизики, e-mail: alexander.kulichenko@gmail.com

Ладыгина Людмила Владимировна — ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», ведущий научный сотрудник, кандидат биологических наук, e-mail: lvladygina@yandex.ru

Ливенцов Станислав Юрьевич — Институт биохимических технологий, экологии и фармации (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского», аспирант кафедры физиологии человека и животных и биофизики

Манилова Ольга Юрьевна — Кубанский государственный медицинский университет, доцент кафедры нормальной физиологии, e-mail: ManilovaOU@yandex.ru

Манюхина Елизавета Федоровна — Институт биохимических технологий, экологии и фармации (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», студент кафедры физиологии человека и животных и биофизики, e-mail: emanyukhina@yandex.ru

Муртазаева Амина Мустафаевна — Институт биохимических технологий, экологии и фармации (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», обучающаяся направления подготовки 06.04.01 Биология

Мусса Авалдугубах — Севастопольский государственный университет, аспирант

Мустафаев Эмиль Решатович — Институт биохимических технологий, экологии и фармации (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», студент кафедры физиологии человека и животных и биофизики, e-mail: emil11.mustafaev@yandex.ru

Мухаммадиева Гузель Фанисовна — ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории генетики отдела токсикологии и генетики с экспериментальной клиникой лабораторных животных, e-mail: ufniimt@mail.ru

Нефедова Жанета Валерьевна — ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, доктор медицинских наук, доцент, профессор кафедры пропедевтики детских болезней, e-mail: nefedova_doc@mail.ru

Османова Ресуде Серьяновна — Институт биохимических технологий, экологии и фармации (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского, обучающаяся кафедры ботаники и физиологии растений и биотехнологий

Павленко Владимир Борисович — ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», заведующий кафедрой общей психологии и психофизиологии, e-mail: vpav55@gmail.com

Панасенко Людмила Михайловна — ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, доктор медицинских наук, доцент, профессор кафедры пропедевтики детских болезней, e-mail: plm-ngmu@mail.ru

Пересторонина Ольга Николаевна — Вятский государственный университет, Институт биологии и биотехнологии, кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры Биологии и методики обучения биологии, e-mail: Olgaperest.29@yandex.ru

Пиркова Анна Васильевна — ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», ведущий научный сотрудник, кандидат биологических наук, e-mail: avpirkova@mail.ru

Погодина Светлана Владиировна — ФГАОУ ВО Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского, доктор биологических наук, доцент, профессор кафедры спорта и физического воспитания

Попова Наталия Николаевна — Воронежская государственная академия спорта, доктор биологических наук, профессор кафедры медико-биологически, естественно-научных и математических дисциплин

Просянникова Ирина Борисовна — Институт биохимических технологий, экологии и фармации (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского», кандидат биологических наук, доцент кафедры ботаники и физиологии растений и биотехнологий

Ратников Владимир Дмитриевич — ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», аспирант кафедры «Физика», преподаватель кафедры «Физика»

Ревин
Виктор Васильевич — ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», декан факультета биотехнологии и биологии, доктор биологических наук, профессор, факультет биотехнологии и биологии, e-mail: revinvv2010@yandex.ru,

Репина
Эльвира Фаридовна — ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник лаборатории токсикологии отдела токсикологии и генетики с экспериментальной клиникой лабораторных животных, e-mail: e.f.repina@bk.ru.

Рогатых
Станислав
Валентинович — ФГБОУ ВО «Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга», кандидат биологических наук, доцент кафедры биологии и наук о Земле, e-mail: rogatykhsv@yandex.ru

Рупова
Эльмира Ханисовна — Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник лаборатории экологии почв, e-mail: elmira.rupova@mail.ru

Рябова
Юлия Владимировна — ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», кандидат медицинских наук, заведующий лабораторией токсикологии отдела токсикологии и генетики с экспериментальной клиникой лабораторных животных, e-mail: ryabovaiuvl@gmail.com.

Рябушко
Виталий Иванович — ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», главный научный сотрудник, доктор биологических наук, e-mail: rabushko2006@yandex.ru

Рязанов
Станислав Сергеевич — Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории экологии почв, e-mail: RStanislav.soil@yandex.ru

Саядян
Виктория Евгеньевна — ФГАОУ ВО Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского, обучающийся направления подготовки 49.04.03 Спорт

Светлик
Михаил Васильевич — Институт биологии, экологии, почвоведения, сельского и лесного хозяйства Национального исследовательского Томского государственного университета, доцент, кандидат биологических наук, заведующий кафедрой физиологии человека и животных, e-mail: mihasv@gmail.com

Сидякин
Андрей Иванович — Институт биохимических технологий, экологии и фармации (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского», кандидат биологических наук, доцент кафедры ботаники и физиологии растений и биотехнологий

