

Н.А. Пронович, С.И. Красовская, Л. Александрова, П.А. Курынцева
Казанский (Приволжский) федеральный университет, polinazwerewa@yandex.ru

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВЕГЕТАЦИИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ УЛАВЛИВАНИЯ АТМОСФЕРНОГО УГЛЕРОДА РАСТЕНИЯМИ ВИКИ ЯРОВОЙ (*VICIA SATIVA* L.)

Исследование посвящено изучению влияния температуры вегетации на рост и развитие растений вики яровой, а также на дыхательную активность почвенного микробного сообщества с точки зрения оценки потенциала вики яровой как сидеральной культуры, улавливающей CO_2 из атмосферы. Для этого был проведен лабораторный вегетационный эксперимент длительностью 63 дня при трех температурах вегетации – 20 °С (базовая) и 25 °С, 30 °С (повышенные). Результаты показывают, что максимальная фитомасса была достигнута при температуре вегетации 25 °С, без существенных различий в длине побегов при разных температурах. Однако длина корней увеличилась в 1.9 раза при 30 °С по сравнению с 25 °С и в 1.4 раза по сравнению с 20 °С. Содержание углерода в фитомассе увеличивалось с ростом растений, но не менялось значительно с температурой. Дыхательная активность почвы была выше при повышенных температурах, вероятно, из-за увеличения корневой экссудации. Расчеты показывают, что выращивание вики яровой в течение 63 дней может способствовать улавливанию 119, 166 и 97 кг С/га при 30 °С, 25 °С и 20 °С, соответственно, с наиболее эффективным улавливанием при 25 °С. Полученные результаты свидетельствуют о том, что вика яровая может быть полезной зеленой культурой и поглотителем атмосферного углерода, при этом оптимальный вегетационный период составляет 56 дней, что позволяет максимально улавливать углерод и при этом предотвращать образование семян.

Ключевые слова: парниковые газы; улавливание углерода; вика яровая; почвенная респираторная активность; изменение климата.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2024.3.04.10>

Введение

За последнее столетие увеличение концентрации CO_2 в атмосфере привело к глобальному изменению климата и, как следствие, увеличению частоты и интенсивности экстремальных климатических явлений. Это окажет сильное влияние на цикл углерода в биосфере в целом и в отдельных экосистемах в частности (Frank et al., 2015). Почвы являются вторым крупнейшим пулом углерода после мирового океана, они сохраняют больше углерода, чем атмосфера (в 2 раза) и растительная биомасса (в 3–5 раз) (Wang, 2019), поэтому небольшие изменения в этом резервуаре могут оказать серьезное влияние на концентрацию CO_2 в атмосфере (Reinthal et al., 2021). В последние столетия было зафиксировано увеличение выбросов CO_2 в атмосферу более чем в пять раз при гораздо меньшем увеличении объемов поглощения CO_2 природными средами, что обусловлено, например, максимальной растворимостью CO_2 в воде. Так, поглощение CO_2 почвой возросло только в три раза (Федоров, 2013). Установлено, что общий выброс CO_2 в

атмосферу составляет 6.3 млрд тС/год, из которых почвенные экосистемы поглощают около 23% (Федоров, 2004).

Согласно данным разных источников, на выбросы от сельского хозяйства, лесного хозяйства и землепользования приходится от 13 до 21% мировых выбросов парниковых газов, что соответствует 12 Гт CO_2 -экв (Climate ..., 2020; Nabuurs et al., 2022). Эмиссия парниковых газов в сельском хозяйстве происходит при энтеральной ферментации в животноводстве, при обращении с отходами животноводства, в частности навозами и пометами, при обработке почвы (вспашка, боронование, внесение минеральных и органических удобрений), использовании энергии (электричество, топливо) (Столбовой, 2020; Agricultural ..., 2023; Golasa, 2021; Greenhouse ..., 2024; Soil-based ..., 2021).

Увеличение эмиссии CO_2 из сельскохозяйственных почв при их обработке приводит к еще одному негативному последствию, а именно к снижению содержания почвенного органического вещества и, как следствие, к потере почвенного плодородия. Вспашка приводит к повышению

активности почвенных микроорганизмов – бактерий, высвобождению CO_2 из почвы и поступлению его в приземный слой атмосферы. Кроме того, высвобождается диоксид углерода, накапливающийся в почвенной пористой структуре. Известно, что максимальная доля парниковых газов, содержащихся в почве, сконцентрирована в верхних горизонтах, так как там наблюдаются наиболее активные процессы жизнедеятельности бактерий и микромицет (Александрова и др., 2023). Кроме того установлено, что базальное дыхание зависит от температуры и влажности почвы. Поэтому существует множество исследований, направленных на оценку дыхания почвы при воздействии различных внешних факторов. По результатам таких исследований можно построить глобальные экологические модели изменения углеродного баланса.

