

Экология / Ecology

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-2-1783](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1783)

EDN: JYTJOO

УДК 631.95:631.412.1:631.417.1



Оценка эффективности улавливания CO₂ растениями-сидератами в агроэкосистемах

П.А. Курынцева, А.Р. Камалова, С.И. Красовская,
Н.А. Пронович, С.Ю. Селивановская

*Институт экологии, биотехнологии и природопользования КФУ,
Казань, Российская Федерация*

Аннотация

Обоснование. В условиях глобального изменения климата актуализируется поиск эффективных методов улавливания углекислого газа (CO₂). Растения-сидераты являются ключевым элементом агроэкосистем, способными не только улучшать плодородие почвы, но и связывать атмосферный углерод, что делает оценку их потенциала чрезвычайно важной для снижения парникового эффекта.

Цель. Провести сравнительную оценку эффективности десяти видов растений-сидератов по улавливанию CO₂ из атмосферы и определить их влияние на агрохимические свойства почвы для выбора оптимальных культур.

Материалы и методы. В рамках мелкоделяночного эксперимента исследовались 10 видов растений-сидератов: редька масличная, рапс яровой, вика, фацелия, горох полевой, ячмень яровой, горох посевной, овес, горчица белая и горчица сарептская. Методика включала определение динамики прироста наземной и корневой биомассы, измерение содержания углерода в фитомассе и анализ изменения ключевых почвенных показателей после их внесения.

Результаты. Установлено, что максимальный прирост биомассы наблюдался на 14-42 сутки (от 9 до 672%). Содержание углерода в фитомассе стабилизировалось в диапазоне 33–58% в ходе роста. Объем фиксации CO₂ варьировал от 40 до 13 464 кгC/га, с максимумом у гороха посевного (10 022–13 464 кгC/га), а минимальное - у вики (765 кгC/га). Внесение сидератов повысило содержание органического углерода (на 2–23%), азота (на 3–27%), калия (на 6–42%), фосфора (на 6–28%), а также микробную биомассу (11–17 мкг/г), снизив при этом емкость катионного обмена и электропроводность. Расчет баланса эмиссии и улавливания CO₂ показал, что только горох полевой, горох посевной и овес обеспечили фикса-

цию CO₂ в биомассе, в то время как у других культур доминировала эмиссия CO₂ от почвенного дыхания.

Заключение. Полученные результаты имеют практическое значение для выбора оптимальных сидератов с целью повышения углеродной емкости почв и снижения парникового эффекта.

Ключевые слова: растения-сидераты; улавливание CO₂; углеродный баланс; фитомасса; парниковый эффект

Для цитирования. Курынцева, П. А., Камалова, А. Р., Красовская, С. И., Пронич, Н. А., & Селивановская, С. Ю. (2026). Оценка эффективности улавливания CO₂ растениями-сидератами в агроэкосистемах. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 157–186. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1783>

Assessment of CO₂ sequestration efficiency by cover crops in agroecosystems

P.A. Kuryntseva, A.R. Kamalova., S.I. Krasovskaya,
A.N. Pronovich, S.Yu. Selivanovskaya

*Institute of Ecology, Biotechnology and Nature Management
of Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation*

Abstract

Background. In the context of global climate change, the search for effective methods of capturing carbon dioxide (CO₂) is becoming increasingly urgent. Green manure plants are a key element of agroecosystems, capable of not only improving soil fertility but also sequestering atmospheric carbon. This makes assessing their potential extremely important for mitigating the greenhouse effect.

Purpose. To conduct a comparative assessment of the effectiveness of ten species of green manure plants in capturing CO₂ from the atmosphere and to determine their impact on the agrochemical properties of the soil for the selection of optimal crops.

Materials and methods. A small-plot experiment was conducted to study 10 species of green manure plants: oil radish, spring rape, vetch, phacelia, field pea, barley, garden pea, oat, white mustard, and brown mustard. The methodology included determining the dynamics of aboveground and root biomass growth, measuring the carbon content in the phytomass, and analyzing changes in key soil indicators after their incorporation.

Results. It was found that the maximum biomass increase was observed on days 14–42 (from 9 to 672%). The carbon content in the phytomass stabilized in the range of 33–58% during growth. The volume of CO₂ fixation varied from 40 to 13,464 kgC/ha, with a maximum in garden pea (10,022–13,464 kgC/ha) and a minimum in vetch

(765 kgC/ha). The application of green manure increased the content of organic carbon (by 2–23%), nitrogen (by 3–27%), potassium (by 6–42%), phosphorus (by 6–28%), and microbial biomass (11–17 µg/g), while decreasing the cation exchange capacity and electrical conductivity. Calculation of the balance of CO₂ emission and capture showed that only field pea, garden pea and oats ensured CO₂ fixation in biomass, while for other crops, CO₂ emission from soil respiration dominated.

Conclusion. The obtained results have practical significance for the selection of optimal green manure crops in order to increase the carbon capacity of soils and reduce the greenhouse effect.

Keywords: cover crops; CO₂ sequestration; carbon balance; phytomass; greenhouse effect

For citation. Kuryntseva, P. A., Kamalova, A. R., Krasovskaya, S. I., Pronovich, N. A., & Selivanovskaya, S. Yu. (2026). Assessment of CO₂ sequestration efficiency by cover crops in agroecosystems. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 157–186. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1783>

Введение

Глобальное изменение климата, вызванное растущей концентрацией парниковых газов (преимущественно углекислого газа) в атмосфере, требует разработки новых подходов для улавливания углерода. Многие исследователи признают одним из наиболее перспективных направлений внедрение изменений в сельскохозяйственные системы [19; 31; 35]. Одним из таких подходов является использование растений-сидератов, известных своей двойной пользой: повышением плодородия почв и снижением воздействия на окружающую среду. Введение сидератов в севооборот представляет собой эффективный способ улавливания углерода и сокращения выбросов CO₂ [4]. Эти культуры широко применяются для улучшения структуры почвы, снижения эрозии, а также для увеличения содержания органического вещества и улучшения микробиологической активности почвы [5; 6]. Биологическая ценность сидератов, особенно бобовых, также проявляется в их способности фиксировать атмосферный азот в корневых клубеньках благодаря симбиозу с бактериями рода *Rhizobium*, что способствует увеличению содержания азота в почве и уменьшает потребность в минеральных удобрениях [7; 10; 14]. Экологическая роль сидератов также проявляется в их способности снижать эмиссию парниковых газов, в частности углекислого газа, за счет фиксации углерода в биомассе и накопления его в почве [1; 12; 13]. Совокупность этих факторов позволяет рассматривать растения-сидераты как эффективный и экологически устойчивый инструмент повышения плодородия почв и снижения углеродного следа сельскохозяйственного производства.

Согласно последним оценкам, даже незначительное ежегодное увеличение содержания органического углерода в почвах сельскохозяйственных угодий на 0,4% может потенциально компенсировать годовые выбросы углерода, связанные со сжиганием ископаемого топлива [36]. Это подчёркивает важнейшую роль устойчивых методов ведения сельского хозяйства, таких как введение в севооборот сидеральных культур, для достижения глобальных целей углеродной нейтральности [12; 42].

Сельскохозяйственные почвы традиционно рассматриваются как источники эмиссии углерода, а изменение традиционных технологий может приводить к снижению этих выбросов и интенсификации процессов накопления углерода в почве, а значит и увеличению ее плодородия. С этой точки зрения выращивание сидератов, в частности в качестве промежуточной культуры после раннего сбора озимых, может стать эффективным путем смягчения последствий изменений климата и принести дополнительные выгоды, такие как улучшение здоровья и плодородия почвы.

Целью исследования являлось попытка оценить потенциал улавливания углерода различными видами сидератов в условиях мелкоделяночного эксперимента, путем количественной оценки эмиссии CO₂ из почвы и накопления фитомассы различными видами сидератов, которая впоследствии перейдет в почвенный профиль.

Материалы и методы

1. Организация мелкоделяночного эксперимента

В 2024 году был проведен мелкоделяночный эксперимент по выращиванию растений-сидератов: редька масличная, рапс яровой, вика, фацелия, горох полевой, ячмень яровой, горох посевной, овес, горчица белая, горчица сарептская. В начале мая, после схода снега и подсыхания верхнего слоя почвы, было проведено рыхление (боронование) верхнего слоя почвы опытного участка зубowymi боронами БЗТУ-1 в два следа сцепкой С-11 трактором МТЗ-1221, что обеспечило сохранение влаги в почве. В дальнейшем боронование повторяли еще дважды с интервалом в 14 суток для уничтожения сорной растительности. После третьего боронования участок был разбит на делянки площадью 10 м² (5х2м). Для каждого варианта было предусмотрено 3 повторности делянок, расположенные в случайном порядке. Для исключения взаимного влияния между делянками были оставлены защитные полосы шириной 1 м, а расстояние от участка до дорог и соседних полей составило 15 м. После разбивки делянок и уста-

новки разметочных колышков с номерами с каждой делянки был отобран почвенный образец с глубины 0–10 см для проведения агрохимического и микробиологического анализа. Внесение минеральных удобрений и пестицидов в эксперименте не предусматривалось.

Посев растений-сидератов был осуществлен 30 мая 2024 года. Далее каждые 7 дней (07.06.2024, 14.06.2024, 21.06.2024, 28.06.2024, 05.07.2024, 12.07.2024, 19.07.2024, 26.07.2024, 01.08.2024, 05.08.2024) проводился отбор растений по 5 штук с каждой делянки (всего 15 растений на вариант опыта), выбранных случайным образом. Растения доставлялись в лабораторию, где измеряли длину корня и побега, высушивали до постоянного веса с последующим определением сухой биомассы корня и побега, а также содержание углерода в фитомассе. В указанные даты также отбирались почвенные пробы для определения респираторной активности согласно ISO 16072:2002 с анализом на газовом хроматографе [28]. 5 августа 2024 года был проведен заключительный отбор растительных проб, после чего все сидераты, за исключением рапса, были заделаны в почву. Рапс яровой был запахан ранее в связи с переходом в фазу созревания семян. 16 августа 2024 года, после запахки сидератов, был осуществлен последний отбор проб почвы для оценки агрохимических свойств, респираторной активности и микробной биомассы.

