

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ
УЛАВЛИВАНИЯ CO₂ ИЗ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА И ФИКСАЦИЮ ЕГО
В БИОМАССЕ ГОРОХА ПОСЕВНОГО (*PISUMSATIVUM*)****П. А. Курынцева, Г. Ш. Галиева, П. Ю. Галицкая,
Н. Ю. Степанова, С. Ю. Селивановская**

Реферат. Широко известны негативные последствия глобального изменения климата, в частности, приводящие к снижению почвенного плодородия и уменьшению эффективности растениеводства. Постоянно разрабатываются подходы экологизации земледелия. К их числу можно отнести использование гороха посевного (*Pisum sativum*) в качестве почвопокровной культуры для снижения эмиссии CO₂ на открытой пашне посредством фиксации С в фитомассе, которая в дальнейшем будет запахана в почву. Цель исследований – оценить потенциал гороха посевного в качестве сидеральной культуры с точки зрения эффективности улавливания С из атмосферы при разных температурах. Для оценки эффективности такого подхода в условиях оранжереи при разных температурных режимах (20°C, 25°C, 30°C) был проведен вегетационный эксперимент с почвой, на которой выращивали растения гороха посевного, и почвой без растений (имитация пара). В ходе эксперимента оценивали показатели, характеризующие процессы накопления углерода (фитомассу, содержание углерода в ней) и эмиссии CO₂ из почвы (интенсивность респираторной активности почвы). С увеличением температуры с 20°C до 30°C происходит снижение фиксации С в фитомассе растений и уменьшение эмиссии CO₂ вследствие ослабления респираторной активности почвенного микробного сообщества. Увеличение температуры вегетации приводит к снижению прироста длины стебля и фитомассы гороха посевного. Респираторная активность почвы занятой горохом посевным на 14-е и 21-е сутки была выше, чем в варианте с паром. Максимальные величины этого показателя для всех температурных режимов были отмечены на 14-е сутки. С увеличением температуры в вариантах, имитирующих пар, происходило повышение эмиссии CO₂ вследствие роста респираторной активности почвы, для почвы под горохом посевным установлена обратная закономерность. Максимальная в опыте фиксация С (585 кг С/га) при выращивании гороха посевного отмечена для температурного режима 20°C.

Ключевые слова: изменение климата, улавливание углекислого газа, сидераты, баланс углерода в почве, горох посевной (*Pisum sativum*).

Введение. Глобальное изменение климата вызвано увеличением концентрации в атмосфере парниковых газов вследствие антропогенной деятельности. На глобальную продовольственную систему приходится 21...37% ежегодных выбросов [1], то есть она занимает 3-е место по объему эмиссии таких парниковых газов, как двуокись углерода (CO₂), метан (CH₄) и закись азота (N₂O) [2, 3].

Источниками парниковых газов в сельском хозяйстве, прежде всего, служат CH₄, образующийся в животноводстве (биологическая деструкция органических отходов сельского хозяйства методами компостирования или анаэробного сбраживания, процессы ферментации в желудочно-кишечном тракте) и N₂O, образующийся при производстве и применении азотных удобрений. Важно учитывать высокую степень влияния этих газов на глобальное изменение климата. Согласно Распоряжению Правительства Российской Федерации № 2979-р потенциал влияния на глобальное потепление, установленный для метана и закиси азота, в Российской Федерации составляет 25 и 298 единиц – эквивалентов диоксида углерода [4].