На данный момент активно разрабатываются методы, увеличивающие сохранение почвенного углерода, в частности минимальная или нулевая обработка почвы, использование почвопокровных культур, мульчи, использование бобовых вместо чистого пара, использование лесополос и многолетних культур (Mattila et al., 2022; Sources ..., 2019). При этом стоит упомянуть, что большинство данных методов давно известно и применяется, однако получили они широкое освещение именно в контексте углеродсберегающего земледелия. Так, одним из популярных агротехнических приемов является использование сидеральных культур. Под сидерацией понимают особый метод удобрения почвы, подразумевающий высадку специальных растений для борьбы с сорняками, для интенсификации процесса азотфиксации (в случае использования бобовых культур) с последующим запахиванием их биомассы, что обеспечит дополнительное поступление органического вещества в почву (Борисова, 2015). При выращивании сидератов растения запахивают в почву до фазы созревания семян, что позволяет внедрять их как промежуточную культуру в севообороте, например, после озимых. Применение сидерации способствует фиксации атмосферного углерода с последующим возвращением его в почву. Кроме того, происходит улучшение структуры почвы за счет развития корневой системы, снижение ветровой и водной эрозии, подавление сорных растений, обеспечение среды обитания опылителей, повышение разнообразия и активности почвенного микробного сообщества (Lei et al., 2022; Valizadeh et al., 2023).

Целью данной работы было оценить потенциальную возможность использовать вику яровую как сидеральную культуру с целью улавливания и

сохранения в почве атмосферного углерода.

Материалы и методы исследования

В условиях теплицы был проведен вегетационный эксперимент длительностью 63 дня при трех температурных режимах: 20 °C, 25 °C и 30 °C. Условия оставались неизменными на протяжении эксперимента: содержание CO_2 в воздушной среде – от 390 до 420 ppm, режим освещенности – 16 часов световая фаза, 8 часов темнота, интенсивность освещения – от 400 до 500 Вт/м², относительная влажность воздуха – от 50 до 55 %, влажность почвы – от 55 до 60% от общей влагоемкости. Выращивание растений вики яровой (*Vicia sativa* L.) осуществляли в контейнерах размером 30×40×20 см, в которые были помещены 10 кг серой лесной почвы. В начале эксперимента определяли pH почвы, содержание подвижного фосфора ($\text{P}_{\text{подв}}$), подвижного калия ($\text{K}_{\text{подв}}$), общего азота ($\text{N}_{\text{общ}}$), общего ($\text{C}_{\text{общ}}$) и органического углерода ($\text{C}_{\text{орг}}$), гранулометрический состав. Содержание общего углерода и общего азота в почвенных и растительных образцах определяли методом сухого сжигания согласно DIN/ISO 13878 на анализаторе Elementar Vario MAX Cube (Germany) (Борисова, 2015), подвижные формы фосфора и калия в почве были определены методом спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на анализаторе ICPE 9000 Shimadzu (Japan). Экстракцию подвижных форм макроэлементов осуществляли с использованием ацетатно-аммонийного буферного раствора с pH 4.8 согласно ГОСТ Р ИСО 27085-2012. Гранулометрический состав определяли с использованием лазерного дифрактометра Blue Wave Microtrack (USA) согласно ISO 13320:2020. Исходная почва характеризовалась следующими показателями: pH 6.7±0.2, $\text{C}_{\text{общ}}$ 4.14±0.11%, $\text{C}_{\text{орг}}$ 3.41±0.12 %, $\text{N}_{\text{общ}}$ 0.21±0.01%, $\text{P}_{\text{подв}}$ 0.03±0.01 мг/кг, $\text{K}_{\text{подв}}$ 0.07±0.01 мг/кг, гранулометрический состав по Ферре – пылевато-глинистый суглинок (глина 30.5%, пыль 75.4%, песок 0%).

На 14-е, 21-е и 40-е сутки определяли морфометрические показатели растений (длина корня и побега, биомасса корня и побега), а также содержание углерода в фитомассе методом сухого сжигания (Борисова, 2015). Суммарное содержание углерода в фитомассе определяли на основании данных сухой биомассы растений и содержания в ней $\text{C}_{\text{общ}}$.

Эмиссию CO_2 из почвы оценивали по уровню респираторной активности почвы согласно ISO 16072: 2002 с окончанием на газовом хроматографе Nexis GC-2030 Shimadzu (Япония). Далее

была определена кумулятивная эмиссия CO_2 из почвы с растениями.

Для расчета баланса углерода для всех температурных режимов была установлена разница между количеством углерода, уловленного фитомассой растений вики яровой за 40 суток вегетации, и количеством углерода, выделенным из почвы за счет ее респираторной активности.