2. Оценка агрохимических параметров

Образцы почвы для определения агрохимических характеристик отбирались согласно ГОСТ 17.4.4.02-2017 [2]. pH и ЕС определяли согласно ГОСТ 26423-85 [30]. Влажность почвы оценивали гигроскопическим методом, ЕКО определяли методом Бобко-Аскинази-Алешина в модификации ЦИНАО согласно ГОСТ 5180–2015 [4]. Для определения содержания общего углерода и общего азота использован метод сухого сжигания согласно DIN/ISO 13878 на анализаторе Elementar Vario MAX Cube (Germany) [37]. Содержание подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО согласно ГОСТ Р 54650-2011 [5], гранулометрический состав методом лазерной дифракции согласно ISO 13320:2020 [27].

3. Оценка функционирования почвенной микробиоты

Для оценки почвенного дыхания (эмиссии CO_2) использовали «камерный метод» [9], определяющий изменение концентрации CO_2 в непрозрачных цилиндрических ПВХ-камерах объемом 1.5 л. и диаметром 110 мм, вкопанных в почву на глубину 4 см. Камеры герметично закрывали крышкой, общее время экспозиции составляло 4 мин. Концентрацию CO_2

фиксируют инфракрасным газоанализатором CD 210 (Wohler, Германия) через 1 и через 3 минуты после начала инкубации. Для расчета изменения массы углерода (в форме CO_2) в камере за время экспозиции использовали выражение, основанное на уравнении Менделеева–Клапейрона [9]. Параллельно измерялась температура приземного слоя воздуха и почвы на глубине 5 и 10 см, с помощью прибора Checktemp-1 (Hanna, Германия) с точностью до 0.1°C .

Углерод микробной биомассы почвы оценивали методом субстрат-индуцированного дыхания согласно ISO 16072:2002 с окончанием на газовом хроматографе Nexis GC-2030 (Shimadzu, Япония) [28]. Навеску почвы массой 1 г и 10 мг D–глюкозы в качестве легкодоступного питательного субстрата помещали в хроматографическую вials и инкубировали в течение 24 ч при температуре 20°C . Измерение проводили на капиллярной колонке Rt-Q-BOND 30 m с диаметром 0.53 мм и толщиной слоя нанесённой фазы 20 мкм. Скорость потока составляла 10 мл/мин, объём впрыска – 10 мкл, общее время измерения составляло 5 минут на образец.

Все измерения проводились не менее чем в трёхкратной повторности. Статистическую обработку полученных результатов проводили с помощью Microsoft Office Excel 2021 (США). Все графические данные содержат средние значения и стандартные ошибки. Для оценки значимости различий использовали критерий Фишера при $\alpha = 0,05$.

Результаты и обсуждение

Мелкоделяночный эксперимент проводился на изменённых сельскохозяйственных почвах лесостепной зоны, тип почвы определен как серая лесная. Агрохимические характеристики почвы до начала эксперимента представлены в табл. 1. Емкость катионного обмена варьировала в диапазоне от 39,00 до 75,80 мг*экв/100 г, pH – в пределах от 6,33 до 7,31, электропроводность – от 46,40 до 84,20 мкСм/см, а влажность – от 18,11 до 19,48 %. Содержание макроэлементов составило: 23,62–42,96 г/кг для С, 0,86–1,88 г/кг для N, 125–163 мг/кг для К, 43–62 мг/кг для Р, что соответствует данным, приведенным в литературе для серых лесных почв. Так, согласно литературе, содержание К в таких почвах составляет 90–135 мг/кг, а Р – 46–126 мг/кг [11, 15, 34, 38]. Содержание углерода, согласно литературным данным, изменяется в диапазоне 1,79–8,10 % [18, 29, 30, 17]. По результатам гранулометрического анализа методом лазерной дифракции, почва, на которой проводился эксперимент, относится к песчаным суглинкам.

Таблица 1.

Агрохимические характеристики почвы до начала мелкоделяночного эксперимента**Table 1.** Agrochemical characteristics of the soil prior to the start of the small-plot experiment

Дата	30.05.2024								
Показатель/ Культуры	ЕКО, мг*экв/100 г СЕС, meq/100g	pH	ЕС, мкСм/см	С, %	N, %	К, мг/кг	Р, мг/кг	Влажность, %	ГМС
Редька масличная	39,00± 0,51	7,25±0 ,02	83,20± 5,10	35,60± 0,95	1,65± 0,12	380 ±12	53±2	18,50 ±0,390	песчаный суглинок
Рапс яровой	48,80± 0,41	7,21± 0,02	75,10± 7,12	36,83± 0,85	0,86± 0,15	315 ±15	61±4	19,48 ±0,42	песчаный суглинок
Вика	64,80± 0,28	7,19± 0,03	84,20± 2,80	42,96± 0,77	1,88± 0,17	312 ±21	62±3	19,25 ±0,92	песчаный суглинок
Фацелия	45,00± 0,44	7,31± 0,05	77,20± 4,12	35,08± 1,25	1,51± 0,21	407 ±23	62±4	18,71 ±0,52	песчаный суглинок
Горох полевой	65,20± 0,52	7,16± 0,06	79,20± 8,60	35,31± 1,63	1,39± 0,24	327 ±30	43±5	18,41 ±0,47	песчаный суглинок
Ячмень яровой	68,80± 0,71	7,10± 0,03	54,10± 2,69	31,57± 1,37	1,48± 0,20	319 ±34	51±4	18,83 ±0,68	песчаный суглинок
Горох посевной	59,80± 0,85	6,93± 0,02	49,70± 4,37	35,24± 0,89	1,00± 0,09	395 ±37	52±3	18,13 ±0,51	песчаный суглинок
Овес	56,60± 0,41	6,96± 0,04	55,50± 5,33	28,65± 0,92	1,06± 0,18	334 ±26	60±4	18,30 ±0,49	песчаный суглинок
Горчица белая	75,80± 0,95	6,33± 0,05	46,40± 6,85	27,32± 0,47	1,09± 0,16	384 ±25	46±5	18,11 ±0,61	песчаный суглинок
Горчица сарептская	51,00± 0,15	7,03± 0,07	61,50± 6,52	23,62± 1,27	1,04± 0,15	334 ±32	49±6	18,95 ±0,44	песчаный суглинок

Динамика морфометрических показателей растений в ходе эксперимента представлена на рис.1-10 [8]. Поскольку в данном исследовании растения-сидераты рассматриваются преимущественно как средство снижения эмиссии парниковых газов, в частности CO₂, выделяемого при почвенном дыхании, и в меньшей степени – как «зеленые удобрения», то к оптимальным были отнесены те виды, отличающиеся быстрым накоплением биомассы и её максимальными значениями к концу вегетационного сезона.

Согласно полученным данным, всходы вики появились после 7 июня 2024 г. Длина корня увеличивалась на протяжении вегетационного сезона,

достигнув максимальных значений в августе - 15,5 и 19,7 см (отбор проб 1 августа и 5 августа). Аналогично изменялась длина побега, значения которой к концу эксперимента составили 80-97 см. Фитомасса вики увеличивалась до 12 июля, после чего прирост был незначительным, вероятно, из-за отмирания нижних листьев. Полученные значения соответствуют типичным для данной культуры: длина корня – до 100 см, высота побега – 50-100 см, биомасса – от 2500 до 5200 кг/га [21; 25; 39; 40].

Первые всходы гороха полевого были зафиксированы также после 7 июня 2024 г. В течение вегетационного периода длина корня и побега стабильно увеличивалась. Растения, отобранные 1 августа и 5 августа, по морфометрическим параметрам достоверно не различались: длина корня составила 17–19 см, длина побега – 107–108,6 см, фитомасса – 14,9–15,8 г ($p>0,05$). Эти показатели соответствуют средним значениям, указанным производителем семян (побеги 80–100 см, корневая система с основным корнем проникает до 1,5 м, боковые корни – 20–40 см).

Первые всходы гороха посевного были отмечены 7 июня 2024 г. В дальнейшем длина корня, побега и фитомасса растений постепенно увеличивались, достигая максимальных значений в августе 2024 года: длина корня - 18,6–21,4 см, побега - 49,6–60,4 см, фитомасса - 20,3–21,0 г. Стоит отметить, что после 12 июля прирост фитомассы замедлился.

Всходы горчицы белой были зафиксированы 7 июля 2024 г. В ходе вегетации морфометрические показатели увеличивались, достигнув к концу наблюдений длины корня в среднем 13,5 см, длины побега 51 см и фитомассы 2,5 г. Эти результаты совпадают со средними показателями вида, где высота побега достигает до 70 см, а длина корня - до 60 см.

Горчица сарептская, аналогично горчице белой, взошла 7 июня 2024 г. Длина корня и побега постепенно увеличивалась, однако скорость прироста снизилась после 12 июля. Фитомасса растений горчицы сарептской увеличивалась на протяжении всего вегетационного эксперимента, с наименьшим приростом после 1 августа. В эксперименте не выявлено статистически значимых различий по высоте побега, длине корня и фитомассе между двумя видами горчицы ($p>0,05$). С увеличением продолжительности вегетации длина побега и фитомасса овса увеличивались, достигнув максимальных значений 5 августа (в среднем 79 см и 5,6 г, соответственно). Длина корня после 12 июля достоверно не увеличивалась и находилась в диапазоне 7,6–11,2 см ($p>0,05$).