Однако наиболее крупнотоннажным парниковым газом выступает диоксид углерода, образующийся от сжигания топлива при использовании спецтехники и транспортировке готовой продукции, семян, удобрений, при разложении органических отходов и

растительных остатков, а также в процессе дыхания почвенной микрофлоры. Почвенное дыхание, то есть эмиссия CO₂, образующегося в результате жизнедеятельности почвенных организмов, преимущественно бактерий и микромицетов, служит одним из основных потоков в глобальном углеродном цикле, ежегодно выбрасывая в атмосферу в 10 раз больше CO₂, чем сжигание ископаемого топлива. Из-за молекулярного веса и ограниченной диффузионной способности почвы молекулы CO₂ обычно концентрируются в почве и приземном слое воздуха [5]. Вспашка приводит к выделению молекул CO₂, накопленных в почве, а также к повышению активности почвенного микробного сообщества, что в свою очередь также способствует увеличению респираторной активности и эмиссии CO₂. Кроме того, почвенное базальное дыхание коррелирует с влажностью и температурой почвы. Поэтому большинство исследований направлены на то, чтобы понять, как дыхание почвы реагирует на изменение погоды и условий землепользования для включения этих обратных связей в глобальные климатические модели. Быстрое изменение климата приведет к негативным последствиям в области продовольственной безопасности и социальной сферы, поэтому актуальна разработка способов снижения эмиссии и улавливания парниковых газов [6]. Одно из направлений решения этой задачи – снижение эмиссии парниковых газов и

фиксация С в биомассе растений, в частности, посредством исключения периода нахождения пашни без растительного покрова, например, после уборки озимых путем использования почвопокровных культур. В современных условиях в качестве почвоулучшителей широко используют сидераты [7]. Срок их вегетации ограничен фазой образования семян и поэтому не должен превышает 40...60 суток. Важное условие выращивания сидератов – накопление достаточного количества биомассы, которая в последствии будет легко подвергнута деструкции почвенным микробным сообществом, поэтому они могут быть посеяны после озимых культур – в июле-августе. В таком случае поверхность почвы после вспашки будет закрыта растительным покровом и одновременно удастся избежать неконтролируемого развития сорняков. Кроме того, выращивание почвопокровных сидеральных культур дает возможность улавливать диоксид углерода из атмосферы и фиксировать С в фитомассе, которая в последующем будет заделана в почву, что приведет к увеличению содержания органического углерода. Одновременно возделывание сидеральных культур приводит к улучшению качества почвы, снижению вымывания питательных элементов, в частности N, уменьшению плотности, оптимизации агрегатного состава почвы, увеличению разнообразия почвенного микробиома [7, 8].

В последние годы четко сформулированы требования к сидеральным культурам: интенсивный пророст фитомассы, большая площадь листьев (для покрытия поверхности почвы), способность к накоплению питательных элементов, низкая себестоимость выращивания, широкий экологический оптимум по отношению к освещенности, температуре, влажности и качеству почвы, высокая устойчивость к болезням и вредителям, а также пестицидам, низкое содержание лигнина, узкое соотношение С:N, высокая скорость биodeградации растительных остатков, возможность фиксации атмосферного азота. Поэтому в качестве сидератов часто используют растения виды семейства Бобовые, например, люпин, клевер белый и розовый, вика яровая и озимая, донник белый, соя, фасоль, кормовые бобы, горох посевной [9].

Цель исследований – определить возможность снижения эмиссии диоксида углерода в условиях меняющегося климата при выращивании гороха посевного в качестве сидеральной культуры для снижения последствий изменения климата и сохранения высокого содержания органического вещества в почве.

Условия, материалы и методы. Для оценки потоков углерода в условиях оранжереи был поставлен вегетационный эксперимент при трех температурных режимах: 20°C, 25°C и 30 °C. При его проведении поддерживали следующие стабильные условия: содержание CO₂ в атмосфере – 390...420 ppm; режим освещенности – 16 ч свет, 8 ч темнота;

