

Углеродный след от выращивания посевной конопли (*Cannabis sativa* L.) в условиях повышенной температуры окружающей среды

© 2025. Н. В. Данилова, к. б. н., с. н. с.,
Д. М. Глазунова, лаборант-исследователь,
В. Р. Бабичук, лаборант-исследователь,
П. А. Курынцева, к. б. н., доцент, с. н. с.,
С. Ю. Селивановская, д. б. н., профессор,
Казанский (Приволжский) федеральный университет,
420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18,
e-mail: natasha-danilova91@mail.ru

Предотвращение глобального изменения климата путём секвестрации углерода атмосферы с использованием биотехнологий является одной из наиболее важных природоохранных задач современности. Создание плантаций с растениями-суперпоглопителями углерода, например, посевной конопли, рассматривается как одно из возможных вариантов решения такой задачи. Такие растения стимулируют микробную биомассу почв и способствуют микробной эмиссии углерода, однако в собственной биомассе секвестрируют столько углерода, что баланс этих процессов становится отрицательным. Неизвестным до настоящего времени остаётся вопрос об углеродном следе указанных биотехнологий в условиях повышенных температур окружающей среды. В настоящей работе в условиях теплицы реализовано выращивание посевной конопли при температуре 15 °С, характерной для вегетационного сезона в Средней полосе России, а также повышенных температурах 20 и 30 °С. Установлено, что эмиссия углекислого газа из контрольной почвы (без растений) при трёх указанных температурах составляет 1,88, 2,71 и 2,59 г CO₂/м² соответственно, а при выращивании конопли выбросы повышаются на 113, 110 и 124% в сравнении с контролем, соответственно. Содержание органического углерода не изменяется в течение вегетационного сезона, тогда как микробная и растительная биомасса увеличиваются в зависимости от температуры. При расчёте баланса углерода установлено, что ΔCO₂ составляет –9067,64, –8587,08 и –11496,8 кг/га при 15, 20 и 30 °С, соответственно. Это позволяет рекомендовать выращивание конопли посевной для секвестрации атмосферного углерода и в настоящее время, и в будущем, когда среднегодовые температуры повысятся.

Ключевые слова: круговорот углерода, респираторная активность почвы, секвестрация углерода в почве, почвенный углеродный пул, углеродный след, растения-суперпоглопители.

Carbon footprint of *Cannabis sativa* L. cultivation under elevated ambient temperature conditions

© 2025. N. V. Danilova ORCID: 0000-0001-8750-0929, D. M. Glazunova ORCID: 0009-0009-3732-7211,
V. R. Babichuk ORCID: 0009-0005-6021-1269, P. A. Kuryntseva ORCID: 0000-0002-9274-7077,
S. Yu. Selivanovskaya ORCID: 0000-0001-6379-7166,
Kazan federal university,
18, Kremlevskaya St., Kazan, Russia, 420008,
e-mail: natasha-danilova91@mail.ru

Preventing of global climate change by sequestering atmospheric carbon using biotechnology is one of the most important environmental challenges of our time. The creation of plantations with carbon-superabsorbing plants, such as *Cannabis sativa* L., is considered as one of the possible solution to this problem. Such plants stimulate soil microbial biomass and contribute to microbial carbon emission but sequester so much carbon in their own biomass that the balance of these processes becomes negative. The question of the carbon footprint of these biotechnologies under conditions of elevated ambient temperatures remains unknown so far. In this study, the *C. sativa* cultivation at a temperature of 15 °C, typical for the growing season in Central Russia, as well as at elevated temperatures of 20 and 30 °C, is realized in a greenhouse. It was found that carbon dioxide emission from the control soil (without plants) at the three specified temperatures is 1.88, 2.71 and 2.59 g CO₂·m⁻², respectively, while *C. sativa* cultivation increases the emissions by 113, 110 and 124% compared to control, respectively. Organic carbon content does not change during the growing season, while microbial and plant biomass increases with temperature. When calculating the carbon balance, it was found that ΔCO₂ is –9067.64,

–8587.08 and –11496.8 kg·ha⁻¹ at 15, 20 and 30 °C, respectively. This allows recommending the *C. sativa* cultivation for atmospheric carbon sequestration both now and in the future when the average annual temperatures increase.

Keywords: carbon cycle, soil respiration activity, soil carbon sequestration, soil carbon pool, carbon footprint, superabsorbing plants.

