

УДК 631.421.1

ОЦЕНКА ОТКЛИКА ГЕТЕРОТРОФНОГО ПОЧВЕННОГО ДЫХАНИЯ НА РЕЖИМ ВЫПАДЕНИЯ ЛЕТНИХ ОСАДКОВ И РАЗНУЮ ГЛУБИНУ СНЕЖНОГО ПОКРОВА В УСЛОВИЯХ УМЕРЕННО-КОНТИНЕНТАЛЬНОГО КЛИМАТА

© 2023 г. Д. А. Хорошаев^а, * (ORCID: 0000-0001-8044-7635),И. Н. Курганова^{а, б} (ORCID: 0000-0001-5875-0718), В. О. Лопес де Гереню^а (ORCID: 0000-0001-5461-2094)^аИнститут физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,
ул. Институтская, 2, Пушкино, Московская область, 142290 Россия^бТюменский государственный университет,
ул. Володарского, 6, Тюменская область, Тюмень, 625003 Россия

*e-mail: d.khoroshaev@pbcras.ru

Поступила в редакцию 18.04.2023 г.

После доработки 30.06.2023 г.

Принята к публикации 03.07.2023 г.

Режим выпадения осадков наряду с температурными условиями являются ключевыми факторами, определяющими скорость разложения органического вещества почв в наземных экосистемах. Цель работы – оценка влияния продолжительности засушливых периодов летом и разной глубины снежного покрова зимой на гетеротрофное дыхание почвы. Исследования проводили в рамках двухлетнего полевого имитационного эксперимента, организованного на серой почве (Haplic Luvisol) в зоне умеренно-континентального климата (южное Подмосковье), включающего 3 варианта: (1) имитация мягких погодных условий с равномерным поливом почвы летом и отсутствием ее промерзания зимой, (2) имитация двух летних сухих периодов продолжительностью 1–2 мес. с естественным режимом снежного покрова, (3) имитация экстремальных погодных условий с одним длительным (~3 мес.) сухим периодом летом и полным удалением снежного покрова зимой. Гетеротрофное дыхание почвы определяли методом закрытых камер на площадках под бесшумным черным паром в течение двух лет непрерывного эксперимента и одного года после его окончания. Медианные значения гетеротрофного почвенного дыхания за весь период эксперимента в трех вышеупомянутых вариантах опыта составили 38, 27 и 19 мг С/(м² ч) соответственно. Имитация непродолжительных сухих периодов привела к усилению суммарного гетеротрофного дыхания почвы за период летнего эксперимента на 7–10%, что может быть связано как с циклами высушивания и увлажнения почвы, так и с повышением средней летней температуры 20-сантиметрового почвенного профиля на 1.5°C. Имитация продолжительного сухого периода привела к снижению суммарного гетеротрофного дыхания почвы за тот же период на 12–16% как результат низкой влажности почвы. Промерзание почвы явилось причиной снижения суммарного гетеротрофного дыхания почвы за период зимнего эксперимента на 34–72%. Доля морозного периода (ноябрь–март) в годовом потоке CO₂ из почвы составила 25–34% в варианте, где почва не промерзала, и 14–19% – в вариантах с промерзающей почвой. Сделано заключение, что отсутствие промерзания почвы, вызванное увеличением глубины снежного покрова, привело к более существенному изменению величины годового гетеротрофного дыхания почвы, чем недостаток осадков в летний сезон.

Ключевые слова: эмиссия CO₂ из почвы, засухи, оттепели, температурный режим почвы, промерзание почв, черный пар, экстремальные погодные явления, Haplic Luvisol

DOI: 10.31857/S0032180X23600749, EDN: MFBFVR

ВВЕДЕНИЕ

Биогенный поток углекислого газа (CO₂) из почвы формируется в результате дыхания корней и гетеротрофных организмов. Деятельность последних замыкает почвенное звено биологического круговорота углерода. Поэтому оценка гетеротрофного источника принципиально важна

для расчета баланса углерода в наземных экосистемах.

Наблюдаемый рост глобальной температуры воздуха (T_v), которая в начале XXI в. превысила отметку в 1°C относительно доиндустриального уровня, вероятно, продолжится и может достигнуть 1.5–2°C в текущем столетии [40]. Одновре-

менно с увеличением приземной температуры воздуха отмечается устойчивый рост температуры почвы (T_p) [14, 73]. Однако в естественной среде последствия глобального потепления смягчаются благодаря способности растительного покрова к формированию и регулированию локального микроклимата [31]. Считается, что глобальное потепление закономерно должно вызвать усиление минерализации почвенного органического вещества (soil organic matter, SOM), обеспечивая петлю положительной обратной связи за счет более интенсивного выделения CO_2 из почвы [43]. Это убеждение подкрепляется анализом глобальной базы данных дыхания почв, в соответствии с которым за период с 1990 по 2014 гг. на фоне роста глобальной температуры воздуха на 0.7°C произошло усиление гетеротрофного дыхания почвы (heterotrophic respiration, HR) на 1.2% [22]. С другой стороны, результаты моделирования показывают, что глобальное потепление может привести к снижению влажности почвы на значительных территориях умеренного пояса [40]. Возможный дефицит почвенной влаги потенциально может компенсировать рост гетеротрофного дыхания почвы, ассоциированного с увеличением температуры [67, 75]. Перераспределение осадков между сезонами [14] в совокупности с изменением характера их выпадения [3, 28] может вызвать усиление засухливости даже на фоне общего роста количества осадков. Увеличение продолжительности сухих периодов (период без осадков) [3] может привести к уменьшению влажности почвы на отдельных временных отрезках. Не до конца ясно, могут ли эти изменения вызвать снижение гетеротрофного дыхания почвы и какова в этом процессе роль продолжительности периодов без осадков.

Потепление за пределами вегетационного сезона приводит к уменьшению продолжительности залегания снежного покрова в экосистемах умеренного пояса [15, 40]. Одновременно с изменением сроков формирования и схода снежного покрова для территории России в среднем наблюдается увеличение его максимальной высоты [14]. На обозначенные тенденции накладывается рост числа оттепелей в морозный период [6], сказывающихся на состоянии и теплоизолирующих свойствах снежного покрова. Позднее формирование устойчивого снежного покрова, как и ухудшение его теплоизолирующих свойств, может приводить к более сильному охлаждению биологически активного верхнего слоя почвы [34]. Изменение температуры почвы, динамики ее промерзания и числа циклов замерзания–оттаивания почвенной влаги серьезным образом повлияют на функционирование экосистем [44, 70]. Вопреки интуитивному пониманию морозного периода как периода покоя, процессы минерализации SOM протекают под снежным покровом даже в

самые суровые морозы. Микробные сообщества адаптируются к стабильной низкой температуре почвы, защищенной снежным покровом от сильного промерзания [61], а их биомасса в зимний период может превышать биомассу микробных сообществ в летний сезон [24, 66]. В отличие от теплого периода, зимой дыхание гетеротрофов формирует практически весь поток CO_2 из почвы [11] и может высвобождать до половины углерода, ассимилированного автотрофами в предшествующий вегетационный сезон [25]. Разный характер промерзания и оттаивания почвы влияет на функционирование микробных сообществ [9, 72] и, по всей видимости, является причиной сильного варьирования зимней эмиссии CO_2 из почвы как внутри сезона, так и на многолетнем масштабе [48]. Эта изменчивость вносит существенный вклад в варьирование доли морозного периода в годовом потоке CO_2 – от единиц процентов до половины суммарного годового потока CO_2 [49, 58]. Поэтому прогнозируемые изменения режима снежного покрова и его влияния на температурный режим почвы будут определять скорость разложения органического вещества в зимний период, оказывая значительное влияние на годовой баланс углерода в сезонно промерзающих почвах.

Оценка углеродного баланса в наземных экосистемах предполагает определение гетеротрофного (микробного) дыхания почвы [46, 50], что в условиях натуральных экспериментов является весьма трудоемким процессом. Методы, позволяющие разделить общее дыхание почв на корневую и микробную составляющие, довольно разнообразны, но единого подхода до сих пор не существует [30, 35, 51, 52]. Все они сопряжены с теми или иными нарушениями в экосистеме, трудоемки и зачастую дорогостоящи. Одним из доступных способов определения гетеротрофного дыхания, связанного с разложением SOM, является наблюдение за потоками CO_2 из почвы под черным паром. Кроме того, сравнение дыхания почв на парующих и луговых площадках можно использовать для определения вклада корней растений в общий поток CO_2 из почв как в летний, так и в морозный период [19, 47, 60, 71].

Для получения количественных и качественных оценок влияния будущих изменений климата на параметры углеродного цикла в отдельных экосистемах хорошо себя зарекомендовала постановка имитационных экспериментов [57, 67, 71, 75]. Применение этого подхода позволило выявить значимые факторы и возможные механизмы трансформации углеродного цикла в условиях меняющегося климата. Однако в большинстве случаев имитационные эксперименты проводят в течение одного сезона, редко контролируя изменения погодных и климатических условий в годовом масштабе [64]. Немногочисленные примеры

Таблица 1. Климатическая норма (КН, 1981–2010 гг.) со стандартным отклонением (SD) для региона исследования, среднемесячные значения температуры воздуха и суммы осадков в период проведения эксперимента (данные Станции Фонового Мониторинга (Росгидромет), Приокско-Террасный биосферный заповедник, местечко Данки, Московская область)

| Параметр, год | Янв. | Фев. | Мар. | Апр. | Май | Июн. | Июл. | Авг. | Сен. | Окт. | Нояб. | Дек. | Год |
|-------------------------|-------------|---------------|--------------|-------------|---------------|---------------|-------------|---------------|---------------|--------------|-------------|---------------|--------------|
| Температура воздуха, °С | | | | | | | | | | | | | |
| КН | –7.3 | –7.5 | –1.6 | 6.5 | 12.5 | 16.3 | 18.4 | 16.7 | 11.1 | 5.5 | –1.7 | –6.0 | 5.2 |
| SD | 3.7 | 4.3 | 2.7 | 2.1 | 1.9 | 2.0 | 1.9 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 3.0 | 3.5 | 1.0 |
| 2014 | –10.0 | –2.6 ↑ | 2.4 ↑ | 6.7 | 15.2 ↑ | 15.5 | 19.3 | 18.6 ↑ | 11.9 | 3.4 ↓ | –2.6 | –4.8 | 6.1 |
| 2015 | –4.9 | –2.7 ↑ | 1.8 ↑ | 6.1 | 13.6 | 17.0 | 17.9 | 16.7 | 13.9 ↑ | 4.1 | 0.0 | –0.5 ↑ | 6.9 ↑ |
| 2016 | –10.7 | –0.9 ↑ | –0.2 | 8.1 | 13.7 | 17.1 | 19.9 | 19.0 ↑ | 11.1 | 4.5 | –2.9 | –5.3 | 6.1 |
| 2017 | –7.8 | –5.1 | 2.0 ↑ | 5.9 | 10.7 | 13.9 ↓ | 17.2 | 17.9 | 12.3 | 4.5 | –0.4 | –0.2 ↑ | 5.9 |
| Сумма осадков, мм | | | | | | | | | | | | | |
| КН | 45 | 39 | 33 | 38 | 49 | 82 | 86 | 65 | 64 | 64 | 48 | 47 | 659 |
| SD | 19 | 17 | 17 | 19 | 27 | 41 | 35 | 46 | 35 | 29 | 20 | 24 | 92 |
| 2014 | 36 | 23 | 26 | 12 ↓ | 32 | 90 | 18 ↓ | 59 | 25 ↓ | 34 ↓ | 11 ↓ | 53 | 419 ↓ |
| 2015 | 40 | 19 ↓ | 15 ↓ | 47 | 99 ↑ | 49 | 83 | 14 ↓ | 43 | 16 ↓ | 47 | 43 | 514 ↓ |
| 2016 | 79 ↑ | 56 ↑ | 57 ↑ | 43 | 92 ↑ | 74 | 80 | 134 ↑ | 45 | 21 ↓ | 92 ↑ | 32 | 803 ↑ |
| 2017 | 45 | 23 | 42 | 33 | 52 | 103 | 72 | 50 | 16 | 66 | 25 ↓ | 76 ↑ | 603 |

Примечание. Жирным шрифтом и знаками ↑ и ↓ отмечены среднемесячные температуры воздуха и суммы осадков, отклоняющиеся от КН более, чем на 1 SD.

