

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 распахки, 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 (<i>Pinus sylvestris</i>), 10 С	Заказник Шорский, искусственная посадка, около 75 лет (приспевающие), почвы – дерново-подзолистые
ПП2	Береза повислая (<i>Betula pendula</i>) 10Б+Е+Лп	Охранная зона Раифского участка Волжско-Камского, искусственная посадка, 84 года (перестойные), почвы – дерново-подзолистые
ПП3	Сосна обыкновенная (<i>Pinus sylvestris</i>) 10 С	Там же, искусственная посадка, 71 год (приспевающие), почвы – дерново-подзолистые
ПП4	Дуб высокоствольный (<i>Quercus petraea</i>) 7Д2Лп1Кл+В	Иске-Казанское участковое лесничество, близ с. Пановка, лес естественного возобновления, 110 лет (перестойные), почвы – серые лесные
ПП5	Лиственница сибирская (<i>Larix sibirica</i>), Лс10	Там же, искусственная посадка, 80 лет (средневозрастные), почвы – серые лесные
ПП6	Ель европейская (<i>Picea abies</i>) 8Е2Лс	Там же, искусственная посадка, 80 лет (приспевающие), почвы – серые лесные

Запасы органического углерода определялись в следующих пулах: почве, сырораствующей 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-сантиметровом слое колеблются от $9,1 \pm 2,0$ т/га до $60,2 \pm 2,3$ т/га (рис. 1). Минимальные запасы органического углерода обнаружены в дерново-подзолистой почве под сосняком в охранный 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).

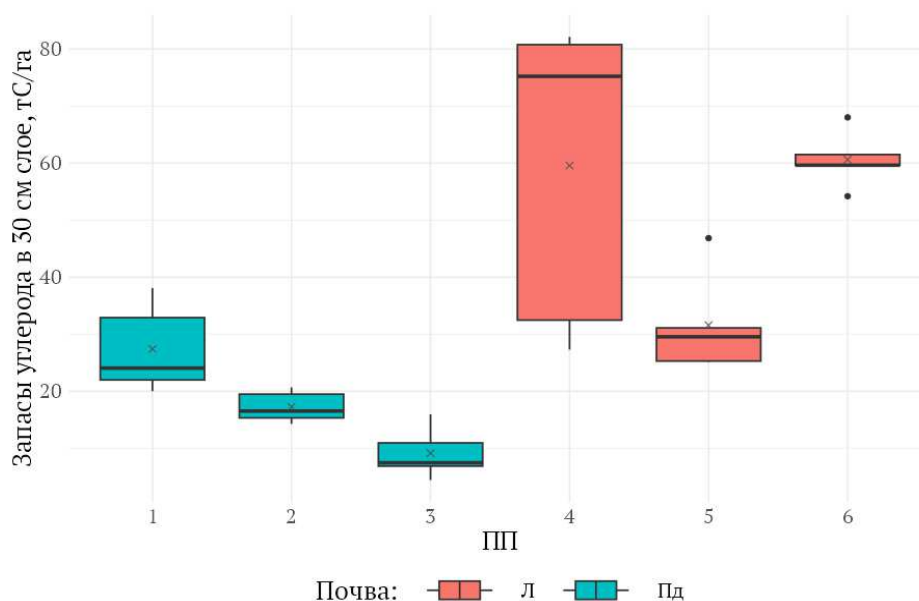


Рис. 1. Запасы углерода в почвах пробных площадок в слое 0–30 см. Расшифровку номеров площадок см. в таблице 1. Крестиком обозначено среднее значение, жирной линией – медиана, точки – «выбросы» значений. Л – серые лесные почвы, Пд – дерново-подзолистые почвы.

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 охранный 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].