Рапс яровой характеризовался стабильным приростом всех морфометрических характеристик на протяжении эксперимента, достигнув макси-

мальных значений к 1 августа: средняя длина корня 26,6 см, побега - 108 см, фитомассы - 11,6 г. Полученные значения соответствуют средним показателям длины корня – 20-40 см, длины побега – 60-150 см. Поскольку созревание семян рапса произошло раньше, запашка данного варианта была проведена сразу после отбора проб 1 августа, чтобы предотвратить попадание зрелых семян в почву и потенциального её засорения. Следует отметить, что наблюдаемое в динамике снижение некоторых средних значений морфометрических показателей, связано с неоднородностью развития растений в одном варианте и случайным отбором проб, что объясняет значительный разброс полученных данных.

Всходы редьки масличной появились 7 июня 2024 г. Интенсивный рост длины корня и побега, а также прирост биомассы отмечены в период с 7 июня по 12 июля. К концу вегетации средняя длина корня достигла 19 см, длина побега - 85,7 см, фитомасса - 13,0 г.

Всходы фацелии зафиксированы после 14 июня 2024 года. Длина побега и фитомасса увеличивались на протяжении всего вегетационного периода, достигнув максимума 5 августа (86,4 см и 9,1 г соответственно). Длина корня интенсивно увеличивалась до 12 июля, затем колебалась в пределах 10–18 см. Эти результаты соответствуют типичным для фацелии значениям: длина побега до 1 м, длина корня до 60 см.

Всходы ячменя ярового отмечены 7 июня 2024 г. В последующий период наблюдалось увеличение длины корня, побега и фитомассы. К 5 августа средние значения составили: длина корня - 7 см, длина побега - 75 см, фитомасса - 5,8 г. После 12 июля для ряда растений отмечен прирост который не был статистически значим по длине корня (ячмень яровой, фацелия, редька масличная, овес, горчица сарептская, горох посевной, горох полевой, вика), длине побега (редька масличная, горчица сарептская, горох посевной, вика) и фитомассе (редька масличная, овес, горох посевной, горох полевой, вика) ($p > 0,05$).

После оценки морфометрических характеристик отобранные растения были подготовлены для определения содержания углерода (рис. 11). Установлено, что в начале вегетации растения характеризовались минимальным содержанием углерода - от 24 до 58 %. К концу эксперимента (на 5 августа) наибольшим содержанием углерода характеризовались растения овса (51,4 %), наименьшим – растения ячменя (41 %). Полученные данные будут использованы для последующего расчета интенсивности поглощения углерода из атмосферы и его фиксации в растительной биомассе.

Далее была проведена оценка респираторной активности почвенного микробного сообщества, на основании которой была рассчитана эмиссия CO₂ из почвы (табл. 2). Респираторная активность почвенного микробного сообщества зависит от климатических факторов, таких как температура и влажность почвы [20,22,24,26,32,33,43,44,45], и биотических факторов, в частности влияние корневой системы растений посредством выделения экссудатов и образования отмерших корней [23]. В начале эксперимента почва характеризовалась минимальной эмиссией CO₂ и наименьшим разбросом данных, поскольку растения либо ещё не имели проростков, либо их корневая система была недостаточно развита для значительного влияния на микробную активность и, следовательно, на эмиссию CO₂. Так, 7 июня 2024 г. эмиссия CO₂ составляла от 0,050 до 0,112 г C/м²*ч. Рост и развитие корневой системы и повышенная влажность почвы привела к увеличению эмиссии CO₂ в период с 14 по 21 июня в 4–31 раз. В дальнейшем респираторная активность микробного сообщества стабилизировалась, эмиссия CO₂ колебалась в диапазоне от 0,123 до 0,534 гC/м²*ч. Следует отметить, что почва под горчицей сарептской, викой и фацелией характеризовалась повышенной респираторной активностью на протяжении всего вегетационного периода.

Таблица 2.

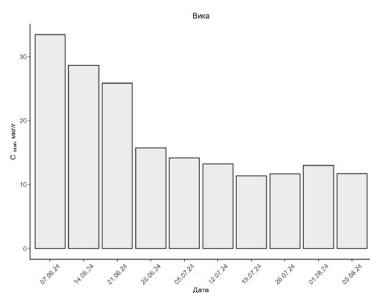
Изменение эмиссии CO₂ за счет респираторной активности почвенного микробного сообщества в динамике вегетационного эксперимента под растениями

Table 2. Changes in CO₂ emissions due to the respiratory activity of the soil microbial community over the course of a vegetation experiment under plants

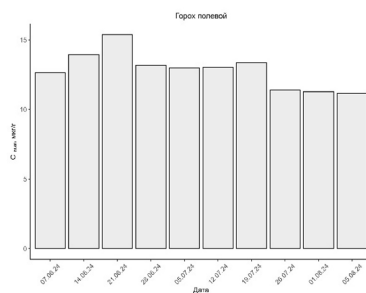
Культуры	Эмиссия CO ₂ , гC/м ² *ч									
Дата	07.06.2024	14.06.2024	21.06.2024	28.06.2024	05.07.2024	12.07.2024	19.07.2024	26.07.2024	01.08.2024	05.08.2024
Редька масличная	0,112	0,394	0,731	0,185	0,251	0,344	0,237	0,188	0,166	0,366
Рапс яровой	0,085	0,513	0,944	0,174	0,229	0,297	0,280	0,200	0,220	0,240
Вика	0,083	0,620	1,113	0,159	0,241	0,395	0,338	0,360	0,308	0,429
Фацелия	0,047	0,474	0,854	0,184	0,242	0,390	0,481	0,534	0,449	0,303
Горох полевой	0,050	0,295	0,506	0,124	0,207	0,269	0,224	0,147	0,123	0,239
Ячмень яровой	0,094	0,514	0,924	0,131	0,190	0,244	0,268	0,265	0,282	0,182
Горох посевной	0,097	0,552	0,979	0,146	0,240	0,353	0,401	0,393	0,339	0,190
Овес	0,095	0,354	0,627	0,187	0,237	0,339	0,239	0,164	0,191	0,349
Горчица белая	0,089	1,026	1,783	0,155	0,234	0,312	0,292	0,195	0,189	0,267
Горчица сарептская	0,055	0,896	1,701	0,194	0,298	0,497	0,329	0,294	0,258	0,309

Наиболее подвижной фракцией углерода, отражающей состояние микробного сообщества, является углерод микробной биомассы. В ходе вегетационного эксперимента содержание углерода микробной биомассы определяли методом субстрат-индуцированного дыхания. Результаты представлены на рис. 1.

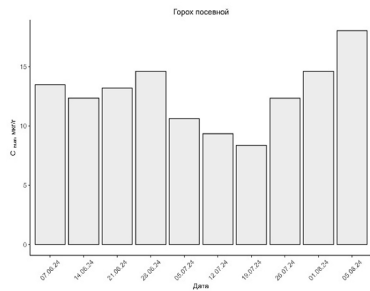
А



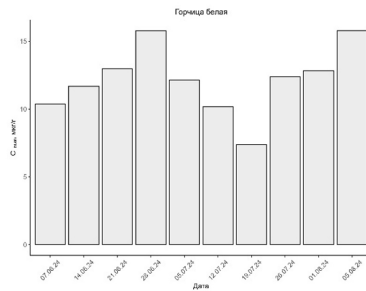
Б



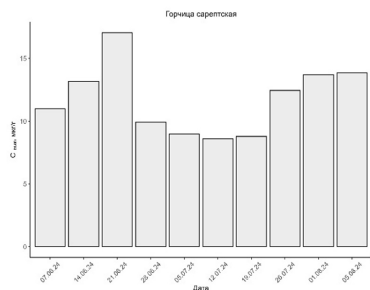
В



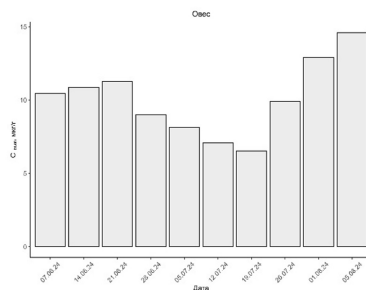
Г



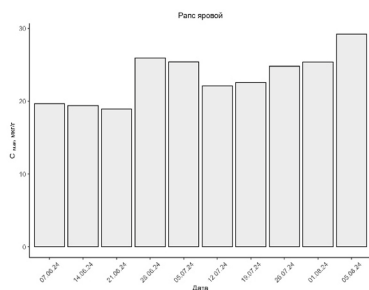
Д



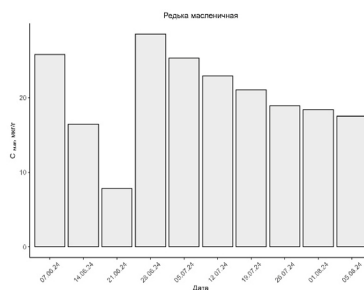
Е



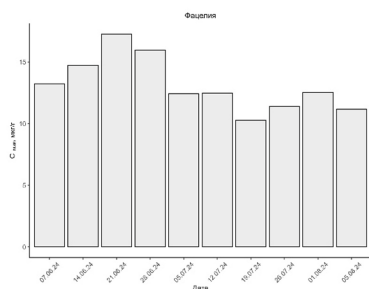
Ж



З



И



К

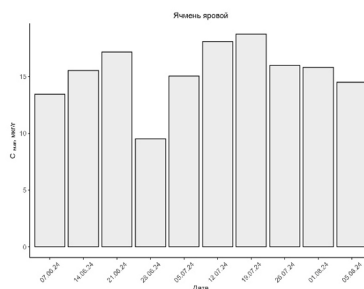


Рис. 1. Изменение содержания углерода микробной биомассы в почве под растениями-сидератами в динамике вегетационного эксперимента (А – вика, Б – горох полевой, В – горох посевной, Г – горчица белая, Д – горчица сарептская, Е – овес, Ж – рапс яровой, З – редька масличная, Ж – фацелия, З – ячмень яровой).

