

УДК 631.8:581.1

DOI 10.29039/2413-1725-2025-11-3-164-177

ВОЗДЕЙСТВИЕ СОВМЕСТНОГО ВНЕСЕНИЯ БИОУГЛЯ И ГУМАТА КАЛИЯ НА РАСТЕНИЯ ПОЛБЫ И АГРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВЫ

**Кулагина В. И.¹, Сунгатуллина Л. М.¹, Гордеева К. А.¹, Грачев А. Н.²,
Рязанов С. С.¹, Забелкин С. А.², Хайруллина А. М.¹**

¹*Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Казань, Российская Федерация*

²*ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»,
Казань, Российская Федерация*

E-mail: viksoil@mail.ru

На основании проведенного вегетационного опыта и статистической обработки результатов показано, что совместное внесение в почву биоугля и гумата привело к увеличению содержания обменного калия, но не изменило реакцию среды и содержание щелочногидролизуемого азота. Содержание подвижного фосфора коррелировало только с дозой биоугля. Совместное применение биоугля с гуматом не привело к увеличению биомассы полбы по сравнению с контролем к 42 дню опыта. Ограничивающим фактором, вероятно, послужило очень низкое содержание щелочногидролизуемого азота на всех вариантах. Содержание хлорофиллов *a* и *b* проявило сильную корреляционную зависимость с концентрацией раствора гумата, однако статистически значимое увеличение содержания хлорофилла по сравнению с контролем обнаружено только при совместном внесении биоугля 2 % и 0,2 % раствора гумата.

Ключевые слова: биоуголь, илы сточных вод, хлорофилл, биомасса растений, лабораторный опыт.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема безопасной и экономически целесообразной утилизации осадков сточных вод (ОСВ) остро стоит во многих странах мира [1–4]. Осадки сточных вод производятся непрерывно и в огромных количествах. На каждый миллион жителей на станциях водоочистки ежегодно генерируется 150–200 тыс. тонн влажного ОСВ, или 30 тыс. тонн в сухом весе [4]. Только в России ежегодно образуется 2 млн. тонн ОСВ в пересчете на сухое вещество [3]. Трудности утилизации связаны как с количеством, так и составом ОСВ. Осадок содержит вещества с неприятным запахом, патогенные микроорганизмы, яйца гельминтов, тяжелые металлы, поверхностно-активные вещества и др. В настоящее время предлагается несколько способов переработки ОСВ, после которых получившиеся продукты можно утилизировать без риска распространения инфекционных заболеваний [1–4]. Однако все способы утилизации илов сточных вод на настоящий момент убыточны [4, 5]. Одним из перспективных, хотя не слишком распространенных, методов переработки, дающим надежду на снижение затрат и возможное получение

прибыли, является пиролиз – термическая обработка при недостатке кислорода [4, 6, 7]. Твердый продукт пиролиза называют биоуглем [6], биочаром, биококсом, есть еще несколько названий [4, 5]. Твердый продукт пиролиза не содержит патогенных организмов, не имеет специфического запаха осадков сточных вод. Считается, что микропористая структура биоугля благоприятствует поселению и развитию микроорганизмов [8]. Поскольку биоуголь содержит много веществ, пригодных для питания растений, идея утилизировать его путем внесения в почву кажется логичной. Некоторые опасения вызывает концентрация тяжелых металлов, увеличивающаяся по сравнению с исходным продуктом за счет уменьшения объема, но в нескольких исследованиях показано, что тяжелые металлы в биоугле переходят в труднорастворимую форму [9, 10]. Однако биоуголь из осадков сточных вод еще не стал коммерчески привлекательным продуктом. Для этого необходимо, чтобы внесение в почву биоугля, отдельно или в комплексе с дополнительными веществами, приводило к гарантированному и очень существенному увеличению урожайности сельскохозяйственных культур без ухудшения качества.

Исследования по внесению биоугля из сточных вод в почву, проведенные в разных странах, дали весьма противоречивые результаты: от увеличения урожайности [11, 12], до значительного снижения [13]. Впрочем, для биоугля из другого органического сырья результаты также оказывались противоположными [15, 14].

Желая получить эффект синергизма, сходный со свойствами искусственных темноокрашенных (за счет биоугля) почв в бассейне реки Амазонки – Terra Preta, сохраняющих высокое плодородие более 500 лет после создания [16], исследователи изучали результаты внесения вместе с биоуглем минеральных или органических удобрений. По данным разных авторов совместное внесение биоугля с минеральными и органическими удобрениями приводило к следующим результатам: увеличилась урожайность зерна ячменя на 49–61 % [17], урожайность картофеля и не изменилась, но улучшались его биохимические показатели [18], урожайность капусты и свеклы увеличилась, а сои – уменьшилась [19]. Проростки редиса и овса развивались лучше при совместном внесении биоугля и лигногумата, а проростки горчицы – нет [20]. Проведенный нами ранее вегетационный лабораторный опыт показал, что вносить минеральные азотные удобрения в бедную песчаную почву совместно с биоуглем из илов сточных вод следует с большой осторожностью – лучший результат при выращивании растений овса посевного получен в варианте с 10 % биоугля от веса почвы без минеральных удобрений [6]. По данным Бовсун М. А. с соавторами, совместное внесение биоугля с органическими удобрениями, способствовало лучшей структуре урожая, чем внесение биоугля с минеральными удобрениями [19]. Таким образом, поиск оптимального сочетания биоугля и удобрений остается актуальной проблемой.

Цель работы – определить агрохимические показатели почвы, биомассу растений полбы и содержание хлорофилла в них при внесении в почву различных количеств биоугля из илов сточных вод в комплексе с органическим удобрением (гуматом).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для решения поставленных задач проведен лабораторный вегетационный опыт. В вегетационные сосуды помещалось по 400 г почвы или смеси почвы с биоуглем. В опыте использовалась дерново-подзолистая почва из Верхнеуслонского района Республики Татарстан близ города Иннополис. Образцы для проведения опыта отобраны на залежи возрастом около 30 лет из гумусового горизонта. Содержание гумуса по Тюрину И. В. – 1,78 %, общего азота – 0,12 %, щелочногидролизуемого азота методом Корнфилда А. Х. – 22,4 мг/кг (очень низкое). Реакция среды используемой почвы слабокислая ($pH_{KCl}=5,15$). Гранулометрический состав почвы – легкосуглинистый (табл. 1).