показывают важность комплексного рассмотрения изменения погодных условий в разные сезоны для правильной оценки экологических процессов [29, 37, 63, 68].

В регионе южного Подмосковья в течение последних двух десятилетий наблюдается одновременное усиление засушливости летнего периода и выраженное потепление зимой с уменьшением глубины и продолжительности залегания снежного покрова [10]. В связи с этим целью исследования состояла в оценке совокупного влияния увеличения продолжительности засушливых периодов летом и изменения глубины снежного покрова зимой на величину HR под чистым паром. Задачи включали: (1) определение внутри- и межгодовой изменчивости HR при имитации засушливых условий летом и изменения глубины снежного покрова — зимой, (2) оценку температурной чувствительности дыхания почвы при имитации различных погодных условий. Ожидается, что увеличение сухих периодов летом и снижение высоты снежного покрова зимой будет приводить к снижению HR, а промерзание почвы будет определять вклад морозного периода в формирование годового потока CO₂ из парующей почвы. Предполагается, что увеличение размаха температуры почвы в результате снижения теплоизолирующей функции снежного покрова будет приводить к увеличению температурной чувствительности гетеротрофного дыхания почвы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальный участок расположен на юге Московской области (54°49.854' N, 37°36.306' E) вблизи Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН. Климат региона — умеренно-континентальный. По данным станции фонового мониторинга Росгидромета (Приокско-Террасный биосферный заповедник, местечко Данки, Московская область; 54°54.148' N, 37°33.377' E) среднегодовая температура воздуха за период с 1981 по 2010 гг. составляет 5.2°C (стандартное отклонение, SD = 1.0°C), среднегодовая сумма осадков — 659 мм (SD = 92 мм). Около 2/3 годового количества осадков выпадает в теплый период (табл. 1). Морозный период в регионе исследований обычно продолжается с ноября по март. За начало морозного периода принимался первый день периода с отрицательной максимальной температурой воздуха продолжительностью не менее 5 сут, а конец соответствовал дате устойчивого перехода температуры воздуха через 0°C [7]. Устойчивый снежный покров наблюдается с ноября—декабря по март—апрель. Средняя многолетняя продолжительность его залегания составляет 131 сут (SD = 23 сут) со средним максимумом высоты 53 см (SD = 12 см).

Почва участка — серая среднесуглинистая (Haplic Luvisol (Loamic)) с содержанием физической глины 36.1%. Пространственная вариабельность основных свойств почвы невысокая (число

повторностей, $n = 16$): $pH_{KCl} - 6.1$ ($SD = 0.3$), содержание органического углерода — 14.6 г С/кг почвы ($SD = 1.4$ г С/кг почвы) и общего азота — 1.4 г N/кг почвы ($SD = 0.1$ г N/кг почвы).

С 2011 по 2014 г. экспериментальный участок находился под сеяным лугом (трехкомпонентная злаковая смесь с добавлением клевера белого). Весной 2014 г. на территории площадью ~ 55 м² было организовано 12 квадратных опытных делянок площадью по ~ 4 м², половина из которых была покрыта луговой растительностью, а на оставшихся поддерживался чистый пар. Луговые и парующие площадки чередовались в шахматном порядке. Между тремя вариантами опыта на глубину 30 см были установлены перегородки из пластика для предотвращения горизонтального перемещения влаги. Таким образом, каждый вариант включал две луговые и две парующие делянки.

Натурный имитационный эксперимент с регулированием количества осадков в летний период и манипулированием высотой снежного покрова в зимний проводили с июня 2014 г. по апрель 2016 г. Схема эксперимента предполагала три варианта с имитацией разных режимов выпадения осадков летом (летняя фаза эксперимента, ЛФЭ) и разной высоты снежного покрова зимой (зимняя фаза эксперимента, ЗФЭ). Для контроля осадков над делянками сооружалась крыша из армированного полиэтилена (с 3 июля по 17 октября 2014 г.) или поликарбоната (с 1 июня по 22 сентября 2015 г.).

В первом варианте летом поддерживались мягкие условия с оптимальной влажностью почвы в верхнем слое 0–6 см (50–60% их полного насыщения влагой; вариант регулярное увлажнение (РУ)) с имитацией стабильного снежного покрова на протяжении всего морозного периода (вариант без промерзания (БП)). Для поддержания необходимой влажности почвы летом полив делянок, эквивалентный 2.5–5 мм осадков, проводили каждые 2–3 сут. Имитацию стабильного снежного покрова проводили с помощью укладки на поверхность почвы трехслойной композиции из нетканого материала и синтепона (общая высота ~ 15 см). Материал раскладывали накануне первых заморозков и удаляли весной, после схода снежного покрова — он залегал с 21 октября 2014 г. по 16 марта 2015 г. (146 сут) и с 11 ноября 2015 г. по 7 апреля 2016 г. (148 сут).

Во втором варианте имитировали усиление засушливости летнего периода. С этой целью было организовано два коротких сухих периода (вариант короткие засухи (КЗ)), во время которых осадки отсутствовали: 32 и 49 сут в 2014 г., 35 и 53 сут в 2015 г. Между двумя сухими периодами проводили интенсивный полив (далее летний полив), эквивалентный 55 мм осадков в течение 5 сут в 2014 г. и 30 мм осадков в течение 7 сут в 2015 г.

После второго сухого периода проводили полив (далее осенний полив), эквивалентный 15 мм осадков в течение 8 сут в 2014 г. и 17.5 мм в течение 6 сут в 2015 г. Зимой в этом варианте сохраняли естественный режим снежного покрова (вариант зимний контроль (ЗК)).

Третий вариант предполагал имитацию экстремальных погодных условий, которые включали имитацию длительного сухого периода летом (вариант длительная засуха (ДЗ)) в совокупности с увеличенной глубиной промерзания почвы зимой (вариант без снега (БС)). Летние осадки отсутствовали 85 сут в 2014 г. и 94 сут в 2015 г. Завершение продолжительного сухого периода совместили с окончанием второго сухого периода в варианте КЗ. Интенсивность осеннего полива была эквивалентна 20 мм осадков в течение 8 сут в 2014 г. и 17.5 мм осадков в течение 6 сут в 2015 г. Для обеспечения глубокого промерзания почвы зимой снежный покров удаляли, как правило, в течение 1–3 сут после снегопада.

ЛФЭ ограничивалась периодом между весенним уравнивающим поливом и окончанием осеннего полива делянок: 1-я ЛФЭ с 01.07.2014 г. по 02.10.2014 г. и 2-я ЛФЭ с 01.06.2015 г. по 08.09.2015 г. ЗФЭ начиналась с укладки синтетического материала в варианте БП и оканчивалась весенним оттаиванием почвы: 1-я ЗФЭ с 21.10.2014 г. по 31.03.2015 г. и 2-я ЗФЭ с 11.11.2015 г. по 07.04.2016 г.

Для оценки возможных эффектов последствий описанных выше манипуляций с количеством поступающих в течение года осадков, наблюдения продолжили в период после окончания эксперимента (май 2016 г.—апрель 2017 г.), когда режим выпадения осадков и высота снежного покрова оставались естественными на всех делянках (уравнивательный период).

В представляемой работе основное внимание сосредоточено на анализе *гетеротрофного дыхания почвы*, которое определяли с поверхности делянок, находящихся под бесменным черным паром. Их поверхность изредка взрыхлялась для разрушения почвенной корки, а появляющиеся растения регулярно выпалывались. Таким образом, отсутствие растений обеспечило, главным образом, изучение отклика микроорганизмов, разлагающих SOM, на изменение летних и зимних погодных условий. Полученные оценки HR не включают ризосферную компоненту и не учитывают влияние растений на температуру и влажность почвы.

Измерение скорости выделения CO₂ из почвы в теплый период проводили динамическим камерным методом с помощью портативного инфракрасного газового анализатора LI-COR 6400XT (LI-COR, США). Камеру прибора (6400-09) устанавливали на цилиндрические пластиковые ос-

нования (высота 5 см, диаметр 11 см), которые были врезаны в почву на глубину 3 см. На каждой площадке устанавливали по два стационарных основания (итого 4 повторности на вариант).

В зимнее время скорость эмиссии CO_2 определяли статическим камерным методом [12]. В качестве камер использовали канализационные ПВХ трубы диаметром 10 см и высотой 45 см, которые врезали в почву на глубину 10 см. На каждой делянке устанавливали по 3 камеры (итого 6 повторностей на вариант). Когда снежный покров полностью накрывал камеры, их высоту увеличивали путем установки дополнительных секций. Камеры закрывали штатными ПВХ заглушками с врезанными резиновыми пробками для отбора газовых проб с помощью медицинских шприцов объемом 20 мл. Газовые пробы отбирали после 5–6 прокачиваний внутрикамерного воздуха через шприц. Отбор трех проб осуществляли через фиксированные промежутки времени (от 12 до 30 мин). Кончик иглы после отбора пробы закрывали резиновой пробкой. Определение концентрации CO_2 в пробах выполняли в тот же день в лаборатории на инфракрасном газовом анализаторе Li-820 (LICOR, США). Скорость HR (мг $\text{C}/(\text{м}^2 \text{ ч})$) рассчитывали по формуле:

$$\text{HR} = \frac{d\text{CO}_2 (V_k - V_{\text{сн}}) M}{dt S \times 100} \frac{P}{R(T + 273.15)}, \quad (1)$$

где $d\text{CO}_2/dt$ – скорость накопления CO_2 в камере, ppm/ч; V_k – объем камеры, см^3 , $V_{\text{сн}}$ – объем снега, см^3 , S – площадь основания камеры, см^2 ; M – молярная масса углерода (12 г/моль), P – давление, кПа; R – универсальная газовая постоянная, ($\text{м}^3 \text{ Па})/(\text{К моль})$; T – температура воздуха, $^\circ\text{C}$. Данные плотности снега взяты из специализированных массивов для климатических исследований для ближайшей метеостанции, Серпухов [1].

Измерение скорости HR проводили в первой половине дня с 9 до 13 ч. В периоды проведения ЛФЭ и ЗФЭ измерения потоков CO_2 проводили в среднем 1–3 раза в неделю, а во время летнего и осеннего поливов, как и в периоды зимних оттепелей, частота измерений увеличивалась до 1–2 раз в день.

Определение гидротермических параметров. Непрерывный мониторинг T_b и T_n проводили с помощью автоматических логгеров (iButton, США). Два логгера крепили на уровне 1.5 м над поверхностью почвы для регистрации T_b . Четыре логгера устанавливали в центре каждой делянки на глубинах 1, 5, 10 и 20 см. Значения T_n автоматически записывались каждые 4 ч. Измерения объемной влажности почв в верхнем 6–см слое почвы проводили во время измерения скорости HR с помощью электронного влагомера (НН-2, ML2 ThetaProbe, Великобритания). В морозный

период также контролировали высоту снежного покрова.

Обработка данных и статистический анализ. Суммарную величину HR (total heterotrophic respiration, THR, г $\text{C}/(\text{м}^2 \text{ сут})$) рассчитывали путем линейной интерполяции измеренных значений между последовательными датами в соответствии с формулой:

$$\text{THR} = \sum_{i=1}^n \frac{\overline{\text{HR}}_i}{t}, \quad (2)$$

где $\overline{\text{HR}}_i$ – средняя скорость гетеротрофного дыхания почвы между двумя последовательными датами (г $\text{C}/(\text{м}^2 \text{ сут})$), t – длительность периода между двумя последовательными датами (сут).