Fig. 1. Changes in the carbon content of microbial biomass in the soil under green manure crops over the course of a growing season experiment (A – vetch, B – field peas, C – garden peas, D – white mustard, E – Sarepta mustard, F – oats, G – spring rapeseed, H – oil radish, I – phacelia, J – spring barley).

Показано, что почвы, на которых проводился эксперимент, характеризуются невысоким содержанием микробной биомассы – от 6,5 до 33,5 мкг С/г. В большинстве вариантов к концу эксперимента отмечено либо значительное увеличение содержания углерода микробной биомассы (горох посевной, горчица белая, овес), либо отсутствие достоверных изменений (горох полевой, горчица сарептская, рапс яровой, редька масличная, фацелия, ячмень яровой) ($p > 0,05$). На последнем этапе (16 августа 2024 г.), через два месяца после заделки сидератов, были отобраны пробы почвы для определения агрохимических показателей (табл. 3).

Таблица 3.

**Агрохимические характеристики почвы после окончания
мелкоделяночного эксперимента**

**Table 3. Agrochemical Characteristics of the Soil Following the Completion
of the Small-Plot Experiment**

Культуры	ЕКО, мг*экв/100 г	pH	ЕС, мкСм/см	С, %	N, %	К, мг/кг	P, мг/кг	Влажность, %	ГМС
Редька масличная	10,20 ±1,20	7,28± 0,20	79,50± 7,5	36,25± 0,34	1,34± 0,02	162± 15	60± 5	8,12± 0,50	песчаный суглинок
Рапс яровой	32,00 ±2,50	7,38± 0,30	79,90± 6,1	37,13± 0,24	1,05± 0,01	143± 11	71± 3	8,33± 0,24	песчаный суглинок
Вика	23,20 ±2,45	7,25± 0,15	58,60± 5,5	40,54± 0,61	1,94± 0,02	144± 12	59± 4	8,95± 0,21	песчаный суглинок
Фацелия	37,00± 4,01	7,20± 0,20	57,80± 6,4	36,22± 0,29	1,68± 0,09	185± 17	66± 5	7,54± 0,50	песчаный суглинок
Горох полевой	24,80± 2,08	7,01± 0,30	36,50± 4,1	35,77± 0,37	1,51± 0,05	149± 21	62± 6	7,01± 0,31	песчаный суглинок
Ячмень яровой	19,40± 1,85	7,14± 0,20	62,50± 5,9	34,27± 0,36	1,86± 0,07	164± 17	59± 5	7,30± 0,34	песчаный суглинок
Горох посевной	15,40± 2,00	7,06± 0,15	38,70± 3,2	35,34± 0,51	1,16± 0,05	131± 10	62± 4	9,85± 0,16	песчаный суглинок
Овес	42,80± 3,78	7,04± 0,30	47,40± 5,0	29,56± 0,29	1,21± 0,06	170± 15	65± 3	9,63± 0,17	песчаный суглинок
Горчица белая	11,20± 1,23	6,90± 0,40	43,20± 2,7	33,94± 0,37	1,39± 0,05	146± 14	62± 6	11,61± 0,05	песчаный суглинок
Горчица сарептская	30,20± 2,56	7,15± 0,30	48,00± 4,6	25,31± 0,25	1,27± 0,02	139± 11	54± 3	8,41± 0,05	песчаный суглинок

К концу мелкоделяночного эксперимента влажность почвы во всех вариантах изменялась в диапазоне 7-11,6 %. Выращивание растений-сидератов с последующей запашкой в почву не привело к изменению pH почвы (6,9-7,4), однако было зафиксировано снижение ёмкости катионного обмена и электропроводности, а также достоверное увеличение содержания в почве органического углерода (на 2–23%), азота (на 3–27%), калия (на 6–42%) и фосфора (на 6–28%) ($p < 0,05$). Ожидается, что наибольшим увеличением азота характеризовались варианты, в которых выращивались растения, относящиеся к семейству Бобовые (вика, горох полевой, горох посевной), способные формировать корневые клубеньки, в которых обитают азотфиксирующие бактерии рода *Rhizobium*, что позволяет им эффективно фиксировать атмосферный азот и обогащать почву.

Кроме агрохимических показателей была оценена эмиссия CO_2 за счет респираторной активности почвенного микробного сообщества (рис. 2) и содержания микробной биомассы (рис.3). Установлено, что к августу почвенная респираторная активность оказалась существенно ниже, чем в вегетационный период, и варьировала в пределах 0,05–0,11 г $\text{C}/\text{M}^2 \cdot \text{ч}$, а микробная биомасса, наоборот, увеличилась и составила от 11 до 17 мкг/г, что, вероятно, связано с поступлением растительных остатков.

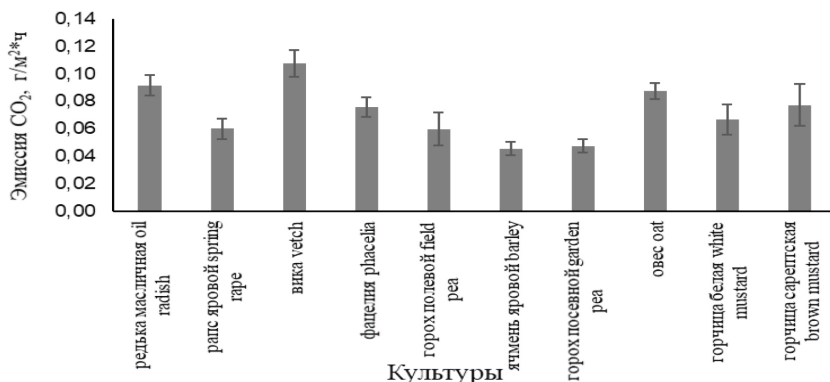


Рис. 2. Эмиссия CO_2 за счет респираторной активности почвы, отобранной 16.08.2024

Fig. 2. CO_2 emissions resulting from soil respiration in a soil sample collected on August 16, 2024

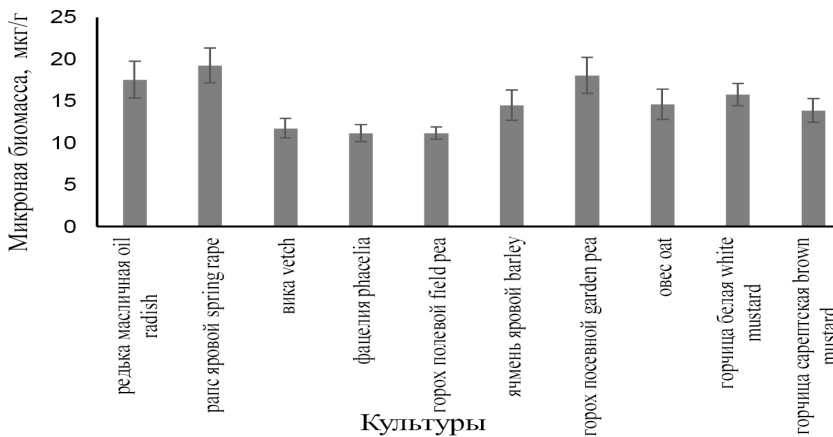


Рис. 3. Содержание микробной биомассы в почве, отобранной 16.08.2024

Fig. 3. Microbial biomass content in soil samples collected on August 16, 2024

На основе полученных экспериментальных данных была предпринята попытка оценить эффективность каждого из растений-сидератов с точки зрения улавливания CO_2 из атмосферы.

Для этого была определена кумулятивная эмиссия CO_2 для почвы под каждым видом растения за период его вегетации, на основании данных о количестве растений на 1 м^2 , биомассе одного растения и содержании в фитомассе углерода, было рассчитано количество углерода, зафиксированное в фитомассе растений, которое впоследствии было запахано в почву.

Показано, что наибольшей кумулятивной эмиссией CO_2 характеризовались почва по викой ($637 \text{ гC/м}^2\cdot\text{ч}$), фацелией ($635 \text{ гC/м}^2\cdot\text{ч}$), горчицей белой ($733 \text{ гC/м}^2\cdot\text{ч}$) и горчицей сарептской ($781 \text{ гC/м}^2\cdot\text{ч}$), наименьшей – по горохом полевым ($343 \text{ гC/м}^2\cdot\text{ч}$) и овсом ($429 \text{ гC/м}^2\cdot\text{ч}$) (рис. 4).

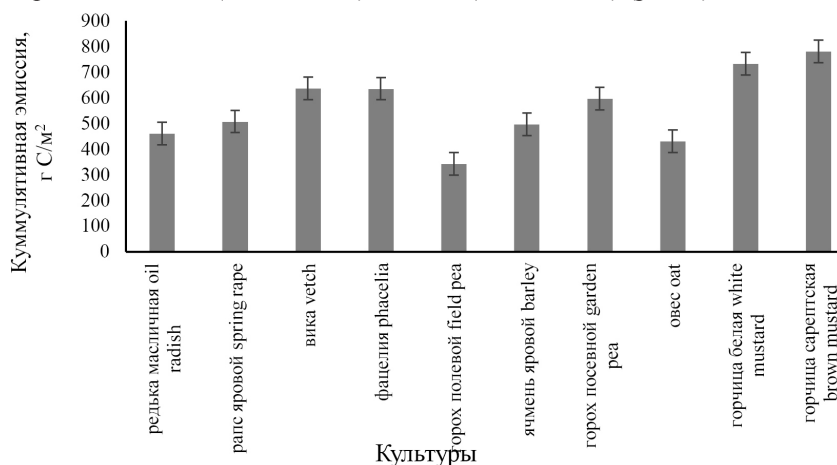


Рис. 4. Кумулятивная эмиссия CO_2 из почвы за период проведения мелкоделяночного эксперимента

Fig. 4. Cumulative CO_2 emissions from the soil during the small-plot experiment

На протяжении всего мелкоделяночного эксперимента горох полевой, горох посевной, ячмень яровой, овес характеризовались высокой фитомассой и большим количеством растений на 1 м^2 , что позволило им зафиксировать максимальное количество углерода в пересчете на гектар: 6606 кгC/га , 10868 кгC/га , 3537 кгC/га , 5716 кгC/га , соответственно (табл. 4). Стоит отметить, что, не смотря на высокую фитомассу, выращивание редьки масличной привело к невысокому улавливанию углерода из атмосферы - 1151

кгС/га за счет меньшего количества растений на единицу площади, что сопоставимо с данными улавливания углерода для горчицы сарептской, горчицы белой и фацелии.