Таблица 1

Гранулометрический состав дерново-подзолистой почвы

Содержание фракций, %					
1–0,25 мм	0,25–0,05 мм	0,05–0,01 мм	0,01–0,005 мм	0,005– 0,001 мм	< 0,001 мм
0,28	36,86	39,98	7,01	11,59	4,29

Биоуголь для вегетационного опыта получен при температуре $+500\pm 20$ °С из иловых осадков сточных вод г. Чебоксары на установке быстрого пиролиза FPP02, которая является запатентованной разработкой компании ООО «Энерголеспром», г. Казань. Содержание общего нелетучего углерода в биоугле 68,7 %, зольность 19,3 %. Реакция среды водной вытяжки щелочная ($pH_{H_2O}=7,9$). Содержание щелочногидролизуемого азота 105 мг/кг, подвижного фосфора и обменного калия – 800 и 3350 мг/кг соответственно. Количество вносимого биоугля составляло 2, 5 и 10 % от веса почвы.

Гумат калия, жидкое универсальное органическое удобрение на основе гуминовых кислот, произведено ООО «БИОТЕХНОЛОГИИ», г. Краснодар. Гумат разводился дистиллированной водой из расчета 1 мл и 2 мл на 1 литр раствора (0,1 % и 0,2 %-ный раствор). Полученным раствором производился полив растений 1 раз в 10 дней по 10 мл.

Опыт состоял из 12 вариантов и закладывался в 3-кратной повторности по следующей схеме: 1) контроль (почва); 2) гумат 0,1 %; 3) гумат 0,2 %; 4) уголь 0,2 %; 5) уголь 2 % + гумат 0,1 %; 6) уголь 2 % + гумат 0,2 %; 7) уголь 5 %; 8) уголь 5 % + гумат 0,1 %; 9) уголь 5 % + гумат 0,2 %; 10) уголь 10 %; 11) уголь 10 % + гумат 0,1 %; 12) уголь 10 % + гумат 0,2 %.

Опыт производился согласно ГОСТ Р ИСО 22030-2009. В качестве тест-культуры использовалась набирающая все большую популярность в Республике Татарстан сельскохозяйственная культура – полба или, по-другому, пшеница двузернянка (*Triticum dicoccum* L.). В каждый вегетационный сосуд высевалось по 12 семян. На 14 день часть растений срезалась. В каждом сосуде оставляли по 4 растения, которые дорастивались до 42 дня, после чего срезались для определения

биомассы. Содержание хлорофилла *a* и *b* определялось колориметрическим методом в растениях, срезанных на 42 день.

Агрохимические показатели почв определялись общепринятыми методами: щелочногидролизуемый азот методом Корнфилда А. Х., подвижный фосфор и обменный калий – по Чирикову, реакция среды солевой вытяжки – потенциометрическим методом.

Оценка статистической значимости разницы проводилась с использованием различных непараметрических и параметрических критериев и способов обработки данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Агрохимические показатели

Результаты изучения агрохимических показателей почвы из вегетационных сосудов после проведения опыта представлены в таблице (табл. 2).

Биоуголь и гумат оказывают противоположное воздействие на реакцию среды солевой вытяжки. Биоуголь способствует подщелачиванию, а гумат – подкислению. Соответственно, корреляционная взаимосвязь между дозой вносимого биоугля и pH – прямая средней силы (коэффициент корреляции $r=0,60$), а между концентрацией раствора гумата и pH – обратная слабая ($r=-0,38$). Несмотря на это, реакция среды солевой вытяжки из почвы на 11 вариантах из 12 находится в пределах агрохимической группировки «слабокислая», и только на одном варианте ее можно отнести к группировке «близкая к нейтральной» – уголь 10 % + гумат 0,1 %.

Таблица 2

Агрохимические показатели почвы

Вариант опыта	pH _{KCl}	Азот щелочногидр., мг/кг	Фосфор подвижный, мг/кг	Калий обменный, мг/кг
Контроль (почва)	5,3	23,3	86,4	167,3
Гумат 0,1%	5,1	28,0	91,0	174,5
Гумат 0,2 %	5,2	28,0	86,2	182,5
Уголь 2%	5,3	28,0	103,1	189,4
Уголь 2% + Гумат 0,1 %	5,5	30,3	96,8	186,5
Уголь 2% + Гумат 0,2 %	5,2	32,7	96,6	183,7
Уголь 5%	5,4	30,3	109,9	178,3
Уголь 5% + Гумат 0,1%	5,5	30,3	128,2	191,6
Уголь 5% + Гумат 0,2 %	5,2	28,0	104,9	203,1
Уголь 10%	5,4	39,7	130,1	216,9
Уголь 10% + Гумат 0,1 %	5,6	35,0	131,2	225,8
Уголь 10% + Гумат 0,2 %	5,3	37,3	129,7	230,9

Количество щелочногидролизуемого азота, определяемого в почве методом Корнфилда А. Х., увеличивается при внесении биоугля, степень корреляции высокая ($r=0,85$). Несмотря на это, содержание щелочногидролизуемого азота в почве на всех вариантах опыта характеризуется как «очень низкое» согласно агрохимической группировке. Коэффициент корреляции между содержанием щелочногидролизуемого азота и концентрацией вносимого раствора гумата равен 0,10, то есть корреляция не подтверждена.