Расчет коэффициента температурной чувствительности Q_{10} для HR осуществляли на основе линейной зависимости логарифма HR от T_n :

$$\ln(\text{HR}) = aT_n + b, \quad (3)$$

$$Q_{10} = e^{10a}, \quad (4)$$

где a и b – эмпирические константы. Величина Q_{10} показывает, во сколько раз увеличивается интенсивность дыхания почвы при увеличении T_n на 10°C . Величину HR при 0°C (HR_0) рассчитывали по формуле (3).

Статистическую обработку проводили с использованием программного обеспечения MS Excel (пакет анализ данных) и стандартных библиотек программной среды вычислений R [62]. Для оценки влияния имитации погодных условий на HR использовали однофакторную ANOVA с повторениями. Апостериорный анализ множественного сравнения средних величин проводили при помощи теста Тьюки.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Погодные условия во время проведения эксперимента характеризовались наличием в отдельные месяцы умеренных ($>1 \text{ SD}$) аномалий среднемесячных температур воздуха и осадков относительно среднегодовых значений (табл. 1). Летний гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК) в 2014 и 2015 гг. составил 1.0 и 0.9 соответственно. Практически все месяцы морозных периодов 2014–2016 гг. характеризовались положительными аномалиями среднемесячных температур воздуха, которые составляли 1.2–5.5 $^\circ\text{C}$.

Теплые зимы 2014–2016 гг. сопровождалась регулярными оттепелями (рис. 1b). Под оттепелю мы понимали повышение среднесуточной температуры воздуха до 0°C и выше внутри устойчивого морозного периода [17]. Морозный период 2014/2015 гг. продолжался с 15 ноября 2014 г. по 19 февраля 2015 г. (96 сут) и насчитывал 17 сут с

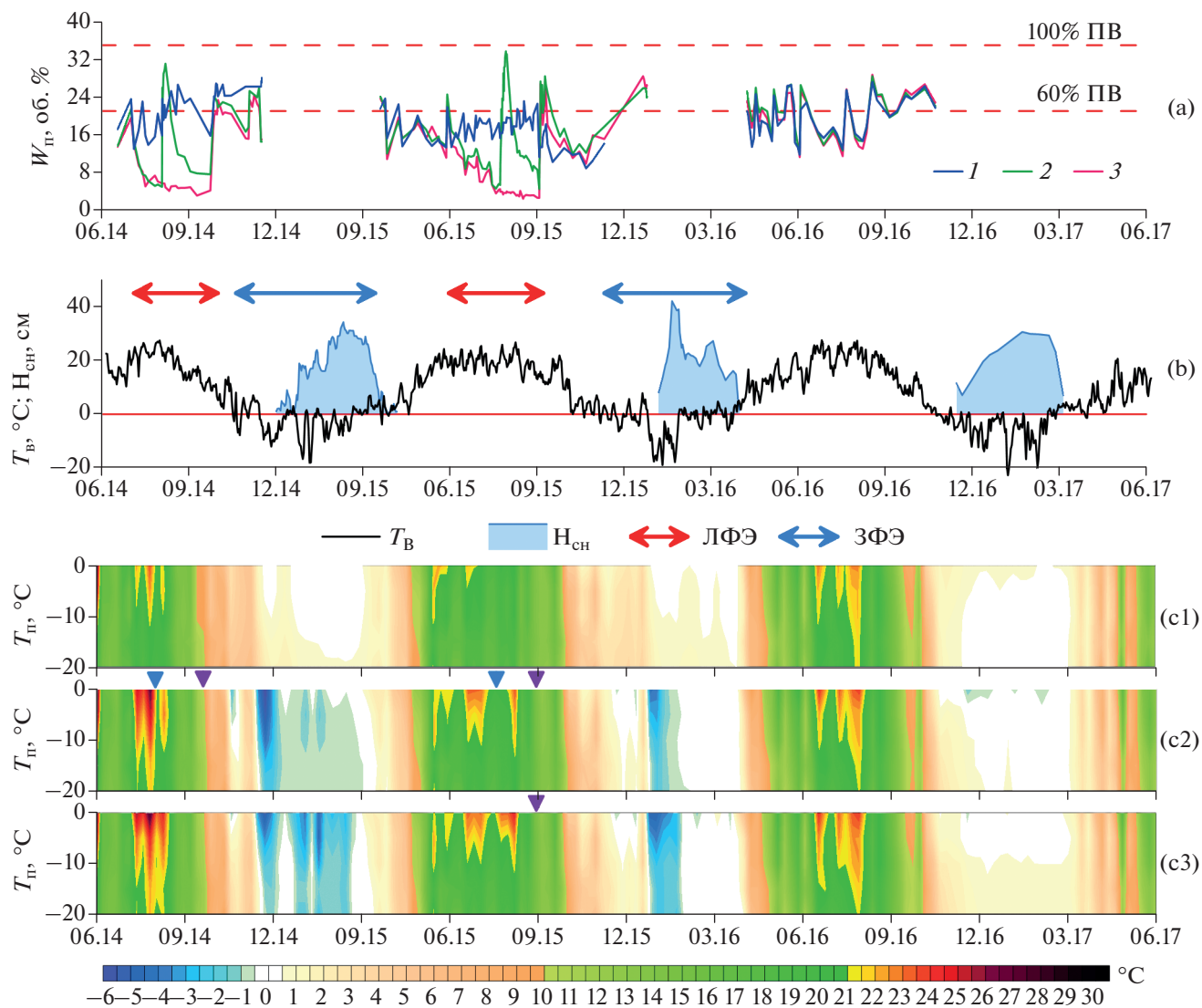


Рис. 1. Динамика показателей в эксперименте: а – влажность почвы (W_p) в слое 0–6 см во время имитации сухих периодов в трех вариантах опыта: регулярное увлажнение (1), имитация двух коротких сухих периодов (2) и продолжительного сухого периода (3); пунктиром обозначены уровни W_p относительно полевой влагоемкости (ПВ); б – динамика средней температуры воздуха (T_B) и высоты снежного покрова (H_{CH}) в 2014–2017 гг.; цифровая шкала обоих показателей одинаковая; в – термохроноизоплеты среднесуточной температуры почвы (T_n) на глубине 0–20 см в трех вариантах опыта: (с1) – регулярный полив летом и стабильный снежный покров зимой, (с2) – два коротких сухих периода летом и естественный снежный покров зимой, (с3) – продолжительный сухой период летом и отсутствие снежного покрова зимой.

оттепелью. Большая их часть (9 сут) наблюдалась с 13 по 23 декабря 2014 г., остальные равномерно распределились в январе 2015 г. Морозный период второго года эксперимента продолжался с 25 ноября 2015 г. по 26 марта 2016 г. (122 сут). Он был теплее, чем в предыдущий и характеризовался большим количеством оттепелей, которые суммарно насчитывали 44 сут. Сильная оттепель наблюдалась с 19 по 26 декабря 2015 г. С 28 января 2016 г. и до окончания морозного периода начался период с чередованием положительных дневных и отрицательных ночных температур воздуха,

который продолжался вплоть до начала активного снеготаяния. В этот период наблюдалось 30 сут с оттепелью.

Во время проведения эксперимента наблюдалось позднее образование снежного покрова, высота и свойства которого были бы достаточны для эффективной изоляции почвы от прямого влияния воздушных температур (рис. 1б). В *первый зимний сезон* снежный покров начал формироваться 2 декабря 2014 г., однако его высота не превышала 10 см, а сам он растаял во время декабрьской оттепели. Повторное образование снежного

покрова началось с обильных снегопадов сразу после окончания оттепели (с 25 декабря 2014 г.). Максимальной высоты снег (34 см) достиг к 10 февраля 2015 г. Январские оттепели приводили к таянию и уплотнению снежного покрова. Активное снеготаяние началось с 5 марта 2015 г. на фоне сильного увеличения дневной температуры воздуха. Полностью снег сошел в первой декаде апреля 2015 г. Во второй зимний сезон снежный покров образовался аномально поздно — 7 января 2016 г. За две недели его высота выросла до максимальной за зиму величины — 42 см. С началом аномально теплого периода высота покрова за 1 нед. (с 28 января по 4 февраля 2016 г.) снизилась в два раза и находилась на уровне 20–27 см до 10 марта. Снежный покров сильно уплотнился и в значительной мере деградировал под действием многочисленных оттепелей. Активное снеготаяние началось после устойчивого перехода температуры воздуха через 0°C. В целом, под воздействием частых оттепелей в снежном покрове наблюдались признаки сильного метаморфизма: структура снега становилась зернистой, в снежном профиле нарастала слоистость, образовывались ледяные прослойки. Талые воды замерзали при контакте с мерзлой почвой и образовывали ледяные блюдца на ее поверхности.

Следующий после окончания эксперимента период наблюдений, который пришелся на 2016–2017 гг., по температурным условиям был близок к климатической норме и характеризовался обильными осадками. Морозный период продолжался с 12 ноября 2016 г. по 17 февраля 2017 г. (97 сут). Образование устойчивого снежного покрова зимой 2016/2017 гг. совпало с началом морозного периода, а максимальная высота достигала 31 см. Его теплоизоляционная функция в значительной степени сохранялась всю зиму, благодаря малому влиянию оттепелей, общая продолжительность которых не превышала 6 сут. Начало снеготаяния совпало с окончанием морозного периода, а полностью снег сошел в первой декаде марта.

Таким образом, период исследований характеризовался погодными условиями, близкими к тем климатическим трендам, которые имеют место в регионе южного Подмосковья, а именно — засушливым летом и теплыми зимами, с повторяющимися оттепелями, циклами замерзания и оттаивания почв.

Влажность почвы. Перед началом летней фазы эксперимента по имитации сухих периодов влажность почвы на всех вариантах опыта варьировала незначительно и составляла 20–24 об. % (рис. 1а). Ограничение поступления осадков приводило к быстрому снижению влажности почвы в слое 0–6 см. В среднем за 2 недели она снижалась на 50%, а за месяц — на 70%. За 3 мес. имитации продолжительного сухого периода влажность почвы

снижалась на 90%. Средняя влажность почвы во время имитации коротких сухих периодов (включая периоды летнего и осеннего поливов) снижалась на 20–38% (табл. 2). Во время длительных сухих периодов средняя влажность почвы снижалась на 55–65%. В периоды летнего и осеннего поливов влажность почвы быстро возрастала и уже через 2–3 сут была примерно на одном уровне с регулярно увлажняемым вариантом. Летний полив был более интенсивным по сравнению с осенним (рис. 1а); максимальная влажность почвы достигала к концу полива 31–34 и 21–23 об. % соответственно.

Температура почвы. Температура почвы на глубине 5 см в летний период, как правило, находилась на уровне 15–25°C. Снижение влажности почвы приводило к увеличению ее температуры независимо от того, было ли это снижение вызвано короткими или длинными сухими периодами (рис. 1с). Средняя температура почвы во всем 20-сантиметровом слое при имитации сухих периодов была на 1.3–1.5°C выше, чем при регулярном поливе. Наибольшие различия в значениях почвенных температур между вариантами опыта наблюдались в жаркие и ясные дни ($T_b > 30^\circ\text{C}$). Прямой солнечный нагрев приводил к увеличению температуры почвы на глубине 1 см в варианте КЗ относительно варианта РУ в среднем на 6–7°C, достигая в отдельные дни 8–9°C. С увеличением глубины отмеченные различия довольно быстро уменьшались, составляя в слое 5 см в среднем 3°C для периодов с высокой температурой воздуха. Летний и осенний полив практически сразу приводили к выравниванию температуры почвы между вариантами. Однако уже через несколько суток после окончания летнего полива, когда поверхность почвы начинала подсыхать, различия между вариантами с поливом и без полива начинали увеличиваться и в течение 14 сут возвращались на прежний уровень. Летом 2016 г., когда имитацию сухих периодов не проводили, температурный режим почвы на всех делянках практически не отличался друг от друга.

