

Получена ...

Прошла рецензирование ...

Принята к публикации ...

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

© 2023. Н.В. Данилова<sup>1</sup>, к.б.н., старший научный сотрудник,  
Д.М. Глазунова<sup>1</sup>, лаборант–исследователь,  
В.Р. Бабичук<sup>1</sup>, лаборант–исследователь,  
П.А. Курынцева<sup>1</sup>, к.б.н., доцент, старший научный сотрудник,  
С.Ю. Селивановская<sup>1</sup>, д.б.н., профессор,

<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт экологии и природопользования, кафедра прикладной экологии, 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18, e-mail: natasha-danilova91@mail.ru

Предотвращение глобального изменения климата путем секвестрации углерода атмосферы с использованием биотехнологий является одной из наиболее важных природоохранных задач современности. Создание плантаций с растениями-суперпоглопителями углерода, например, технической коноплей, 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 остается вопрос об углеродном следе указанных биотехнологий в условиях повышенных температур окружающей среды. В настоящей работе в условиях теплицы реализовано выращивание технической конопли при температуре 15°C, характерной для вегетационного сезона в Средней полосе России, а также повышенных температурах 20°C и 30°C. Установлено, что эмиссия углекислого газа из контрольной почвы

(без растений) при трех указанных температурах составляет 1,88, 2,71 и 2,59 г CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup> 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 расчете баланса углерода установлено, что ΔCO<sub>2</sub>, составляет −9067,64, −8587,08 и −11496,8 кг/га при 15°C, 20°C и 30°C, соответственно. Это позволяет рекомендовать выращивание конопли технической 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-суперпоглоотители.

Received ...

Revised ...

Accepted ...

## **Carbon footprint of growing technical hemp (*Cannabis sativa* L.) in high ambient temperatures**

© 2023. **N.V. Danilova**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-8750-0929,

**D.M. Glazunova**<sup>1</sup> ORCID: 0009-0009-3732-7211,

**V.R. Babichuk**<sup>1</sup> ORCID: 0009-0005-6021-1269,

**P.A. Kuryntseva**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-9274-7077,

**S.Yu. Selivanovskaya**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-6379-7166,

<sup>1</sup>Kazan federal university,

18, Kremlevskaya, Kazan, Russia, 420008,

e-mail: natasha-danilova91@mail.ru

Prevention 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 super carbon absorbing plants, such as industrial hemp, is considered as one of the possible options for solving 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 work, in a greenhouse, the cultivation of industrial hemp at a temperature of 15°C, typical for the growing season in Central Russia, as well as at elevated temperatures of 20°C and 30°C, is realized. It was found that the emission of carbon dioxide from the control soil (without plants) at the three specified temperatures is 1.88, 2.71 and 2.59 g CO<sub>2</sub>\*m<sup>-2</sup>, respectively, and when growing hemp, emissions increase by 113%, 110% and 124% compared to control, respectively. The content of organic carbon does not change during the growing season, while microbial and plant biomass increases with temperature. When calculating the carbon balance, it was found that ΔCO<sub>2</sub> is -9067.64, -8587.08 and -11496.8 kg\*ha<sup>-1</sup> at 15°C, 20°C and 30°C, respectively. This allows us to recommend the cultivation of industrial hemp 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, superabsorbent plants.

Круговорот углерода является одним из важнейших процессов, при котором углекислый газ атмосферы в процессе фотосинтеза ассимилируются 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 ее влажность, таким образом, интенсивность эмиссии углекислого газа выше при оптимальных для микроорганизмов условиях – температуре 15–30° С и влажности 60% [5].

Истощение углеродного пула почвы, особенно приуроченного к агропромышленному сектору, на сегодняшний день является важной проблемой, требующей комплексного решения. Накопление 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 метра в высоту за 100 дней. Известно, что конопля поглощает и секвестрирует углерод в 2 раза эффективнее, чем деревья. Считается, что 1 гектар конопли поглощает от 8 до 22 тонн 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 счет интенсификации процессов микробной минерализации легкодоступного органического вещества [8].

Долгосрочная секвестрация углерода в почве подразумевает либо его включение в состав почвенных минералов путем преобразования в карбонаты или стойкий органический углерод (например, древесный уголь), либо за счет 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]. Так же 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].