Круговорот углерода является одним из важнейших процессов, при котором углекислый газ атмосферы в процессе фотосинтеза ассимилируется растениями. Около 50% углерода, образованного в результате фотосинтеза, растения используют для наращивания собственной биомассы, при этом значительная доля углерода (до 30%) высвобождается в ризосферу в виде корневых экссудатов либо выделяется при дыхании [1–3]. Корневые экссудаты, являясь доступным источником питания, оказывают непосредственное влияние на микробное сообщество почвы. Происходит стимуляция микроорганизмов, что выражается в интенсификации разложения органического вещества почвы, а также увеличении респираторной активности [4]. На активность микробного сообщества почвы напрямую влияет температурный режим, а также её влажность, таким образом, интенсивность эмиссии углекислого газа выше при оптимальных для микроорганизмов условиях – температуре 15–30 °C и влажности 60% [5].

Истощение углеродного пула почвы, особенно приуроченного к агропромышленному сектору, на сегодняшний день является важной проблемой, требующей комплексного решения. Накопления запасов углерода в почве можно достигнуть, одновременно увеличив как скорость поступления углерода в почву, так и время его удержания в ней [4]. Одним из таких потенциальных способов является выращивание растений, которые обладают повышенной способностью секвестрировать углерод в биомассе или в почве [6]. Например, конопля, являющаяся одним из таких растений, отличается высокой скоростью роста и способна достигать 4 м в высоту за 100 дней. Известно, что конопля поглощает и секвестрирует углерод в 2 раза эффективнее, чем деревья. Считается, что 1 га посева конопли поглощает от 8 до 22 т углекислого газа в год, что значительно выше по сравнению с лесным массивом [7]. С другой стороны, известно, что выделение растениями стимулирующих для микроорганизмов веществ приводит к потерям почвенного углерода за счёт интенсификации процессов микробной минерализации легкодоступного органического вещества [8]. Долгосрочная секвестрация углерода в почве

подразумевает либо его включение в состав почвенных минералов путём преобразования в карбонаты или стойкий органический углерод (например, древесный уголь), либо за счёт уменьшения микробного дыхания, то есть повышения эффективности использования микробного углерода [9]. Более длительному удерживанию углерода в почве способствуют глубокие корневые системы растений, поскольку углеродные соединения, отложившиеся в более глубоких почвенных горизонтах, будут разлагаться с меньшей скоростью по сравнению с верхними горизонтами [10, 11]. Для секвестрации углерода в почве имеют значение морфология корней, количество и химический состав корневых тканей и экссудатов, а также активность микробиома ризосферы, способного с большей эффективностью преобразовывать поступающий из корней углерод в углерод почвы [12–15].

Балансировка процессов секвестрации атмосферного углерода растениями в собственной биомассе, а также эмиссии углекислого газа из почвы в результате микробной минерализации является одной из важнейших современных природоохранных задач, решение которой приведёт к предотвращению глобального изменения климата. Такая балансировка усложнена в условиях повышения температур воздуха и почвы, наблюдаемых в последние десятилетия [16].

В настоящей работе рассмотрены процессы секвестрации и эмиссии углекислого газа при выращивании растений-суперпоглощителей углерода (посевной конопли *Cannabis sativa* L.) на серой лесной почве в климатических условиях, характерных для средней полосы России (15 °C), а также в условиях повышенных температур (20 и 30 °C). Работы проводились в условиях тепличного эксперимента в течение вегетационного сезона 2023 г. с использованием посевной конопли (*C. sativa* L.) сорта Надежда, который не содержит наркотических веществ (<https://gossortrf.ru/>).

Объекты и методы исследования

Для вегетационного тепличного эксперимента была использована серая лесная почва. В качестве растения-секвестратора углерода

в почву были засеяны семена посевной конопли (*C. sativa* L.) сорта «Надежда», допущенные к использованию на территории РФ (<https://gossortrf.ru/>). Семена предварительно проращивали до стадии ростка на вермикулите. Были подготовлены два варианта – почва без растений (контроль) и почва, засеянная коноплей. Каждый ящик содержал почву в количестве 40 кг и растения конопли в количестве 3 штук. Инкубирование осуществляли в течение 98 сут при разных температурных режимах – 15, 20 и 30 °C. Для каждого температурного режима было подготовлено по 3 повторности контрольной почвы и почвы, засеянной коноплей. В результате были получены следующие варианты – П15, П20, П30 (контрольная почва) и К15, К20, К30 (почва под посевной коноплей).

Респираторную активность микробного сообщества почвы оценивали на 1, 7, 14, 28, 42, 56, 70, 84 и 98 сут инкубирования с помощью инфракрасного газоанализатора CDL 210 (Wohler, Германия) [17]. Микробную биомассу почвы оценивали на 1, 7, 14, 28, 42, 56, 70, 84 и 98 сут инкубирования согласно ISO 16072:2002 с использованием газовой хроматографии. Биомассу растений конопли измеряли на 98 сут. Растения освобождали от почвы и сушили при температуре 20 °C. После 10 дней высушенную биомассу взвешивали. Содержание общего и органического углерода определялось на термоградиентном анализаторе углерода LECO RC 612 (LECO Instruments,

США) согласно ISO 10694:1995. Детекция CO₂ осуществлялась ИК-ячейкой прибора. Содержание углерода в образцах определялось в процессе термического разложения при температуре 450 °C на основании площади пика. В качестве стандартов калибровки использовался карбонат кальция производства LECO (США).