Наибольшие различия в температурном режиме почвы разных вариантов наблюдались в морозный период (рис. 1с). В варианте с имитацией стабильного снежного покрова почва не промерзала, а средняя температура почвы на глубинах 1 и 5 см за морозный период находилась на уровне 0.3–0.4°C в 2014/2015 гг. и 0.8–1.2°C в 2015/2016 гг. Среднесуточная температура почвы практически не изменялась, оставаясь стабильной даже в периоды с сильными морозами. Температура почвы в варианте с естественным снежным покровом (контроль) была более подвержена влиянию низких температур воздуха. Позднее образование устойчивого снежного покрова в первые два года привело к сильному охлаждению и промерзанию почвы в начале зимы. Однако после установления

Таблица 2. Средняя влажность почвы в слое 0–6 см для разных временных периодов летней фазы эксперимента (ЛФЭ) по имитации сухих периодов в вариантах с регулярным увлажнением (РУ), короткими сухими периодами (КЗ) и длительным сухим периодом (ДЗ), об. %

| Период | РУ | КЗ | ДЗ | РУ/КЗ* | РУ/ДЗ* |
|----------------|----|----|----|--------|--------|
| 1-й год | | | | | |
| Начало ЛФЭ | 24 | 21 | 20 | | |
| 1 сухой период | 17 | 9 | 9 | –46% | –47% |
| Летний полив | 21 | 28 | 6 | +35% | –73% |
| 2 сухой период | 23 | 11 | 4 | –51% | –82% |
| Осенний полив | 24 | 22 | 19 | –7% | –19% |
| Вся ЛФЭ | 21 | 13 | 7 | –38% | –65% |
| 2-й год | | | | | |
| Начало ЛФЭ | 22 | 25 | 23 | | |
| 1 сухой период | 17 | 12 | 10 | –31% | –42% |
| Летний полив | 17 | 25 | 4 | +46% | –78% |
| 2 сухой период | 19 | 14 | 3 | –27% | –83% |
| Осенний полив | 15 | 21 | 20 | +42% | +33% |
| Вся ЛФЭ | 18 | 14 | 8 | –20% | –55% |

* Отличия во влажности почвы в вариантах КЗ и ДЗ относительно варианта РУ (%).

снежного покрова температура почвы перестала обуславливаться динамикой температуры воздуха. Термоизоляционный эффект снежного покрова привел к тому, что, несмотря на сильные морозы в январе 2016 г. температура почвы под нарастающим снежным покровом стала постепенно расти с $-7...-2^{\circ}\text{C}$ (слой 1–20 см) и стабилизировалась на уровне $-1...-0.5^{\circ}\text{C}$ по всему 20-сантиметровому слою. Средняя температура почвы на всех глубинах контрольного варианта была отрицательной и составляла $-1.4...-0.7^{\circ}\text{C}$ в морозный период 2014/2015 гг. и $-0.6...-0.1^{\circ}\text{C}$ в 2015/2016 гг. Удаление снежного покрова привело к усилению связи между температурой почвы и воздуха. Во время сильных морозов почва охлаждалась до $-6...-3^{\circ}\text{C}$ на разных глубинах, а в периоды оттепелей увеличивалась до $-0.5...1.5^{\circ}\text{C}$. В теплые солнечные дни оттепелей почва могла оттаивать на небольшую глубину. Средняя температура почвы на разных глубинах за два первых морозных периода составила $-2.4...-0.7$ и $-1.2...-0.2^{\circ}\text{C}$ соответственно. Из-за инертности почвенных температур ее оттаивание происходило за пределами морозного периода. Под весенним оттаиванием почвы на определенной глубине принимали дату начала устойчивого роста среднесуточной температуры почвы $>0-0.5^{\circ}\text{C}$. Полное оттаивание почвы во всех вариантах, где она промерзала, происходило через месяц после окончания устойчивого морозного периода в 2014/2015 гг. и через 10 сут в 2015–2016 гг. Хотя полное оттаивание почвы в контрольном и бес-снежном вариантах происходило практически одновременно, верхние 10 см почвы в варианте

без снега оттаивали быстрее и динамичнее, опережая контрольный вариант на 2–8 сут, благодаря более интенсивному прогреванию свободной от снега темной поверхности почвы. В период наблюдений 2016/2017 гг. после окончания эксперимента зимний температурный режим почвы был одинаков на всех делянках. Раннее образование устойчивого снежного покрова предотвратило промерзание почвы, средняя температура которой на разных глубинах за морозный период варьировала от -0.4 до 1.0°C . Температурный режим почвы в третий морозный период практически не отличался от такового в варианте с утеплением для предшествующих двух лет.

Динамика гетеротрофного дыхания почвы (HR). Многолетний ход почвенного дыхания в целом отражал смену времен года. Скорость HR за весь период наблюдений, усредненная по вариантам опыта ($n = 4-6$), как правило, не превышала ~ 200 мг С/(м² ч) (рис. 2а). Медианное значение HR в варианте РУ + БП, КЗ + ЗК и ДЗ + БС составило 38, 27 и 19 мг С/(м² ч) соответственно (рис. 2с). Коэффициент вариации в трех перечисленных вариантах составлял 49, 96 и 76%. Суммарные месячные величины HR варьировали от 0.3 до 75 мг С/(м² мес.) в зависимости от варианта опыта и времени года (рис. 2б, 2д).

Особенности динамики HR, характерные для конкретных вариантов, касались, прежде всего, распределения импульсных потоков CO₂ почвы, имеющих вид высоких и непродолжительных пиков, а также динамики выделения CO₂ из почвы в морозный период года. Летние импульсы HR, ве-

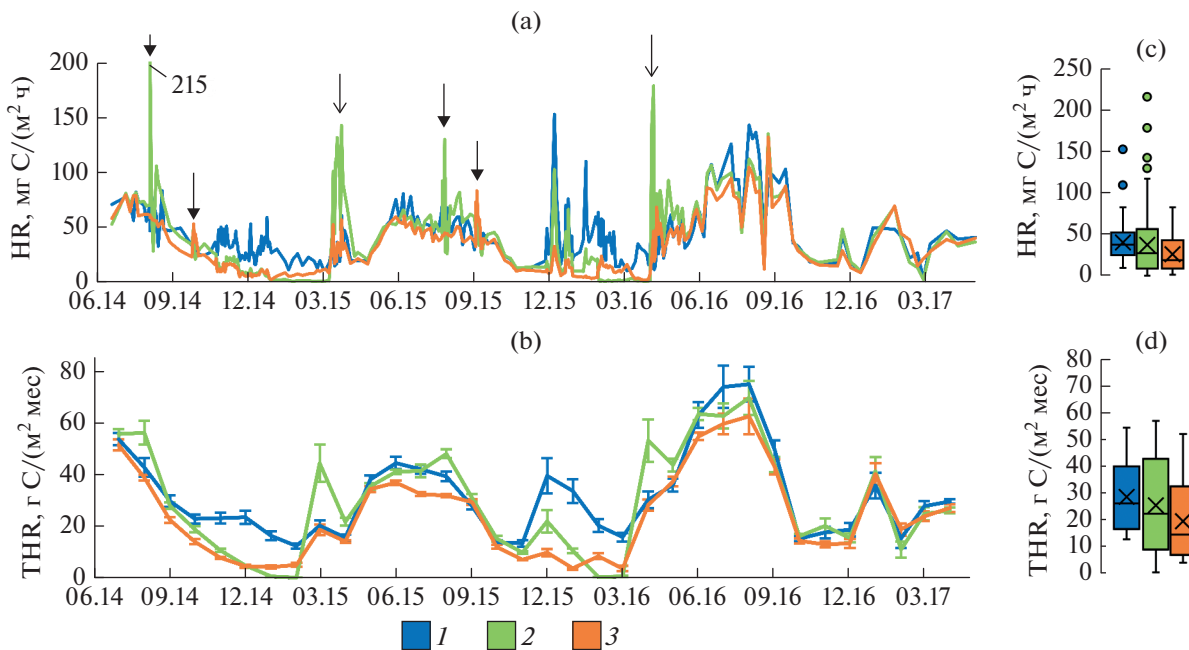


Рис. 2. Динамика скорости гетеротрофного дыхания почвы (HR) (a) и его суммарные месячные величины (THR) (b) в трех вариантах опыта: 1 – регулярное увлажнение почвы летом и отсутствие ее промерзания зимой, 2 – имитация двух сухих периодов летом с естественной высотой снежного покрова зимой, 3 – продолжительный сухой период летом при отсутствии снежного покрова зимой. Планками погрешностей указано стандартное отклонение. Полными стрелками показаны импульсы HR под действием летнего и осеннего поливов после имитации сухих периодов, тонкими стрелками показаны импульсы выделения CO_2 , связанные с весенним оттаиванием почвы. Диаграммы варьирования скорости HR (c) и THR (d) в период проведения эксперимента (с июля 2014 г. по апрель 2016 г.). Тело ящиков показывает 1 и 3 квартили, усы – 1.5-й межквартильный размах, горизонтальная черта – медиану, крестик – среднее значение.

личной в несколько раз превышающие медианные значения, были характерны для вариантов с имитацией сухих периодов: КЗ и ДЗ. Резкое усиление HR (на 54–211% через несколько часов после внесения первой порции осадков относительно периода до полива) в этих вариантах было вызвано поливом сухих почв (эффект Бирча) (рис. 2a). Отклик HR на полив почвы после второго короткого сухого периода (54–57%) был в 2–4 раза слабее по сравнению с реакцией на полив как после первого короткого (111–211%), так и после продолжительного сухого периода (128–135%). Выраженные пики эмиссии CO_2 из почвы, величина которых могла в несколько раз превышать интенсивность летних величин HR, наблюдались во время весеннего оттаивания почвы (рис. 2a). Наиболее интенсивные потоки CO_2 из почвы, достигающие 150–200 мг С/(м² ч), наблюдались при оттаивании почвы, на поверхности которой ранее находились ледяные блюдца и блокировали газообмен между почвой и атмосферой. Импульсы выделения CO_2 из почвы, наблюдающиеся при ее оттаивании в варианте без снежного покрова, достигали 50–80 мг С м²/ч.

Зимние величины HR во время проведения эксперимента характеризовались наибольшим

варьированием как во времени, так и вдоль градиента высоты снежного покрова. В течение зимы отмечалось наличие кратковременных импульсов выделения CO_2 из почвы разной силы (вплоть до 100–200 мг С/(м² ч)), которые сопровождалось увеличением пространственной изменчивости ($SD = 40\text{--}90$ мг С/(м² ч)). Вызванное оттепелями таяние снежного покрова приводило к практически полному прекращению выделения CO_2 из почвы в контрольном варианте. При отсутствии снежного покрова оттепели приводили к оттаиванию поверхности замерзшей почвы и усилению HR.