Балансирование 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 приведет к предотвращению глобального изменения климата. Такое балансирование усложнено 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-суперпоглопителей углерода (технической 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°C и 30°C). Работы проводились в условиях тепличного эксперимента в течение вегетационного сезона 2023 года.

### **Объекты и методы исследования**

Для вегетационного тепличного эксперимента была использована серая лесная почва. В качестве растения-секвестратора углерода в почву были засеяны семена технической конопли (*C. sativa* L.), предварительно пророщенные до стадии роста на вермикулите. Были подготовлены два варианта – почва без растений (контроль) и почва, засеянная коноплей. Каждый ящик содержал почву в количестве 40 кг и растения технической конопли (*C. sativa* L.) в количестве 3 штук. Инкубирование осуществляли в течение 98 суток при разных температурных режимах – 15°C, 20°C и 30°C. Для каждого температурного режима было подготовлено по 3 повторности контрольной почвы и почвы, засеянной технической коноплей (*C. sativa* L.). В результате были получены следующие варианты – П15, П20, П30 (контрольная почва) и К15, К20, К30 (почва под технической коноплей (*C. sativa* L.)).

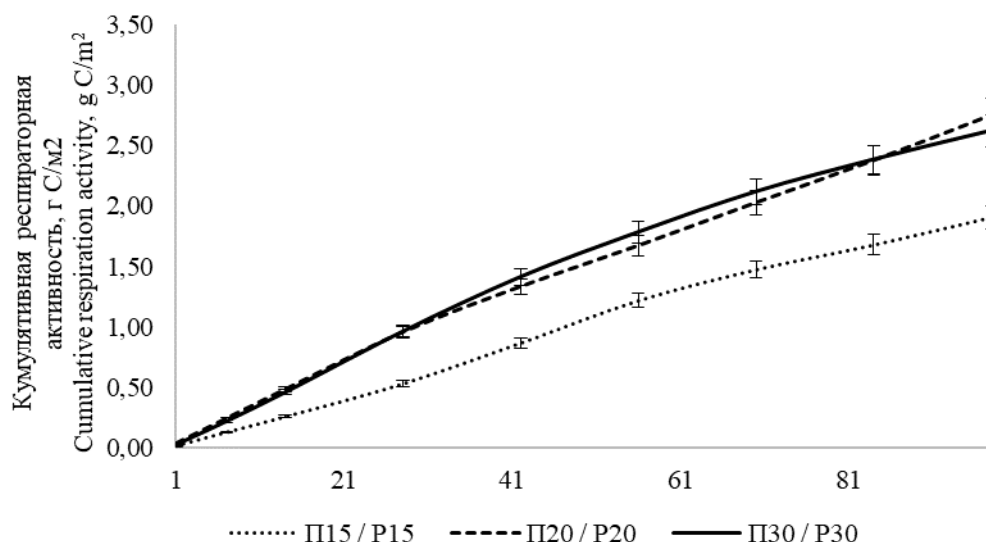
Респираторную активность микробного сообщества почвы оценивали на 1, 7, 14, 28, 42, 56, 70, 84 и 98 сутки инкубирования с помощью инфракрасного

газоанализатора CDL 210 (Wohler, Германия) [17]. Микробную биомассу почвы оценивали на 1, 7, 14, 28, 42, 56, 70, 84 и 98 сутки инкубирования согласно ISO 16072:2002 с использованием газовой хроматографии [18]. Биомассу растений технической конопли (*C. sativa* L.) измеряли на 98 сутки. 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 [19]. Детекция CO<sub>2</sub> 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 трехкратной 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 1 этапе была оценена кумулятивная респираторная активность контрольной почвы при разных температурных режимах за весь вегетационный период (98 суток). На рисунке 1 видно, что эмиссия углекислого газа была ниже при более холодной температуре инкубирования почвы (15°C) и составила 1,88 г CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>. При более высоких температурах (20°C и 30°C) эмиссия углекислого газа была выше и составила 2,71 и 2,59 г CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup> соответственно.