интенсивность освещения – 400...500 Вт/м²; относительная влажность воздуха – 50...55%; влажность почвы – 55...60% от общей влагоемкости. Вегетационный эксперимент проводили в течение 40 суток с использованием серой лесной почва: без растений (имитация пара) и с выращиванием гороха посевного (*Pisum sativum*). Ее насыпали по 10 кг в контейнеры размером 30 см × 40 см × 20 см, повторность – трехкратная. В исходной почве определяли pH, содержание подвижного фосфора (P_{подв}), подвижного калия (K_{подв}), общего азота (N_{общ}), общего (C_{общ}) и органического углерода (C_{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) [10], подвижные формы фосфора и калия – методом спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на анализаторе ICPE 9000 Shimadzu (Japan). Экстракцию подвижных форм макро- и микроэлементов осуществляли с использованием ацетатно-аммонийного буферного раствора с pH 4,8 согласно ГОСТ Р ИСО 27085-2012 [11]. Гранулометрический состав определяли с использованием лазерного дифрактометра Blue Wave Microtrack (USA) согласно ISO 13320:2020 [12, 13]. Содержание C_{общ} в исходной почве составляло – 14±0,11%, C_{орг} – 3,41±0,12%, N_{общ} – 0,21±0,01%, P_{подв} – 0,03±0,01%, K_{подв} – 0,07±0,01%, pH 6,7±0,24, гранулометрический состав по Ферре – пылевато-глинистый суглинок (глина – 24,57%, пыль – 75,43%).

На 14-е, 21-е и 40-е сутки определяли морфометрические показатели растений (длина корня, длина стебля, биомасса), на 40-е сутки – содержание хлорофилла с использованием портативного хлорофилломера Force-A (Dualox) [14].

Эмиссию CO₂ из почвы оценивали по уровню респираторной активности почвы, согласно ISO 16072:2002 [15] с окончанием на газовом хроматографе Nexis GC-2030 Shimadzu (Япония).

Баланс углерода определяли для всех температурных режимов, как разницу между количеством углерода, уловленного фитомассой растений гороха посевного за 40 суток вегетации, и количеством углерода, выделенным из почвы вследствие увеличения ее респираторной активности, по сравнению с вариантом, имитирующим пар. Для этого рассчитывали кумулятивную респираторную активность за 40 суток инкубации почвы. Суммарное содержание углерода в фитомассе определяли на основании данных о сухой биомассе растений и содержании в ней C_{общ}. Эффективность гороха посевного в качестве уловителя CO₂ оценивали на основе баланса углерода.

Все измерения проводили не менее трех раз. Статистическую обработку результатов выполняли с использованием Microsoft Office

Excel 2010 (США). 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 (Statsoft, США).

Результаты и обсуждение. На основании морфометрических параметров растений можно определить эффективность фиксации CO_2 из атмосферы в С фитомассы. Растения, которые предполагается использовать в качестве сидеральных культур и фиксаторов CO_2 должны характеризоваться высоким проростом

фитомассы в начале вегетации. На 14-е сутки рассматриваемые параметры растений, выращенных при разных температурах, находились на одном уровне (рис. 1). Начиная с 21-х суток выявлены достоверные различия ($p < 0,05$) по длине корней и стеблей растений при разных температурах, а на 40-е сутки и по биомассе. Максимальное в опыте увеличение длины корней и стеблей отмечали у растений, вегетация которых проходила при 20°C , минимальное – при 30°C . Достоверных различий между биомассой растений, выращенных при 25°C и 30°C не установлено.

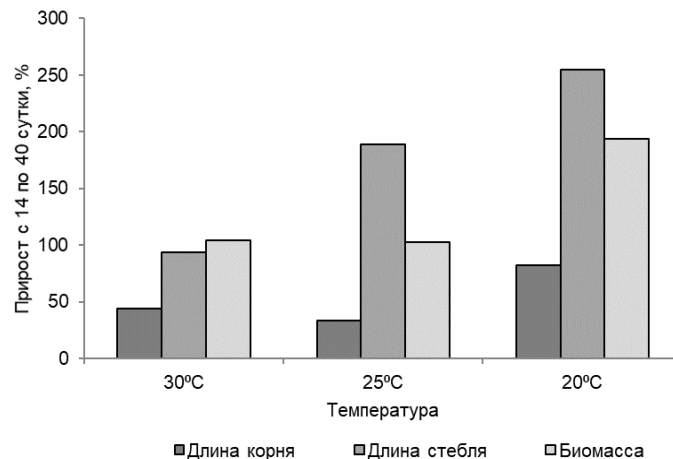


Рис. 1 – Изменение морфометрических показателей растений гороха, выращиваемого при разных температурах