Суммарное гетеротрофное дыхание почвы (THR). Имитация коротких сухих периодов увеличила THR за летнюю фазу эксперимента в среднем на 8% ($n = 8, p = 0.38$) относительно варианта с регулярным поливом делянок (табл. 3, рис. 3a). Значения THR за зимнюю фазу эксперимента (с включением периода весеннего оттаивания почвы) под естественным снежным покровом были в среднем на 45% ниже ($n = 12, p = 0.001$), чем в варианте с имитацией стабильного снежного покрова, где почва не промерзала (рис. 3c). Удаление снежного покрова приводило к снижению THR на 65% по сравнению с вариантом без промерзания

Таблица 3. Суммарное гетеротрофное дыхание почвы (THR) за летнюю фазу эксперимента (ЛФЭ), зимнюю фазу эксперимента (ЗФЭ), в период после окончания эксперимента (ПЭП) и за отдельные календарные периоды эксперимента в трех вариантах опыта: регулярное увлажнение почвы летом и отсутствие ее промерзания зимой (РУ + БП), имитация двух сухих периодов летом с естественной высотой снежной покровы зимой (КЗ + ЗК), продолжительный сухой период летом при отсутствии снежной покровы зимой (ДЗ + БС). В качестве меры неопределенности указаны доверительные интервалы, 95%

| Период | | Суммарное гетеротрофное дыхание почвы (г С/м ²) в вариантах опыта | | |
|-----------------|---------------------------------|--|----------|----------|
| | | РУ + БП | КЗ + ЗК | ДЗ + БС |
| 1-я ЛФЭ | 01.07.2014–02.10.2014 (94 сут) | 124 ± 29 | 136 ± 12 | 110 ± 6 |
| 1-я ЗФЭ | 22.10.2014–31.03.2015 (166 сут) | 102 ± 33 | 64 ± 21 | 43 ± 12 |
| в том числе* | 13.03.2015–31.03.2015 (19 сут) | 15 ± 5 | 41 ± 17 | 14 ± 3 |
| морозный период | Ноябрь 2014 г.–март 2015 г. | 96 | 61 | 41 |
| зимний период | Декабрь 2014 г.–февраль 2015 г. | 52 | 6 | 14 |
| 1 год | Июль 2014 г.–июнь 2015 г. | 344 | 319 | 253 |
| 2-я ЛФЭ | 01.06.2015–09.09.2015 (100 сут) | 128 ± 18 | 137 ± 10 | 108 ± 4 |
| 2-я ЗФЭ | 11.11.2015–07.04.2016 (149 сут) | 124 ± 44 | 55 ± 13 | 34 ± 12 |
| в том числе* | 03.04.2016–05.04.2016 (3 сут) | 4 ± 2 | 11 ± 7 | 2 ± 1 |
| морозный период | Ноябрь 2015 г.–март 2016 г. | 123 | 44 | 33 |
| зимний период | Декабрь 2015 г.–февраль 2016 г. | 94 | 33 | 22 |
| 2 год | Июнь 2015 г.–май 2016 г. | 357 | 318 | 242 |
| ПЭП (лето) | 01.06.2016–30.09.2016 (122 сут) | 254 ± 40 | 231 ± 26 | 212 ± 16 |
| ПЭП (зима) | 01.11.2016–31.03.2015 (151 сут) | 113 ± 41 | 112 ± 31 | 108 ± 24 |
| Морозный период | Ноябрь 2016 г.–март 2017 г. | 116 | 113 | 110 |
| Зимний период | Декабрь 2016 г.–февраль 2017 г. | 70 | 68 | 73 |
| 3 год | Май 2015 г.–апрель 2016 г. | 459 | 440 | 409 |

* Период весеннего оттаивания почвы.

почвы ($n = 12, p < 0.001$) и на 36% ($n = 12, p = 0.22$) – по сравнению с контрольным вариантом. Отдельно стоит отметить вклад весеннего оттаивания почвы в формирование THR за зимнюю фазу эксперимента. Периоды весеннего оттаивания почвы в 2015 и 2016 гг. составляли 12 и 2% продолжительности зимней фазы эксперимента соответственно, но при этом формировали весьма существенную долю THR: от 7 до 64% (табл. 3).

В пост-экспериментальный уравнительный период наблюдалась тенденция к снижению THR за летне–раннеосенний период в ряду от имитации мягких условий к экстремальным (рис. 3b), однако различия имели слабую статистическую значимость (ANOVA, $n = 4, p = 0.19$). В зимний уравнительный период потоки в трех вариантах опыта не различались (рис. 3d).

Годовые величины THR варьировали от 253 до 459 г С/м². Хотя имитация коротких сухих периодов летом стимулировала HR, из-за зимнего промерзания почвы в данном варианте годовые величины THR здесь были на 7–11% ниже, чем при имитации мягких погодных условий. Иммитация

экстремальных погодных явлений приводила к снижению годовых значений THR на 26–32%.

Доли морозного (ноябрь–март) и зимнего (декабрь–февраль) периодов в годовой величине THR зависели от условий промерзания почвы. Если почва не промерзала, вклад морозного периода составлял 25–34%, а зимнего – 15–26%. В результате промерзания почвы вклады этих периодов снижались до 14–19 и 2–10% соответственно.

Имитация засушливых периодов летом и разной высоты снежного покрова зимой в течение 2 лет привела к изменению траекторий кумулятивных кривых HR за трехлетний период наблюдений (рис. 4). Иммитация коротких сухих периодов летом не привела к сильному расхождению кумулятивных линий относительно варианта с мягкими погодными условиями и даже несколько скомпенсировала ту разницу, которая накопилась в зимний период. Итоговая разница между двумя вариантами за три года наблюдений составила 100 г С/м². В свою очередь, иммитация продолжительного сухого периода летом в совокупности с отсутствующим снежным покровом зи-

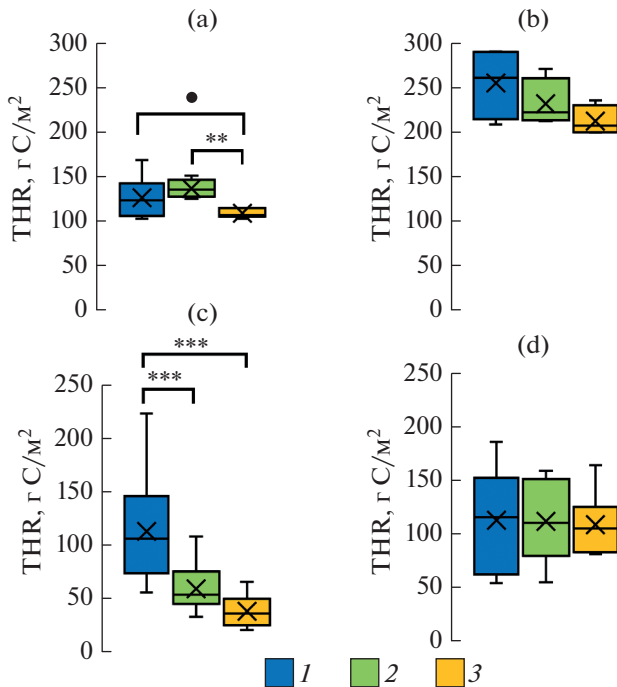


Рис. 3. Суммарные величины гетеротрофного дыхания почвы (THR) за: а – летние фазы эксперимента 2014–2015 гг. с – зимние фазы эксперимента 2014/2015–2015/2016 гг. б – за июнь–сентябрь 2016 г. д – ноябрь–апрель уравнильных 2016/2017 гг. в трех вариантах опыта: регулярное увлажнение почвы летом и отсутствие ее промерзания зимой (1), имитация двух сухих периодов летом с естественной высотой снежного покрова зимой (2), продолжительный сухой период летом при отсутствии снежного покрова зимой (3). Условными знаками отмечены различия между вариантами опыта на уровне значимости: • – 0.1, * – 0.05, *** – 0.001.

мой приводили к более сильному расхождению кумулятивных кривых относительно варианта с мягкими условиями – разница достигла к концу наблюдений 270 г С/м². Наибольшая скорость расхождения кумулятивных кривых наблюдалась зимой, что подчеркивает важность влияния зимнего климата на эмиссионную составляющую цикла углерода.

Коэффициент температурной чувствительности гетеротрофного дыхания почвы Q_{10} рассчитывали, используя суммарные месячные величины HR и усредненную температуру почвы на глубине 1–10 см (рис. 5а, 5б). Величина Q_{10} в разные годы эксперимента увеличивалась от 1.44–1.68 в варианте с имитацией мягких погодных условий до 2.38–2.6 – в варианте с имитацией экстремальных погодных условий. При этом величина Q_{10} в большей степени зависела от условий зимнего температурного режима почвы, который определялся высотой и стабильностью снежного покрова (рис. 5с). Полученные экспоненциальные зависимости показывают, что суммарное месячное дыхание почвы

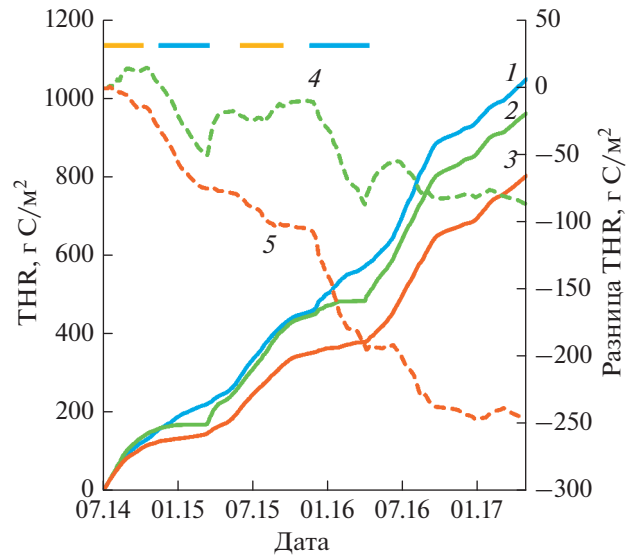


Рис. 4. Кумулятивные кривые гетеротрофного дыхания почвы (THR) в трех вариантах опыта: регулярное увлажнение почвы летом и отсутствие ее промерзания зимой (РУ + БП; 1), имитация двух сухих периодов летом с естественной высотой снежного покрова зимой (КЗ + ЗК; 2), продолжительный сухой период летом при отсутствии снежного покрова зимой (ДЗ + БС; 3); величина накопленных отклонений суммарного потока CO₂ из почвы в вариантах КЗ + ЗК (4) и ДЗ + БС (5) относительно варианта РУ + БП. Оранжевыми отрезками показаны периоды имитации сухих периодов, голубыми – разной высоты снежного покрова.

при 0°С (HR₀), в зависимости от высоты снежного покрова, изменяется от 7 до 22 г С/(м² мес). Величины HR₀ были тесно линейно связаны со средней зимней температурой почвы (рис. 5д).

ОБСУЖДЕНИЕ

Усиление засушливости климата и дыхание почв. Погодные условия двух лет эксперимента отражали те изменения климата, которые в последние десятилетия наблюдаются на территории южного Подмосковья [10]. Значения ГТК вошли в 15% наиболее низких с 1981 по 2010 гг., что обеспечило благоприятный фон для проведения имитационного эксперимента по регулированию количества осадков в летний период.

Рост продолжительности сухих и влажных периодов [3] в сочетании с увеличением доли конвективных осадков [28] могут оказать серьезное влияние на экосистемы, прежде всего, через изменение почвенной влажности. Модельные оценки реакции почвенного дыхания на изменение климата приводят как к небольшому усилению стока углерода в наземные экосистемы, так и к его сильным потерям [33], а неопределенность выполненных прогнозов связана с реакцией дыха-