Все измерения проводились не менее чем в трёхкратной повторности. Статистическую обработку полученных результатов проводили с помощью Microsoft Office Excel 2010 (США). Все графические данные содержат средние значения и стандартные ошибки. Для оценки значимости различий использовали критерий Фишера при $\alpha=0,05$.

Результаты и обсуждение

На первом этапе была оценена кумулятивная респираторная активность контрольной почвы при разных температурных режимах за весь вегетационный период (98 сут). На рисунке 1 видно, что эмиссия углекислого газа была ниже при более низкой температуре инкубирования почвы (15 °C) и составила 1,88 г CO₂/м². При более высоких температурах (20 и 30 °C) эмиссия углекислого газа была выше и составила 2,71 и 2,59 г CO₂/м² соответственно.

Выделяемые растениями корневые экссудаты стимулируют функционирование микробного сообщества почвы, поэтому поч-

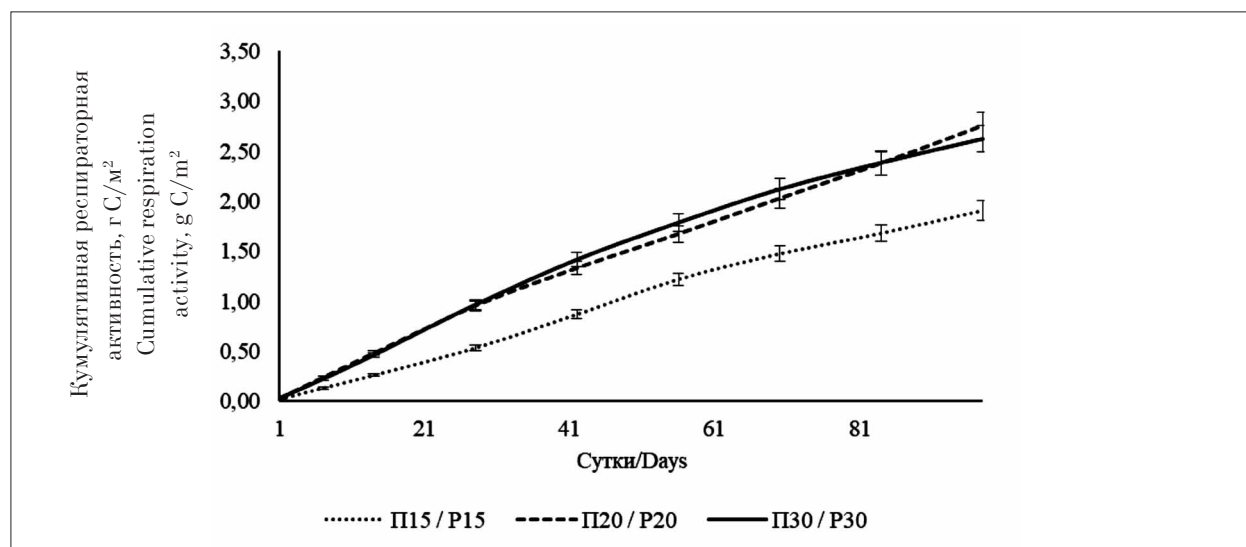


Рис. 1. Кумулятивная респираторная активность микробного сообщества контрольной почвы при разных температурных режимах: П15, П20 и П30 – контрольная почва, инкубированная при 15, 20 и 30 °C соответственно / **Fig. 1.** Cumulative respiration activity (g C/m²) of microbial community of the control soil at different temperature regimes: P15, P20 and P30 – control soil incubated at 15, 20 and 30 °C, respectively