Содержание подвижного фосфора возрастает с увеличением количества вносимого биоугля (табл. 2). Корреляционная зависимость между содержанием подвижного фосфора и дозой биоугля очень высокая ($r=0,94$). В почвах вариантов с добавлением биоугля содержание подвижного фосфора статистически значимо выше, чем без биоугля (t-тест, $p<0,05$). Зависимость от внесения гумата статистически не подтверждена (коэффициент корреляции $r=-0,07$). Согласно агрохимической группировке содержание подвижного фосфора в почве на разных вариантах колеблется от среднего (в пределах 50–100 мг/кг) до повышенного (100–150 мг/кг).

Содержание обменного калия в почвах согласно агрохимической группировке «очень высокое» на всех вариантах опыта, кроме контроля и варианта с 0,1 % раствором гумата, где оно «высокое». Содержание обменного калия в почве имеет очень высокую степень корреляции с концентрацией вносимых биоугля и раствора гумата (коэффициент корреляции в обоих случаях $> 0,90$), то есть фактически содержание обменного калия увеличивается прямо пропорционально количеству вносимых компонентов. Разница между отдельными вариантами статистически значима, что, впрочем, не удивительно, так как и биоуголь, и гумат содержат много калия. Увеличение содержания обменного калия в почве пропорционально дозе вносимого биоугля соответствует литературным данным [21, 22].

Биомасса растений

Проведенные исследования показали, что к 42 дню опыта сухая биомасса растений полбы на контроле и разных вариантах статистически значимо не отличалась (рис. 1). Данные по биомассе растений на 14 день опыта не приведены, так как статистически значимых отличий между вариантами также нет.

Считается, что продолжительность опыта сроком 14 дней достаточна для проявления острого токсического эффекта на растения (если он есть), а 42 дня – для проявления хронического токсического эффекта (ГОСТ Р ИСО 22030-2009). Полученные результаты показали, что токсический эффект от внесения биоугля и гумата отсутствовал. Однако и статистически значимого увеличения биомассы растений ни на одном из вариантов опыта по сравнению с контролем также не наблюдалось (рис. 1). Причиной, по-видимому, послужил недостаток доступного растениям азота. Согласно агрохимическому закону минимума, урожайность растений ограничивается тем фактором, который находится в минимуме. В минимуме в данном случае находилось содержание в почвах щелочногидролизуемого азота, которое на всех вариантах характеризовалось как «очень низкое» и явно находилось в дисбалансе с содержанием фосфора и калия.

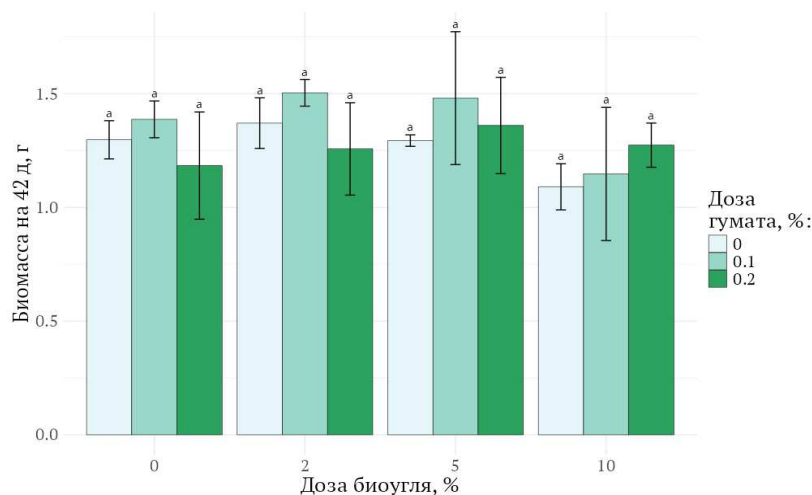


Рис. 1. Сухая биомасса растений полбы на 42 день опыта (среднее \pm стандартное отклонение). Столбцы с одинаковыми буквами не имеют статистически значимых различий согласно тесту Тьюки.

Содержание хлорофилла *a*

Наиболее интересные результаты получены по влиянию биоугля и гумата на содержание в растениях полбы хлорофилла *a* и *b*.

В сельскохозяйственных растениях, как правило, встречаются оба пигмента. Считается, что увеличение суммарного содержания хлорофиллов положительно сказывается на продуктивности сельскохозяйственных культур [23–25].

Хлорофиллу *a* отводится основная роль в фотосинтезе [26], его содержание в сельскохозяйственных культурах выше, чем других зеленых пигментов.

Согласно полученным данным, содержание хлорофилла *a* в растениях полбы колебалось от 3,9 до 10,9 мг/г сухой биомассы (рис. 2). Полученный результат в целом согласуется с указанными в литературе данными [27].

При этом одинаковое минимальное содержание хлорофилла *a* наблюдалось на всех вариантах без внесения гумата. Внесение в почву биоугля без гумата не повлияло на количество хлорофилла *a* в полбе. Отсутствие корреляционной зависимости на всех вариантах опыта между дозой вносимого биоугля и количеством хлорофилла *a* подтвердил коэффициент корреляции, равный 0,002. Результаты отличаются от полученных Курынцевой П. А. с соавторами, отмечавшими увеличение содержания хлорофилла в растениях ячменя при внесении биоугля [28], что, вероятно, связано отличиями в составе исследуемых биоугля и почвы.

Корреляция между концентрацией раствора гумата и количеством хлорофилла *a* в растениях полбы высокая и прямая ($r=0,72$). Полученный результат согласуется с литературными данными. Фирсов С. С. с соавторами, отмечал, что обработка семян и внекорневая подкормка пшеницы жидким удобрением на основе гуминовых кислот приводит к увеличению содержания хлорофилла в растениях [27]. По данным

Оказовой З. П. с соавторами применение гумата калия в концентрации 0,01–0,02 % повышало содержания хлорофилла в листьях кукурузы на 7,7–17,6 % в сравнении с контролем [29]. В работе Лагошиной А. Г. с соавторами показано, что обработка чайных кустов гуматом натрия в концентрации 1,5 г на 10 л воды привела к существенному увеличению суммарного содержания хлорофилла [30].