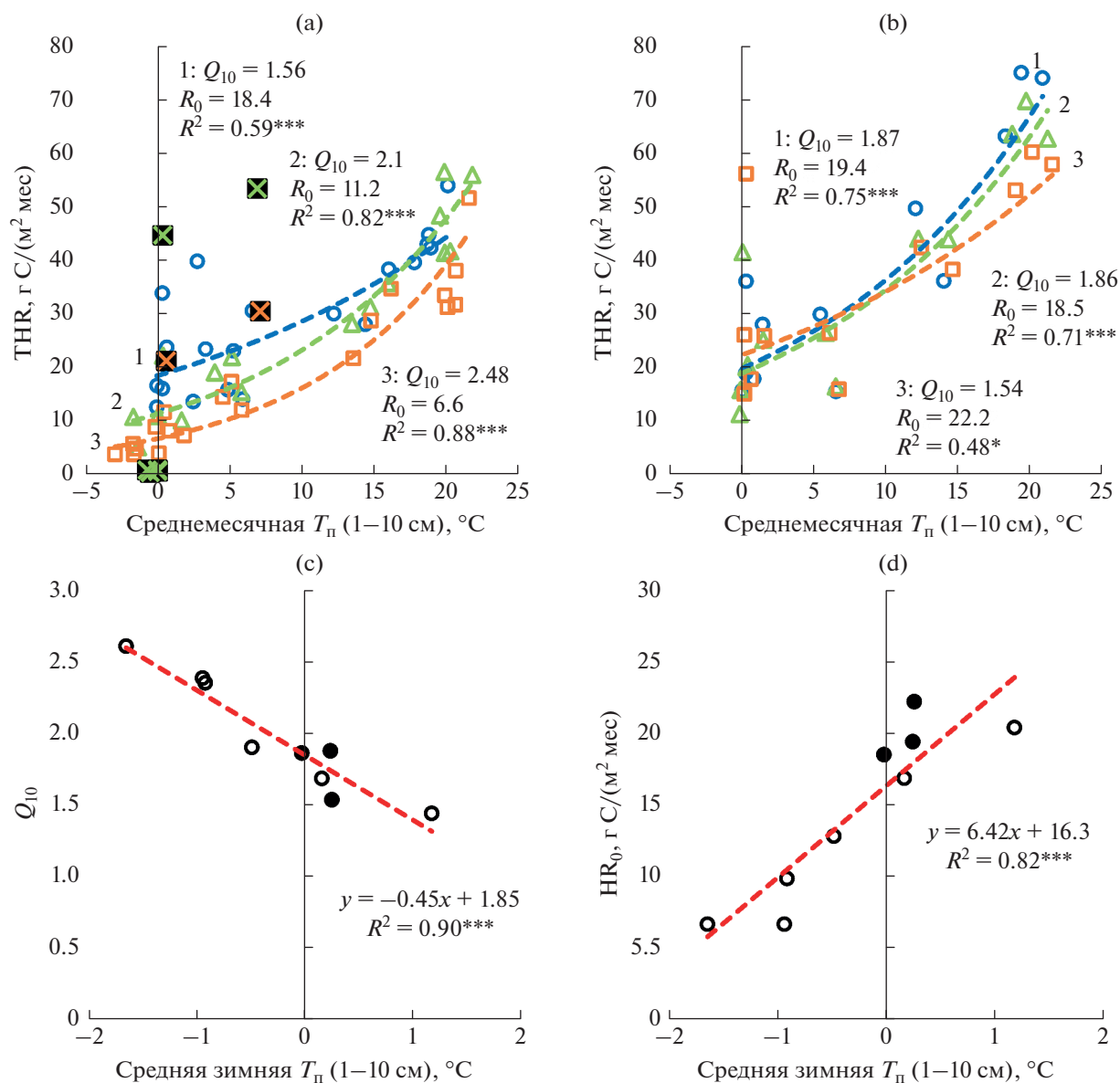


Рис. 5. Зависимость суммарных месячных величин гетеротрофного дыхания почвы (THR) от среднемесячной температуры почвы (T_n) усредненной по глубине 1–10 см в период эксперимента (объединенная выборка 2014–2016 гг.; (a) и после его окончания (2016–2017 гг.; (b) в трех вариантах опыта: регулярное увлажнение почвы летом и отсутствие ее промерзания зимой (1), имитация двух сухих периодов летом с естественной высотой снежного покрова зимой (2), продолжительный сухой период летом при отсутствии снежного покрова зимой (3); зависимость полученных коэффициентов температурной чувствительности Q_{10} (c) и HR при среднемесячной температуре 0°C – HR_0 (d) за разные годы в трех вариантах от средней зимней (декабрь–февраль) T_n . Черными кружками отмечены Q_{10} и HR_0 в уравнительный год.

ния почвы на изменение влажности почвы. Результаты многолетнего мониторинга почвенного дыхания показывают тенденцию к ослаблению выделения CO_2 на фоне увеличения среднегодовой температуры воздуха и уменьшения количества осадков в летний период [49]. Имеются свидетельства, что засухи в лесах умеренного пояса могут ослаблять разложение старого органического вещества почвы и приводить как минимум

к временному усилению стока углерода за счет меньшей минерализации подстилки [23]. При этом стоит помнить, что сокращение первичной продукции экосистемы в ответ на более сухие условия может резко усилиться и превзойти ослабление почвенного потока CO_2 в случае возникновения серьезных засух и, как следствие – приводить к потерям углерода в рассматриваемой экосистеме [39].

Увеличение температуры почвы на фоне снижения влажности [18, 59] может привести к усилению минерализации органического вещества почвы в том случае, если количество почвенной влаги не падает ниже критического уровня. Вероятно, что этот механизм приводил к положительному отклику гетеротрофного дыхания почвы на имитацию коротких сухих периодов, что было выявлено в нашем эксперименте. Средняя температура почвы в верхнем 20-сантиметровом слое при имитации сухих периодов была примерно на 1.5°C выше, чем при регулярном увлажнении. Если принять коэффициент Q_{10} , равный 2.1 (аналогичный полученному для рассматриваемого варианта), то обозначенное увеличение температуры должно было бы привести к увеличению дыхания почвы на 11%, что примерно соответствует наблюдаемому в варианте с двумя короткими сухими периодами усилению эмиссии CO_2 из почвы (7–11%). В реальности разница температурного режима почвы между влажным и засушливым летом может быть еще сильнее из-за комплексного влияния облачности, эвапотранспирации, продуктивности экосистем и пр. [54, 55]. В варианте с продолжительным сухим периодом потери почвенной влаги, вероятно, были недостаточными для ослабления гетеротрофного дыхания почвы. Увеличение температуры почвы, как и дыхательный импульс, после полива не компенсировали эффект продолжительного иссушения почвы, что наблюдалось в других экспериментах [56, 59].

Повышенная скорость выделения CO_2 из почвы после увлажнения сухих почв, известная в литературе как эффект Бирча [5, 20, 21], хорошо выделялась в виде непродолжительных всплесков HR, однако в масштабе летнего сезона влияние периодов увлажнения с повышенными величинами HR было несущественным. Менее выраженная величина эффекта Бирча после второго короткого сухого периода, вероятно, связана с меньшей степенью иссушения почвы. Ранее показано, что игнорирование эффекта Бирча на луговых делянках приводило к недооценке экосистемного дыхания в масштабах летнего сезона на 3–6% [18]. Это может быть связано с более сильным иссушением почвы под луговым ценозом за счет транспирации влаги растениями в сравнении с черным паром. С другой стороны, почва под лугом включала свежее органическое вещество, растительные остатки и сообщества ризосферных микроорганизмов, что также могло повлиять на более выраженный дыхательный импульс. В регионах с засушливым климатом или в периоды засух эффект Бирча может в значительной степени влиять на углеродный баланс экосистемы [5, 41]. Однако в регионах с малой продолжительностью сухих периодов роль дыхательных всплесков в формировании потока CO_2 из почв

незначительна [4]. Обсуждаемые ранее тренды увеличения продолжительности сухих периодов потенциально могут способствовать увеличению роли эффекта Бирча для тех территорий, где ранее он не являлся существенным.

Влияние зимнего потепления на дыхание почвы. Снижение продолжительности залегания снежного покрова на территории северной Евразии [40], увеличение числа зимних оттепелей [13] и количества жидких осадков в морозный период приводят к снижению теплоизолирующей функции снежного покрова, что ведет к изменению зимнего климата почвы. Гипотеза о “холодных почвах в более теплом мире” первоначально была сформулирована на основе экспериментов по имитации более позднего формирования снежного покрова [36]. И хотя разными коллективами были обнаружены противоречивые тенденции изменений температурного режима почвы в ответ на зимнее потепление [16, 26, 38, 45, 69, 74], как минимум в некоторых экосистемах данная гипотеза подтверждалась для верхних, самых биологически активных горизонтов почвы [34]. Результаты проведенных исследований показывают, что зимний климат почвы играет определяющую роль в формировании высокой изменчивости вклада морозного и зимнего периодов в годовые потоки CO_2 из почвы, которая фиксируется в ряде натуральных наблюдений [8, 48, 58]. При этом сильное варьирование суммарной зимней эмиссии CO_2 из почвы наблюдалось и без поступления свежего органического вещества в виде растительных остатков и экссудатов, недостаток которых является одним из лимитирующих факторов зимнего потока CO_2 из почвы [25].

Промерзание почвы является фактором, сильно ограничивающим доступность питательных веществ для почвенных микроорганизмов [32], оттаивание почв, наоборот, высвобождает легкодоступные элементы питания [42]. Однако короткие импульсы выделения CO_2 из почвы во время оттепелей в зимний период, наблюдавшиеся в эксперименте, связаны не только с резкой активизацией микробных сообществ [9], но и с физическими причинами. Ранее отмечалось резкое увеличение потока CO_2 в атмосферу, обусловленное высвобождением накопленного в почвенном профиле CO_2 [2, 27, 53]. В данном исследовании за короткий период весеннего оттаивания почвы формировалось 7–64% суммарного гетеротрофного дыхания почвы за 5 мес. морозного периода. Наличие столь весомых импульсов выделения CO_2 из почвы указывает на необходимость увеличения частоты измерений зимней эмиссии CO_2 или разработки иных подходов к оценке импульсных составляющих выделения CO_2 , например, на базе проведения сопутствующих изменений концентрации CO_2 в почвенном профиле. Выражен-

ная короткопериодная вариативность зимних потоков CO_2 из почвы, связанная, по всей видимости, с физическими причинами, и практически неизменная температура почвы делают крайне затруднительной оценку температурной чувствительности дыхания микробных сообществ в зимний период, которая, согласно ряду работ, имеет весьма высокие величины [61, 65]. Без получения надежных оценок температурного коэффициента зимнего дыхания почвы и понимания механизмов его изменчивости, оценки зимних потоков CO_2 из почв будут оставаться весьма консервативными.

Совокупное влияние изменения летних и зимних погодных условий. Увеличение продолжительности сухих периодов привело к разному отклику почвенных микроорганизмов на недостаток осадков: от усиления гетеротрофного дыхания почвы за теплый период (апрель–октябрь) на 10–40 г C/M^2 при имитации коротких сухих периодов до его ослабления на 26–35 г C/M^2 в результате удлинения периода без осадков. На многолетнем масштабе эти эффекты могут компенсировать друг друга в связи с естественной изменчивостью погодных условий. С другой стороны, отсутствие промерзания почвы зимой приводило к увеличению почвенного гетеротрофного дыхания в морозный период (ноябрь–март) – на 35–90 г C/M^2 в зависимости от глубины промерзания на сравниваемых участках черного пара. Отсюда неодинаковые тенденции зимнего климата почвы, наблюдаемые в разных регионах, могут привести к усилению варьирования вклада холодного периода в формировании годового дыхания почвы. Это может усилить неопределенность оценок годового потока CO_2 из почвы при использовании неизменных коэффициентов пересчета в тех случаях, где фактические измерения дыхания почвы за пределами периода вегетации отсутствуют. Результаты показывают, что средняя зимняя температура почвы может служить предиктором для корректировки как значений температурного коэффициента Q_{10} , так и коэффициента HR_0 , которые необходимы для расчета динамики HR на основе имеющихся температурных рядов. Оценка температурной чувствительности почвенного дыхания, и особенно его гетеротрофной составляющей для изменяющихся погодных условий, крайне важна для понимания траекторий изменения углеродного баланса в наземных экосистемах под влиянием текущих климатических трендов. Развитие работ по изучению влияния экстремальных погодных условий на дыхание почв может быть расширено за счет проведения экспериментов на почвах с разным качеством органического вещества и разной текстурой, которые в значительной степени влияют на формирование гетеротрофного потока CO_2 из почв и его водный режим.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Увеличение температуры воздуха в сочетании с изменением характера выпадения осадков может серьезным образом изменить климат почвы, от которого зависит деструкционное звено углеродного цикла в наземных экосистемах. Как показали результаты проведенного эксперимента, увеличение продолжительности сухих периодов неоднозначно влияет на интенсивность гетеротрофного дыхания почвы и может быть причиной как его усиления, так и ослабления. Направленность и величина этого влияния предположительно зависят от соотношения между увеличением биологической активности почвы в результате роста температуры и снижением доступности субстрата в результате уменьшения влажности. Считаем, что критическая продолжительность сухого периода, после которого начинается снижение интенсивности почвенного дыхания, будет отличаться для разных почв и экосистем, что связано как с влагоудерживающей способностью почвы, так и уровнем потребления воды растительными сообществами.

Сокращение продолжительности снежного покрова, изменение его свойств в ответ на потепление зим вызывают перемены в температурном режиме почвы, что может существенным образом отразиться на динамике ее промерзания. Изменение высоты снежного покрова повлияло на годовое гетеротрофное дыхание почвы сильнее, чем усиление летней засухливости. Это свидетельствует о том, что зимний период является критически важным для формирования общего экосистемного обмена в контексте изменения климата.