На следующем этапе была оценена разница между улавливанием углерода в форме CO_2 в фитомассе растений-сидератов и эмиссией CO_2 за счет почвенного дыхания в динамике эксперимента (табл. 5). Отрицательные значения показывают преобладание процессов фиксации углерода в фитомассе, что возможно при невысокой респираторной активности почвенного микробного сообщества и высокой фитомассе растений.

Показано, что на протяжении всего вегетационного эксперимента горох полевой характеризовался преобладанием процесса фиксации атмосферного углерода, суммарное количество составило - 3179 кгС/га, что соответствует улавливанию 11656 кг CO_2 /га.

Таким образом, в условиях мелкоделяночного эксперимента показано, что оптимальным растением-сидератом, с точки зрения улавливания парниковых газов, в частности атмосферного CO_2 , является горох полевой, выращивание которого привело к улавливанию 3179 кгС/га, а запашка его фитомассы привела к увеличению содержания С в почве на 1,3 %, N – на 8 %, К – на 14 %, Р – на 42 %.

Таблица 4.

Количество углерода, зафиксированное в фитомассе растений-сидератов в динамике мелкоделяночного эксперимента

Table 4. Amount of carbon sequestered in the plant biomass of green manure crops over the course of a small-plot experiment

Культуры	Количество С, зафиксированного в фитомассе, кг/га									
	07.06.2024	14.06.2024	21.06.2024	28.06.2024	05.07.2024	12.07.2024	19.07.2024	26.07.2024	01.08.2024	05.08.2024
Редька масличная	42	129	242	188	759	1990	3149	1167	1278	1151
Рапс яровой	168	234	157	414	983	1512	1996	3268	3797	0
Вика	0	131	237	357	541	782	1005	715	1138	765
Фацелия	0	40	67	466	543	1021	1383	997	1821	2013
Горох полевой	0	715	1082	2627	3368	5601	7920	5631	8608	6606
Ячмень яровой	204	879	964	1712	1261	1844	2394	2689	3919	3537
Горох посевной	186	1043	1165	4394	5419	10575	9776	10022	13464	10868
Овес	244	1240	1342	2379	1873	3131	2988	2938	4914	5716
Горчица белая	226	393	347	180	201	406	534	749	1144	1357
Горчица сарептская	233	570	581	251	280	503	657	1187	1506	1974

Таблица 5.

**Разница между количеством углерода, зафиксированный
в фитомассе растений-сидератов и эмиссией углерода в форме CO₂
за счет почвенного дыхания**

**Table 5. Difference between the amount of carbon sequestered in the biomass of green manure
plants and carbon emissions in the form of CO₂ due to soil respiration**

Культуры	Разница между эмиссией и улавливанием CO ₂ в фитомассе, кгC/га								
	14.06.2024	21.06.2024	28.06.2024	05.07.2024	12.07.2024	19.07.2024	26.07.2024	01.08.2024	05.08.2024
Редька масличная	297	1128	1953	1749	1017	346	2685	2872	3445
Рапс яровой	269	1569	2252	2021	1934	1935	1066	890	5073
Вика	459	1810	2758	2911	3204	3597	4473	4611	5603
Фацелия	397	1487	1960	2241	2293	2663	3902	3904	4343
Горох полевой	-426	-119	-1134	-1597	-3430	-5335	-2734	-5485	-3179
Ячмень яровой	-368	755	892	1613	1395	1275	1427	657	1428
Горох посевной	-498	666	-1618	-2319	-6976	-5544	-5123	-7950	-4909
Овес	-862	-141	-494	367	-407	222	611	-1068	-1416
Горчица белая	544	2949	4744	5050	5303	5683	5877	5805	5974
Горчица сарептская	229	2400	4322	4706	5151	5691	5684	5829	5837

Заключение

1. Проведен мелкоделяночный эксперимент по выращиванию 10 видов растений-сидератов (редька масличная, рапс яровой, вика, фацелия, горох полевой, ячмень яровой, горох посевной, овес, горчица белая, горчица сарептская) с целью оценки их эффективности в улавливания CO₂ из атмосферы.

2. Максимальный прирост наземной и корневой биомассы (от 9 до 672%) наблюдался на 14–42 сутки эксперимента (с 14 июня по 12 июля 2024 г.) После 49 суток прирост наземной и корневой биомассы не превышал 86%. Наибольшим средним приростом характеризовались фацелия (112%), редька масличная (66%) и горох посевной (73%).

3. Показано, что в зависимости от продолжительности мелкоделяночного эксперимента, растения-сидераты способны фиксировать в своей биомассе от 40 до 13464 кгC/га. Максимальное поглощение CO₂ отмечалось у гороха посевного (10 022–13 464 кг C/га), минимальное – у вики (765 кг C/га). Содержание углерода в фитомассе в начале вегетационного периода было минимальным (24–46%). После 14-х суток эксперимента, содержание углерода в фитомассе растений-сидератов достоверно не изменялось и составило для ячменя ярового (33-51 %), фацелии (34-50 %),

гороха полевого (39-58 %), рапса ярового (35-56 %), вики яровой (40-55 %), горчицы сарептской (39-54 %), горчицы белой (37-54 %), редьки масличной (36-51 %), овса ярового (33-51 %) и гороха посевного (33-51 %) по срокам вегетации в мелкоделяночном эксперименте ($p > 0,05$).

4. Выращивание растений-сидератов на серой лесной почве Поволжья с последующей запашкой увеличило содержание органического углерода (на 2–23%), азота (на 3–27%), калия (на 6–42%) и фосфора (на 6–28%), снизило емкость катионного обмена и электропроводность, но не привело к достоверному изменению pH почвы ($p > 0,05$).

5. Запашка растений-сидератов способствовала увеличению микробной биомассы с 11 до 17 мкг/г, в то время как респираторная активность почвы в конце сезона снизилась до 0,05–0,11 г C/м²*ч из-за низкой влажности почвы и невысокой температуры окружающей среды.

6. Расчет эмиссии и улавливания CO₂ показал, что при выращивании редьки масличной, рапса ярового, вики, фацелии, ячменя ярового, горчицы белой и горчицы сарептской преобладают процессы эмиссии CO₂ в атмосферу, тогда как возделывание гороха полевого, гороха посевного и овса характеризуется преобладанием процессов фиксации CO₂ в фитомассе.

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности, проект № FZSM-2024-0004.

Список литературы

1. Белоусов, А. А., & Белоусова, Е. Н. (2023). Влияние предшественников на скорость продуцирования углекислого газа и содержание углерода микробной биомассы чернозема обыкновенного Красноярской лесостепи. В сборнике: *Современные проблемы почвоведения, агрохимии и экологии* (стр. 24–31). Дальневосточный государственный аграрный университет. <https://doi.org/10.22450/9785964205609>. EDN: <https://elibrary.ru/BCPQFS>
2. ГОСТ 17.4.4.02-2017. (2018). *Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа* (с. 1–9). Стандартинформ.
3. ГОСТ 26423-85. (2011). *Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, pH и плотного остатка водной вытяжки* (с. 1–8). Стандартинформ.

4. ГОСТ 5180-2015. (2016). *Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик* (с. 1–23). Стандартиформ.
5. ГОСТ Р 54650-2011. (2013). *Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО* (с. 1–12). Стандартиформ.
6. Гребенюк, К. В. (2021). Анализ эффективности применения сидератов по системе No-till для северного региона Казахстана. *Научно-технический вестник: технические системы в АПК*, 2(10), 61–69. EDN: <https://elibrary.ru/KWRUBP>
7. Делаев, У. А., Зузиев, У. Г., & Шишхаев, И. Я. (2017). Фиксация атмосферного азота в зависимости от почвенно-климатических условий. В сборнике: *Материалы 6 Ежегодной итоговая конференции профессорско-преподавательского состава чеченского государственного университета* (стр. 209–212). Чеченский государственный университет имени Ахмата Абдулхамидовича Кадырова.
8. Дополнительные материалы. URL: <https://drive.google.com/drive/folders/19Qgtp5pV-JP-LyeZCIGiDjdWn14rZqSx?usp=sharing> (дата обращения: 12.11.2025).
9. Карелин, Д. В., Замолотчиков, Д. Г., & Краев, Г. Н. (2015). *Методическое руководство по анализу эмиссий углерода из почв поселений в тундре*. ЦЭПЛ РАН. 64 с. ISBN: 978-5-9905012-1-8. EDN: <https://elibrary.ru/ZTISOF>
10. Каримова, Е. Р., & Худайгулов, Г. Г. (2018). Изучение влияния биопрепарата на основе клубеньковых бактерий *Rhizobium lupini* на бобовые и злаковые культуры. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: пищевые и биотехнологии*, 6(2), 52–57. <https://doi.org/10.14529/food180207>. EDN: <https://elibrary.ru/XRSXAL>
11. Каюгина, С. М., & Ерёмин, Д. И. (2022). Вариабельность физико-химических свойств тёмно-серых лесных почв Северного Зауралья. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*, 96(4), 13–18. <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2022-96-4-13-18>. EDN: <https://elibrary.ru/ZBNTZC>
12. Кулачкова, С. А., Деревенец, Е. Н., Сорокин, А. С., & Пронина, В. В. (2025). Потоки парниковых газов и секвестрация углерода в агроэкосистемах с сидератами и многолетними травами на карбоновом полигоне «Чашниково». *Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение*, 80(3), 7–21. <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2025-80-3-7-21>. EDN: <https://elibrary.ru/DAOUWZ>
13. Курынцева, П. А., Галиева, Г. Ш., Галицкая, П. Ю., Степанова, Н. Ю., & Селивановская, С. Ю. (2023). Влияние температурного режима на эффективность улавливания CO₂ из атмосферного воздуха и фиксацию его в биомассе гороха посевного (*Pisum sativum*). *Вестник Казанского государственного аграрно-*