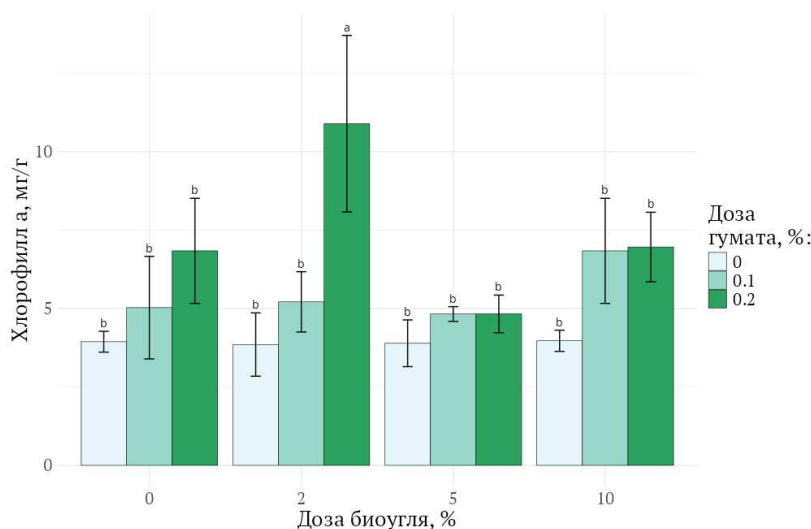


Рис. 2. Содержание хлорофилла *a* в растениях полбы на 42 день опыта (среднее ± стандартное отклонение). Столбцы с одинаковыми буквами не имеют статистически значимых различий согласно тесту Тьюки.

Корреляционной зависимости между количеством хлорофилла *a* и сухой биомассой растений не выявлено, коэффициент корреляции $r = -0,23$. Корреляция с агрохимическими показателями также отсутствует.

При совместном внесении с гуматом биоуголь и его количество все же оказывают воздействие на содержание хлорофилла в растениях. Максимальное содержание хлорофилла *a* обнаружено на варианте уголь 2 % + гумат 0,2 %. Только этот вариант статистически значимо отличался по содержанию хлорофилла *a* от всех остальных вариантов (рис. 2).

Содержание хлорофилла *b*

Хлорофилл *b* – второй по распространенности пигмент фотосинтезирующих растений. Считается, что с его помощью растения более эффективно используют энергию света.

Проведенные исследования показали, что содержание хлорофилла *b* в растениях полбы колеблется от 1,1 до 4,5 мг/г сухой биомассы (рис. 3).

Для хлорофилла *b* увеличение содержания с возрастанием концентрации раствора гумата, используемого для полива, выражено сильнее, чем для хлорофилла

a. Корреляционная зависимость между применяемой концентрацией гумата и хлорофилла *b* высокая и прямая ($r=0,87$). С агрохимическими факторами и биомассой корреляционная зависимость не выявлена.

Максимальное содержание хлорофилла *b* отмечено на том же варианте, что и для хлорофилла *a* – уголь 2 % + гумат 0,2 %. Это единственный вариант, имеющий статистически значимые отличия от контроля (почва). Минимальное содержание обнаружено на вариантах с 2 % и 5 % биоугля, но без гумата. Содержание хлорофилла *b* в растениях этих вариантов статистически значимо меньше, чем других вариантов. В большинстве случаев при концентрации гумата 0,2 % содержание хлорофилла *b* статистически значимо выше, чем при 0,1 %.

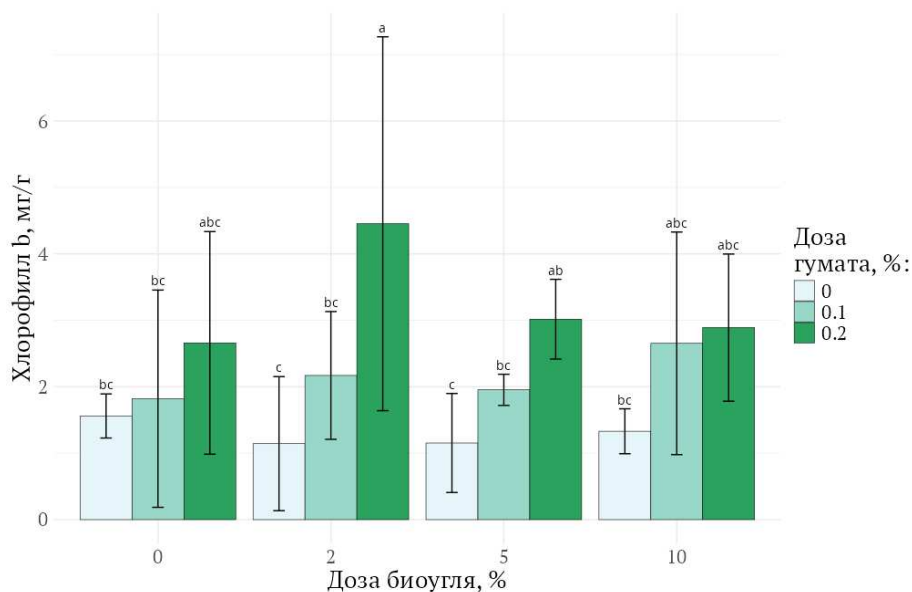


Рис. 3. Содержание хлорофилла *b* в растениях полбы на 42 день опыта (среднее±стандартное отклонение). Столбцы с одинаковыми буквами не имеют статистически значимых различий согласно тесту Тьюки.

Соотношение хлорофиллов *a* и *b*

Соотношение фотосинтетических пигментов в растениях способно изменяться при изменении условий окружающей среды, внесении удобрений и гербицидов [24, 31].

Полученные результаты свидетельствуют, что при внесении в почву биоугля без гумата соотношение хлорофилла *a* к хлорофиллу *b* в растениях полбы увеличивается по сравнению с контролем (табл. 3), причем, за счет уменьшения количества хлорофилла *b*.