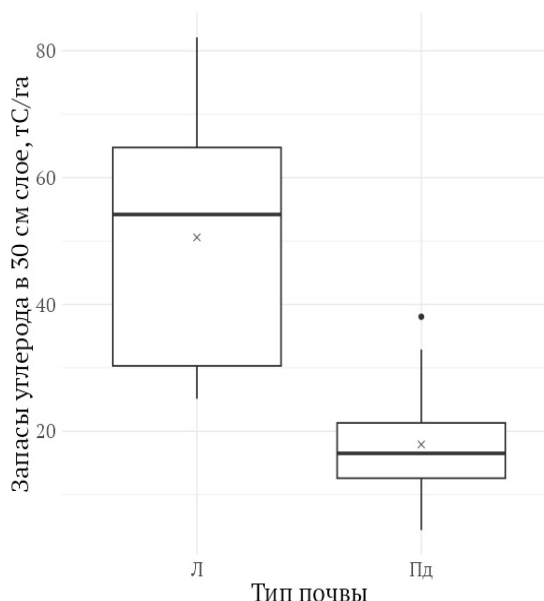


Рис. 2. Запасы углерода в серых лесных и дерново-подзолистых почвах пробных площадок. Крестиком обозначено среднее значение, жирной линией – медиана, точки – «выбросы» значений. Л – серые лесные почвы, Пд – дерново-подзолистые почвы.

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.

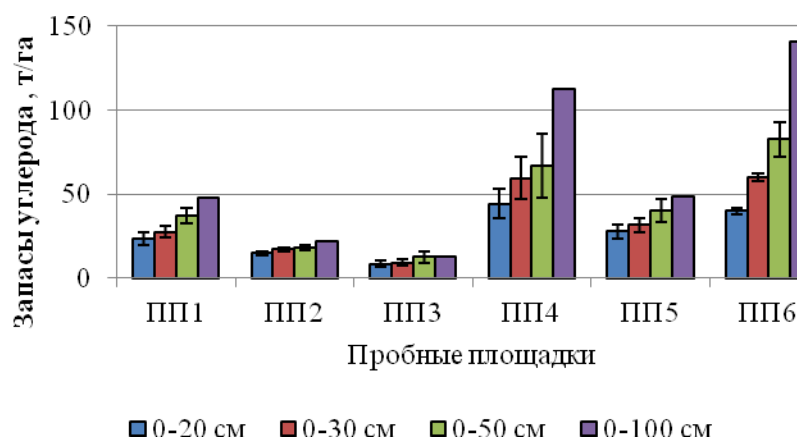


Рис. 3. Запасы органического углерода в разных расчетных слоях почв пробных площадок ($M \pm m$).

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.

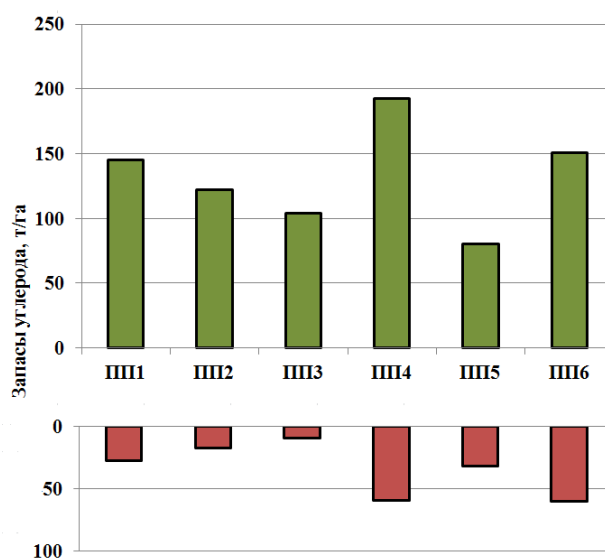


Рис. 4. Запасы углерода в биомассе древостоя (зеленый цвет) и в толще почвы 0–30 см (красный цвет).

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. Щепашенко // 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. Щепашенко Д. Г. Запасы органического углерода в почвах России / Д. Г. Щепашенко, 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. Щепаченко, 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. Pripulina 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).