С 14-х по 40-е сутки сильнее всего увеличивалась высота наземной части растений при 25°C и 20°C – в 2,9 и 3,5 раз соответственно. Наименьший в опыте прирост установлен для длины корня – в 1,3...1,8 раза при всех температурах.

Физиологическое состояние растений характеризует содержание хлорофилла

в листьях. При низкой величине этого показателя процесс фотосинтеза идет менее интенсивно, что сопровождается снижением эффективности улавливания CO_2 из атмосферного воздуха. В нашем исследовании содержание хлорофилла достоверно не зависело ни от продолжительности эксперимента, ни от температуры (рис. 2).

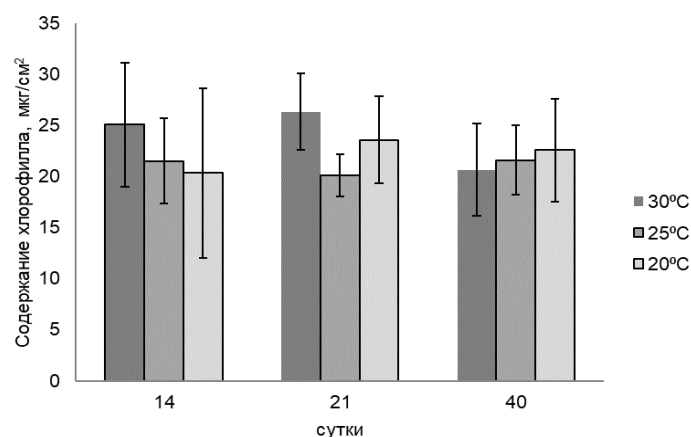


Рис. 2 – Содержание хлорофилла в листьях гороха, выращиваемого в разных температурных условиях

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 [16], с другой, экссудация корней может стимулировать гетеротрофное дыхание ризосферной почвы, на долю которого приходится до 20% от общего дыхания почвы [17]. Респираторная

активность на 14-е и 21-е сутки под растениями гороха была в 1,2...3,8 раза выше, чем в вариантах, имитирующих пар, при этом максимальная в опыте респираторная активность установлена на 14-е сутки вегетационного эксперимента (рис. 3). К 40-м суткам под горохом она снижалась и либо находилась

на уровне обычной почвы (25°C и 20°C), либо была достоверно ($p < 0,05$) ниже (30°C). Для вариантов, имитирующих пар, установлена прямая корреляция между температурой окружающей среды и респираторной активностью ($r = 0,85$), для почвы под горохом – обратная ($r = 0,87$).

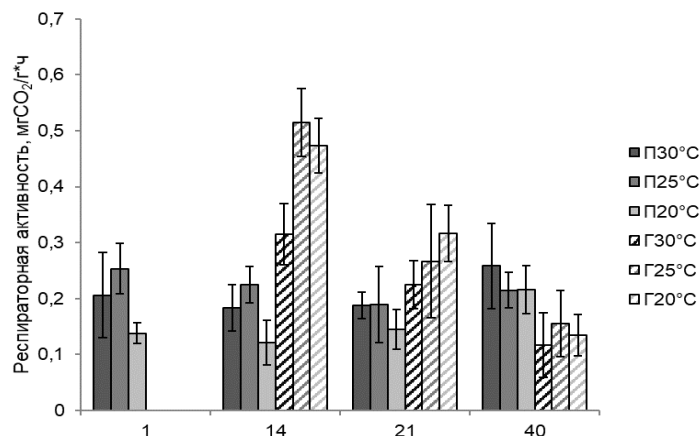


Рис. 3 – Респираторная активность парующейся почвы (П) и почвы под горохом (Г) при разных температурных условиях