Все измерения проводились не менее трех раз. Статистическую обработку полученных результатов выполняли с использованием Microsoft Excel. Все данные, представленные на рисунках и в таблице, содержат средние значения и стандартные ошибки. Достоверность различий оценивали с использованием критерия Фишера при $\alpha=0.05$ в пакете Statistica 13.0.

Результаты и их обсуждение

Эффективность фиксации CO_2 из атмосферы в углерод фитомассы при разных температурных режимах зависит от интенсивности физиологических процессов, в частности, процессов фотосинтеза и дыхания. Косвенными критериями, позволяющими оценить влияние температуры на развитие растения, являются морфометрические характеристики, такие как длина корня, длина побега, длина стебля, биомасса (рис. 1).

Показано, что с 7-х по 14-е сутки эксперимента прирост биомассы корня и побега вики яровой по всем показателям составил в среднем 84–143% и 115–162%, соответственно. При 30 °C прирост биомассы корня был максимальным на 28–49 сутки эксперимента. Начиная с 35-х суток скорость прироста биомассы растений уменьшалась, достигнув минимальных значений на 56–63 сутки эксперимента. Установлено, что прирост биомассы не менее чем в 2 раза превышает изменения остальных морфометрических характеристик. Это согласуется с формой растения – невысокое, кустистое. На 63 сутки эксперимента биомасса растений, выращенных при 30 °C, составила 3.1 ± 1.2 г, при 25 °C 4.1 ± 0.9 г, при 20 °C 2.4 ± 1.6 г. Таким образом, максимальная фитомасса установлена при температуре вегетации 25 °C. Длины корня и побега в конце вегетационного эксперимента составили 8.8–16.7 см и 58.0–62.0 см, соответственно. Не установлено достоверного различия ($p < 0.05$) в длинах побегов растений, выращенных при разных температурах, при этом выращивание растений при повышенной температуре 30 °C привело к увеличению длины корня в 1.9 раз по сравнению с температурой вегетации 25 °C и в 1.4 раза по сравнению с температурой вегетации 20 °C. В качестве сидеральных культур и фиксаторов CO_2 предпочтительно использовать

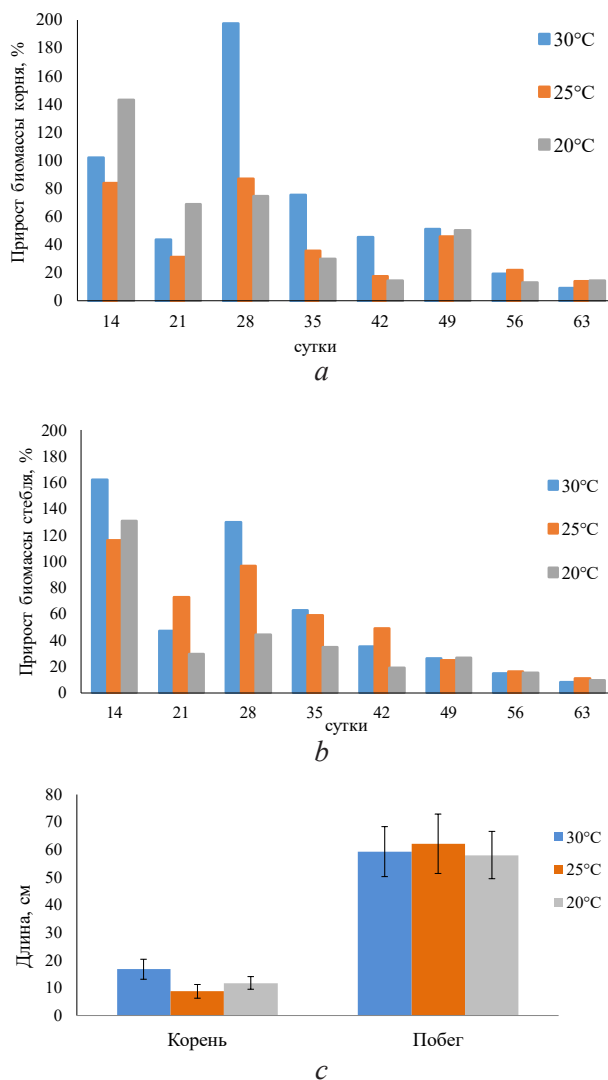


Рис. 1. Изменение морфометрических показателей растений вики яровой, выращиваемой при разных температурах

a – изменение прироста биомассы корня, b – изменение прироста биомассы стебля, c – длины корня и побега на 63-и сутки эксперимента

Fig. 1. Changes in morphometric parameters of spring vetch plants grown at different temperatures
a – change in root biomass growth, b – change in stem biomass growth, c – root and shoot length on the 63rd day of the experiment

растения, которые обладают высоким приростом фитомассы в начале вегетации.