Похожие результаты получены Родькиным О. И. при внесении в почву золы растений, содержащей много фосфора и калия, но мало азота, также как изучаемый биоуголь. Автор связывал изменения соотношения зеленых пигментов с изменением соотношения микроэлементов в почве за счет поступления их с золой [31].

Таблица 3
Соотношение хлорофилла *a* и хлорофилла *b* в растениях полбы

Концентрация гумата	Доза биоугля			
	0%	2%	5%	10%
0%	2,5	3,4	3,4	3,0
0,1%	2,8	2,4	2,5	2,6
0,2%	2,6	2,4	1,6	2,4

Данные других исследователей свидетельствуют о том, что количество хлорофилла *b* увеличивается и, соответственно, соотношение хлорофилла *a/b* уменьшается в оптимальных условиях: в условиях оптимального увлажнения [24], на более плодородных почвах, при внесении минеральных удобрений в правильном соотношении, включая азотные [32]. Мнения исследователей по поводу взаимосвязи соотношения хлорофиллов *a/b* разделились. По данным Федулова Ю. П. с соавторами, чем ниже соотношение *a/b*, тем выше урожайность озимой пшеницы [32]. По данным Родькина О. И. – урожайность картофеля увеличилась на вариантах, где соотношение хлорофиллов *a/b* оказалось шире [31]. В нашем случае биомасса полбы статистически значимых отличий от контроля не имела, корреляция между соотношением хлорофиллов *a/b* и биомассой полбы также не обнаружена (коэффициент корреляции равен 0,18).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что отдельное и совместное внесение в почву биоугля из илов сточных вод в количестве 2 %, 5 % и 10 % от веса почвы и раствора гумата калия в концентрации 0,1 % и 0,2 % не оказало существенного воздействия на реакцию среды и содержание щелочногидролизующего азота в почве. Содержание последнего осталось очень низким на всех вариантах опыта. Содержание подвижного фосфора увеличивалось с дозой биоугля, содержание обменного калия проявило сильную корреляционную зависимость и от дозы биоугля, и от концентрации раствора гумата.

Сильная прямая корреляционная зависимость содержания хлорофиллов наблюдалась с концентрацией раствора гумата, однако содержание хлорофиллов *a* и *b* в растениях полбы статистически значимо отличалось от контроля только на варианте опыта с совместным внесением 2 % биоугля и 0,2 %-ного раствора гумата калия.

Отдельное и совместное внесение в почву биоугля из илов сточных вод и раствора гумата калия не привело к увеличению биомассы полбы к 42 дню вегетационного опыта. Увеличение содержания хлорофилла обычно способствует увеличению урожайности сельскохозяйственных культур, но в данном случае ограничивающим фактором оказалось очень низкое содержание доступного растениям азота в почве.

Необходимо продолжить исследования для выявления оптимальных способов использования биоугля в качестве удобрения и мелиоранта, однако для получения

достоверных различий по урожайности растений следует обеспечить достаточный уровень азотного питания растений и сбалансированное соотношение азота, фосфора и калия в почве.

Список литературы

1. Дьяков М. С. Оценка перспективных и конкурентоспособных направлений переработки осадков коммунальных сточных вод / М. С. Дьяков, Я. И. Вайсман // Экология и промышленность России. – 2017. – Т. 21, № 7. – С. 36–41.
2. Сердюк Ю. О. Анализ общемировых тенденций развития технологий утилизации осадков сточных вод / Ю. О. Сердюк, А. В. Цыбина // Химия. Экология. Урбанистика. – Т. 2017. – 2017. – С. 117–121.
3. Ручкина О. И. Методы утилизации осадков городских очистных сооружений / О. И. Ручкина, А. Н. Зверева // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2020. – Т. 1 – С. 192–196.
4. Макоев С. О. Биокс из илового осадка сточных вод – эффективный субстрат для обеззараживания полигонов ТКО и восстановления качества почв / С. О. Макоев, И. Г. Ахметова // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24, № 6. – С. 153–164.
5. Цыбина А. В. Применение принципов экономики замкнутого цикла для обоснования экономически эффективного, энерго и ресурсосберегающего способа обращения с осадками городских сточных вод / А. В. Цыбина // Экология и промышленность России. – 2018. – Т. 22, № 10. – С. 38–43.
6. Кулагина В. И. Воздействие совместного внесения биоугля и минеральных азотных удобрений на растения овса посевного и биологические свойства почв / В. И. Кулагина, А. Н. Грачев, Р. Р. Шагидуллин, Л. М. Сунгатуллина, С. С. Рязанов, С. А. Забелкин // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2023. – № 61. – С. 27–44.
7. Koltsova T. G. Phytotesting of Liquid Products of Wood Pyrolysis on Seeds of Higher Plants / T. G. Koltsova, V. I. Kulagina, S. A. Zabelkin, A. N. Grachev, G. M. Bikbulatova, R. M. Khaziakhmedova, A. A. Makarov, A. R. Valeeva, A. I. Valiullina, V. N. Bashkirov // Waste Biomass Valor – 2024. – Vol. 15. – P. 5335–5347. <https://doi.org/10.1007/s12649-024-02497-1>
8. Hunt J. The Basics of Biochar: A Natural Soil Amendment / J. Hunt, M. Du Ponte, D. Sato, A. Kawabata // Soiland Crop Management. – 2010. – SCM-30. – P. 1–2.
9. Рязанов С. С. Содержание тяжелых металлов в растениях при внесении различных видов биоуглей в серую лесную почву / С. С. Рязанов, А. Н. Грачев, В. И. Кулагина, А. М. Хайруллина // Российский журнал прикладной экологии. – 2020. – № 3. – С. 29–34.
10. Song D. Application of biochar from sewage sludge to plant cultivation: Influence of pyrolysis temperature and biochar-to-soil ratio on yield and heavy metal accumulation / D. Song, X. Y. Xue, D. Z. Chen, P. J. He, X. H. Dai // Chemosphere. – 2014. – Vol. 109, P. 213–220.
11. Liu T. Nutrients and Heavy Metals in Biochar Produced by Sewage Sludge Pyrolysis: Its Application in Soil Amendment/ T. Liu, B. Liu, W. Zhang // Polish Journal of Environmental Studies. – 2014. – No 23(1). – P. 271–275.
12. Брындина Л. В. Восстановление почвы после гербицидного загрязнения с помощью биочара из осадков сточных вод и опилок / Л. В. Брындина, О. В. Бакланова // Экология и промышленность России. – 2021. – Т. 25, № 6. – С. 32–37.
13. Ábrego J. Phytotoxicity of sewage sludge biochars prepared at different pyrolysis condition / J. Ábrego, M. Atienza-Martínez, J. R. Gimeno, J. Aibar, D. Quílez, G. Gea // 23rd European Biomass Conference and Exhibition. – Vienna, Austria, 2015. <https://www.researchgate.net/publication/278031095>
14. Бетехтина А. А. Изменение свойств почвы и морфометрических параметров пшеницы при внесении биоугля: вегетационный эксперимент / А. А. Бетехтина, О. А. Некрасова, А. В. Малахсева, С. А. Черепанов, В. В. Валдайских // Аграрный вестник Урала. – 2024. – Т. 24, № 3. – С. 298–308.
15. Токтар М. Влияние биоугля на продуктивность яровой пшеницы / М. Токтар, М. Б. Ахметов, Ф. К. Муканова // Новости науки Казахстана. – 2023. – № 3 (158). – С. 34–38.