- го университета, 4(72), 24–29. <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2023-24-29>. EDN: <https://elibrary.ru/DXBHCK>
14. Лазарев, Н. Н., Кухаренкова, О. В., Авдеев, С. М., Куренкова, Е. М., & Дикарева, С. А. (2022). Симбиотическая фиксация азота многолетними бобовыми травами в луговых агрофитоценозах. *Кормопроизводство*, (2), 20–28. <https://doi.org/10.25685/krm.2022.2.2022.002>. EDN: <https://elibrary.ru/BPHMZE>
 15. Люлин, Д. А., & Арефьев, А. Н. (2023). Изменение содержания подвижных форм фосфора и калия в серой лесной почве под влиянием диатомита и двукратного внесения птичьего помета. В сборнике: *Региональные проблемы устойчивого развития агропромышленного комплекса в условиях цифровой трансформации* (стр. 159–162). Пензенский государственный аграрный университет. EDN: <https://elibrary.ru/USYKXN>
 16. Харитонов, В. В., & Шахов, С. С. (2016). Оценка влияния сидератов на агрохимические показатели почвы. *Агрохимический вестник*, (3), 39–43. EDN: <https://elibrary.ru/XBVKLX>
 17. Чурагулова, З. С., Латыпов, Ф. Ш., & Габделхаков, А. К. (2007). Ход роста дуба черешчатого на темно-серой лесной почве лесостепи Башкирского Предуралья. *Аграрный вестник Урала*, 4(40), 48–51. EDN: <https://elibrary.ru/IJFJVR>
 18. Azarenko, Y., Alekseeva, Z., & Zinenko, S. (2023). Assessment of fallow grey forest soils fertility in sub-taiga zone of Omsk Priirtyshye. *E3S Web of Conferences*, 462, 03042. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346203042>. EDN: <https://elibrary.ru/MTYGNO>
 19. Carbon sequestration practices in eastern Netherlands. URL: https://www.eurofins-agro.com/uploads/Forage/Carbon_sequestration_practices_in_eastern_Netherlands.pdf (дата обращения: 22.10.2025).
 20. Šapek, P., Starke, R., Hofmockel, K. S., Bond-Lamberty, B., & Hess, N. (2019). Apparent temperature sensitivity of soil respiration can result from temperature driven changes in microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 135, 286–293. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.05.016>. EDN: <https://elibrary.ru/SNMXZV>
 21. Common Vetch (*Vicia sativa*): Mississippi State University Extension Service. URL: <https://extension.msstate.edu/agriculture/forages/legumes/common-vetch-vicia-sativa> (дата обращения: 22.10.2025).
 22. Dacal, M., Bradford, M. A., Plaza, C., Maestre, F. T., & García-Palacios, P. (2019). Soil microbial respiration adapts to ambient temperature in global drylands. *Nature Ecology & Evolution*, 3(2), 232. <https://doi.org/10.1038/S41559-018-0770-5>. EDN: <https://elibrary.ru/JSKVRA>
 23. de Vries, F. T., Williams, A., Stringer, F., Willcocks, R., McEwing, R., Langridge, H., & Straathof, A. L. (2019). Changes in root-exudate-induced respiration reveal a

- novel mechanism through which drought affects ecosystem carbon cycling. *The New Phytologist*, 224(1), 132. <https://doi.org/10.1111/NPH.16001>. EDN: <https://elibrary.ru/MBRJXU>
24. Dieleman, W. I. J., Vicca, S., Dijkstra, F. A., Hagedorn, F., Hovenden, M. J., Larsen, K. S., Morgan, J. A., Volder, A., Beier, C., Jeffrey, S. D., King, J., Leuzinger, S., Linder, S., Luo, Y., Oren, R., Angelis, De P., Tingey, D., Hoosbeek, M. R., & Janssens, I. A. (2012). Simple additive effects are rare: a quantitative review of plant biomass and soil process responses to combined manipulations of CO₂ and temperature. *Global Change Biology*, 18(9), 2681–2693. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02745.x>
25. Frasier, I., Noellemeier, E., Fernández, R., & Quiroga, A. (2016). Direct field method for root biomass quantification in agroecosystems. *MethodsX*, 3, 513–519. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2016.08.002>
26. Hamdi, S., Moyano, F., Sall, S., Bernoux, M., & Chevallier, T. (2013). Synthesis analysis of the temperature sensitivity of soil respiration from laboratory studies in relation to incubation methods and soil conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, 58, 115–126. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2012.11.012>. EDN: <https://elibrary.ru/RMGLEJ>
27. ISO 13320:2020. (2020). *Particle size analysis — Laser diffraction methods* (pp. 1–59). International standart.
28. ISO 16072:2002. (2002). *Soil quality — Laboratory methods for determination of microbial soil respiration* (pp. 1–11). International standart.
29. Kayugina, S. M., & Eremin, D. E. (2022). Physicochemical properties of gray forest soils on the eastern outskirts of the Trans-Ural Plateau. *Journal of Siberian Federal University — Biology*, 15(4), 471–490. <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0399>. EDN: <https://elibrary.ru/YOCLPO>
30. Kostin, A. S., Krechetov, P. P., Chernitsova, O. V., & Terskaya, E. V. (2021). Data on physico-chemical characteristics and elemental composition of gray forest soils (Greyzemic Phaeozems) in natural-technogenic landscapes of Moscow brown coal basin. *Data in Brief*, 35, 106817. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.106817>. EDN: <https://elibrary.ru/OHXBLG>
31. Lal, R. (2004). Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science*, 304(5677), 1623–1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>
32. Lloyd, J., & Taylor, J. A. (1994). On the Temperature Dependence of Soil Respiration. *Functional Ecology*, 8(3), 315. <https://doi.org/10.2307/2389824>
33. Meyer, N., Welp, G., & Amelung, W. (2018). The temperature sensitivity (Q10) of soil respiration: controlling factors and spatial prediction at regional scale based on

- environmental soil classes. *Global Biogeochemical Cycles*, 32(2), 306–323. <https://doi.org/10.1002/2017GB005644>. EDN: <https://elibrary.ru/YEQNZZ>
34. Osipova, R. A., Gilyazov, M. Y., Kuzhamberdieva, S. Z., & Abzhalelov, B. B. (2020). Impact of oil contamination of grey forest soil on its nutrient status and plant safety. *BIO Web of Conferences*, 27, 00046. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20202700046>. EDN: <https://elibrary.ru/FSOISI>
35. Poeplau, C., & Don, A. (2015). Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 200, 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.10.024>
36. Rios, J. D.L., Poyda, A., Reinsch, T., Kluß, C., Taube, F., & Loges, R. (2022). Integrating crop-livestock system practices in forage and grain-based rotations in Northern Germany: potentials for soil carbon sequestration. *Agronomy*, 12, 338. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020338>. EDN: <https://elibrary.ru/OIGXSH>
37. Roth, P. J., Lehtndorff, E., Brodowski, S., Bornemann, L., Sanchez-García, L., Gustafsson, Ö., & Amelung, W. (2012). Differentiation of charcoal, soot and diagenetic carbon in soil: Method comparison and perspectives. *Organic Geochemistry*, 46, 66–75. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2012.01.012>. EDN: <https://elibrary.ru/PIAMDL>
38. Vasilyeva, G., Mikhedova, E., Zinnatshina, L., Strijakova, E., Akhmetov, L., Sushkova, S., & Ortega-Calvo, J.-J. (2022). Use of natural sorbents for accelerated bioremediation of grey forest soil contaminated with crude oil. *Science of The Total Environment*, 850, 157952. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157952>. EDN: <https://elibrary.ru/AWFYTX>
39. Vetch. Section 4. Plant growth and physiology. *GRDC Grownotes* (2018). URL: https://grdc.com.au/_data/assets/pdf_file/0034/370699/GrowNote-Vetch-North-04-Physiology.pdf (дата обращения: 29.10.2025).
40. Vetches: planting, pruning & winter care — Plantura. URL: <https://plantura.garden/uk/flowers-perennials/vetches/vetches-overview> (дата обращения: 29.10.2025).
41. Wang, P., Yu, A., Wang, F., Shang, Y., Wang, Y., Yin, B., Liu, Y., & Zhang, D. (2025). Mechanistic insights into farmland soil carbon sequestration: a review of substituting green manure for nitrogen fertilizer. *Agronomy*, 15(5), 1–19. <https://doi.org/10.3390/agronomy15051042>. EDN: <https://elibrary.ru/FZCNVV>
42. Xu, Y., Ding, H., Zhang, G., Li, Z., Guo, Q., Feng, H., Qin, F., Dai, L., & Zhang, Z. (2023). Green manure increases peanut production by shaping the rhizosphere bacterial community and regulating soil metabolites under continuous peanut production systems. *BMC Plant Biology*, 23(1), 69. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04079-0>. EDN: <https://elibrary.ru/XGKHDO>
43. Zhang, J., Liu, S., Liu, C., Wang, H., Luan, J., Liu, X., Guo, X., & Niu, B. (2021). Different mechanisms underlying divergent responses of autotrophic and heterotro-