Показано, что морозный сезон в представленных климатических условиях может составлять существенную (до 35%) долю годового гетеротрофного потока CO_2 из почвы. Отсутствие видимых потоков CO_2 с поверхности почвы в зимний период не всегда означает отсутствие его продукции в почве. При невозможности высвобождения CO_2 из почвы в результате закрытия пор льдом, углекислый газ скапливался и распределялся в почвенном профиле, выходя наружу после оттаивания почв в виде непродолжительных интенсивных потоков. Этот разрыв между продукцией и выходом CO_2 является не только причиной недооценки или переоценки суммарного зимнего потока CO_2 при недостаточном числе измерений, но и препятствует адекватной оценке температурной чувствительности почвы, по данным полевых наблюдений. Как вариант решения этой проблемы предлагаем ориентироваться на интегральные показатели в зимний период: суммарные потоки CO_2 и среднюю зимнюю температуру почвы.

Увеличение коэффициента температурной чувствительности Q_{10} гетеротрофного дыхания

почвы в результате усиления экстремальности погодных условий, имитация которых проводилась в настоящем эксперименте, было связано, в первую очередь, с изменением зимнего климата почвы. Варьирование гетеротрофного дыхания почвы при 0°C, как и величина коэффициента Q_{10} , были тесно связаны со средней зимней температурой почвы. Это показывает, что разложение органического вещества почвы на многолетнем масштабе связано в числе прочих причин с условиями зимнего промерзания почв.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы признательны сотрудникам Станции фоновый мониторинга (Данки, Серпуховский район, Московская область), предоставившим данные метеорологических наблюдений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Экспериментальные работы выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 122040500037-6) при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект 075-15-2021-610) и Правительства Тюменской области (проект Западно-Сибирского межрегионального научно-образовательного центра № 89-ДОН (1)). Анализ данных и подготовка рукописи проводилось в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 122111000095-8).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Веселов В.М., Прибыльская И.Р., Мирзеабасов О.А.* Специализированные массивы для климатических исследований. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2022
2. *Гончарова О.Ю., Семенюк О.В., Матышак Г.В., Бобрин А.А.* Сезонная динамика продукции CO₂ почвами дендрария ботанического сада МГУ им. М.В. Ломоносова // Вестник Моск. ун-та. 2016. № 2. С. 3–10
3. *Золина О.Г., Булыгина О.Н.* Современная Климатическая Изменчивость Характеристик Экстремальных Осадков В России // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2016. Т. 1. С. 84–103. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2016-1-84-103>
4. *Карелин Д.В., Горячкин С.В., Кудиков А.В., Лопес де Гереню В.О., Лунин В.Н., Долгих А.В., Люри Д.И.* Изменение запасов углерода и эмиссии CO₂ в ходе постагрогенной сукцессии растительности на серых почвах в европейской части России // *Почвоведение*. 2017. № 5. С. 580–594. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17050070>
5. *Карелин Д.В., Замолодчиков Д.Г., Исаев А.С.* Мало-известные импульсные составляющие почвенной эмиссии диоксида углерода в таежных лесах // *Доклады Академии наук*. 2017. Т. 475. № 4. С. 473–476. <https://doi.org/10.7868/s0869565217220248>
6. *Коршунова Н.Н., Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Давлетишин С.Г.* Оценки экстремальности температурного режима и режима осадков для территории РФ и ее регионов // *Тр. Всерос. НИИ гидрометеорологической информации – мирового центра данных*. 2018. № 183. С. 20–30
7. *Коршунова Н.Н., Давлетишин С.Г.* Климатические характеристики оттепелей на территории России // *Тр. Всерос. НИИ гидрометеорологической информации – мирового центра данных*. 2019. № 184. С. 24–32
8. *Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Хорошаев Д.А., Мякшина Т.Н., Сапронов Д.В., Жмурич В.А., Кудеяров В.Н.* Анализ многолетней динамики дыхания почв в лесном и луговом ценозах Приокско-террасного биосферного заповедника в свете современных климатических трендов // *Почвоведение*. 2020. № 10. С. 1220–1236. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20100111>
9. *Курганова И.Н., Тине Р.* Влияние процессов промерзания–оттаивания на дыхательную активность почв // *Почвоведение*. 2003. № 9. С. 1095–1105.
10. *Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Аблеева В.А., Быховец С.С.* Климат южного Подмоскovie: современные тренды и оценка аномальности // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2017. Т. 4. С. 66–82. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2017-4-66-82>
11. *Ларионова А.А., Евдокимов И.В., Курганова И.Н., Сапронов Д.В., Кузнецова Л.Г., Лопес де Гереню В.О.* Дыхание корней и его вклад в эмиссию CO₂ из почвы // *Почвоведение*. 2003. № 2. С. 183–194
12. *Лопес де Гереню В.О., Курганова И.Н., Замолодчиков Д.Г., Кудеяров В.Н.* Методы количественной оценки потоков диоксида углерода из почв // *Методы исследований органического вещества почв*. М., 2005. С. 408–425
13. *Мирвис В.М., Гусева И.П.* Изменения в режиме оттепелей на территории России // *Тр. главной геофизической обсерватории им. А.И. Войтхова*. 2007. № 556. С. 101–115
14. Росгидромет. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. М., 2022. 104 с.
15. Росгидромет. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Под ред. Катцова В.М. СПб.: Научное издание, 2022. 676 с.
16. *Сосновский А.В., Осокин Н.И.* Влияние оттепелей на снежный покров и промерзание грунта при современных изменениях климата // *Лед и снег*. 2019. Т. 59. № 4. С. 475–482. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-4-433>
17. *Хайруллин Х.Ш.* Оттепели на территории СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 87 с.

18. *Хорошаев Д.А.* Влияние экстремальных погодных явлений на потоки CO₂ из почв под луговой растительностью и чистым паром в имитационном эксперименте. Дис. ... канд. биол. наук. М., 2021. 200 с.
19. *Akinremi O.O., McGinn S.M., McLean H.D.J.* Effects of soil temperature and moisture on soil respiration in barley and fallow plots // *Can. J. Soil Sci.* 1999. V. 79. P. 5–13.
<https://doi.org/10.4141/s98-023>
20. *Barnard R.L., Blazewicz S.J., Firestone M.K.* Rewetting of soil: revisiting the origin of soil CO₂ emissions // *Soil Biol. Biochem.* 2020. V. 147. P. 107819.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107819>
21. *Birch H.F.* The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability // *Plant Soil.* 1958. V. 10. P. 9–31.
<https://doi.org/10.1007/BF01343734>
22. *Bond-Lamberty B., Bailey V.L., Chen M., Gough C.M., Vargas R.* Globally rising soil heterotrophic respiration over recent decades // *Nature.* Nature Publishing Group. 2018. V. 560. P. 80–83.
<https://doi.org/10.1038/s41586-018-0358-x>
23. *Borken W., Savage K., Davidson E.A., Trumbore S.E.* Effects of experimental drought on soil respiration and radiocarbon efflux from a temperate forest soil // *Glob. Change Biol.* 2006. V. 12. P. 177–193.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001058.x>
24. *Brooks P.D., Grogan P., Templer P.H., Groffman P., Öquist M.G., Schimel J.* Carbon and Nitrogen Cycling in Snow-Covered Environments // *Geogr. Compass.* 2011. V. 5. P. 682–699.
<https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2011.00420.x>
25. *Brooks P.D., McKnight D., Elder K.* Carbon limitation of soil respiration under winter snowpacks: potential feedbacks between growing season and winter carbon fluxes // *Glob. Change Biol.* 2005. V. 11. P. 231–238.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00877.x>
26. *Campbell J.L., Ollinger S.V., Flerchinger G.N., Wicklein H., Hayhoe K., Bailey A.S.* Past and projected future changes in snowpack and soil frost at the Hubbard Brook Experimental Forest, New Hampshire, USA // *Hydrol. Process.* 2010. V. 24. P. 2465–2480.
<https://doi.org/10.1002/hyp.7666>
27. *Chantigny M.H., Rochette P., Angers D.A., Goyer C., Brin L.D., Bertrand N.* Nongrowing season N₂O and CO₂ emissions – Temporal dynamics and influence of soil texture and fall-applied manure // *Can. J. Soil Sci.* NRC Research Press, 2017. V. 97. P. 452–464.
<https://doi.org/10.1139/cjss-2016-0110>
28. *Chernokulsky A., Kozlov F., Zolina O., Bulygina O., Mokhov I.I., Semenov V.A.* Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades // *Environ. Res. Lett.* IOP Publishing, 2019. V. 14. P. 045001.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aafb82>
29. *Chimner R.A., Welker J.M., Morgan J., LeCain D., Reeder J.* Experimental manipulations of winter snow and summer rain influence ecosystem carbon cycling in a mixed-grass prairie, Wyoming, USA // *Ecohydrology.* 2010. V. 3. P. 284–293.
<https://doi.org/10.1002/eco.106>
30. *Chin M.-Y., Lau S.Y.L., Midot F., Jee M.S., Lo M.L., Sangok F., Melling L.* Root exclusion method for separating soil respiration components: Review and methodological considerations // *Pedosphere.* 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2023.01.015>
31. *De Frenne P., Zellweger F., Rodríguez-Sánchez F., Scheffers B.R., Hylander K., Luoto M., Vellend M., Verheyen K., Lenoir J.* Global buffering of temperatures under forest canopies // *Nat. Ecol. Evol.* 2019. V. 3. P. 744–749.
<https://doi.org/10.1038/s41559-019-0842-1>
32. *Du E., Zhou Z., Li P., Jiang L., Hu X., Fang J.* Winter soil respiration during soil-freezing process in a boreal forest in Northeast China // *J. Plant Ecol.* 2013. V. 6. P. 349–357.
<https://doi.org/10.1093/jpe/rtt012>
33. *Falloon P., Jones C.D., Ades M., Paul K.* Direct soil moisture controls of future global soil carbon changes: An important source of uncertainty // *Glob. Biogeochem. Cycles.* 2011. V. 25.
<https://doi.org/10.1029/2010GB003938>
34. *Halim M.A., Thomas S.C.* A proxy-year analysis shows reduced soil temperatures with climate warming in boreal forest // *Sci. Rep.* 2018. V. 8. P. 16859.
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-35213-w>
35. *Hanson P.J., Edwards N.T., Garten C.T., Andrews J.A.* Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations // *Biogeochemistry.* 2000. V. 48. P. 115–146.
<https://doi.org/10.1023/a:1006244819642>
36. *Hardy J.P., Groffman P.M., Fitzhugh R.D., Henry K.S., Welman A.T., Demers J.D., Fahey T.J., Driscoll C.T., Tierney G.L., Nolan S.* Snow depth manipulation and its influence on soil frost and water dynamics in a northern hardwood forest // *Biogeochemistry.* 2001. V. 56. P. 151–174.
<https://doi.org/10.1023/a:1013036803050>
37. *Harrison J.L., Sanders-DeMott R., Reinmann A.B., Soresen P.O., Phillips N.G., Templer P.H.* Growing-season warming and winter soil freeze/thaw cycles increase transpiration in a northern hardwood forest // *Ecology.* 2020. V. 101. P. e03173.
<https://doi.org/10.1002/ecy.3173>
38. *Henry H.A.L.* Climate change and soil freezing dynamics: historical trends and projected changes // *Clim. Change.* 2008. V. 87. P. 421–434.
<https://doi.org/10.1007/s10584-007-9322-8>
39. *Hoover D.L., Knapp A.K., Smith M.D.* The immediate and prolonged effects of climate extremes on soil respiration in a mesic grassland: Soil Respiration and Climate Extremes // *J. Geophys. Res. Biogeosciences.* 2016. V. 121. P. 1034–1044.
<https://doi.org/10.1002/2015jg003256>
40. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2021. 3949 p.
41. *Jarvis P., Rey A., Petsikos C., Wingate L., Rayment M., Pereira J., Banza J., David J., Miglietta F., Borghetti M., Manca G., Valentini R.* Drying and wetting of Mediterranean soils stimulates decomposition and carbon di-