16. Wright David K. Stable isotope ecology of terra preta in Caxiuanã National Forest, Brazil / David K. Wright, Helena Lima Pinto, Jungyu Choi, Jeong-Heon Choi, Anna T. Browne Ribeiro, Mayara C. P. Mariano, Kevin McDaniel // *Frontiers in Earth Science*. – 2023. – Vol.11. – P. 1–15.
17. Мухина И. М. Влияние биоугля на биологические свойства дерново-подзолистой супесчаной почвы и эффективность использования растениями питательных веществ / И. М. Мухина, А. С. Дурова // *Агрофизика*. – 2017. – № 1. – С. 26–35.
18. Мухина И. М. Влияние биоугля на урожайность пропашных и злаковых культур в условиях северо-западного региона РФ / И. М. Мухина, Е. Я. Рижия, Н. П. Бучкина, Е. В. Балашов // *Почвы России: вчера, сегодня, завтра / Сборник статей по материалам Всероссийской с международным участием научной конференции*. – 2017. – С. 94–100.
19. Бовсун М. А. Влияние внесения биоугля на урожайность сельскохозяйственных культур / М. А. Бовсун, О. В. Нестерова, В. А. Семаль, Н. А. Сакара, А. В. Бриксманс, Т. Ю. Карпенко, Т. С. Тарасова // *Вестник Томского государственного университета. Биология*. – 2023. – № 61. – С. 6–26.
20. Кирюшина А. П. Фитотестирование ростстимулирующей активности биочара и лигногумата на почвах разного гумусного статуса/ А. П. Кирюшина, А. И. Парамонова, Е. В. Прудникова, П. С. Королев, В. А. Терехова // *Агрохимия*. – 2020. – № 11. – С. 14–20.
21. Соколик Г. А. Характеристики дерново-подзолистых почв после внесения биоугля/ Г. А. Соколик, С. В. Овсянникова, Т. Г. Иванова, М. В. Попеня, Е. В. Войникова // *Вестні Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя хімічных навук*. – 2015. – № 2. – С. 87–94.
22. Кулагина В. И. Влияние биоугля на структуру почвы и содержание форм калия / В. И. Кулагина, А. Н. Грачев, Р. Р. Шагидуллин, С. С. Рязанов, Л. М. Сунгатуллина, С. А. Забелкин, Т. Г. Кольцова // *Аграрный научный журнал*. – 2019. – № 1. – С. 16–20.
23. Зубкова Т. В. Влияние органических удобрений и природного цеолита на содержание пигментов и урожайность растений рапса сорта Риф / Т. В. Зубкова, О. А. Дубровина, С. М. Мотылева // *Аграрный вестник Урала*. – 2020. – № 2 (193). – С. 2–8.
24. Лиховидова В. А. Влияние фотосинтетического пигмента хлорофилла при различной влагообеспеченности на продуктивность растений озимой мягкой пшеницы / В. А. Лиховидова, В. Л. Газе, Е. В. Ионова // *Аграрная наука*. – 2020. – №7–8. – С. 86–89.
25. Каипов Я. З. Содержание хлорофилла в листьях как агротехнический прогноз в совершенствовании биологизации севооборотов в степной зоне Южного Урала / Я. З. Каипов, Р. С. Кираев, З. Р. Султангазин // *Вопросы степеведения*. – 2025. – № 1. – С. 56–64.
26. Платонова Н. Б. Фотосинтетические пигменты, как элемент формирования адаптивности растений чая / Н. Б. Платонова, О. Г. Белоус // *Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия*. – 2019. – Т. 5, № 3. – С. 76–84.
27. Фирсов С. С. Эффективность гуминовых удобрений в интенсификации продукционных процессов озимой пшеницы / С. С. Фирсов, Ю. В. Жигарева, Н. В. Сухова // *XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс*. – 2017. – № 5–6. – С. 42–49.
28. Курынцева П. А. Оценка возможности применения биочара с иммобилизованными свободноживущими азотфиксаторами в качестве удобрения (вегетационные опыты) / П. А. Курынцева, П. Ю. Галицкая, С. Ю. Селивановская // *Аграрный научный журнал*. – 2020. – № 12. – С. 28–33.
29. Оказова З. П. О путях повышения урожайности кукурузы в условиях лесостепной зоны РСО Алания / З. П. Оказова, Д. М. Мамиев, А. А. Тедеева // *Современные проблемы науки и образования*. – 2015. – № 5. – С. 695.
30. Лагошина А. Г. Влияние агрохимикатов регуляторного действия на пигментную систему растений чая / А. Г. Лагошина, О. Г. Белоус // *Субтропическое и декоративное садоводство*. – 2023. – № 86. – С. 54–61.
31. Родькин О. И. Физиологические характеристики и продуктивность картофеля при использовании золы в качестве удобрения / О. И. Родькин // *Экологический вестник*. – 2013. – № 4. – С. 89–94.
32. Федулов Ю. П. Содержание и соотношение хлорофиллов в листьях озимой пшеницы в зависимости от агротехнических приемов ее выращивания/ Ю. П. Федулов, Ю. В. Подушин // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. – 2009. – № 51. – С. 240–253.