Известно, что растения в процессе фотосинтеза переводят неорганический углерод в органический – в молекулы глюкозы. Однако существуют и процессы, в которых углеродсодержащие молекулы выводятся из растения, например, дыхание, выделение корневых экссудатов и др. При расчете баланса углерода было допущено упрощение и улавливание CO_2 из атмосферы анализировали только на основе данных об углероде, зафиксированном в фитомассе (табл.). Не установлено достоверных связей ($p > 0,05$) между содержанием углерода в фитомассе растений гороха и температурой вегетации. Выявлена обратная корреляция между температурой вегетации и биомассой растений ($r = -0,78$), то есть общее количество С в биомассе растений гороха посевного снижалось с увеличением температуры вегетации. Максимальное в опыте улавливание С установлено при 20°C – 656 ± 73 кг С/га, минимальное – при 30°C – 302 ± 86 кг С/га. Посев гороха приводит к увеличению респираторной активности почвы вследствие активации почвенного микробного сообщества корневыми выделениями. При температуре 30°C разница

между куммулятивной респираторной активностью почвы под растениями гороха и вариантом с имитацией пара была минимальной – 6 кг С/га. Снижение температуры вегетации растений привело к увеличению эмиссии CO_2 в результате почвенного дыхания. При 25 °C она составляла 48 кг С/га, при 20°C – 71 кг С/га. При температуре 20°C увеличение эмиссии вследствие почвенного дыхания достигало 11% от общей фиксации углерода в фитомассе. Баланс углерода для всех изученных температурных режимов был положительным, это означает, что фиксация углерода в фитомассе преобладает над эмиссией CO_2 в результате почвенного дыхания. При увеличении температуры до 25°C эффективность улавливания CO_2 из атмосферы и накопление С в фитомассе растений гороха посевного снижается на 25%, до 30°C – на 49%. Несмотря на увеличение респираторной активности в почве под горохом, по сравнению с таковой в варианте, имитирующем пар, при температурном режиме 20°C, высокий прирост фитомассы обеспечил фиксацию 585 кг С/га из атмосферного CO_2 .

Таблица – Оценка потенциала гороха посевного как уловителя CO_2

Температурный режим	Содержание С в сухой биомассе растений гороха, %	Улавливание С в биомассе растений гороха, кг/га	Увеличение эмиссии CO_2 посредством почвенного дыхания при вегетации гороха, кг С/га	Баланс С, кг/га
30 °C	$44,04 \pm 3,29$	302 ± 86	$6,0 \pm 0,4$	296
25 °C	$43,70 \pm 3,44$	488 ± 120	$48,1 \pm 1,1$	440
20 °C	$46,68 \pm 1,41$	656 ± 73	$71,0 \pm 4,3$	585

Выводы. Выращивание гороха посевного в качестве почвопокровной, сидеральной культуры способствует снижению эмиссии CO_2 из почвы, находящейся в состоянии

открытой пашни. Увеличение температуры вегетации с 20°C до 30°C приводит к снижению фиксации углерода в фитомассе растений, одновременно происходит

снижение эмиссии CO₂, обусловленной респираторной активностью почвенного микробного сообщества.

Анализ баланса углерода, рассчитанного на основании показателей эмиссии CO₂, связанной с респираторной активностью почвы и фиксацией углерода в фитомассе растений

гороха посевного, показал, что максимальное улавливание C происходит при 20°C и составляет 585 кг C/га.

Сведения об источнике финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 23-26-00275.