Увеличение биомассы растений происходит за счет процесса фотосинтеза, в ходе которого из атмосферного углерода (диоксида углерода) синтезируются органические молекулы. Соответственно, углерод биомассы растений является углеродом, уловленным из атмосферы. Показано, что содержание углерода в фитомассе вики яровой увеличивается со временем вегетации растения (рис. 2), при этом достоверных различий в количестве углерода в зависимости от температуры вегетации не установлено ($p < 0.05$). Наименьшим

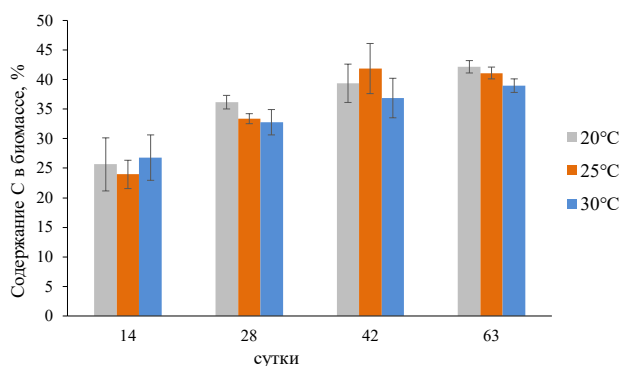


Рис. 2. Содержание углерода в биомассе вики яровой, выращиваемой в разных температурных условиях

Fig. 2. Carbon content in the biomass of spring vetch grown under different temperature conditions

содержанием углерода с 28 по 63 сутки характеризовались растения, которые выращивались при повышенной температуре – 30°C.

Корни растений, особенно бобовых, выделяют экссудаты, которые в свою очередь могут стимулировать активность микробного сообщества ризосферы. С одной стороны, ризосфера представлена достаточно тонким (2...3 мм) слоем почвы, с другой стороны экссудация корней может стимулировать гетеротрофное дыхание в ризосферной почве, на долю которого приходится до 20% от общего дыхания почвы. Для этого была оценена респираторная активность почвы в динамике вегетационного эксперимента (рис. 3). Показано, что базальная респираторная активность почвы при вегетации вики яровой изменялась в диапазоне 0.16–0.23 мгСО₂/г·ч при 30°C, 0.14–0.21 мгСО₂/г·ч при 25°C, 0.13–0.19 мгСО₂/г·ч при 20°C. В целом, базальная респираторная активность почвенного микробного сообщества всегда выше при повышенных температурах, однако достоверные различия установлены только на 21, 28 и 35

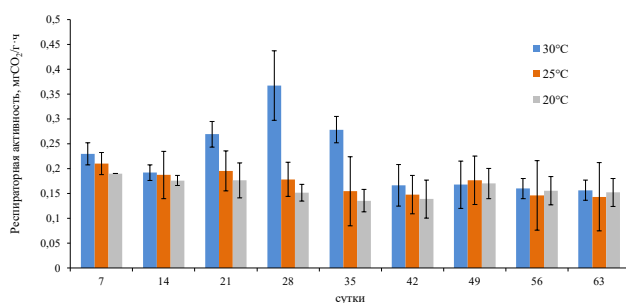


Рис. 3. Респираторная активность почвенного микробного сообщества при выращивании вики яровой в разных температурных режимах

Fig. 3. Respiratory activity of the soil microbial community during the cultivation of spring vetch in different temperature regimes

сутки ($p < 0.05$). Вероятно, в данный период идет активное развитие корневой системы вики яровой, активное выделение экссудатов, что в совокупности с повышенной температурой приводит к увеличению активности почвенных гетеротрофных микроорганизмов. При этом стоит отметить, что значения респираторной активности являются типичными для серой лесной почвы, на которой произрастали растения (Иващенко и др., 2014; Мамаева и др., 2012; Blagodatskaya et al., 2006) и выше значений полученных в лабораторных экспериментах при ингибировании почвы без растений (Вершинин и др., 2021), что подтверждает стимулирующее действие почвенных растительных экссудатов. Так же стоит отметить, что данные по кумулятивной эмиссии СО₂ за вегетационный сезон, рассчитанные на основе респираторной активности почвенного микробного сообщества, соотносятся с данными других исследователей (Larionova et al., 1998).