IMPACT OF COMBINED APPLICATION OF BIOCHAR AND POTASSIUM HUMATE ON SPELT PLANTS AND SOIL AGROCHEMICAL PROPERTIES

*Kulagina V. I.¹, Sungatullina L. M.¹, Gordeeva K. A.¹, Grachev A. N.²,
Ryazanov S. S.¹, Zabelkin S. A.², Khairullina A. M.¹*

¹*Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, Kazan, Republic of Tatarstan, Russia*

²*Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Republic of Tatarstan, Russia
E-mail: viksoil@mail.ru*

The production of biochar from sewage sludge is a promising method for treating this waste, which is generated in large quantities annually. Pyrolysis ensures disinfection and reduces the volume of the original material. Biochar contains a significant amount of plant nutrients, yet its application to soil has yielded inconsistent results, with both increases and decreases in crop yields reported. To enhance the commercial appeal of biochar, its application – either alone or combined with fertilizers – must lead to a substantial increase in crop yield without compromising quality. Finding the optimal combination of biochar and fertilizers remains a relevant challenge. The aim of this study was to evaluate the agrochemical properties of soil, spelt (*Triticum dicoccum* L.) plant biomass, and chlorophyll content following the application of varying amounts of sewage sludge-derived biochar in combination with an organic fertilizer (potassium humate).

A laboratory vegetation experiment was conducted with 12 treatments. Each vegetation vessel contained 400 g of soil or a soil-biochar mixture. Biochar was applied at rates of 2 %, 5 %, and 10 % of the soil weight. Potassium humate solutions were used at concentrations of 0.1 % and 0.2 %. The control group consisted of soil without biochar or humate. The results demonstrated that the combined application of biochar and humate increased exchangeable potassium content but did not alter soil pH or alkali-hydrolyzable nitrogen levels. Nitrogen content remained "very low" across all treatments (23.3–37.3 mg/kg) according to agrochemical classification. The content of mobile phosphorus in the soil correlated only with the biochar dose ($r = 0.94$). While the control soil had a "medium" phosphorus level (86.4 mg/kg), biochar application increased it to an "elevated" level (100.0–129.7 mg/kg). Exchangeable potassium exhibited a strong positive correlation with both biochar and humate concentrations ($r > 0.90$), with all treatments classified as "very high" or "high" (167.3–230.9 mg/kg). The combined use of biochar and humate did not increase spelt biomass compared to the control by days 14 and 42 of the experiment. Dry plant biomass showed no statistically significant differences among treatments. The limiting factor for yield was likely the very low alkali-hydrolyzable nitrogen content across all variants. The chlorophyll *a* and *b* content in spelt plants showed a strong positive correlation with humate concentration ($r = 0.72$ and $r = 0.86$, respectively), increasing with higher humate levels. No correlation was found between chlorophyll content and biochar dose. However, a statistically significant increase in chlorophyll compared to the control was observed only in one treatment—2 % biochar combined with 0.2 % humate solution. While increased chlorophyll content typically enhances crop yields, the limiting factor in this study was the insufficient

availability of nitrogen in the soil. Further research is needed to determine optimal methods for using biochar as a fertilizer and soil amendment. To achieve reliable differences in crop yield, future studies should ensure adequate nitrogen supply and a balanced ratio of nitrogen, phosphorus, and potassium in the soil.

Keywords: biochar, sewage sludge, chlorophyll, plant biomass, laboratory experiment.

References

1. Dyakov M. S., Vaisman Ya. I. Evaluation of Promising and Competitive Areas of Municipal Waste Water Recycling, *Ecology and industry of Russia*, **7**, 36 (2017).
2. Serdyuk Yu. O., Tsybina A. V. analysis of global trends in the development of sewage sludge recycling technologies, *Chemistry. Ecology. Urbanism*, **2017**, 117 (2017).
3. Ruchkinova O. I., Zvereva A. N. Methods of disposal of sludge from urban wastewater treatment plants, *Modern technologies in construction. Theory and practice*, **1**, 192 (2020).
4. Makoev S. O., Akhmetova I. G. Biocoal from wastewater sludge is an effective substrate for disinfecting municipal solid waste polygons and restore soil quality, *Power engineering: research, equipment, technology*, **24(6)**, 153 (2022).
5. Tsybina A. V. Application of the Principles of Circular Economy to Justify an Economically Efficient, Energy-Efficient and Resource-Saving Way of Handling Municipal Sewage Sludge, *Ecology and industry of Russia*, **10**, 38 (2018).
6. Kulagina V. I., Grachev A. N., Shagidullin R. R., Sungatullina L. M., Ryazanov S. S., Zabelkin S. A. The Impact of the Joint Application of Biochar and Mineral Nitrogen Fertilizers on Oat Plants and the Biological Properties of Soils, *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya*, **61**, 27 (2023).
7. Koltsova T. G., Kulagina V. I., Zabelkin S. A., Grachev A. N., Bikbulatova G. M., Khaziakhmedova R. M., Makarov A. A., Valeeva A. R., Valiullina A. I., Bashkurov V. N. Phytotesting of Liquid Products of Wood Pyrolysis on Seeds of Higher Plants, *Waste Biomass Valor*, **15**, 5335 (2024). <https://doi.org/10.1007/s12649-024-02497-1>
8. Hunt J., Du Ponte M., Sato D., Kawabata A. The Basics of Biochar: A Natural Soil Amendment, *Soiland Crop Management*, **30**, 1 (2010).
9. Ryazanov S. S., Grachev A. N., Kulagina V. I., Khairullina A. M. Heavy metals content in plants after an application of different types of biochar into the grey forest soil, *Russian Journal of Ecosystem Ecology*, **3**, 29 (2020).
10. Song D., Xue X. Y., Chen D. Z., He P. J., Dai X. H. Application of biochar from sewage sludge to plant cultivation: Influence of pyrolysis temperature and biochar-to-soil ratio on yield and heavy metal accumulation, *Chemosphere*, **109**, 213 (2014).
11. Liu T., Liu B., Zhang W. Nutrients and Heavy Metals in Biochar Produced by Sewage Sludge Pyrolysis: Its Application in Soil Amendment, *Polish Journal of Environmental Studies*, **23(1)**, 271 (2014).
12. Bryndina L. V., Baklanova O. V. Restoration of Soil from Herbicide Pollution using Biochar from Sewage Sludge and Sawdust, *Ecology and Industry of Russia*, **6**, 32 (2021).
13. Ábrego J., Atienza-Martínez M., Giménez J. R., Aibar J., Quílez D., Gea G. Phytotoxicity of sewage sludge biochars prepared at different pyrolysis condition, *23rd European Biomass Conference and Exhibition* (Vienna, 2015). <https://www.researchgate.net/publication/278031095>
14. Betekhtina A. A., Nekrasova O. A., Malakheeva A. V., Cherepanov S. A., Valdayskikh V. V. Changes in soil properties and morphometric parameters of wheat when applying biochar: vegetation experiment, *Agrarian Bulletin of the Urals*, **3**, 298 (2024).
15. Toktar M., Akhmetov M. B., Mukanova F. K. Influence of biochar on the productivity of spring wheat, *Science News of Kazakhstan*, **3**, 34 (2023).
16. Wright David K., Lima Helena Pinto, Choi Jungyu, Choi Jeong-Heon, Browne Ribeiro Anna T., Mariano Mayara C. P., McDaniel Kevin. Stable isotope ecology of terra preta in Caxiuanã National Forest, Brazil, *Frontiers in Earth Science*, **11**, 1 (2023).

17. Mukhina I. M., Durova A. S. The effect of biochar on the biological properties of loamy sand soil spodosol and the efficiency of nutrients use by plants, *Agrophysics*, **1**, 26 (2017).
18. Mukhina I. M., Rizhiya E. Ya., Buchkina N. P., Balashov E. V. The influence of biochar on the yield of row crops and cereals in the conditions of the north-western region of the Russian Federation, *Soils of Russia: yesterday, today, tomorrow*, 94 (2017).
19. Bovsun M. A., Nesterova O. V., Semal V. A., Sakara N. A., Brikmans A. V., Karpenko T. Yu., Tarasova T. S. The effect of applying biochar on crop yields, *VestnikTomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya*, **61**, 6 (2023).
20. Kiryushina A. P., Paramonova A. I., Prudnikova E. V., Korolev P. S., Terekhova V. A. Phytotesting of Growth-Stimulating Activity of Biochar and Lignomhumate on Soils of Different Humus Status, *Agrochemistry*, **11**, 14 (2020).
21. Sokolik G. A., Ovsyannikova S. V., Ivanova T. G., Popenya M. V., Voynikova E. V. Characteristics of sod-podzolic soils after biochar application, *Bulletin of the National Academy of Sciences of Belarus. Gray Chemical Sciences*, **2**, 87 (2015).
22. Kulagina V. I., Grachev A. N., Shagidullin R. R., Ryazanov S. S., Sungatullina L. M., Zabelkin S. A., Koltsova T. G. Influence of biochar on soil structure and the content of potassium forms, *Agrarian scientific journal*, **1**, 16 (2019).
23. Zubkova T. V., Dubrovina O. A., Motyleva S. M. Influence of organic fertilizers and natural zeolite on pigment content and yield of rapeseed plants of the Rif, *Agrarian Bulletin of the Urals*, **2**, 2 (2020).
24. Likhovidova V. A., Gaze V. L., Ionova E. V. The effect of photosynthetic chlorophyll pigment in the conditions of various moisture supply on winter bread wheat productivity, *Agrarian Science*, **7-8**, 86 (2020).
25. Kaipov Ya. Z., Kiraev R. S., Sultangazin Z. R. Chlorophyll content in leaves as an agrotechnical forecast in improving the biologization of crop rotations in the steppe zone of the Southern Urals, *Questions of steppe studies*, **1**, 56 (2025).
26. Platonova N. B., Belous O. G. Photosynthetic pigments as an element of formation of tea plants adaptability, *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry*, **3**, 76 (2019).
27. Firsov S. S., Zhigareva Yu. V., Sukhova N. V. Effectiveness of humic fertilizers in the intensification of production processes of wheat, *XXI century: results of the past and problems of the present plus*, **5-6**, 42 (2017).
28. Kuryntseva P. A., Galitskaya P. Yu., Selivanovskaya S. Yu. Assessment of the possibility of using biochar with immobilized free-living nitrogen fixers as a fertilizer (pot experiments), *Agrarian Scientific Journal*, **12**, 28 (2020).
29. Okazova Z. P., Mamiev D. M., Tedeeva A. A. On ways to increase corn yields in the forest-steppe zone of the Republic of North Ossetia-Alania, *Modern problems of science and education*, **5**, 695 (2015).
30. Lagoshina A. G., Belous O. G. The influence of agrochemicals of regulatory action on tea plants pigment system, *Subtropical and ornamental gardening*, **86**, 54 (2023).
31. Rodkin O. I. Physiological parameters and productivity of potato at the result of fertilization by ash, *Ecological Bulletin*, **4**, 89 (2013).
32. Fedolov Yu. P., Podushin Yu. V. The content and ratio of chlorophylls in the leaves of winter wheat depending on agrotechnical methods of its cultivation, *Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University*, **51**, 240 (2009).