- phic respiration to long-term throughfall reduction in a warm-temperate oak forest. *Forest Ecosystems*, 8(1), 41. <https://doi.org/10.1186/S40663-021-00321-Z>. EDN: <https://elibrary.ru/IZETLX>
44. Zhang, Z., Li, Y., Williams, R. A., Chen, Y., Peng, R., Liu, X., Qi, Y., & Wang, Z. (2023). Responses of soil respiration and its sensitivities to temperature and precipitation: A meta-analysis. *Ecological Informatics*, 75, 102057. <https://doi.org/10.1016/J.ECOINF.2023.102057>. EDN: <https://elibrary.ru/UWOTCT>
45. Zhao, C., Miao, Y., Yu, C., Zhu, L., Wang, F., Jiang, L., Hui, D., & Wan, S. (2016). Soil microbial community composition and respiration along an experimental precipitation gradient in a semiarid steppe. *Scientific Reports*, 6(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/srep24317>

References

1. Belousov, A. A., & Belousova, E. N. (2023). Influence of predecessors on the rate of carbon dioxide production and microbial biomass carbon content of ordinary chernozem of the Krasnoyarsk forest-steppe. In *Modern problems of soil science, agrochemistry and ecology* (pp. 24–31). Far Eastern State Agrarian University. <https://doi.org/10.22450/9785964205609>. EDN: <https://elibrary.ru/BCPQFS>
2. GOST 17.4.4.02-2017. (2018). *Nature protection. Soils. Methods of sampling and sample preparation for chemical, bacteriological, helminthological analysis* (pp. 1–9). Standartinform.
3. GOST 26423-85. (2011). *Soils. Methods for determination of specific electrical conductivity, pH and dense residue of water extract* (pp. 1–8). Standartinform.
4. GOST 5180-2015. (2016). *Soils. Methods for laboratory determination of physical characteristics* (pp. 1–23). Standartinform.
5. GOST R 54650-2011. (2013). *Soils. Determination of mobile phosphorus and potassium compounds by the Kirsanov method as modified by TsINAO* (pp. 1–12). Standartinform.
6. Grebenyuk, K. V. (2021). Analysis of the effectiveness of using green manure crops under the No-till system for the northern region of Kazakhstan. *Scientific and Technical Bulletin: Technical Systems in Agribusiness*, 2(10), 61–69. EDN: <https://elibrary.ru/KWRUBP>
7. Delaev, U. A., Zuziev, U. G., & Shishkhaev, I. Ya. (2017). Atmospheric nitrogen fixation depending on soil and climatic conditions. In *Proceedings of the 6th Annual Final Conference of the Teaching Staff of the Chechen State University* (pp. 209–212). Chechen State University named after Akhmat Abdulhamidovich Kadyrov.
8. Supplementary materials. URL: <https://drive.google.com/drive/folders/19Qgtp-5pV-JP-LyeZCIGiDjdWn14rZqSx?usp=sharing> (accessed: 12.11.2025).

9. Karelin, D. V., Zamolodchikov, D. G., & Kraev, G. N. (2015). *Methodological guide for the analysis of carbon emissions from settlement soils in the tundra*. Center for Forest Ecology and Production of the Russian Academy of Sciences. 64 p. ISBN: 978-5-9905012-1-8. EDN: <https://elibrary.ru/ZTISOF>
10. Karimova, E. R., & Khudaygulov, G. G. (2018). Study of the effect of a biological preparation based on nodule bacteria *Rhizobium lupini* on leguminous and cereal crops. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and Biotechnology*, 6(2), 52–57. <https://doi.org/10.14529/food180207>. EDN: <https://elibrary.ru/XRSXAL>
11. Kayugina, S. M., & Eremin, D. I. (2022). Variability of physicochemical properties of dark gray forest soils of the Northern Trans-Urals. *Proceedings of the Orenburg State Agrarian University*, 96(4), 13–18. <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2022-96-4-13-18>. EDN: <https://elibrary.ru/ZBNTZC>
12. Kulachkova, S. A., Derevenets, E. N., Sorokin, A. S., & Pronina, V. V. (2025). Greenhouse gas fluxes and carbon sequestration in agroecosystems with green manure crops and perennial grasses at the carbon polygon “Chashnikovo.” *Bulletin of Moscow University. Series 17. Soil Science*, 80(3), 7–21. <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2025-80-3-7-21>. EDN: <https://elibrary.ru/DAOUWZ>
13. Kuryntseva, P. A., Galieva, G. Sh., Galitskaya, P. Yu., Stepanova, N. Yu., & Selivanovskaya, S. Yu. (2023). Influence of temperature regime on the efficiency of CO₂ capture from atmospheric air and its fixation in the biomass of garden pea (*Pisum sativum*). *Bulletin of the Kazan State Agrarian University*, 4(72), 24–29. <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2023-24-29>. EDN: <https://elibrary.ru/DXBHCK>
14. Lazarev, N. N., Kukharenskova, O. V., Avdeev, S. M., Kurenkova, E. M., & Dikareva, S. A. (2022). Symbiotic nitrogen fixation by perennial leguminous grasses in meadow agrophytocenoses. *Fodder Production*, (2), 20–28. <https://doi.org/10.25685/krm.2022.2.2022.002>. EDN: <https://elibrary.ru/BPHMZE>
15. Lyulin, D. A., & Arefiev, A. N. (2023). Changes in the content of mobile forms of phosphorus and potassium in gray forest soil under the influence of diatomite and double application of poultry manure. In *Regional problems of sustainable development of the agro-industrial complex under conditions of digital transformation* (pp. 159–162). Penza State Agrarian University. EDN: <https://elibrary.ru/USYKXN>
16. Kharitonov, V. V., & Shakhov, S. S. (2016). Assessment of the effect of green manure crops on agrochemical soil indicators. *Agrochemical Herald*, (3), 39–43. EDN: <https://elibrary.ru/XBVKLX>
17. Churagulova, Z. S., Latypov, F. Sh., & Gabelkhakov, A. K. (2007). Growth dynamics of pedunculate oak on dark gray forest soil of the forest-steppe of the Bashkir Cis-Urals. *Agrarian Bulletin of the Urals*, 4(40), 48–51. EDN: <https://elibrary.ru/IJFJVR>

18. Azarenko, Y., Alekseeva, Z., & Zinenko, S. (2023). Assessment of fallow grey forest soils fertility in sub-taiga zone of Omsk Priirtyshye. *E3S Web of Conferences*, 462, 03042. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346203042>. EDN: <https://elibrary.ru/MTYGNO>
19. Carbon sequestration practices in eastern Netherlands. URL: https://www.eurof-ins-agro.com/uploads/Forage/Carbon_sequestration_practices_in_eastern_Netherlands.pdf (дата обращения: 22.10.2025).
20. Čapek, P., Starke, R., Hofmockel, K. S., Bond-Lamberty, B., & Hess, N. (2019). Apparent temperature sensitivity of soil respiration can result from temperature driven changes in microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 135, 286–293. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2019.05.016>. EDN: <https://elibrary.ru/SNMXZV>
21. Common Vetch (*Vicia sativa*): Mississippi State University Extension Service. URL: <https://extension.msstate.edu/agriculture/forages/legumes/common-vetch-vicia-sativa> (дата обращения: 22.10.2025).
22. Dacal, M., Bradford, M. A., Plaza, C., Maestre, F. T., & García-Palacios, P. (2019). Soil microbial respiration adapts to ambient temperature in global drylands. *Nature Ecology & Evolution*, 3(2), 232. <https://doi.org/10.1038/S41559-018-0770-5>. EDN: <https://elibrary.ru/JSKVRA>
23. de Vries, F. T., Williams, A., Stringer, F., Willcocks, R., McEwing, R., Langridge, H., & Straathof, A. L. (2019). Changes in root-exudate-induced respiration reveal a novel mechanism through which drought affects ecosystem carbon cycling. *The New Phytologist*, 224(1), 132. <https://doi.org/10.1111/NPH.16001>. EDN: <https://elibrary.ru/MBRJXU>
24. Dieleman, W. I. J., Vicca, S., Dijkstra, F. A., Hagedorn, F., Hovenden, M. J., Larsen, K. S., Morgan, J. A., Volder, A., Beier, C., Jeffrey, S. D., King, J., Leuzinger, S., Linder, S., Luo, Y., Oren, R., Angelis, De P., Tingey, D., Hoosbeek, M. R., & Janssens, I. A. (2012). Simple additive effects are rare: a quantitative review of plant biomass and soil process responses to combined manipulations of CO₂ and temperature. *Global Change Biology*, 18(9), 2681–2693. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02745.x>
25. Frasier, I., Noellemeier, E., Fernández, R., & Quiroga, A. (2016). Direct field method for root biomass quantification in agroecosystems. *MethodsX*, 3, 513–519. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2016.08.002>
26. Hamdi, S., Moyano, F., Sall, S., Bernoux, M., & Chevallier, T. (2013). Synthesis analysis of the temperature sensitivity of soil respiration from laboratory studies in relation to incubation methods and soil conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, 58, 115–126. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2012.11.012>. EDN: <https://elibrary.ru/RMGLEJ>