На следующем этапе были рассчитаны эмиссия углерода за счет респираторной активности и объем его улавливания в фитомассе растений. Разница в данных показателях позволяет оценить эффективность использования вики яровой с точки зрения улавливания углерода из атмосферы с последующим внесением его в почву (рис. 4). Однако стоит отметить, что при расчете баланса углерода было допущено упрощение, и анализ улавливания СО₂ из атмосферы базировался только на данных углерода, уловленного в фитомассе. При этом известно, что в растительных организмах одновременно происходят фотосинтез, дыхание, выделение экссудатов, отмирание частей корня/побега и т.д. Показано, что выращивание вики яровой в течение 63 суток позволяет уловить 119, 166 и 97 кг С/га при температурах вегетации 30, 25 и 20°C, соответственно. Наиболее эффективно использование вики яровой в качестве сидеральной культуры и возможного поглотителя атмосферного углерода (СО₂) при 25°C, так данная температура характеризовалась невысокой эмиссией СО₂ за счет респираторной активности и максимальной биомассой растений. Увеличение температуры на 5°C приводит к снижению эффективности в 1.4 раза, а снижение на 5°C – к снижению эффективности в 1.7 раза. Еще одним важным параметром, который необходимо установить при разработке технологий улавливания атмосферного углерода в фитомассе растений, является минимальный достаточный срок вегетации. Полученные результаты показывают, что вегетация растений вики яровой в течение 56 суток является оптимальной, что в свою очередь приведет к высокому улавливанию углерода и не-

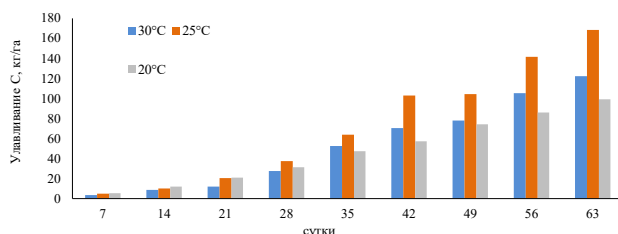


Рис. 4. Улавливание углерода при выращивании вики яровой в разных температурных режимах
Fig. 4. Carbon capture during the cultivation of spring vetch in different temperature regimes

допущению формирования семян.

Закключение

Результаты данного исследования показывают, что оптимальная температура для выращивания яровой вики в качестве сидерата и потенциального поглотителя углерода составляет 25 °C. При этой температуре растения демонстрируют максимальный рост фитомассы и улавливание углерода, в то время как выбросы CO₂ от дыхания почвы сводятся к минимуму. Повышение или понижение температуры на 5 °C приводит к значительному снижению эффективности, что подчеркивает необходимость подбора оптимальных сидеральных культур для разных климатических зон. Было установлено, что оптимальный вегетационный период составляет 56 дней, что обеспечивает высокий уровень улавливания углерода и не позволяет растениям сформировать семена. Полученные результаты могут в дальнейшем быть использованы для разработки эффективных технологий улавливания атмосферного углерода и увеличения почвенного плодородия.

Благодарность: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 23-26-00275.

Список литературы

1. Александрова Л., Гордеев А.С., Бабичук В.Р., Курнцева П.А., Селивановская С.Ю. Оценка запасов углерода в почве на территории карбонового полигона «Карбон – Поволжье» // Российский журнал прикладной экологии. 2023. С. 12–21. <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.4.12.21>.
2. Борисова Е. Е. Применение сидератов в мире // Вестник НГИЭИ. 2015. №1. С. 24–33.
3. Вершинин А.А., Утомбаева А.А., Петров А.М., Богданова О.А., Князев И.В. Влияние аммофоски на дыхательную активность нефтезагрязненной серой лесной почвы // Экология родного края: проблемы и пути их решения / Материалы XVI Всероссийской научно-практической с международным участием конференции. Киров: ВятГУ, 2021. С. 110–114.
4. ГОСТ Р ИСО 27085–2012. Корма для животных. Определение содержания кальция, натрия, фосфора, магния, калия, железа, цинка, меди, марганца, кобальта, молибдена, мышьяка, свинца и кадмия методом ИСП–АЭС.

5. Иващенко К.В., Ананьева Н.Д., Васенев В.И., Кудряков В.Н., Валентини Р. Биомасса и дыхательная активность почвенных микроорганизмов в антропогенно-измененных экосистемах (Московская область) // Почвоведение. 2014. №9. С. doi: 10.7868/S0032180X14090056.
6. Мамаева Е.В., Галицкая П.Ю., Шафигуллин Б.У., Селивановская С.Ю. Агрохимические и биологические характеристики склоновых почв // Ученые записки Казанского университета. Естественные науки. 2012. Т. 154. С. 148–157.
7. Столбовой В.С. Регенеративное земледелие и смягчение изменений климата // Земледелие и растениеводство. 2020. С. 19–26. doi: 10.24411/0235-2451-2020-10703.
8. Федоров Б.Г. Выбросы углекислого газа: углеродный баланс России // Проблемы прогнозирования. 2013. №1. С. 63–78.
9. Федоров Б.Г. Экономико-экологические аспекты выбросов углекислого газа в атмосферу // Проблемы прогнозирования. 2004. №5. С. 86–101.
10. Agricultural greenhouse gas emissions 101. Resources for the future // URL: <https://www.rff.org/publications/explainers/agricultural-greenhouse-gas-emissions-101/> (дата обращения: 15.02.2024).
11. Blagodatskaya E., Pampura T., Myakshina T., Dem'yanova E. The Influence of lead on the respiration and biomass of microorganisms in grey forest soil in a long-term field experiment // Soil biology. 2006. №5. P. 498–506.
12. Climate change and land. Intergovernmental panel on climate change // URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/02/SPM_Updated-Jan20.pdf (дата обращения: 07.07.2023).
13. Frank D., Reichstein M., Bahn M., Thonicke K., Frank D. Effects of climate extremes on the terrestrial carbon cycle: Concepts, processes and potential future impacts // Global change biology. 2015. №8. P. 2861–2880. doi: 10.1111/gcb.12916.
14. Gołasa P., Wysokiński M., Biełkowska-Gołasa W., Gradziuk P., Golonko M., Gradziuk B., Siedlecka A., Arcadiusz G. Sources of greenhouse gas emissions in agriculture, with particular emphasis on emissions from energy used // Energies. 2021. № 14. P. 1–20.
15. Greenhouse gas emissions: agriculture. Agriculture and horticulture development board // URL: <https://ahdb.org.uk/knowledge-library/greenhouse-gas-emissions-agriculture> (дата обращения: 15.02.2024).
16. ISO 13320:2009. Particle size analysis – Laser diffraction methods.
17. ISO 16072. Soil quality – Laboratory methods for determination of microbial respiration.
18. Larionova A. A., Yermolayev A. M., Blagodatsky S., Rozanova L. N., Yevdokimov I., Orlinsky D.B. Soil respiration and carbon balance of grey forest soils as affected by land use // Biology and fertility of soils. 1998. №27. P. 251–257. doi: 10.1007/s003740050429.
19. Lei B., Wang J., Yao H. Ecological and environmental benefits of planting green manure in paddy fields // Agriculture. 2022. №13. P. 1–15. doi: 10.3390/agriculture12020223.
20. Mattila T.J., Hagelberg E., Söderlund S., Joona J. How farmers approach soil carbon sequestration? Lessons learned from 105 carbon-farming plans // Soil and tillage research. 2022. Vol. 215. P. 1–9. doi: 10.1016/j.still.2021.105204.
21. Nabuurs G.-J., Mrabet R., Abu Hatab A., Bustamante M., Clark H., Havlik P., House J.I., Mbow C., Ninan K.N., Popp A., Roe S., Sohngen B., Towprayoon S., Steinfeld J.P. Agriculture, forestry and other land uses (AFOLU) // Climate Change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the Sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2022. P. 747–860. doi: 10.1017/9781009157926.009.