Литература

1. Food Security / C.Mbow, C.Rosenzweig, L.G.Barioni, et al. Germany, Potsdam: Institut fur Klimafolgenforschung, 2019.550с.
2. Agriculture's Contribution to Climate Change and Role in Mitigation Is Distinct From Predominantly Fossil CO₂-Emitting Sectors / J.Lynch, M.Cain, D.Frame, et al. // Front. Sustain. Food Syst. 2021. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fsufs.2020.518039/full> (дата обращения: 05.09.2023).
3. Сафин, Р. И. Современное состояние и перспективы развития углеродного земледелия в Республике Татарстан / Р. И. Сафин, А. Р. Валиев, В. А. Колесар // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2021. – Т. 16, № 3(63). – С. 7-13.
4. Об утверждении перечня парниковых газов, в отношении которых осуществляется государственный учет выбросов парниковых газов и ведение кадастра парниковых газов: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 22.10.2021 № 2979-р // Рос. газ. 2021. 7 июля.
5. Phillips C.L., Nickerson N. Soil Respiration Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences: моногр. Denmark: Elsevier, 2015. 20 p.
6. Jayawardena D.M., Heckathorn S.A., Boldt J.K. A meta-analysis of the combined effects of elevated carbon dioxide and chronic warming on plant %N, protein content and N-uptake rate // AoB Plants. 2021 URL: <https://academic.oup.com/aobpla/article/13/4/plab031/6284301> (дата обращения: 05.09.2023).
7. Encouraging adoption of green manure technology to produce clean rice product / N.Valizadeh, S.Jalilian, Z.Hallaj, et al. // Sci. Rep. 2023. URL: <http://www.voennoepravo.ru/node/2149> (дата обращения: 05.09.2023).
8. The potential of green manure to increase soil carbon sequestration and reduce the yield-scaled carbon footprint of rice production in southern China / S.Gao, S.Li, G.Zhou, et al. // J. Integr. Agric. 2022. Vol. 22.No. 7. P. 2233–2247.
9. Saini P.K., Yadav R.K., Yadav G.C. Green manures in agriculture: A review // BhartiyaKrishiAnusandhan-Patrika. 2019. Vol. 34. No.1. P. 1–10. URL: <https://arccjournals.com/journal/bhartiya-krishi-anusandhan-patrika/BKAP142> (дата обращения: 05.09.2023).
10. Differentiation of charcoal, soot and diagenetic carbon in soil: Method comparison and perspectives / P.J.Roth, E.Lehndorff, S.Brodowski, et al. // Org. Geochem. Pergamon. 2012. Vol. 46. P. 66–75.
11. ГОСТ Р ИСО 27085-2012 Корма для животных. Определения содержания кальция, натрия, фосфора, магния, калия, железа, цинка, меди, марганца, кобальта, молибдена, мышьяка, свинца и кадмия методом ИСП-АЭС (Переиздание). М.: Стандартинформ, 2012. 28с.
12. ISO 13320:2009 Particle size analysis – Laser diffraction methods ISO Standards, 2009.51p.
13. Is the Laser Diffraction Method Reliable for Soil Particle Size Distribution Analysis? / Y.Yang, L.Wang, O.Wendroth, et al. // Soil Sci. Soc. Am. J. 2019. Vol. 83.No. 2. P. 276–287.
14. A new optical leaf-clip meter for simultaneous non-destructive assessment of leaf chlorophyll and epidermal flavonoids / Z.G.Cerovic, G.Masdoumier, N. BenGhozlen, et al. // Physiol. Plant. 2012. Vol. 146.No. 3. P. 251–260.
15. ISO 16072. Soil quality-Laboratory methods for determination of microbial respiration ISO Standards, 2002.19p.
16. Ларинова Ю.С., Волобуева О.Г. Современные представления об эколого-физиологической роли корневых экссудатов растений // Зернобобовые и крупяные культуры. 2021. № 4(40). С. 94–101.
17. Relationship between fine-root exudation and respiration of two Quercus species in a Japanese temperate forest / L.Sun, M.Ata, Y.Kominami, et al. // Tree Physiol. 2017. Vol. 37.No. 8. P. 1011–1020.