-
27. ISO 13320:2020. (2020). *Particle size analysis — Laser diffraction methods* (pp. 1–59). International standard.
 28. ISO 16072:2002. (2002). *Soil quality — Laboratory methods for determination of microbial soil respiration* (pp. 1–11). International standard.
 29. Kayugina, S. M., & Eremin, D. E. (2022). Physicochemical properties of gray forest soils on the eastern outskirts of the Trans-Ural Plateau. *Journal of Siberian Federal University — Biology*, 15(4), 471–490. <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0399>. EDN: <https://elibrary.ru/YOCLPO>
 30. Kostin, A. S., Krechetov, P. P., Chernitsova, O. V., & Terskaya, E. V. (2021). Data on physico-chemical characteristics and elemental composition of gray forest soils (Greyzemic Phaeozems) in natural-technogenic landscapes of Moscow brown coal basin. *Data in Brief*, 35, 106817. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.106817>. EDN: <https://elibrary.ru/OHXBLG>
 31. Lal, R. (2004). Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science*, 304(5677), 1623–1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>
 32. Lloyd, J., & Taylor, J. A. (1994). On the Temperature Dependence of Soil Respiration. *Functional Ecology*, 8(3), 315. <https://doi.org/10.2307/2389824>
 33. Meyer, N., Welp, G., & Amelung, W. (2018). The temperature sensitivity (Q10) of soil respiration: controlling factors and spatial prediction at regional scale based on environmental soil classes. *Global Biogeochemical Cycles*, 32(2), 306–323. <https://doi.org/10.1002/2017GB005644>. EDN: <https://elibrary.ru/YEQNZZ>
 34. Osipova, R. A., Gilyazov, M. Y., Kuzhamberdieva, S. Z., & Abzhalelov, B. B. (2020). Impact of oil contamination of grey forest soil on its nutrient status and plant safety. *BIO Web of Conferences*, 27, 00046. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20202700046>. EDN: <https://elibrary.ru/FSOISI>
 35. Poeplau, C., & Don, A. (2015). Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops — A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 200, 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.10.024>
 36. Rios, J. D.L., Poyda, A., Reinsch, T., Kluß, C., Taube, F., & Loges, R. (2022). Integrating crop-livestock system practices in forage and grain-based rotations in Northern Germany: potentials for soil carbon sequestration. *Agronomy*, 12, 338. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020338>. EDN: <https://elibrary.ru/OIGXSH>
 37. Roth, P. J., Lehnendorff, E., Brodowski, S., Bornemann, L., Sanchez-García, L., Gustafsson, Ö., & Amelung, W. (2012). Differentiation of charcoal, soot and diagenetic carbon in soil: Method comparison and perspectives. *Organic Geochemistry*, 46, 66–75. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2012.01.012>. EDN: <https://elibrary.ru/PIAMDL>

38. Vasilyeva, G., Mikhedova, E., Zinnatshina, L., Strijakova, E., Akhmetov, L., Su-shkova, S., & Ortega-Calvo, J.-J. (2022). Use of natural sorbents for accelerated bioremediation of grey forest soil contaminated with crude oil. *Science of The Total Environment*, 850, 157952. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157952>. EDN: <https://elibrary.ru/AWFYTX>
39. Vetch. Section 4. Plant growth and physiology. *GRDC Grownotes* (2018). URL: https://grdc.com.au/__data/assets/pdf_file/0034/370699/GrowNote-Vetch-North-04-Physiology.pdf (дата обращения: 29.10.2025).
40. Vetches: planting, pruning & winter care — Plantura. URL: <https://plantura.garden/uk/flowers-perennials/vetches/vetches-overview> (дата обращения: 29.10.2025).
41. Wang, P., Yu, A., Wang, F., Shang, Y., Wang, Y., Yin, B., Liu, Y., & Zhang, D. (2025). Mechanistic insights into farmland soil carbon sequestration: a review of substituting green manure for nitrogen fertilizer. *Agronomy*, 15(5), 1–19. <https://doi.org/10.3390/agronomy15051042>. EDN: <https://elibrary.ru/FZCNAV>
42. Xu, Y., Ding, H., Zhang, G., Li, Z., Guo, Q., Feng, H., Qin, F., Dai, L., & Zhang, Z. (2023). Green manure increases peanut production by shaping the rhizosphere bacterial community and regulating soil metabolites under continuous peanut production systems. *BMC Plant Biology*, 23(1), 69. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04079-0>. EDN: <https://elibrary.ru/XGKHDO>
43. Zhang, J., Liu, S., Liu, C., Wang, H., Luan, J., Liu, X., Guo, X., & Niu, B. (2021). Different mechanisms underlying divergent responses of autotrophic and heterotrophic respiration to long-term throughfall reduction in a warm-temperate oak forest. *Forest Ecosystems*, 8(1), 41. <https://doi.org/10.1186/S40663-021-00321-Z>. EDN: <https://elibrary.ru/IZETLX>
44. Zhang, Z., Li, Y., Williams, R. A., Chen, Y., Peng, R., Liu, X., Qi, Y., & Wang, Z. (2023). Responses of soil respiration and its sensitivities to temperature and precipitation: A meta-analysis. *Ecological Informatics*, 75, 102057. <https://doi.org/10.1016/J.ECOINF.2023.102057>. EDN: <https://elibrary.ru/UWOTCT>
45. Zhao, C., Miao, Y., Yu, C., Zhu, L., Wang, F., Jiang, L., Hui, D., & Wan, S. (2016). Soil microbial community composition and respiration along an experimental precipitation gradient in a semiarid steppe. *Scientific Reports*, 6(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/srep24317>

ВКЛАД АВТОРОВ

Курынцева П.А., Селивановская С.Ю.: разработка концепции научной работы, определение методологии, написание рукописи.

Камалова А.Р., Красовская С.И., Пронович Н.А.: сбор и анализ данных, проведение исследования, статистическая обработка полученных результатов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Polina A. Kuryntseva, Svetlana Y. Selivanovskaya: development of the concept of scientific work, definition of methodology, writing of manuscript.

Alina R. Kamalova, Sof'ya I. Krasovskaya, Nataliya A. Pronovich: data collection and analysis, conducting research, statistical processing.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Курынцева Полина Александровна, старший научный сотрудник учебно-научной лаборатории Центра агро- и экобиотехнологий, к.б.н.

Институт экологии, биотехнологии и природопользования КФУ
ул. Кремлевская 18к11, г. Казань, 420008, Республика Татарстан, Российская Федерация
polinazwerewa@yandex.ru

Камалова Алина Ринатовна, младший научный сотрудник учебно-научной лаборатории Центра агро- и экобиотехнологий

Институт экологии, биотехнологии и природопользования КФУ
ул. Кремлевская 18к11, г. Казань, 420008, Республика Татарстан, Российская Федерация
akhtjamovaalina07@gmail.com

Красовская Софья Игоревна, студент

Институт экологии, биотехнологии и природопользования КФУ
ул. Кремлевская 18к11, г. Казань, 420008, Республика Татарстан, Российская Федерация
sophia@krasovsky.me

Пронович Наталия Андреевна, научный сотрудник, аспирант

Институт экологии, биотехнологии и природопользования КФУ
ул. Кремлевская 18к11, г. Казань, 420008, Республика Татарстан, Российская Федерация
pronovich.natascha@yandex.ru

Селивановская Светлана Юрьевна, ведущий научный сотрудник учебно-научной лаборатории Центра агро- и экобиотехнологий, д.б.н., профессор

Институт экологии, биотехнологии и природопользования КФУ
ул. Кремлевская 18к11, г. Казань, 420008, Республика Татарстан, Российская Федерация
svetlana.selivanovskaya@kpfu.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Polina A. Kuryntseva, Ph.D. in Biological Sciences, Senior Researcher at the Educational and Research Laboratory of the Center for Agro- and Ecobiotechnology
Institute of Ecology, Biotechnology and Nature Management of Kazan Federal University

18, bldg. 11, Kremlevskaya Str., Kazan, 420008, Republic of Tatarstan, Russian Federation

polinazwerewa@yandex.ru

SPIN-code: 3916-9347

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9274-7077>

ResearcherID: M-3407-2016

Scopus Author ID: 56069925000

Alina R. Kamalova, Junior Researcher at the Educational and Research Laboratory of the Center for Agro- and Ecobiotechnology

Institute of Ecology, Biotechnology and Nature Management of Kazan Federal University

18, bldg. 11, Kremlevskaya Str., Kazan, 420008, Republic of Tatarstan, Russian Federation

akhtjamovaalina07@gmail.com

SPIN-code: 2691-5682

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7857-8756>

ResearcherID: AAO-8646-2020

Scopus Author ID: 56539926700

Sof'ya I. Krasovskaya, student

Institute of Ecology, Biotechnology and Nature Management of Kazan Federal University

18, bldg. 11, Kremlevskaya Str., Kazan, 420008, Republic of Tatarstan, Russian Federation

sophia@krasovsky.me

Nataliya A. Pronovich, Research Associate, Graduate Student

Institute of Ecology, Biotechnology and Nature Management of Kazan Federal University

18, bldg. 11, Kremlevskaya Str., Kazan, 420008, Republic of Tatarstan, Russian Federation

pronovich.natascha@yandex.ru

SPIN-code: 8373-0951

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3630-0055>

ResearcherID: LLK-5183-2024

Scopus Author ID: 58824221600

Svetlana Y. Selivanovskaya, Senior Researcher at the Educational and Research Laboratory of the Center for Agro- and Ecobiotechnology, Doctor of Biological Sciences, Professor

Institute of Ecology, Biotechnology and Nature Management of Kazan Federal University

18, bldg. 11, Kremlevskaya Str., Kazan, 420008, Republic of Tatarstan, Russian Federation

svetlana.selivanovskaya@kpfu.ru

SPIN-code: 4867-6900

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6379-7166>

ResearcherID: L-8851-2013

Scopus Author ID: 6603604965

Поступила 16.11.2025

После рецензирования 17.12.2025

Принята 30.12.2025

Received 16.11.2025

Revised 17.12.2025

Accepted 30.12.2025