22. Reinthaler D., Harris E., Pötsch E. M., Herndl M., Richter A. Responses of grassland soil CO₂ production and fluxes to drought are shifted in a warmer climate under elevated CO₂ // *Soil biology and biochemistry*. 2021. №163. P. 1–11. doi: 10.1016/j.soilbio.2021.108436.
 23. Soil-based carbon sequestration. MIT climate portal / URL: <https://climate.mit.edu/explainers/soil-based-carbon-sequestration> (дата обращения: 16.03.2024).
 24. Sources of agricultural greenhouse gases. The livestock and poultry environmental learning community // <https://lpelc.org/sources-of-agricultural-greenhouse-gases/> (дата обращения: 15.02.2024).
 25. Valizadeh N., Jalilian S., Hallaj Z., Bayat S.E. Hayati D., Bazrafkan K. Kianmehr N., Akbari M. Encouraging adoption of green manure technology to produce clean rice product // *Scientific Reports*. 2023. №13. P. 1–15. doi: 10.1038/s41598-023-35964-1.
 26. Wang Z. Estimating of terrestrial carbon storage and its internal carbon exchange under equilibrium state // *Ecological modelling*. 2019. №401. P. 94–110. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2019.03.008.
- ### References
1. Alexandrova L., Gordeev A.S., Babichuk V.R., Kuryntseva P.A., Selivanovskaya S.Yu. Otsenka zapasov ugleroda v pochve na territorii karbonovogo poligona «Karbon – Povolzh'ye» [The estimation of carbon content in soil on the territory of the carbon polygon «Carbon – Povolzh'ye»] // *Rossiiskij zhurnal prikladnoj ekologii* [Russian journal of applied ecology]. 2023. P. 12–21. <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.4.12.21>
 2. Borisova Y.Y. Primeneniye sideratov v mire [The use of green manures in the world] // *Bulletin NGIEI*. 2015. No 1. P. 24–33.
 3. Vershinin A.A., Utombayeva A.A., Petrov A.M., Bogdanova O.A., Knyazev I.V. Vliyaniye ammofoski na dykhatel'nyuyu aktivnost' neftezagryaznennoy seroy lesnoy pochvy [The effect of ammophosca on the respiratory activity of oil-contaminated grey forest soil] // *Ekologiya rodnogo kraia: problemy i puti ih resheniya* [Ecology of the native land: problems and ways to solve them]. Kirov, 2021. P. 110–114.
 4. GOST R ISO 27085–2012. Korma dlya zhivotnykh. Opredeleniye soderzhaniya caltsiya, natriya, phosphora, magniya, kaliya, zheleza, tsynka, medi, margantsa, cobal'ta, molibdena, mysh'yaka, svintsa i kadmiya metodom ISP–AES [Animal feeding stuffs. Determination of calcium, sodium, phosphorus, magnesium, potassium, iron, zinc, copper, manganese, cobalt, molybdenum, arsenic, lead and cadmium by ICP–AES].
 5. Ivaschenko K.V., Anan'yeva N.D., Vasen'yev V.I., Kud'yarov V.N., Valentini R. Biomassa i dykhatel'naya aktivnost' pochvennykh mikroorganizmov v antropogennno-izmenyennykh ekosistemakh (Moskovskaya oblast') [Biomass and respiratory activity of soil microorganisms in anthropogenic-modified ecosystems (Moscow region)] // *Eurasian soil science*. 2014. No 9. P. 1077–1088. doi: 10.7868/S0032180X14090056.
 6. Mamayeva Ye.V., Galitskaya P.Yu., Shafigullin B.U., Selivanovskaya S.Yu. Agrokhimicheskiye i biologicheskiye kharakteristiki sklonovykh pochv [Agrochemical and Biological Properties of Hillslope Soils] // *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Estestvennye nauki* [Proceedings of Kazan university. Natural sciences Series]. 2012. Vol. 154. P. 148–157.
 7. Stolbovoy V.S. Regenerativnoye zemledelie i smagcheniye izmeneniy klimata [Regenerative agriculture and mitigation of climate change] // *Zemledelie i rastenievodstvo* [Crop farming and plant growing]. 2020. P. 19–26. doi: 10.24411/0235-2451-2020-10703.
 8. Fyedorov B.G. Vybrosov uglekislogo gaza: uglerodnyi balans Rossii [Carbon dioxide emissions: Russia's carbon balance] // *Studies on Russian economic development*. 2013. No 1. P. 63–78.
 9. Fyedorov B.G. Ekonomiko–ecologicheskiye aspekty vybrosov uglekislogo gaza v atmosferu [Economic and ecological aspects of carbon dioxide emissions into the atmosphere] // *Studies on Russian economic development*. 2004. No 5. P. 86–101.
 10. Agricultural greenhouse gas emissions 101. Resources for the future // URL: <https://www.rff.org/publications/explainers/agricultural-greenhouse-gas-emissions-101/> (accessed: 15.02.2024).
 11. Blagodatskaya E., Pampura T., Myakshina T., Dem'yanova E. The Influence of lead on the respiration and biomass of microorganisms in grey forest soil in a long-term field experiment // *Soil biology*. 2006. No 5. P. 498–506.
 12. Climate change and land. Intergovernmental panel on climate change // https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/02/SPM_Updated-Jan20.pdf (дата обращения: 07.07.2023).
 13. Frank D., Reichstein M., Bahn M., Thonicke K., Frank D. Effects of climate extremes on the terrestrial carbon cycle: Concepts, processes and potential future impacts // *Global change biology*. 2015. No 8. P. 2861–2880. doi: 10.1111/gcb.12916.
 14. Gołasa P., Wysokiński M., Bieńkowska-Gołasa W., Gradziuk P., Golonko M., Gradziuk B., Siedlecka A., Arcadiusz G. Sources of greenhouse gas emissions in agriculture, with particular emphasis on emissions from energy used // *Energies*. 2021. No 14. P. 1–20.
 15. Greenhouse gas emissions: agriculture. Agriculture and horticulture development board // URL: <https://ahdb.org.uk/knowledge-library/greenhouse-gas-emissions-agriculture> (accessed: 15.02.2024).
 16. ISO 13320:2009. Particle size analysis – Laser diffraction methods.
 17. ISO 16072. Soil quality – Laboratory methods for determination of microbial respiration.
 18. Larionova A. A., Yermolayev A. M., Blagodatsky S., Rozanova L. N., Yevdokimov I., Orlinsky D.B. Soil respiration and carbon balance of gray forest soils as affected by land use // *Biology and fertility of soils*. 1998. No 27. P. 251–257. doi: 10.1007/s003740050429.
 19. Lei B., Wang J., Yao H. Ecological and environmental benefits of planting green manure in paddy fields // *Agriculture*. 2022. No 13. P. 1–15. doi: 10.3390/agriculture12020223.
 20. Mattila T. J., Hagelberg E., Söderlund S., Joona J. How farmers approach soil carbon sequestration? Lessons learned from 105 carbon-farming plans // *Soil and tillage research*. 2022. Vol. 215. P. 1–9. doi: 10.1016/j.still.2021.105204.
 21. Nabuurs G.-J., Mrabet R., Abu Hatab A., Bustamante M., Clark H., Havlík P., House J.I., Mbow C., Ninan K.N., Popp A., Roe S., Sohngen B., Towprayoon S., Steinfeld J.P. Agriculture, forestry and other land uses (AFOLU) // *Climate Change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the Sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge, New York: Cambridge university press, 2022. P. 747–860. doi: 10.1017/9781009157926.009.
 22. Reinthaler D., Harris E., Pötsch E. M., Herndl M., Richter A. Responses of grassland soil CO₂ production and fluxes to drought are shifted in a warmer climate under elevated CO₂ // *Soil biology and biochemistry*. 2021. No 163. P. 1–11. doi: 10.1016/j.soilbio.2021.108436.
 23. Soil-Based carbon sequestration. MIT climate portal / URL: <https://climate.mit.edu/explainers/soil-based-carbon-sequestration> (accessed: 16.03.2024).
 24. Sources of agricultural greenhouse gases. The livestock

and poultry environmental learning community // <https://lpecl.org/sources-of-agricultural-greenhouse-gases/> (accessed: 15.02.2024).

25. Valizadeh N., Jalilian S., Hallaj Z., Bayat S. E., Hayati D., Bazrafkan K. Kianmehr N., Akbari M. Encouraging adoption of green manure technology to produce clean rice product // Scientific reports. 2023. No 13. P. 1–15. doi: 10.1038/s41598-023-35964-1.

26. Wang Z. Estimating of terrestrial carbon storage and its internal carbon exchange under equilibrium state // Ecological modelling. 2019. No 401. P. 94–110. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2019.03.008.

Pronovich N.A., Krasovskaya S.I., Aleksandrova L., Kuryntseva P.A. **Assessment of vegetation temperature impact on the efficiency of atmospheric carbon capture in spring vetch (*Vicia sativa L.*)**.

This article is devoted to the study of the influence of vegetation temperature on the growth and development of spring vetch plants, as well as on the respiratory activity of the soil microbial community from the point of view of assessing the potential of spring vetch as a green manure that captures CO₂ from the atmosphere. For this purpose, a vegetation

experiment lasting 63 days was conducted at three vegetation temperatures – 20 °C (base) and 25 °C, 30 °C (elevated). The results showed that the maximum phytomass was achieved at a vegetation temperature of 25 °C, without significant differences in the length of shoots at different temperatures. However, the length of the roots increased 1.9 times at 30 °C compared to 25 °C and 1.4 times compared to 20 °C. The carbon content in the phytomass increased with plant growth, but did not change significantly with temperature. The respiratory activity of the soil was higher at elevated temperatures, probably due to an increase in root exudation. Calculations showed that growing spring vetch for 63 days could contribute to the capture of 119, 166 and 97 kg C/ha at 30 °C, 25 °C and 20 °C, respectively, with the most effective capture at 25 °C. We assume that spring vetch can be a useful green crop and an absorber of atmospheric carbon, while the optimal growing season is 56 days, which makes it possible to capture carbon as much as possible and at the same time prevent the formation of seeds.

Keywords: greenhouse gases; carbon capture; spring vetch; soil respiratory activity; climate change.

Раскрытие информации о конфликте интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / Disclosure of conflict of interest information: The author claims no conflict of interest

Информация о статье / Information about the article

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 28.08.2024

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 03.09.2024

Принята к публикации / Accepted for publication: 10.09.2024

Сведения об авторах

Пронович Наталья Андреевна, научный сотрудник, аспирант, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, E-mail: pronovich.natascha@yandex.ru.

Красовская Софья Игоревна, студент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, E-mail: sophia@krasovsky.me.

Александрова Людмила, студент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, E-mail: LD Aleksandrova@stud.kpfu.ru.

Курынцева Полина Александровна, кандидат биологических наук, доцент, доцент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, E-mail: polinazwerewa@yandex.ru.

Information about the authors

Nataliya A. Pronovich, researcher, postgraduate, Kazan Federal University, 18, Kremlyovskaya st., Kazan, 420008, Russia, E-mail: pronovich.natascha@yandex.ru.

Sofia I. Krasovskaya, student, Kazan Federal University, 18, Kremlyovskaya st., Kazan, 420008, Russia, E-mail: sophia@krasovsky.me.

Lyudmila Aleksandrova, student, Kazan Federal University, 18, Kremlyovskaya st., Kazan, 420008, Russia, E-mail: LD Aleksandrova@stud.kpfu.ru.

Polina A. Kuryntseva, Ph.D. in Biology, Associate Professor, Kazan Federal University, 18, Kremlyovskaya st., Kazan, 420008, Russia, E-mail: polinazwerewa@yandex.ru.