Сведения об авторах:

Курынцева Полина Александровна – кандидат биологических наук, доцент кафедры прикладной экологии, e-mail: polinazwerewa@yandex.ru

Галиева Гульназ Шайхиновна – научный сотрудник учебно-научной лаборатории Центра агро- и экобиотехнологий, e-mail: goolnaz@rambler.ru

Галицкая Полина Юрьевна – доктор биологических наук, доцент, главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории OpenLabБиоконтроль, e-mail: gpolina33@yandex.ru

Степанова Надежда Юльевна – доктор биологических наук, профессор кафедры прикладной экологии, e-mail: step090660@yandex.ru

Селивановская Светлана Юрьевна – доктор биологических наук, профессор, директор Института экологии и природопользования, e-mail: Svetlana.Selivanovskaya@kpfu.ru
Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

INFLUENCE OF TEMPERATURE CONDITIONS ON THE EFFICIENCY OF CO₂ CAPTURE FROM ATMOSPHERE AND ITS FIXATION IN THE BIOMASS OF PEAS (*PISUMSATIVUM*) P.A. Kuryntseva, G. Sh. Galieva, P. Yu. Galitskaya, N. Yu. Stepanova, S. Yu. Selivanovskaya

Abstract. The negative consequences of global climate change are widely known, in particular leading to a decrease in soil fertility and a decrease in the efficiency of crop production. In connection with the above, approaches to greening agriculture are constantly being developed, which should lead to improved soil quality, preservation and increase in the amount of nutrients in it, as well as a reduction in greenhouse gas emissions. One of these approaches may be the use of peas as ground cover plants to reduce CO₂ emissions from bulk soil, due to the fixation of C in phytomass, which will later be plowed into the soil. To evaluate the effectiveness of this approach, a vegetation experiment was conducted in

a greenhouse under different temperature conditions (20°C, 25°C, 30°C) with soil on which pea plants (*Pisumsativum*) were grown and soil without plants (imitation of open arable land). In the dynamics of the experiment, indicators characterizing the process of carbon accumulation in phytomass were assessed, namely the rate of increase in plant phytomass and chlorophyll content in leaves, as well as the process characterizing CO₂ emission from the soil - an increase in the intensity of soil basal respiratory activity under peas over that of bulk soil. Next, the carbon balance was calculated for each temperature regime. It was shown that with an increase in temperature from 20°C to 30°C, there is a decrease in C fixation in plant phytomass and a decrease in CO₂ emission due to the respiratory activity of the soil microbial community. The maximum fixation of C when growing peas (*Pisumsativum*) was established for a temperature regime of 20°C and amounted to 585 kg C/ha.

Key words: climate change, carbon dioxide capturing, green manure, carbon balance in soil, pea (*Pisum sativum*).