Согрин Денис Андреевич — Институт биохимических технологий, экологии и фармации (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского», аспирант 1-го года обучения кафедры физиологии человека и животных и биофизики

Сорокин Олег Викторович — ООО «Ведагенетика», кандидат медицинских наук, генеральный директор, e-mail: oleg.sorokin@vedapulse.com

Суботялов Михаил Альбертович — ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный педагогический университет», Министерства просвещения Российской Федерации; доцент кафедры фундаментальной медицины, доктор медицинских наук, доцент, профессор кафедры анатомии, физиологии и безопасности жизнедеятельности, директор НИИ здоровья и безопасности, ФГАОУ ВО «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации; e-mail: subotyalov@yandex.ru

Сунгатуллина Люция Мансуровна — Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, старший научный сотрудник лаборатории экологии почв, e-mail: Sunlyc@yandex.ru

Сытников Денис Михайлович — Севастопольский государственный университет, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры «Фундаментальная медицина, здравоохранение и здоровьесбережение»

Тоичкин Александр Маевич — ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», ведущий инженер, e-mail: toichkin80@mail.ru

Тум Майя Владимировна — ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», директор центра социальной антропологии и формирования личности, ассистент кафедры общей психологии и психофизиологии факультета психологии Таврической академии, e-mail: maiya2587@mail.ru

Туманянц Каринэ Николаевна — Институт биохимических технологий, экологии и фармации (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», кандидат биологических наук, директор Центра коллективного пользования научным оборудованием «Экспериментальная физиология и биофизика», e-mail: timur328@gmail.com

Хайруллина Алина Маратовна — Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, младший научный сотрудник лаборатории экологии почв, e-mail: his.alina94@mail.ru

Хусаинов Денис Рашидович — Институт биохимических технологий, экологии и фармации (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского», кандидат биологических наук, доцент кафедры физиологии человека и животных и биофизики, e-mail: gangliu@yandex.ru

Хуснутдинова Надежда Юрьевна — ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», научный сотрудник лаборатории токсикологии отдела токсикологии и генетики с экспериментальной клиникой лабораторных животных, e-mail: h-n-yu@yandex.ru.

Чередник Ирина Леонидовна — Кубанский государственный медицинский университет, профессор кафедры нормальной физиологии, e-mail: ilch2009@rambler.ru

Чмелёва Светлана Ивановна — Институт биохимических технологий, экологии и фармации (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского», кандидат биологических наук, доцент кафедры ботаники и физиологии растений и биотехнологий

Чуян Елена Николаевна — Институт биохимических технологий, экологии и фармации (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского», доктор биологических наук, заведующий кафедры физиологии человека и животных и биофизики

Шабалкина Светлана Вениаминовна — Вятский государственный университет, Институт биологии и биотехнологии, кандидат биологических наук, доцент кафедры Биологии и методики обучения биологии, e-mail: Nasturtium2017@yandex.ru

Шагидуллин Рифгат Роальдович — Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, академик АН РТ, доктор химических наук, директор, e-mail: shagidullin@mail.ru.

Шайхлисламова Эльмира Радиковна — ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», кандидат медицинских наук, директор; ФГБОУ ВО «Башкирский Государственный медицинский университет» Минздрава России, доцент кафедры терапии и профессиональных болезней с курсом ИДПО, e-mail: fbun@uniimtech.ru.

Щуров Сергей Вячеславович — ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», младший научный сотрудник, e-mail: skrimea@mail.ru

Юнусова Элина Серверовна	Институт биохимических технологий, экологии и фармации (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», обучающийся направления подготовки 06.03.01 Биология
Яковишин Леонид Александрович	ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», доктор химических наук, профессор кафедры «Химия и химические технологии»
Ярмолюк Наталья Сергеевна	Институт биохимических технологий, экологии и фармации (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского», кандидат биологических наук, доцент кафедры физиологии человека и животных и биофизики

СОДЕРЖАНИЕ

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

ОБЗОРНЫЕ СТАТЬИ

Волкова К. Е., Сорокин О. В., Нефедова Ж. В., Панасенко Л. М., Суботялов М. А.
РОЛЬ РЕСПИРАТОРНОГО МИКРОБИОМА В ПАТОГЕНЕЗЕ ВИРУСНЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ ДЫХАТЕЛЬНЫХ ПУТЕЙ.....3

Кашина Ю. В., Манилова О. Ю., Коловская В. О., Чередник И. Л., Кашина Ю. О., Бранчукова П. В.
СЕРОТОНИН: ХИМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА, БИОСИНТЕЗ И МНОГОГРАННАЯ БИОЛОГИЧЕСКАЯ РОЛЬ В РЕГУЛЯЦИИ ФУНКЦИЙ ОРГАНИЗМА.....28

Светлик М. В., Бушов Ю. В.
ЗЕРКАЛЬНЫЕ НЕЙРОНЫ В ЭВОЛЮЦИИ ЧЕЛОВЕКА.....42

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Виниченко Л. А., Рогатых С. В.
АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЛЕЧЕБНОЙ ГРЯЗИ ОЗЕРА УТИНОЕ И ЭССОВСКИХ МИНЕРАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ КАМЧАТСКОГО КРАЯ.....54

Джелдубаева Э. Р., Ярмолюк Н. С., Борисенко Д. А., Ковальчук И. О., Туманянц К. Н.
ВЛИЯНИЕ ИЗОЛИРОВАННОГО И КОМБИНИРОВАННОГО ДЕЙСТВИЯ НИЗКОИНТЕНСИВНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КРАЙНЕ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ НА РЕДОКС-ДИНАМИКУ РАНОЗАЖИВЛЕНИЯ У КРЫС.....66

Дроганова А. В., Бычкова Е. А., Громова Н. В., Кузьмина А. А., Ревин В. В.
МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ МАКРОМОЛЕКУЛЯРНОГО КРАУДИНГА В ЦИТОПЛАЗМЕ ЭРИТРОЦИТОВ.....75

Кобечинская В. Г., Бенескриптов А. В.
СОВРЕМЕННОЕ АГРОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПАХОТНЫХ ЗЕМЕЛЬ В ПРЕДГОРНОМ КРЫМУ С УЧЕТОМ ВЫРАЩИВАЕМЫХ КУЛЬТУР.....86

Костромитин И. С.
ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА И ЖИЗНЕННОЕ СОСТОЯНИЕ НАСАЖДЕНИЙ СОСНЫ КРЫМСКОЙ (*PINUS NIGRA SUBSP. PALLASIANA*) В ПРЕДГОРНОМ КРЫМУ.....111

Кулагина В. И., Александрова А. Б., Рязанов С. С., Сунгатуллина Л. М., Гордеева К. А., Хайруллина А. М., Рупова Э.Х.
АКТИВНОСТЬ ФЕРМЕНТОВ В СЕРЫХ ЛЕСНЫХ И ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВАХ ЛЕСОВ ТАТАРСТАНА.....128

Кулагина В. И., Александрова А. Б., Рязанов С. С., Шагидуллин Р. Р., Сунгатуллина Л. М., Гордеева К. А., Хайруллина А. М.
ЗАПАСЫ УГЛЕРОДА В СЕРЫХ ЛЕСНЫХ И ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВАХ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ ТАТАРСТАНА.....144

Манюхина Е. Ф., Тум М. В., Куличенко А. М., Павленко В. Б.
БЕТА-РИТМ КАК НЕЙРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЙ МАРКЕР АКТИВАЦИИ ДЕФОЛТ-СИСТЕМЫ МОЗГА 158

Мустафаев Э. Р., Тум М. В., Куличенко А. М., Гурнаков Н. В., Павленко В. Б.
ОСОБЕННОСТИ РЕАКЦИИ УСВОЕНИЯ РИТМА ПРИ ВОСПРИЯТИИ РИТМИЧЕСКОЙ ФОТОСТИМУЛЯЦИИ: ВЛИЯНИЕ ПСИХОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИЧНОСТИ..... 170

Мухаммадиева Г. Ф., Шайхлисламова Э. Р., Каримов Д. О., Хуснутдинова Н. Ю., Рябова Ю. В., Репина Э. Ф., Каримов Д. Д.
РОЛЬ ПОЛИМОРФИЗМОВ ГЕНОВ ОКСИДАТИВНОГО СТРЕССА И ВОСПАЛЕНИЯ В ФОРМИРОВАНИИ МЕТАБОЛИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ ПРИ ВИБРАЦИОННОЙ БОЛЕЗНИ 182

Пересторонина О. Н., Шабалкина С. В.
НАХОДКИ РЕДКИХ ВИДОВ НА ТЕРРИТОРИИ ПАМЯТНИКА ПРИРОДЫ «МЕДВЕДСКИЙ БОР» И ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ (КИРОВСКАЯ ОБЛАСТЬ) 190

Пиркова А. В., Ладыгина Л. В., Рябушко В. И., Щуров С. В., Тоичкин А. М.
ДИНАМИКА РОСТА И РАЗВИТИЯ ЛИЧИНОК ГИГАНТСКОЙ УСТРИЦЫ *MAGALLANA GIGAS* (THUNBERG, 1793) (BIVALVIA: OSTREIDAE) ЧЕРНОМОРСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ 200

Погодина С. В., Саядян В. Е.
ВОЗРАСТНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РЕГУЛЯТОРНОГО И КАРДИОГЕМОДИНАМИЧЕСКОГО МЕХАНИЗМОВ АДАПТАЦИИ У ВЫСОКОКВАЛИФИЦИРОВАННЫХ СПОРТСМЕНОВ ПРИ РАЗНОЙ СПЕЦИФИКЕ ФИЗИЧЕСКИХ НАГРУЗОК 214

Попова Н. Н.
БРИОФЛОРА ДЕЙСТВУЮЩИХ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ ОХРАНЯЕМЫХ ТЕРРИТОРИЙ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО ПРИЦНИНСКОГО ЛАНДШАФТНОГО РАЙОНА ТИПИЧНОЙ ЛЕСОСТЕПИ (ТАМБОВСКАЯ ОБЛАСТЬ)..... 227

Просянникова И. Б., Клименко Д. С.
МУЧНИСТОРОСЯНЫЕ ГРИБЫ БОТАНИЧЕСКОГО САДА ИМ. Н.В. БАГРОВА КРЫМСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА ИМЕНИ В.И. ВЕРНАДСКОГО 252

Сытников Д. М., Мусса А., Косовская М. А, Губарев Ф. А.
РЕАКЦИЯ ОВСА ПОСЕВНОГО НА ПРИСУТСТВИЕ НАНОЧАСТИЦ ДИОКСИДА ТИТАНА В ПИТАТЕЛЬНОМ СУБСТРАТЕ..... 265

Хусаинов Д. Р., Бульхина С. Д., Туманянц К. Н., Аидинов И. Д., Согрин Д. А.
ИЗМЕНЕНИЕ ЛАТЕНТНОГО ПЕРИОДА БОЛЕВОЙ РЕАКЦИИ КРЫС В ГИПОМАГНИТНЫХ УСЛОВИЯХ..... 277

Чмелёва С. И., Белоусов В. В., Сидякин А. И., Джелдубаева Э. Р., Туманянц К. Н., Османова Р. С.
ВЛИЯНИЕ РЕГУЛЯТОРА РОСТА КОМПЛЕКСНОГО ДЕЙСТВИЯ «ИМПУЛЬС» НА ПОКАЗАТЕЛИ СОЛЕУСТОЙЧИВОСТИ *AVENA SATIVA* L. 294

Чуян Е. Н., Муртазаева А. М., Ливенцов С. Ю.
ИЗМЕНЕНИЕ КОЖНОЙ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ И ТКАНЕВОГО МЕТАБОЛИЗМА ПРИ РАЗВИТИИ АЛЛОКСАН-ИНДУЦИРОВАННОГО ДИАБЕТА У КРЫС.....308

Ярмолюк Н. С., Джелдубаева Э. Р., Туманянц К. Н., Юнусова Э. С.
ВЛИЯНИЕ НИЗКОИНТЕНСИВНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАНЕВОГО ПРОЦЕССА.....327

ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Гришковец В. И.
ТРИТЕРПЕНОВЫЕ ГЛИКОЗИДЫ ARALIACEAE. VI. МЕТОДЫ ЯМР-СПЕКТРОСКОПИИ В УСТАНОВЛЕНИИ СТРУКТУРЫ ТРИТЕРПЕНОВЫХ ГЛИКОЗИДОВ АРАЛИЕВЫХ: ОДНО- И ДВУМЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ^{13}С-ЯМР 341

Гришковец В. И.
ТРИТЕРПЕНОВЫЕ ГЛИКОЗИДЫ ARALIACEAE. VII. ПОЛНЫЕ ОТНЕСЕНИЯ СИГНАЛОВ В ^{1}Н- И ^{13}С-ЯМР СПЕКТРАХ АГЛИКОННЫХ ЧАСТЕЙ ГЛИКОЗИДОВ ОЛЕАНОЛОВОЙ, ЭХИНОЦИСТОВОЙ КИСЛОТ И ХЕДЕРАГЕНИНА.....357

Яковишин Л. А.
ВЫТЯЖКА ИЗ СЕМЕННЫХ ЖЕЛЕЗ ОРГАНОТЕРАПЕВТИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ Д. КАЛЕНИЧЕНКО: НОВЫЕ ДАННЫЕ О ЛЕКАРСТВЕННОМ ПРЕПАРАТЕ НАЧАЛА XX ВЕКА.....367

Яковишин Л. А., Ратников В. Д., Гришковец В. И., Корж Е. Н.
ПАРАМЕТРЫ ВОДОРОДНЫХ СВЯЗЕЙ В МОЛЕКУЛЯРНЫХ КОМПЛЕКСАХ КВЕРЦЕТИНА И РУТИНА С ТРИТЕРПЕНОВЫМИ ГЛИКОЗИДАМИ 377

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ.....386

СОДЕРЖАНИЕ.....395