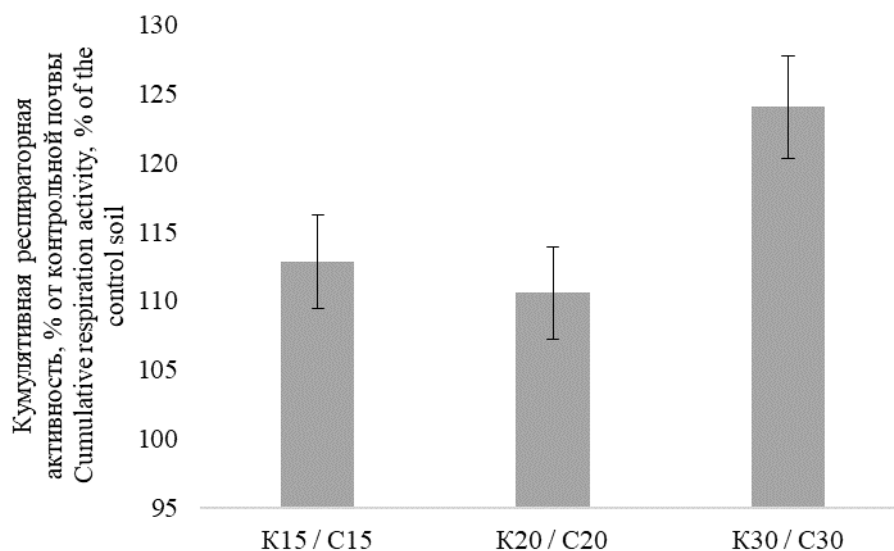
**Рис. 1.** Кумулятивная респираторная активность микробного сообщества контрольной почвы при разных температурных режимах:

П15 – контрольная почва, инкубированная при 15°C; П20 – контрольная почва, инкубированная при 20°C; П30 – контрольная почва, инкубированная при 30°C

**Fig. 1.** Cumulative respiration activity of the microbial community of the control soil under different temperature conditions:

P15 - control soil incubated at 15°C; P20 - control soil incubated at 20°C; P30 - control soil incubated at 30°C

Выделяемые растениями корневые экссудаты стимулируют функционирование микробного сообщества почвы, поэтому почва под растениями по сравнению с почвой, не засаженной растениями, отличается более высокой респираторной активностью [20]. Поэтому далее было оценено влияние технической 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°C, 20°C 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°C и 20°C.



**Рис. 2.** Кумулятивная респираторная активность микробного сообщества почвы под технической коноплей (*C. sativa* L.), % от контрольной почвы:

K15 – почва под технической коноплей (*C. sativa* L.), инкубированная при 15°C; K20 – почва под технической коноплей (*C. sativa* L.) инкубированная при 20°C; K30 – почва под технической коноплей (*C. sativa* L.), инкубированная при 30°C

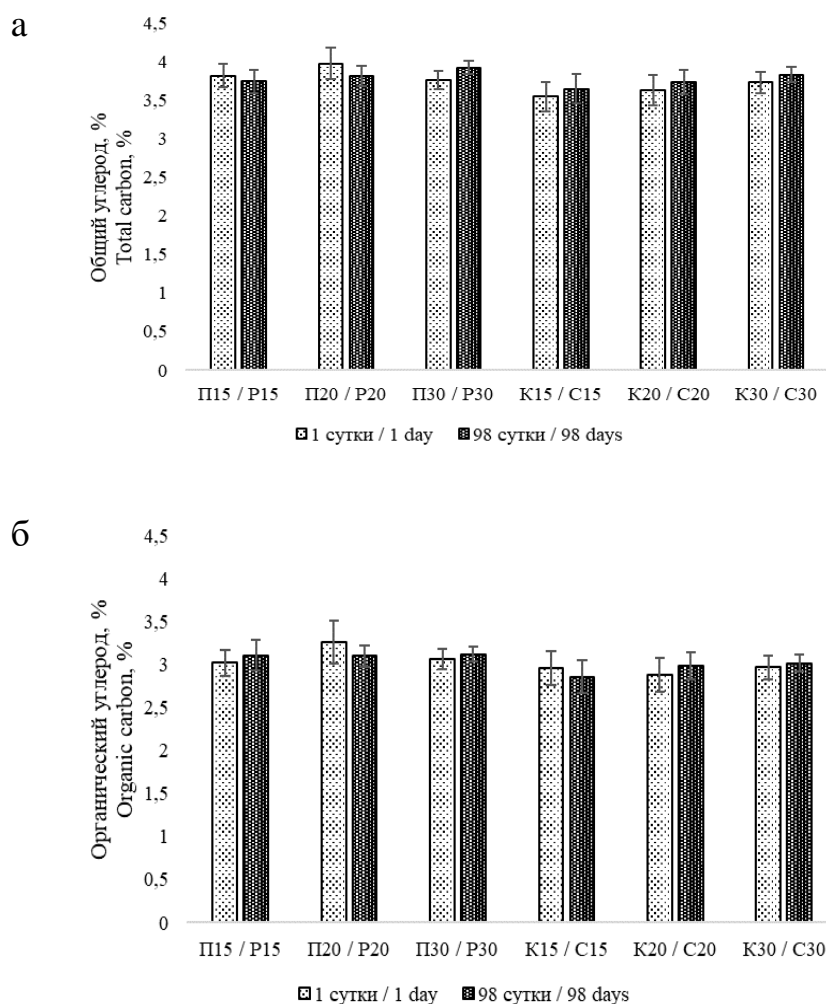
**Fig. 2.** Cumulative respiration activity of the soil microbial community under technical hemp (*C. sativa* L.), % of the control soil:

C15 - soil under technical hemp (*C. sativa* L.) incubated at 15°C; C20 – soil under technical hemp (*C. sativa* L.) incubated at 20°C; C30 - soil under technical hemp (*C. sativa* L.) incubated at 30°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 1 сутки содержание общего и органического углерода составило 3,76–3,97% и 3,02–3,26% соответственно. На 98 сутки изменений в количестве общего и органического углерода в контрольной почве отмечено не было, как и влияния разных температурных режимов. В почве под технической коноплей на 1 сутки содержание общего и органического углерода составило 3,54–3,73% и 2,88–2,96%, что соответствовало контрольным значениям. На 98 сутки изменений в количестве общего и органического углерода в почве под коноплей обнаружено



не было. Вероятно, одного вегетационного сезона недостаточно для того, чтобы выращивание технической конопли способствовало значимому накоплению углерода в почве.



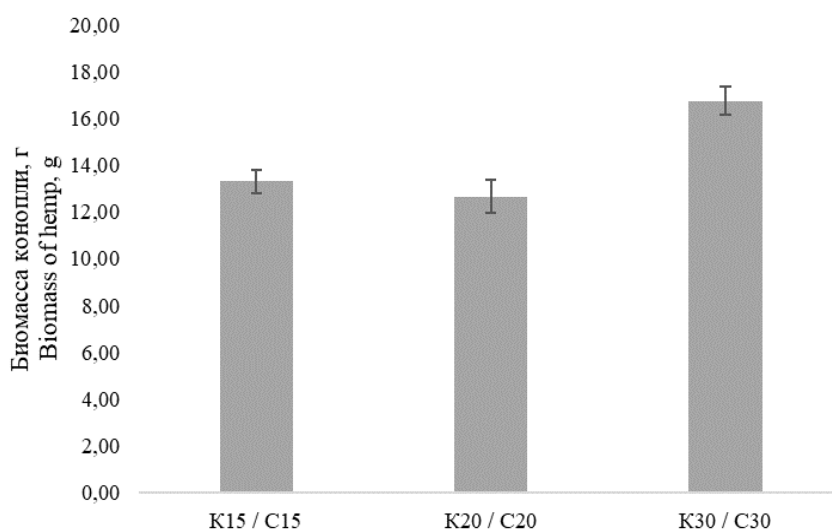
**Рис. 3.** Содержание общего (а) и органического (б) углерода в почве при разных температурных режимах:

П15 – контрольная почва, инкубированная при 15°C; П20 – контрольная почва, инкубированная при 20°C; П30 – контрольная почва, инкубированная при 30°C; К15 – почва под технической коноплей (*C. sativa* L.), инкубированная при 15°C; К20 – почва под технической коноплей (*C. sativa* L.) инкубированная при 20°C; К30 – почва под технической коноплей (*C. sativa* L.), инкубированная при 30°C

**Fig. 3.** The content of total (a) and organic (b) carbon in the soil under different temperature conditions:

P15 - control soil incubated at 15°C; P20 - control soil incubated at 20°C; P30 - control soil incubated at 30°C; C15 - soil under technical hemp (*C. sativa* L.) incubated at 15°C; C20 – soil under technical hemp (*C. sativa* L.) incubated at 20°C; C30 - soil under technical hemp (*C. sativa* L.) incubated at 30°C

Далее было оценено влияние различных температурных режимов на биомассу технической конопли (рис. 4). При более холодных температурах (15°C и 20°C) биомасса конопли достоверно не отличалась и составила в среднем 13,32 г и 12,66 г соответственно. При повышении температуры инкубации почвы биомасса конопли оказалась выше и составила 16,75 г. Таким образом, высокая температура (30°C) оказала благоприятное влияние на наращивание биомассы.



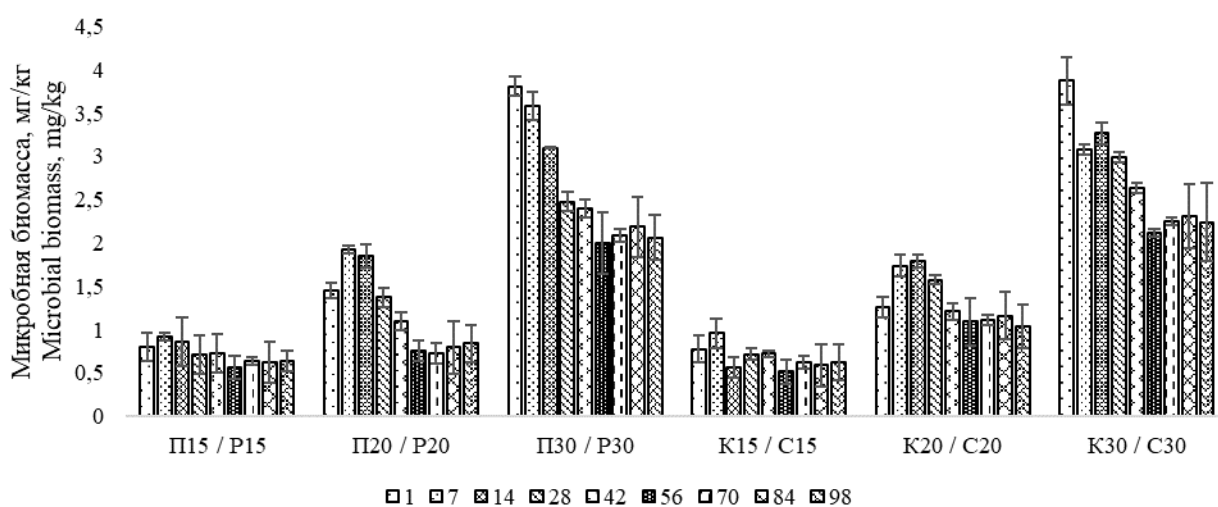
**Рис. 4.** Биомасса технической конопли (*C. sativa* L.) при разных температурных режимах:

K15 – почва под технической коноплей (*C. sativa* L.), инкубированная при 15°C; K20 – почва под технической коноплей (*C. sativa* L.) инкубированная при 20°C; K30 – почва под технической коноплей (*C. sativa* L.), инкубированная при 30°C

**Fig. 4.** Biomass of technical hemp (*C. sativa* L.) at different temperature conditions:

C15 - soil under technical hemp (*C. sativa* L.), incubated at 15°C; C20 – soil under technical hemp (*C. sativa* L.) incubated at 20°C; C30 - soil under technical hemp (*C. sativa* L.) incubated at 30°C

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. 5). И для контрольной почвы, и для почвы под технической 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 суток) в контрольной почве биомасса микроорганизмов составила 0,56–0,91, 0,72–1,92 и 1,99–3,80 при 15°C, 20°C и 30°C, соответственно. В почве под технической коноплей микробная биомасса составила 0,51–0,95, 1,03–1,78 и 2,11–3,87 при 15°C, 20°C и 30°C, соответственно. Значимых различий в микробной биомассе контрольной почвы и почвы, засеянной технической коноплей, отмечено не было. Таким образом, наиболее благоприятной для функционирования микробного сообщества почвы оказалась температура равная 30°C.



**Рис. 5.** Микробная биомасса контрольной почвы и почвы под технической коноплей (*C. sativa* L.) при разных температурных режимах:

П15 – контрольная почва, инкубированная при 15°C; П20 – контрольная почва, инкубированная при 20°C; П30 – контрольная почва, инкубированная при 30°C; К15 – почва под технической коноплей (*C. sativa* L.), инкубированная при 15°C; К20 – почва под технической коноплей (*C. sativa* L.) инкубированная при 20°C; К30 – почва под технической коноплей (*C. sativa* L.), инкубированная при 30°C

**Fig. 5.** Microbial biomass of the control soil and the soil under technical hemp under different temperature conditions:

P15 - control soil incubated at 15°C; P20 - control soil incubated at 20°C; P30 - control soil incubated at 30°C; C15 - soil under technical hemp (*C. sativa* L.) incubated at 15°C; C20 – soil under technical hemp (*C. sativa* L.) incubated at 20°C; C30 - soil under technical hemp (*C. sativa* L.) incubated at 30°C

Далее был оценен баланс углекислого газа ( $\Delta\text{CO}_2$ ) в почве за период вегетации технической конопли. 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 [21]. Поскольку в вегетационном эксперименте отсутствовало внесение в почву органических удобрений, для расчета баланса углерода была использована следующая формула:

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

$\Delta\text{CO}_2$  – баланс углерода,

$\text{CO}_{2\text{агротехника}}$  – выбросы углерода от использования топлива для агротехники,

$\text{РА}$  – респираторная активность почвы,

$\text{C}_{\text{биомасса}}$  – углерод растительной биомассы

В таблице 1 приведены выбросы углекислого газа от различной агротехники, используемой при выращивании технической конопли (*C. sativa* L.). Таким образом, в течение вегетационного периода суммарные выбросы углекислого газа при проведении агротехнических работ составляют 399,7 кг/га (и не зависят от температурных условий).

**Таблица 1 / Table 1**

Выбросы CO<sub>2</sub> от различных видов агротехнических мероприятий согласно «Методическим рекомендациям по проведению добровольной инвентаризации объема выбросов парниковых газов в субъектах Российской Федерации», 2015 г / CO<sub>2</sub> emissions from various types of agrotechnical activities according to the "Methodological recommendations for conducting a voluntary inventory of greenhouse gas emissions in the constituent entities of the Russian Federation", 2015

Вид агротехнического мероприятия / Type of agrotechnical activity	Выбросы CO <sub>2</sub> , кг/га / CO <sub>2</sub> emissions, kg/ha
Вспахивание 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 <sub>2</sub> O от азотных удобрений в пересчете на выбросы CO <sub>2</sub> / N <sub>2</sub> O emissions from nitrogen fertilizers converted to CO <sub>2</sub> emissions	0,4
Обработка пестицидами / Pesticide treatment	4,9
Сбор урожая / Harvesting	120,6
Мульчирование / Mulching	31,1

Суммарная эмиссия углекислого газа в виде респираторной активности из почвы, засеянной технической коноплей, в пересчете на 1 га составила 21,28 кг/га, 30,01 кг/га и 32,13 кг/га при температуре 15°C, 20°C и 30°C, соответственно.

Далее было подсчитано количество углерода, которое аккумулировалось в биомассе технической конопли за вегетационный период. Содержание углерода на 1 тонну технической конопли составляет 445 кг, при этом для

средней полосы России густота посадки растений составляет 4,8 млн семян на 1 гектар почвы [22]. 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 технической коноплей, оцененной за вегетационный период (98 суток) при различных температурных режимах (15°C, 20°C и 30°C). Из таблицы 2 и предыдущих расчетов, что при выращивании технической конопли при повышенных температурах (20°C–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.

**Таблица 2 / Table 2**

Баланс углекислого газа в пахотном слое почвы, засеянной технической коноплей (*C. sativa* L.), в течение вегетационного периода / Balance of carbon dioxide in the arable layer of soil sown with industrial hemp (*C. sativa* L.) during the growing season

Образец / Sample	$\Delta\text{CO}_2$ , кг/га / $\Delta\text{CO}_2$ , kg/ha
K15 / C15	-9067,64
K20 / C20	-8587,08
K30 / C30	-11496,8

Таким образом, согласно полученным результатам, наибольший вклад в накопление углерода почвы был зафиксирован при выращивании технической конопли при более высокой температуре (30°C).

### **Заключение**

Предотвращение глобального изменения климата возможно, в частности, за счет применения технологий секвестрации углерода атмосферы растениями-

суперпоглопителями, такими как техническая конопля. В данной работе продемонстрировано, что несмотря на то, что конопля стимулирует деятельность микроорганизмов в почве и повышает таким образом объем 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 счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности, проект № FZSM-2022-0003.***

## Литература

1. Turner T.R., James E.K., Poole P.S. The plant microbiome // Genome Biol. 2013. V. 14. No 6. P. 1–10. doi:10.1186/gb-2013-14-6-209
2. Kaiser C. et al. 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. et al. Crops for Carbon Farming // Front. Plant Sci. 2021. V. 12. No 6. P. 1–12. doi: 10.3389/fpls.2021.636709
5. Donhauser J. et al. Temperatures beyond the community optimum promote the dominance of heat-adapted, fast growing and stress resistant bacteria in alpine soils // Soil Biol. Biochem. Elsevier Ltd, 2020. V. 148. No 5. P. 1–16. doi:10.1016/j.soilbio.2020.107873
6. Adkins J. et al. Effects of switchgrass cultivars and intraspecific differences in root structure on soil carbon inputs and accumulation // Geoderma. Elsevier B.V., 2016. V. 262. No 11. P. 147–154. doi:10.1016/j.geoderma.2015.08.019
7. Visković J. et al. Industrial Hemp (*Cannabis sativa* L.) Agronomy and Utilization: A Review // Agronomy. 2023. V. 13. No 3. P. 1–23. doi:10.3390/agronomy13030931
8. Li M. et al. Populus root exudates are associated with rhizosphere microbial communities

and symbiotic patterns // *Front. Microbiol.* 2022. V. 13. No 12. P. 1–13. doi: 10.3389/fmicb.2022.1042944

9. Paustian K. et al. Quantifying carbon for agricultural soil management: from the current status toward a global soil information system // *Carbon Manag.* Taylor & Francis, 2019. V. 10. No 6. P. 567–587. doi:10.1080/17583004.2019.1633231

10. Phillips R.P. et al. Roots and fungi accelerate carbon and nitrogen cycling in forests exposed to elevated CO<sub>2</sub>. 2012. V. 15. No 9. P. 1–64. doi:10.1111/j.1461-0248.2012.01827.x

11. Pendall E., Mosier A.R., Morgan J.A. Rhizodeposition stimulated by elevated CO<sub>2</sub> in a semiarid grassland // *New Phytol.* 2004. V. 162. No 2. P. 447–458. doi:10.1111/j.1469-8137.2004.01054.x

12. Kravchenko A.N. et al. Microbial spatial footprint as a driver of soil carbon stabilization // *Nat. Commun.* Springer US, 2019. V. 10. No 1. P. 1–10. doi:10.1038/s41467-019-11057-4

13. Postma J.A. et al. OpenSimRoot: 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. et al. 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. Soil Carbon Sequestration in the Context of Climate Change Mitigation: A Review // *Soil Syst.* 2023. V. 7. No 64. P. 1–21. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7030064>

17. Карелин Д.В., Замолодчиков Д.Г., Краев Г.Н. Методическое руководство по анализу эмиссий углерода из почв поселений в тундре. ЦЭПЛ РАН. Москва, 2015. С. 1–64.

18. ISO 16072:2002 Soil quality — Laboratory methods for determination of microbial soil respiration. 2002. P. 1–19.

19. ISO 10694:1995 Soil Quality Determination of Organic and Total Carbon after Dry Combustion (Elementary Analysis). 1995. P. 1–7.

20. Canarini A. et al. Root exudation of primary metabolites: Mechanisms and their roles in plant responses to environmental stimuli // *Front. Plant Sci.* 2019. V. 10. No 2. P. 1–19. doi: 10.3389/fpls.2019.00157

21. Rahman M.M. Carbon Dioxide Emission from Soil // *Agric. Res.* 2013. Vol. 2. No 2. P. 132–139. <https://doi.org/10.1007/s40003-013-0061-y>

22. Sorrentino G. Introduction to emerging industrial applications of cannabis ( *Cannabis sativa L.* ) // *Rend. Lincei. Sci. Fis. e Nat.* Springer International Publishing, 2021. V. 32. No 2. P.



## References

1. Turner T.R., James E.K., Poole P.S. The plant microbiome // *Genome Biol.* 2013. V. 14. No 6. P. 1–10. doi:10.1186/gb-2013-14-6-209
2. Kaiser C. et al. 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. et al. Crops for Carbon Farming // *Front. Plant Sci.* 2021. V. 12. No 6. P. 1–12. doi: 10.3389/fpls.2021.636709
5. Donhauser J. et al. Temperatures beyond the community optimum promote the dominance of heat-adapted, fast growing and stress resistant bacteria in alpine soils // *Soil Biol. Biochem.* Elsevier Ltd, 2020. V. 148. No 5. P. 1–16. doi:10.1016/j.soilbio.2020.107873
6. Adkins J. et al. Effects of switchgrass cultivars and intraspecific differences in root structure on soil carbon inputs and accumulation // *Geoderma.* Elsevier B.V., 2016. V. 262. No 11. P. 147–154. doi:10.1016/j.geoderma.2015.08.019
7. Visković J. et al. Industrial Hemp (*Cannabis sativa* L.) Agronomy and Utilization: A Review // *Agronomy.* 2023. V. 13. No 3. P. 1–23. doi:10.3390/agronomy13030931
8. Li M. et al. Populus root exudates are associated with rhizosphere microbial communities and symbiotic patterns // *Front. Microbiol.* 2022. V. 13. No 12. P. 1–13. doi: 10.3389/fmicb.2022.1042944
9. Paustian K. et al. Quantifying carbon for agricultural soil management: from the current status toward a global soil information system // *Carbon Manag.* Taylor & Francis, 2019. V. 10. No 6. P. 567–587. doi:10.1080/17583004.2019.1633231
10. Phillips R.P. et al. Roots and fungi accelerate carbon and nitrogen cycling in forests exposed to elevated CO<sub>2</sub>. 2012. V. 15. No 9. P. 1–64. doi:10.1111/j.1461-0248.2012.01827.x
11. Pendall E., Mosier A.R., Morgan J.A. Rhizodeposition stimulated by elevated CO<sub>2</sub> in a semiarid grassland // *New Phytol.* 2004. V. 162. No 2. P. 447–458. doi:10.1111/j.1469-8137.2004.01054.x
12. Kravchenko A.N. et al. Microbial spatial footprint as a driver of soil carbon stabilization

// Nat. Commun. Springer US, 2019. V. 10. No 1. P. 1–10. doi:10.1038/s41467-019-11057-4

13. Postma J.A. et al. OpenSimRoot: 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. et al. 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. Soil Carbon Sequestration in the Context of Climate Change Mitigation: A Review // *Soil Syst.* 2023. V. 7. No 64. P. 1–21. <https://doi.org/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. Moscow, 2015. P. 1–64 (in Russian).

18. ISO 16072:2002 Soil quality — Laboratory methods for determination of microbial soil respiration. 2002. P.1–19.

19. ISO 10694:1995 Soil Quality Determination of Organic and Total Carbon after Dry Combustion (Elementary Analysis). 1995. P. 1–7.

20. Canarini A. et al. Root exudation of primary metabolites: Mechanisms and their roles in plant responses to environmental stimuli // *Front. Plant Sci.* 2019. V. 10. No 2. P. 1–19. doi:10.3389/fpls.2019.00157

21. Rahman M.M. Carbon Dioxide Emission from Soil // *Agric. Res.* 2013. V. 2. No 2. P. 132–139. <https://doi.org/10.1007/s40003-013-0061-y>

22. Sorrentino G. Introduction to emerging industrial applications of cannabis ( *Cannabis sativa* L . ) // *Rend. Lincei. Sci. Fis. e Nat.* Springer International Publishing, 2021. V. 32. No 2. P. 233–243. doi:10.1007/s12210-021-00979-1