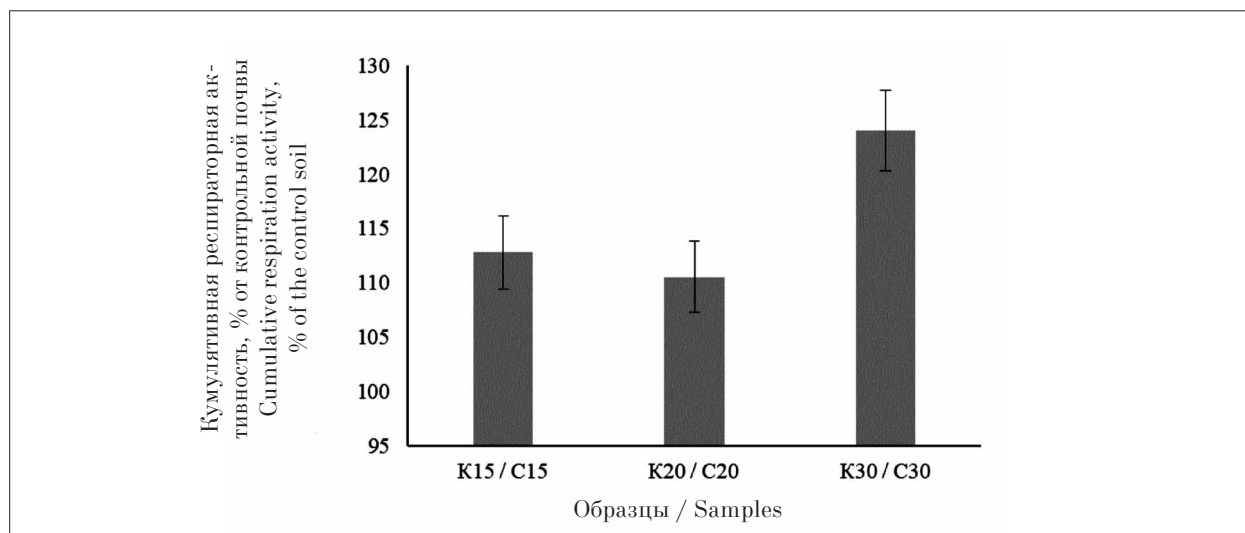


Рис. 2. Кумулятивная респираторная активность микробного сообщества почвы под посевной коноплей, % от контрольной почвы: K15, K20 и K30 – почва под посевной коноплей, инкубированная при 15, 20 и 30 °C соответственно

Fig. 2. Cumulative respiration activity of the soil microbial community under *Cannabis sativa*, % of the control soil: C15, C20 and C30 – soil under *C. sativa* incubated at 15, 20 and 30 °C, respectively

ва под растениями по сравнению с почвой, свободной от растений, отличается более высокой респираторной активностью [48]. Поэтому далее было оценено влияние посевной конопли на эмиссию углекислого газа из почвы при разных температурных режимах (рис. 2). В целом, при выращивании конопли выбросы углекислого газа из почвы были выше по сравнению с контрольной почвой и составили 113, 110 и 124% при 15, 20 и 30 °C, соответственно. Было отмечено влияние более высокой температуры на эмиссию углекислого газа: при 30 °C она была на 11–13% выше, чем при 15 и 20 °C.

На следующем этапе было оценено содержание общего и органического углерода в почве (рис. 3а, б). В образцах контрольной почвы П15, П20 и П30 на первые сутки содержание общего и органического углерода составило 3,76–3,97 и 3,02–3,26% соответственно. На 98-е сутки изменений в количестве общего и органического углерода в контрольной почве отмечено не было, как и влияния разных температурных режимов. В почве под коноплей на первые сутки содержание общего и органического углерода составило 3,54–3,73 и 2,88–2,96%, что соответствовало контрольным значениям. На 98-е сут изменений в количестве общего и органического углерода в почве под коноплей обнаружено не было. Вероятно, одного вегетационного сезона недостаточно для того, чтобы выращивание посевной конопли способствовало значимому накоплению углерода в почве.

Далее было оценено влияние различных температурных режимов на биомассу посевной конопли. При более низких температурах (15 и 20 °C) биомасса конопли достоверно не отличалась и составила в среднем $13,3 \pm 1,9$ и $12,7 \pm 1,6$ г соответственно. При повышении температуры инкубации почвы биомасса конопли оказалась выше и составила $16,8 \pm 2,2$ г. Таким образом, высокая температура (30 °C) оказала благоприятное влияние на наращивание биомассы.

Поскольку процессы эмиссии углекислого газа из почвы и аккумуляция почвенного углерода напрямую зависят от активности микробного сообщества почвы, на следующем этапе была оценена микробная биомасса (рис. 4). И для контрольной почвы, и для почвы под коноплей была обнаружена зависимость микробной биомассы от температурного режима. По мере увеличения температуры инкубирования почвы наблюдалось увеличение биомассы микроорганизмов. Так, в течение всего периода инкубации (98 сут) в контрольной почве биомасса микроорганизмов составила 0,56–0,91, 0,72–1,92 и 1,99–3,80 мг/кг при 15, 20 и 30 °C, соответственно. В почве под посевной коноплей микробная биомасса составила 0,51–0,95, 1,03–1,78 и 2,11–3,87 мг/кг при 15, 20 и 30 °C, соответственно. Значимых различий в микробной биомассе контрольной почвы и почвы, засеянной коноплей, отмечено не было. Таким образом, наиболее благоприятной для функционирования микробного сообщества почвы оказалась температура равная 30 °C.

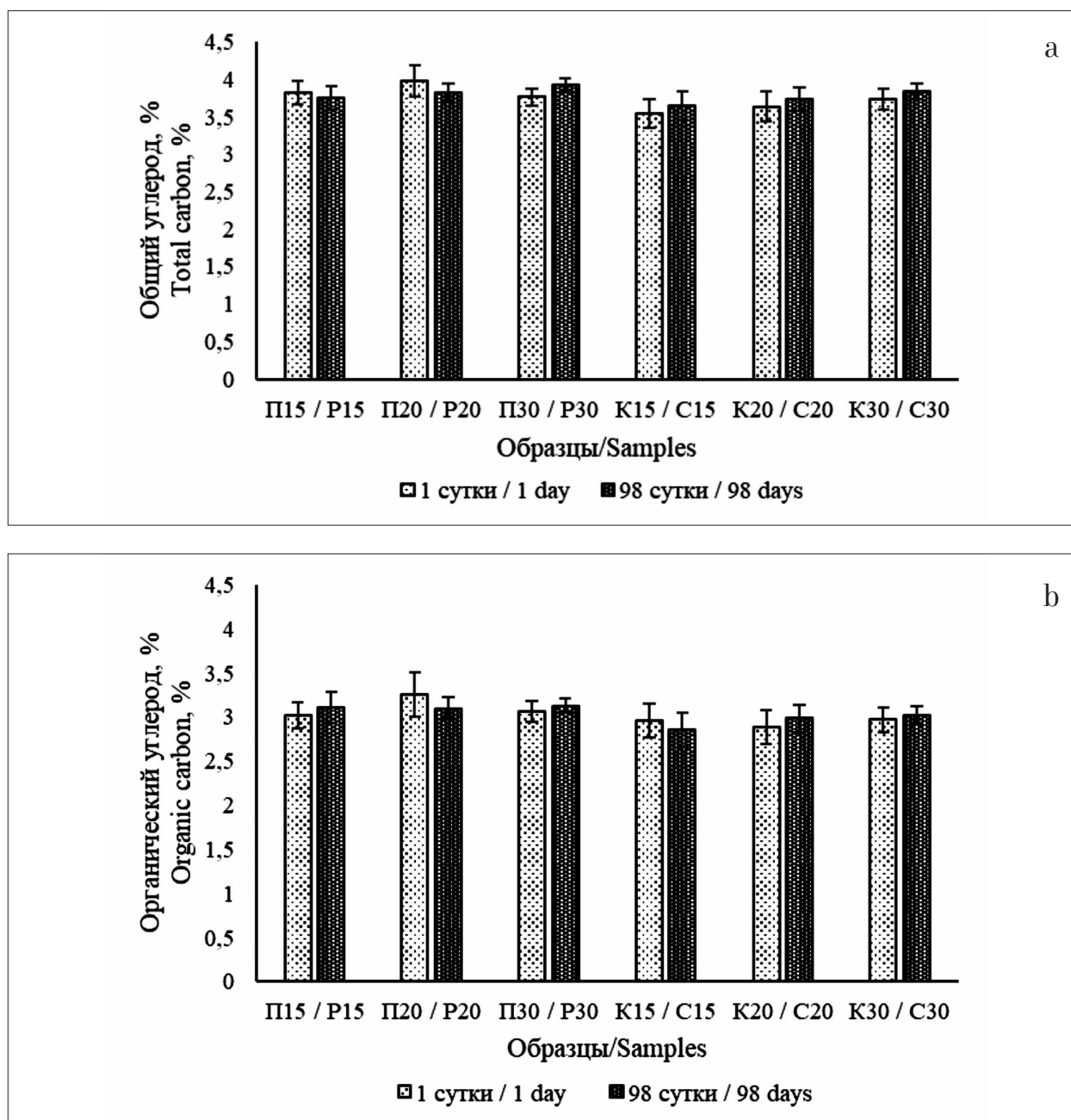


Рис. 3. Содержание общего (а) и органического (б) углерода в почве при разных температурных режимах: П15, П20 и П30 – контрольная почва, инкубированная при 15, 20 и 30 °С соответственно; К15, К20 и К30 – почва под посевной коноплей, инкубированная при 15, 20 и 30 °С соответственно

Fig. 3. The content of total (a) and organic (b) carbon in the soil at different temperature regimes: P15, P20 and P30 – control soil incubated at 15, 20 and 30 °C, respectively; C15, C20 and C30 – soil under *C. sativa* incubated at 15, 20 and 30 °C, respectively

Далее был оценён баланс углекислого газа (CO_2) в почве из расчёта на 1 га на основании данных лабораторного эксперимента с коноплей за период её вегетации. Он учитывает эмиссию углерода из почвы, которая включает респираторную активность, выбросы от агротехники и выбросы от внесения азотных удобрений, а также количество углерода, накопившееся в почве в виде биомассы растений и органических удобрений [19]. Поскольку в

вегетационном эксперименте отсутствовало внесение в почву органических удобрений, для расчёта баланса углерода была использована следующая формула:

$$\Delta\text{CO}_2 = \text{CO}_{2\text{ агротехника}} + \text{РА} - \text{C}_{\text{биомасса}},$$

где ΔCO_2 – баланс углерода, $\text{CO}_{2\text{ агротехника}}$ – выбросы углерода от использования топлива для агротехники, РА – респираторная актив-

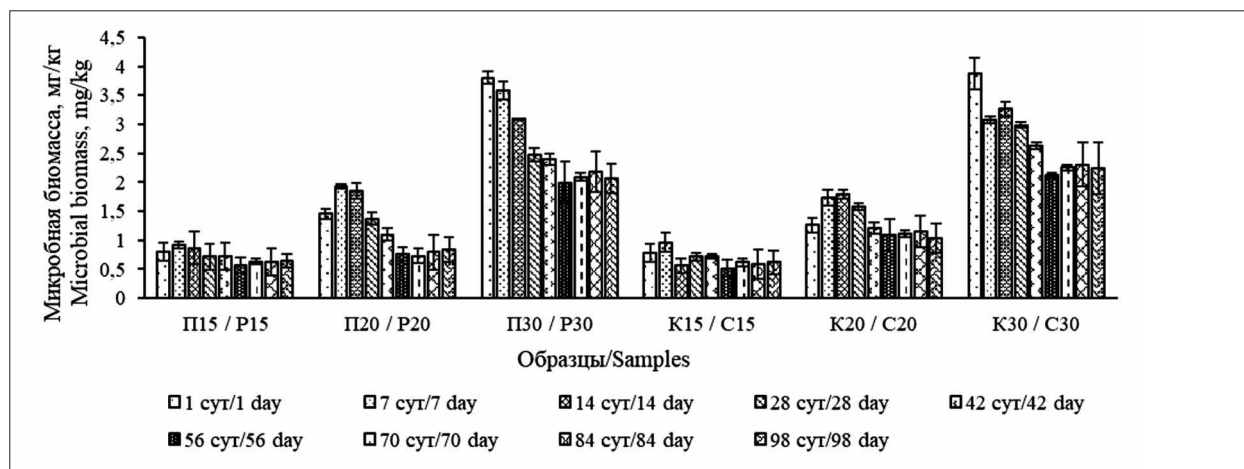


Рис. 4. Динамика микробной биомассы контрольной почвы и почвы под посевной коноплей при разных температурных режимах: П15, П20 и П30 – контрольная почва, инкубированная при 15, 20 и 30 °C соответственно; К15, К20 и К30 – почва под посевной коноплей, инкубированная при 15, 20 и 30 °C соответственно / **Fig. 4.** Dynamics of microbial biomass of the control soil and the soil under *Cannabis sativa* at different temperature regimes: P15, P20 and P30 – control soil incubated at 15, 20 and 30 °C, respectively; C15, C20 and C30 – soil under *C. sativa* incubated at 15, 20 and 30 °C, respectively

Таблица 1 / Table 1
Выбросы CO₂ от различных видов агротехнических мероприятий [20]
CO₂ emissions from various types of agrotechnical activities [20]

Вид агротехнического мероприятия Type of agrotechnical activity	Выбросы CO ₂ , кг/га CO ₂ emissions, kg/ha
Вспашка почвы / Soil plowing	57,8
Боронование / Harrowing	14,5
Посевные работы / Sowing	25,6
Обработка азотным удобрением / Treatment with nitrogen fertilizer	4,8
Выбросы N ₂ O от азотных удобрений в пересчёте на выбросы CO ₂ N ₂ O emissions from nitrogen fertilizers converted to CO ₂ emissions	0,4
Обработка пестицидами / Pesticide treatment	4,9
Сбор урожая / Harvesting	120,6
Мульчирование / Mulching	31,1

ность почвы, $C_{\text{биомасса}}$ – углерод растительной биомассы.

В ходе проведения агротехнических мероприятий была использована следующая серийная сельскохозяйственная техника: БДТ-3х4; ПЛН-5-35; БЗТС-1; КПС-4; СЗ-5,4; ОП-3000. В качестве топлива для техники использовался дизель. В таблице 1 приведены выбросы углекислого газа от данной агротехники, используемой при выращивании посевной конопли (*C. sativa*). Таким образом, в течение вегетационного периода суммарные выбросы углекислого газа при проведении агротехнических работ составляют 399,7 кг/га вне зависимости от температурных условий.

Суммарная эмиссия углекислого газа в виде респираторной активности из почвы,

засеянной посевной коноплей, в пересчёте на 1 га составила 21,28, 30,01 и 32,13 кг/га при температуре 15, 20 и 30 °C, соответственно.

Далее было подсчитано количество углерода, которое аккумулировалось в биомассе посевной конопли за вегетационный период. Содержание углерода на 1 т посевной конопли составляет 445 кг, при этом для средней полосы России густота посадки растений составляет 4,8 млн семян на 1 га почвы [21]. Таким образом, при температуре 15 °C содержание углерода в биомассе конопли составило 9486,21 кг/га, при температуре 20 °C – 9013,92 кг/га и при температуре 30 °C – 11922,44 кг/га.

В таблице 2 представлены результаты оценки баланса углекислого газа в почве под посевной коноплей, оценённой за вегетацион-

Таблица 2 / Table 2

Баланс углекислого газа в пахотном слое почвы, засеянной посевной коноплей, в течение вегетационного периода / Carbon dioxide balance in the arable soil layer under *C. sativa* during the growing season

Образец / Sample	ΔCO_2 , кг/га / ΔCO_2 , kg/ha
K15 / C15	–9067,64
K20 / C20	–8587,08
K30 / C30	–11496,8

ный период (98 сут) при различных температурных режимах (15, 20 и 30 °C). Из таблицы 2 и предыдущих расчётов следует, что при выращивании посевной конопли при повышенных температурах (20–30 °C) наблюдалось более высокая эмиссия углекислого газа из почвы, чем при температуре 15 °C. При этом наиболее высокое аккумулялирование углерода в биомассе конопли было отмечено для почвы, инкубированной при 30 °C.

Таким образом, согласно полученным результатам, наибольший вклад в накопление углерода почвы был зафиксирован при выращивании посевной конопли при температуре 30 °C.

Заключение

Предотвращение глобального изменения климата возможно, в частности, за счёт применения технологий секвестрации углерода атмосферы растениями-суперпоглопителями, такими как посевная конопля. В данной работе продемонстрировано, что несмотря на то, что конопля стимулирует деятельность микроорганизмов в почве и повышает таким образом объём эмиссии углекислого газа, она нивелирует этот процесс накоплением углерода в собственной биомассе, делая баланс углерода отрицательным. Показано, что отрицательный баланс сохраняется и даже увеличивается и при повышении среднесуточной температуры воздуха, прогнозируемой в будущем.

Работа выполнена за счёт средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности, проект № FZSM-2022-0003.

References

1. Turner T.R., James E.K., Poole P.S. The plant microbiome // *Genome Biol.* 2013. V. 14. No. 6. Article No. 209. doi: 10.1186/gb-2013-14-6-209
2. Kaiser C., Kilburn M.R., Clode P.L., Fuchslueger L., Koranda M., Cliff J.B., Solaiman Z.M., Murphy D.V.

Exploring the transfer of recent plant photosynthates to soil microbes: Mycorrhizal pathway *vs* direct root exudation // *New Phytol.* 2015. V. 205. No. 4. P. 1537–1551. doi: 10.1111/nph.13138

3. Lorenz K., Lal R., Shipitalo M.J. Chemical stabilization of organic carbon pools in particle size fractions in no-till and meadow soils // *Biol. Fertil. Soils.* 2008. V. 44. No. 8. P. 1043–1051. doi: 10.1007/s00374-008-0300-8

4. Jansson C., Faiola C., Wingler A., Zhu X.G., Kravchenko A., de Graaff M.A., Ogden A.J., Handakumbura P.P., Werner C., Beckles D.M. Crops for carbon farming // *Front. Plant Sci.* 2021. V. 12. Article No. 636709. doi: 10.3389/fpls.2021.636709

5. Donhauser J., Niklaus P., Rousk J., Larose C., Frey B. Temperatures beyond the community optimum promote the dominance of heat-adapted, fast growing and stress resistant bacteria in alpine soils // *Soil Biol. Biochem.* 2020. V. 148. Article No. 107873. doi: 10.1016/j.soilbio.2020.107873

6. Adkins J., Jastrow J.D., Morris G.P., Six J., de Graaf M.A. Effects of switchgrass cultivars and intraspecific differences in root structure on soil carbon inputs and accumulation // *Geoderma.* 2016. V. 262. No. 11. P. 147–154. doi: 10.1016/j.geoderma.2015.08.019

7. Visković J., Zheljaskov V.D., Sikora V., Noller J., Latković D., Ocamb C.M., Koren A. Industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) agronomy and utilization: a review // *Agronomy.* 2023. V. 13. No. 3. Article No. 931. doi: 10.3390/agronomy13030931

8. Li M., Song Z., Li Z., Qiao R., Zhang P., Ding C., Xie J., Chen Y., Guo H. *Populus* root exudates are associated with rhizosphere microbial communities and symbiotic patterns // *Front. Microbiol.* 2022. V. 13. No. 12. Article No. 1042944. doi: 10.3389/fmicb.2022.1042944

9. Paustian K., Collier S., Baldock J., Burgess R., Creque J., DeLonge M., Dungait J., Ellert B., Frank S., Goddard T., Govaerts B., Grundy M. Quantifying carbon for agricultural soil management: from the current status toward a global soil information system // *Carbon Manage.* 2019. V. 10. No. 6. P. 567–587. doi: 10.1080/17583004.2019.1633231

10. Phillips R.P., Meier I.C., Bernhardt E.S., Grandy A.S., Wickings K., Finzi A.C. Roots and fungi accelerate carbon and nitrogen cycling in forests exposed to elevated CO_2 // *Ecol. Lett.* 2012. V. 15. No. 9. P. 1042–1049. doi: 10.1111/j.1461-0248.2012.01827.x

11. Pendall E., Mosier A.R., Morgan J.A. Rhizodeposition stimulated by elevated CO_2 in a semiarid grass-

land // New Phytol. 2004. V. 162. No. 2. P. 447–458. doi: 10.1111/j.1469-8137.2004.01054.x

12. Kravchenko A.N., Guber A.K., Razavi B.S., Koes-tel J., Quigley M.Y., Robertson G.P., Kuzyakov Y. Microbial spatial footprint as a driver of soil carbon stabilization // Nat. Commun. 2019. V. 10. No. 1. doi: 10.1038/s41467-019-11057-4

13. Postma J.A., Kuppe C., Owen M.R., Mellor N., Griffiths M., Bennett M.J., Lynch J.P., Watt M. Open-SimRoot: widening the scope and application of root architectural models // New Phytol. 2017. V. 215. No. 3. P. 1274–1286. doi: 10.1111/nph.14641

14. Kuzyakov Y., Domanski G. Carbon input by plants into the soil. Review // J. Plant Nutr. Soil Sci. 2000. V. 163. No. 4. P. 421–431. doi:10.1002/1522-2624(200008)163:4<421::AID-JPLN421>3.0.CO;2-R

15. Naveed M., Brown L.K., Raffan A.C., George T.S., Bengough A.G., Roose T., Sinclair I., Koebernick N., Cooper L., Hackett C.A., Hallett P.D. Plant exudates may stabilize or weaken soil depending on species, origin and time // Eur. J. Soil Sci. 2017. V. 68. No. 6. P. 806–816. doi: 10.1111/ejss.12487

16. Rodrigues C.I.D., Brito L.M., Nunes L.J.R. Soil carbon sequestration in the context of climate change

mitigation: a review // Soil Syst. 2023. V. 7. Article No. 64. doi: 10.3390/soilsystems7030064

17. Karelin D.V., Zamolodchikov D.G., Kraev G.N. Methodological guidelines for the analysis of carbon emissions from the soils of settlements in the tundra. Moskva: TsEPL RAN, 2015. 64 p. (in Russian).

18. Canarini A., Kaiser C., Merchant A., Richter A., Wanek W. Root exudation of primary metabolites: Mechanisms and their roles in plant responses to environmental stimuli // Front. Plant Sci. 2019. V. 10. Article No. 157. doi: 10.3389/fpls.2019.00157

19. Rahman M.M. Carbon dioxide emission from soil // Agric. Res. 2013. V. 2. No. 2. P. 132–139. doi: 10.1007/s40003-013-0061-y

20. Methodological recommendations for conducting a voluntary inventory of greenhouse gas emissions in the constituent entities of the Russian Federation [Internet resource] <https://sudact.ru/law/rasporiazhenie-minprirody-rossii-ot-16042015-n-15-r/metodicheskie-rekomendatsii-po-provedeniiu-dobrovolnoi/?ysclid=mam55w2aqh259599576> (Accessed: 16.08.2024) (in Russian).

21. Sorrentino G. Introduction to emerging industrial applications of cannabis (*Cannabis sativa* L.) // Rend. Fis. Acc. Lincei. 2021. V. 32. No. 2. P. 233–243. doi: 10.1007/s12210-021-00979-1