- oxide emission: the “Birch effect” // *Tree Physiol.* Oxford Academic, 2007. V. 27. P. 929–940.
<https://doi.org/10.1093/treephys/27.7.929>
42. Kim D.G., Vargas R., Bond-Lamberty B., Turetsky M.R. Effects of soil rewetting and thawing on soil gas fluxes: a review of current literature and suggestions for future research // *Biogeosciences*. 2012. V. 9. P. 2459–2483.
<https://doi.org/10.5194/bg-9-2459-2012>
 43. Knorr W., Prentice I.C., House J.I., Holland E.A. Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming // *Nature*. 2005. V. 433. P. 298–301.
<https://doi.org/10.1038/nature03226>
 44. Kreyling J. The Ecological Importance of Winter in Temperate, Boreal, and Arctic Ecosystems in Times of Climate Change // *Progress in Botany* Vol. 81 / Ed. Cánovas F.M. et al. Cham: Springer International Publishing, 2020. P. 377–399.
https://doi.org/10.1007/124_2019_35
 45. Kreyling J., Henry H. Vanishing winters in Germany: soil frost dynamics and snow cover trends, and ecological implications // *Clim. Res.* 2011. V. 46. P. 269–276.
<https://doi.org/10.3354/cr00996>
 46. Kudryarov V.N., Kurganova I.N. Respiration of Russian Soils: Database Analysis, Long-Term Monitoring, and General Estimates // *Eurasian Soil Sci.* 2005. V. 38. P. 983–992
 47. Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Khoroshaev D., Blagodatskaya E. Effect of snowpack pattern on cold-season CO₂ efflux from soils under temperate continental climate // *Geoderma*. 2017. V. 304. P. 28–39.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.09.009>
 48. Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Khoroshaev D.A., Zhmurin V.A. The Temporal Variability of Respiration of a Soddy-Podzolic Soil in Forest and Meadow Coenoses of the South-Taiga Zone // *Mosc. Univ. Soil Sci. Bulletin*. 2022. V. 77. P. 74–82.
<https://doi.org/10.3103/S0147687422020041>
 49. Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Khoroshaev D.A., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Zhmurin V.A., Kudryarov V.N. Analysis of the long-term soil respiration dynamics in the forest and meadow coenoses of the Prioksko-terrasny biosphere reserve in the perspective of current climate trends // *Eurasian Soil Sci.* 2020. V. 53. P. 1421–1436.
<https://doi.org/10.1134/s1064229320100117>
 50. Kurganova I.N., Kudryarov V.N., Lopes de Gerenyu V.O. Updated estimate of carbon balance on Russian territory // *Tellus B Chem. Phys. Meteorol.* 2010. V. 62. P. 497–505.
<https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2010.00467.x>
 51. Kuzyakov Y. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods // *Soil Biol. Biochem.* 2006. V. 38. P. 425–448.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.08.020>
 52. Kuzyakov Y., Larionova A.A. Root and rhizomicrobial respiration: A review of approaches to estimate respiration by autotrophic and heterotrophic organisms in soil // *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2005. V. 168. P. 503–520.
<https://doi.org/10.1002/jpln.200421703>
 53. Lange S.F., Allaire S.E., Cuellar Castillo M.A., Dutilleul P. N₂O and CO₂ dynamics in a pasture soil across the frozen period // *Can. J. Soil Sci.* 2017. V. 97. P. 497–511.
<https://doi.org/10.1139/cjss-2016-0054>
 54. Lehnert M. Factors affecting soil temperature as limits of spatial interpretation and simulation of soil temperature // *Acta Univ. Palacki. Olomuc. Geogr.* 2014. V. 45. P. 5–21
 55. Leuzinger S., Fatichi S., Cusens J., Körner C., Niklaus P. The “island effect” in terrestrial global change experiments: a problem with no solution? // *AoB PLANTS*. 2015. V. 7.
<https://doi.org/10.1093/aobpla/plv092>
 56. Li J.-T., Wang J.-J., Zeng D.-H., Zhao S.-Y., Huang W.-L., Sun X.-K., Hu Y.-L. The influence of drought intensity on soil respiration during and after multiple drying-rewetting cycles // *Soil Biol. Biochem.* 2018. V. 127. P. 82–89.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.09.018>
 57. Li W., Wu J., Bai E., Jin C., Wang A., Yuan F., Guan D. Response of terrestrial carbon dynamics to snow cover change: A meta-analysis of experimental manipulation(II) // *Soil Biol. Biochem.* 2016. V. 103. P. 388–393.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.09.017>
 58. Liptzin D., Helmig D., Schmidt S.K., Seok B., Williams M.W. Winter gas exchange between the atmosphere and snow-covered soils on Niwot Ridge, Colorado, USA // *Plant Ecol. Divers.* 2015. V. 8. P. 677–688.
<https://doi.org/10.1080/17550874.2015.1065925>
 59. Liu Y., Li J., Jin Y., Zhang Y., Sha L., Grace J., Song Q., Zhou W., Chen A., Li P., Zhang S. The influence of drought strength on soil respiration in a woody savanna ecosystem, southwest China // *Plant Soil*. 2018. V. 428. P. 321–333.
<https://doi.org/10.1007/s11104-018-3678-6>
 60. Lopes de Gerenyu V.O., Kurganova I.N., Khoroshaev D.A. The effect of contrasting moistening regimes on CO₂ emission from the gray forest soil under a grass vegetation and bare fallow // *Eurasian Soil Sci.* 2018. V. 51. P. 1200–1213.
<https://doi.org/10.1134/s1064229318100034>
 61. Monson R.K., Lipson D.L., Burns S.P., Turnipseed A.A., Delany A.C., Williams M.W., Schmidt S.K. Winter forest soil respiration controlled by climate and microbial community composition // *Nature*. 2006. V. 439. P. 711–714.
<https://doi.org/10.1038/nature04555>
 62. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2021
 63. Sanders-DeMott R., Sorensen P.O., Reinmann A.B., Templer P.H. Growing season warming and winter freeze-thaw cycles reduce root nitrogen uptake capacity and increase soil solution nitrogen in a northern forest ecosystem // *Biogeochemistry*. 2018. V. 137. P. 337–349.
<https://doi.org/10.1007/s10533-018-0422-5>
 64. Sanders-DeMott R., Templer P.H. What about winter? Integrating the missing season into climate change experiments in seasonally snow covered ecosystems // *Methods Ecol. Evol.* 2017. V. 8. P. 1183–1191.
<https://doi.org/10.1111/2041-210x.12780>
 65. Schmidt S.K., Wilson K.L., Monson R.K., Lipson D.A. Exponential growth of “snow molds” at sub-zero tem-

- peratures: an explanation for high beneath-snow respiration rates and Q10 values // *Biogeochemistry*. 2009. V. 95. P. 13–21.
<https://doi.org/10.1007/s10533-008-9247-y>
66. Schmidt S.K., Lipson D.A. Microbial growth under the snow: Implications for nutrient and allelochemical availability in temperate soils // *Plant Soil*. 2004. V. 259. P. 1–7.
<https://doi.org/10.1023/b:plso.0000020933.32473.7e>
67. Song J., Wan S., Piao S., Knapp A.K., Classen A.T., Vicca S., Ciais P. et al. A meta-analysis of 1,119 manipulative experiments on terrestrial carbon-cycling responses to global change // *Nat. Ecol. Evol.* 2019. V. 3. P. 1309–1320.
<https://doi.org/10.1038/s41559-019-0958-3>
68. Templer P.H., Reinmann A.B., Sanders-DeMott R., Sorensen P.O., Juice S.M., Bowles F., Sofen L.E. et al. Climate change across seasons experiment (CCASE): a new method for simulating future climate in seasonally snow-covered ecosystems // *PLOS ONE* / Ed. Rixen C. 2017. V. 12. P. e0171928.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171928>
69. Venäläinen A., Tuomenvirta H., Heikinheimo M., Kellomäki S., Peltola H., Strandman H., Väisänen H. Impact of climate change on soil frost under snow cover in a forested landscape // *Clim. Res.* 2001. V. 17. P. 63–72.
<https://doi.org/10.3354/cr017063>
70. Williams C.M., Henry H.A.L., Sinclair B.J. Cold truths: how winter drives responses of terrestrial organisms to climate change // *Biol. Rev.* 2015. V. 90. P. 214–235.
<https://doi.org/10.1111/brv.12105>
71. Wipf S., Rixen C. A review of snow manipulation experiments in Arctic and alpine tundra ecosystems // *Polar Res.* 2010. V. 29. P. 95–109.
<https://doi.org/10.1111/j.1751-8369.2010.00153.x>
72. Xu X. Effect of freeze-thaw disturbance on soil C and N dynamics and GHG fluxes of East Asia forests: review and future perspectives // *Soil Sci. Plant Nutr.* 2022. V. 68. P. 15–26.
<https://doi.org/10.1080/00380768.2021.2003164>
73. Zhang H., Wang E., Zhou D., Luo Z., Zhang Z. Rising soil temperature in China and its potential ecological impact // *Sci. Rep.* 2016. V. 6. P. 35530.
<https://doi.org/10.1038/srep35530>
74. Zhang T. Influence of the seasonal snow cover on the ground thermal regime: An overview // *Rev. Geophys.* 2005. V. 43. P. RG4002.
<https://doi.org/10.1029/2004rg000157>
75. Zhou L., Zhou X., Shao J., Nie Y., He Y., Jiang L., Wu Z., Hosseini Bai S. Interactive effects of global change factors on soil respiration and its components: a meta-analysis // *Glob. Change Biol.* 2016. V. 22. P. 3157–3169.
<https://doi.org/10.1111/gcb.13253>

Estimation of Heterotrophic Soil Respiration Response to the Summer Precipitation Regime and Different Depths of Snow Cover in a Temperate Continental Climate

D. A. Khoroshaev^{1,*}, I. N. Kurganova^{1,2}, and V. O. Lopes de Gerenyu¹

¹*Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science, Russian Academy of Sciences, Pushchino, 142290 Russia*

²*University of Tyumen, Tyumen, 625003 Russia*

*e-mail: d.khoroshaev@pbcras.ru

Regime of precipitation and temperature conditions are key factors that regulate the rate of decomposition of soil organic matter in terrestrial ecosystems. The aim of this work was to assess the effect of the duration of dry periods in summer and different depths of snow cover in winter on heterotrophic soil respiration. The studies were carried out as part of a 2-year field manipulation experiment organized on gray soil (Haplic Luvisol) in the temperate continental climate conditions (southern Moscow region). Three variants were organized: (1) simulation of mild weather with uniform watering of the soil in summer and the absence of freezing in winter, (2) simulating two summer dry periods lasting 1–2 months with natural winter snow cover, (3) simulation of extreme weather with one long (~3 months) dry period in summer and complete removal of snow cover in winter. Heterotrophic soil respiration was measured by the closed chamber method on bare fallow during 2 years of continuous experiment and 1 more year after its completion. Medians of heterotrophic soil respiration for the entire period of the experiment in the three above-mentioned variants of the experiment were 38, 27 and 19 mg C/(m² h), respectively. Two short dry periods led to an increase in heterotrophic soil respiration by 7–10%, which is associated both with the drying and rewetting cycles of the soil and with an increase in the average summer temperature of a 20-cm soil profile by 1.5°C. The prolonged dry period caused a decrease in heterotrophic soil respiration by 12–16% as a result of low soil moisture. Soil freezing led to a strong decrease in winter CO₂ emission from soil, which reached 34–55% in the control variant and 57–72% when the snow cover was removed. The frost period (November–March) contributed from 25–34% without of soil freezing to 14–19% when its presence to the annual CO₂ flux. We conclude that the change in the winter temperature regime of the soil due to manipulations with the snow depth led to a more significant change in the annual heterotrophic soil respiration than the lack of precipitations in the summer season.

Keywords: soil CO₂ emissions, droughts, thaws, soil temperatures, soil freezing, bare fallow, extreme weather events, Haplic Luvisol