References

1. Mbow C, Rosenzweig C, Barioni LG. Food security. Germany, Potsdam: Institut für Klimafolgenforschung. 2019; 550 p.
2. Lynch J, Cain M, Frame D. Agriculture's contribution to climate change and role in mitigation is distinct from predominantly Fossil CO₂-Emitting Sectors. [Internet]. Front. Sustain. FoodSyst. 2021. [cited 2023, September 05]. Available from: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fsufs.2020.518039/full>.
3. Safin RI, Valiev AR, Kolesar VA. [Current state and prospects of carbon farming development in the Republic of Tatarstan]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2021; Vol.16. 3(63). 7-13 p.
4. [On approval of the list of greenhouse gases in respect of which state accounting of greenhouse gas emissions and maintenance of the greenhouse gas cadastre is carried out]. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 22.10.2021 № 2979-r. Ros. gaz. 2021. 7 iyulya.
5. Phillips CL, Nickerson N. Soil respiration reference module in earth systems and environmental sciences: monograph. Denmark: Elsevier. 2015; 20 p.
6. Jayawardena DM, Heckathorn SA, Boldt JK. A meta-analysis of the combined effects of elevated carbon dioxide and chronic warming on plant %N, protein content and N-uptake rate. [Internet]. AoB Plants. 2021 [cited 2023, September 05]. Available from: <https://academic.oup.com/aobpla/article/13/4/plab031/6284301>.
7. Valizadeh N, Jalilian S, Hallaj Z. Encouraging adoption of green manure technology to produce clean rice product. [Internet]. Sci. Rep. 2023. [cited 2023, September 05]. Available from: <http://www.voennoepravo.ru/node/2149>.
8. Gao S, Li S, Zhou G. The potential of green manure to increase soil carbon sequestration and reduce the yield-scaled carbon footprint of rice production in southern China. [Internet]. J. Integr. Agric. 2022; Vol.22. 7. 2233-2247 p.
9. Saini PK, Yadav RK, Yadav GC. Green manures in agriculture: a review. [Internet]. BhartiyaKrishiAnusandhan-Patrika. 2019; Vol.34. 1. 1-10 p. [cited 2023, September 05]. Available from: <https://arccjournals.com/journal/bhartiya-krishi-anusandhan-patrika/BKAP142>.
10. Roth PJ, Lehdorff E, Brodowski S. Differentiation of charcoal, soot and diagenetic carbon in soil: Method comparison and perspectives. Org. Geochem. Pergamon. 2012; Vol.46. 66-75 p.
11. GOST R ISO 27085-2012 Korma dlya zhivotnykh. Opredeleniya soderzhaniya kal'tsiya, natriya, fosfora, magniya, kaliya, zheleza, tsinka, medi, margantsa, kobal'ta, molibdena, mysh'yaka, svintsa i kadmiya metodom ISP-AES. [Animal feed. Determination of the content of calcium, sodium, phosphorus, magnesium, potassium, iron, zinc, copper, manganese, cobalt, molybdenum, arsenic, lead and cadmium by ICP-AES]. Moscow: Standartinform. 2012; 28 p.
12. ISO 13320: 2009 Particle size analysis – Laser diffraction methods ISO Standards. 2009; 51p.
13. Yang Y, Wang L, Wendroth O. Is the laser diffraction method reliable for soil particle size distribution analysis? Soil Sci. Soc. Am. J. 2019; Vol.83. 2. 276-287 p.
14. Cerovic ZG, Masdoumier G, BenGhozlen N. A new optical leaf-clip meter for simultaneous non-destructive assessment of leaf chlorophyll and epidermal flavonoids. Physiol. Plant. 2012; Vol.146. 3. 251-260 p.
15. ISO 16072. Soil quality-Laboratory methods for determination of microbial respiration ISO Standards, 2002; 19 p.
16. Larikova YuS, Volobueva OG. [Modern ideas about the ecological and physiological role of plant root exudates]. Zernobobovye i krupyanye kul'tury. 2021; 4(40). 94-101 p.
17. Sun L, Ataka M, Kominami Y. Relationship between fine-root exudation and respiration of two Quercus species in a Japanese temperate forest. Tree Physiol. 2017; Vol.37. 8. 1011-1020 p.

Authors:

Kuryntseva Polina Aleksandrovna – Ph.D. of Biological Sciences, Associate Professor of Applied Ecology Department, e-mail: polinazwerewa@yandex.ru
 Galieva Gulnaz Shaykhinurovna – research scientist, Educational and Scientific Laboratory Center for Agricultural and Ecobiotechnologies, e-mail: goolnaz@rambler.ru
 Galitskaya Polina Yurievna – Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Chief Researcher of OpenLab Biocontrol Research Laboratory, e-mail: gpolina33@yandex.ru
 Stepanova Nadezhda Yulievna – Doctor of Biological Sciences, Professor of Applied Ecology Department, e-mail: step090660@yandex.ru
 Selivanovskaya Svetlana Yurievna – Doctor of Biological Sciences, Professor, Director of Institute of Ecology and Environmental Sciences, e-mail: Svetlana.Selivanovskaya@kpfu.ru
 Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia.