

## ПИЛОТНАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ СЕТЬ МОНИТОРИНГА ДЫХАНИЯ ПОЧВЫ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

© 2024 г. И. Н. Курганова<sup>1,\*</sup>, Д. В. Карелин<sup>2</sup>, академик РАН В. М. Котляков<sup>2</sup>,  
А. С. Прокушин<sup>3</sup>, Д. Г. Замолодчиков<sup>4</sup>, А. В. Иванов<sup>5</sup>, Д. В. Ильясов<sup>6</sup>,  
Д. А. Хорошаев<sup>1</sup>, В. О. Лопес де Гереню<sup>1</sup>, А. А. Бобрик<sup>7</sup>, С. В. Брянин<sup>5</sup>,  
О. Ю. Гончарова<sup>7</sup>, В. В. Ершов<sup>8</sup>, Д. Г. Иванов<sup>9</sup>, С. Ю. Зорина<sup>10</sup>, В. В. Каганов<sup>4</sup>,  
Е. А. Капица<sup>11</sup>, Г. Н. Копчик<sup>7</sup>, М. А. Кузнецов<sup>12</sup>, А. С. Куманяев<sup>4</sup>, А. В. Куприн<sup>13</sup>,  
А. В. Мамай<sup>14</sup>, А. И. Матвиенко<sup>3</sup>, А. В. Махныкина<sup>3</sup>, А. С. Мостовая<sup>4</sup>,  
Е. В. Мошкина<sup>14</sup>, С. Ю. Моченов<sup>9</sup>, Н. С. Рябов<sup>8</sup>, Д. В. Сапронов<sup>1</sup>,  
Н. В. Сиденко<sup>3</sup>, Л. Г. Соколова<sup>10</sup>, А. С. Сорокин<sup>7</sup>, Г. Г. Суворов<sup>9</sup>,  
О. Э. Суховеева<sup>2</sup>, А. С. Чумбаев<sup>15</sup>, Н. Ю. Шмакова<sup>16</sup>

Поступило 02.07.2024 г.

После доработки 03.07.2024 г.

Принято к публикации 05.07.2024 г.

Дыхание почвы (soil respiration, SR) является одним из крупнейших потоков в глобальном цикле углерода, превышающим антропогенную эмиссию CO<sub>2</sub> более чем на порядок. Определение величины гетеротрофной составляющей SR необходимо для оценки баланса углерода на экосистемном, региональном, национальном и глобальном уровнях. В рамках Важнейшего инновационного проекта государственного значения “Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ” организована первая в России национальная сеть, одной из функций которой являются наблюдения за эмиссией CO<sub>2</sub> из почв. Впервые для территории России на основе методически идентичных полевых измерений, проведённых одновременно в летний период (июнь–август 2023 г.) на 75 площадках мониторинга, приуроченных к различным экосистемам в основных биоклиматических зонах (от тундры до полупустыни), выполнен анализ величины SR и его связи с температурой верхнего 5–10-см слоя почвы (Ts). Показано, что положительное влияние температуры почвы на среднелетнюю скорость и максимальные месячные значения SR наблюдается в интервале средних Ts от 10 до 20°C. Среди исследованных экосистем наименьшие значения SR выявлены в тундровых и болотных экосистемах, а наибольшие – в лесостепных. Среди лесных экосистем наименьшая величина SR характерна для лиственничников, тогда как самые высокие значения SR наблюдались в широколиственных лесах лесостепной зоны. Для уточнения полученных закономерностей необходимо расширение исследований во всех биоклиматических зонах, но, главным образом, в агроценозах, тундровых и степных экосистемах.

**Ключевые слова:** биогенный цикл углерода, почвенная эмиссия CO<sub>2</sub>, наземные экосистемы, биоклиматические зоны, наземный мониторинг, температурный фактор, изменение климата.

**DOI:** 10.31857/S2686739724110197

<sup>1</sup>Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения Российской Академии наук, Пущино, Московская область, Россия

<sup>2</sup>Институт географии Российской Академии наук, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения Российской Академии наук, Красноярск, Россия

<sup>4</sup>Центр экологии и продуктивности лесов

Российской Академии наук, Москва, Россия

<sup>5</sup>Институт геологии и природопользования Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Благовещенск,

Амурская область, Россия

<sup>6</sup>Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия

<sup>7</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, факультет почвоведения, Москва, Россия

<sup>8</sup>Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра Российской Академии наук, Апатиты, Мурманская область, Россия

<sup>9</sup>Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова Российской Академии наук, Москва, Россия

<sup>10</sup>Сибирский институт физиологии и биохимии растений Сибирского отделения Российской Академии наук,

Иркутск, Россия

<sup>11</sup>Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>12</sup>Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской Академии наук, Сыктывкар, Россия

<sup>13</sup>Федеральный научный центр Биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Владивосток, Россия

<sup>14</sup>Институт леса Карельского научного центра Российской Академии наук, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия

<sup>15</sup>Институт почеведения и агрохимии Сибирского отделения Российской Академии наук, Новосибирск, Россия

<sup>16</sup>Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А. Аврорина Кольского научного центра Российской Академии наук, Анадырь, Мурманская область, Россия

\*E-mail: ikurg@mail.ru

## ВВЕДЕНИЕ

Дыхание почвы (soil respiration, SR) является одним из наиболее значительных потоков в глобальном цикле углерода (C), превышающим более, чем на порядок антропогенную эмиссию CO<sub>2</sub> [1, 2]. Под дыханием почвы обычно понимают эмиссию CO<sub>2</sub> (удельный поток из почвы в атмосферу), причиной которой является процесс разложения органического вещества почв (включая подстилку) микро- и макроорганизмами и дыхания корневых систем растений и ассоциированной с ними микрофлоры [3, 4]. Высокая времененная и пространственная вариабельность основных компонентов SR [5–7] определяют существенную неопределенность величин углеродного баланса как отдельных экосистем [8, 9], так и целых континентов [10–12].

Несмотря на огромную роль SR в общепланетарном цикле углерода, оценки суммарных потоков CO<sub>2</sub> из почв большинства регионов суши остаются очень приблизительными. Величины годовых потоков SR в естественных экосистемах разных природно-климатических зон существенно варьируют: от 109±108 г C/m<sup>2</sup>/год (среднее ± стандартное отклонение) – в арктической зоне до 1286±633 г C/m<sup>2</sup>/год – в тропической [13]. Наименее изученными регионами в отношении почвенного дыхания наряду с Африкой, юго-восточной Азией и Австралией, являются также Восточная Европа и Северная Азия [3]. Именно таким регионом, требующим расширения исследований по определению SR, является территория Российской Федерации (РФ) [14].

Занимая 1/9 часть суши, наземные экосистемы России играют существенную роль не только в формировании глобальных потоков и пулов C, но и вносят существенный вклад в формирование неопределённостей оценок компонентов

глобального углеродного баланса [15]. Поэтому, создание национальной сети мониторинга дыхания почв является одной из приоритетных задач, которые решаются в рамках важнейшего инновационного проекта государственного значения (ВИПГЗ) “Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ”. Получение экспериментальных данных по определению дыхания почв в различных биоклиматических регионах РФ, является также актуальным и востребованным в мировом научном сообществе [5, 7].

Не имеющий аналогов в РФ по охвату и комплексности решаемых задач, ВИПГЗ стартовал в конце 2022 г., и к настоящему времени в рамках этого многолетнего проекта организованы синхронные экспериментальные динамические наблюдения за дыханием почв в основных биоклиматических зонах, подзонах и интразональных экосистемах, охватывающих тундры, леса, степи и полупустыни, а также в болота и агро-экосистемы, что позволяет говорить о создании первой в России национальной системы мониторинга дыхания почв. Цель исследования – представить результаты, полученные в течение первого года функционирования сети мониторинга SR на территории РФ. Для этого были обобщены данные полевых измерений SR, проведённые единовременно на 75 площадках мониторинга (ПМ) в течение летнего периода 2023 г. Работы такого масштаба в нашей стране и за рубежом проводятся впервые, а получаемые результаты входят отдельным блоком в создаваемую в рамках ВИПГЗ Информационно-аналитическую систему (ИАС) “Углерод-Э”.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Одним из важнейших требований при организации национальной сети мониторинга SR является унификация методических подходов и расчётов алгоритмов. На всех ПМ измерение SR проводили камерным методом (статическая или динамическая модификации), который является общепризнанным и наиболее распространённым в подобных исследованиях [5, 16]. Однако размеры и форма измерительных камер на ПМ отличались в зависимости от особенностей используемого газометрического оборудования, технических возможностей и типа экосистемы. Периодичность измерений также была разной и варьировалась от 1–2 до 15–20 раз в месяц в зависимости от труднодоступности ПМ. В рамках организованной сети мониторинга однократные измерения проводятся на 10% экосистем, в то

время как на половине ПМ исследований проводят круглогодично. Анализ полевых данных включал: (i) определение средних за лето значений  $SR_{sum}$  и среднелетней температуры верхнего слоя почвы  $TS_{sum}$  для каждой экосистемы; (ii) определение максимального среднемесячного значения  $SR_{max}$  и сопряжённого значения температуры почвы  $TS_{max}$  для каждой из экосистем; (iii) оценку основных статистических показателей для величин  $SR$  и  $TS$  по отдельным биоклиматическим зонам, типам экосистем и типам леса. Вариабельность определяемых параметров оценивали, используя коэффициент вариации (CV, %). Кроме того, был выполнен анализ регрессионных зависимостей между среднелетними ( $SR_{sum}$ ) и максимальными ( $SR_{max}$ ) значениями  $SR$  и соответствующими им величинами  $TS$ . Статистический анализ проводился в пакете “Анализ данных” MS Excel.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках проведённого исследования выполнен анализ общей информации о ПМ дыхания почв на территории РФ, которая включает географические координаты, метеорологические характеристики, сведения о биоклиматической зоне (БКЗ), типе экосистемы (ЭКО), типе и базовых характеристиках почвы, методах и периоде измерения эмиссии  $CO_2$ , приборной базе и измеряемых гидротермических параметрах. Распределение площадок мониторинга SR по БКЗ – неравномерно (рис. 1). Основное количество расположено в подзонах лесостепи (19 ПМ), средней тайги (16 ПМ) и хвойно-широколиственных лесов (12 ПМ). Степная и тундровая зоны охвачены исследованиями в наименьшей степени (рис. 1 А). Наиболее представлены лесные (35 ПМ) и болотные (13 ПМ) экосистемы, составляющие около 2/3 всех ПМ. На прочие

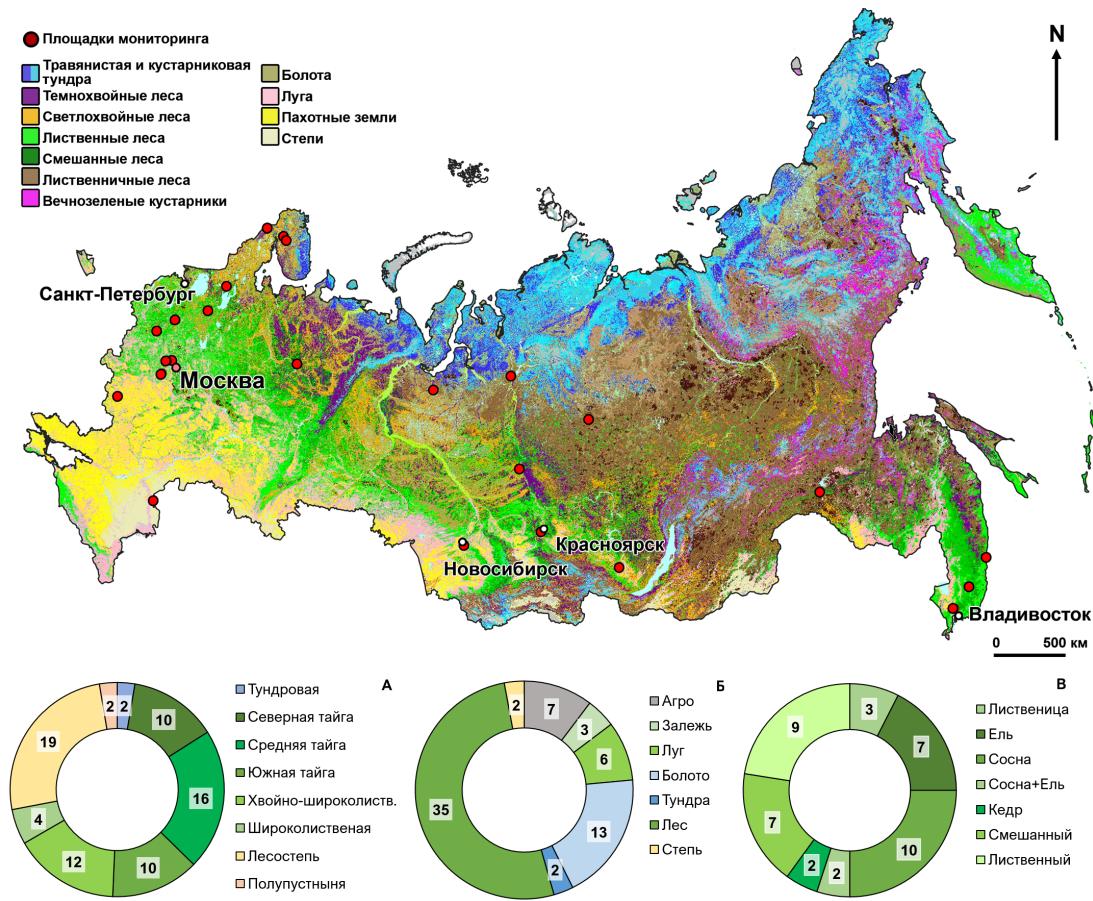


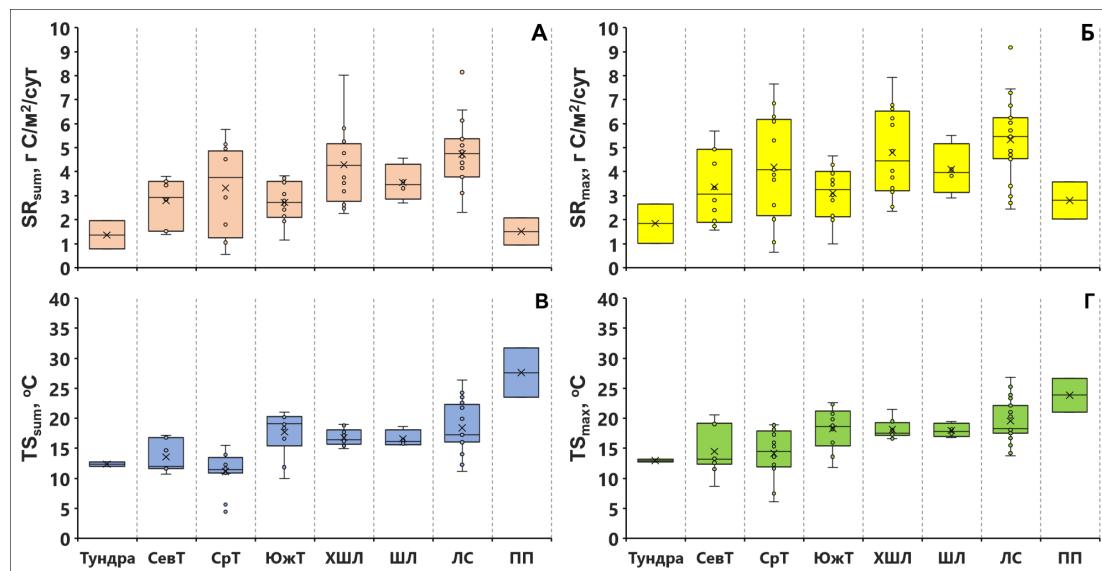
Рис. 1. Расположение площадок мониторинга дыхания почв на карте растительности РФ [17] и их количественное распределение по биоклиматическим зонам (А), типам экосистем (Б) и доминирующими породам деревьев в лесных экосистемах (В).

типы экосистем в настоящее время приходится от 2 до 7 ПМ (рис. 1 Б), что в масштабах территории РФ, безусловно, недостаточно. Наиболее представленными среди лесных экосистем являются сосновые (10 ПМ) и лиственные (9 ПМ) (рис. 1 В). В еловых и смешанных лесах расположено по 7 ПМ, в то время как на другие типы леса (сосново-еловый, кедровый и лиственничный) приходится по 2–3 ПМ.

*Дыхание почв в основных биоклиматических зонах.* Среди основных БКЗ России (рис. 2 А) самые низкие средние значения  $SR_{sum}$ , составляющие соответственно  $1.37 \pm 0.59$  и  $1.51 \pm 0.56$  г С/м<sup>2</sup>/сут (среднее  $\pm$  стандартная ошибка), ожидали наблюдали в тундровой (Мурманская обл.) и полупустынной (Астраханская область) зонах. Наиболее высокие средние скорости  $SR_{sum}$  характерны для лесостепи (4.88  $\pm$  0.32 г С/м<sup>2</sup>/сут) и хвойно-широколиственных лесов (4.28  $\pm$  0.48 г С/м<sup>2</sup>/сут). Близкие по величине значения  $SR_{sum}$  (3.57  $\pm$  0.53 и 3.54  $\pm$  0.39 г С/м<sup>2</sup>/сут) зарегистрированы в средней тайге и широколиственных лесах (рис. 2). Коэффициент вариации  $SR_{sum}$  в разных природных зонах составлял от 22 до 61%, и был самым высоким для зон/подзон, в которых было всего по 2 ПМ.

Максимальную величину SR в течение летнего периода для большинства ПМ регистрировали в июле или августе, за исключением полупустыни, где максимум выделения CO<sub>2</sub> из почв приходился на июнь, поскольку в другие летние месяцы здесь существенное лимитирующее влияние на дыхание почвы оказывал дефицит доступной почвенной влаги. Закономерность распределения  $SR_{max}$  по БКЗ была сходной с описанной выше для  $SR_{sum}$ , с той разницей, что величины дыхания в этом случае были в 1.1–1.9 раз выше (рис. 2 Б). Более всего  $SR_{max}$  превышало  $SR_{sum}$  в зоне тундры (в 1.35 раза) и в полупустынях (в 1.86 раза). Средние значения TS для разных БКЗ, сопряжённые с измерениями  $SR_{sum}$  и  $SR_{max}$ , в большинстве случаев отличались незначительно (на 0.6–1.3°C) и только между подзонами средней тайги и полупустыни различие было существенным и составляло 3.1 (TS<sub>max</sub>) и 3.8 °C (TS<sub>sum</sub>), соответственно.

По средним величинам TS<sub>sum</sub> и TS<sub>max</sub>, измеряемым одновременно с SR, биоклиматические зоны можно разделить на три группы (рис. 2 В, Г): <15°C (тундра, северная и средняя тайга), 16–20°C (от южной тайги до лесостепи) и >20°C (полупустыни). Температура почвы является одним из важнейших предикторов и основным абиотическим фактором, который определяет величину



**Рис. 2.** Среднелетние (А) и максимальные (Б) величины дыхания почв и среднелетняя (В) и максимальная (Г) температуры почвы в различных биоклиматических зонах/подзонах. Приведены средние (крестики), медианы (поперечные линии), нижний (Q1) и верхний (Q3) квартили (прямоугольники); X1 = Q1–1.5 IQR (межквартильный размах, IQR = Q3 – Q1) и X2 = Q3–1.5 IQR (усы). Точки – данные измерений. Тун – тундра (горная), СевТ, СрТ и ЮжТ – северная, средняя и южная тайга, ХШЛ и ШЛ –хвойно-широколиственные и широколиственные леса, ЛС – лесостепь и ПП – полупустыня.

почвенного дыхания [1, 7]. Тесные положительные корреляционные связи между этими величинами наблюдаются как в пределах внутриголовой динамики SR [5, 18], так и на уровне его глобального распределения [1]. В рамках представляемого исследования как для всего полученного ряда ПМ, так и для отдельных БКЗ корреляции между  $SR_{sum}$  и  $SR_{max}$  с соответствующими им значениями TS обнаружены не были. Вероятнее всего, это связано с относительно небольшим разбросом TS между ПМ в разных БКЗ в летний период, составляющим 15°C для  $TS_{sum}$  и 11°C для  $TS_{max}$ , а также с тем, что в летний период температура в большинстве БКЗ не является единственным фактором, лимитирующим скорость SR. При оценке регрессионных зависимостей между усреднёнными по БКЗ величинами  $SR_{sum}$  и  $SR_{max}$  и соответствующими им значениями  $TS_{sum}$  и  $TS_{max}$ , в интервале температур от 11 до 20°C линейные положительные связи между этими параметрами были более выражены, хотя и статистически недостоверны (рис. 3). Вне этой закономерности остаётся только подзона полупустыни, характеризующаяся самыми высокими  $TS_{sum}$  и  $TS_{max}$ , но низкими уровнями дыхания, что связано с тем, что здесь главным ограничивающим фактором становится недостаток влаги.

*Дыхание почвы в различных типах экосистем.* Для того, чтобы оценить влияние типа экосистем на  $SR_{sum}$  и  $SR_{max}$ , все ПМ были распределены по семи группам (рис. 1 Б). Самые низкие значения  $SR_{sum}$  характерны для тундровых и болотных экосистем и составляют  $1.37 \pm 0.59$  и  $2.15 \pm 0.28$  г  $C/m^2/сут$ , соответственно (рис. 4 А). Залежные и луговые экосистемы демонстрировали

наиболее высокие  $SR_{sum}$ , достигающие  $4.98 \pm 0.87$  и  $4.72 \pm 0.83$  г  $C/m^2/сут$ , соответственно. Достаточно высокие  $SR_{sum}$  ( $4.04 \pm 0.24$  и  $3.91 \pm 0.41$  г  $C/m^2/сут$ ) также характерны для лесов и агроэкосистем. Коэффициент вариации  $SR_{sum}$  по отдельным экосистемам составлял от 28 до 89%.

Закономерности распределения  $SR_{max}$  и  $SR_{sum}$  по типам экосистем оказались идентичны, с той разницей, что величина  $SR_{max}$  была лишь незначительно (в 1.1–1.3 раза) выше (рис. 4 А, Б). Наиболее существенное различие между этими показателями характерно для тундровых и степных экосистем. Средние значения TS для отдельных типов экосистем, сопряжённые с измерениями  $SR_{sum}$  и  $SR_{max}$ , в большинстве случаев отличались незначительно (на 0.3–1.3°C) и только для лесных и степных экосистем разница между  $TS_{max}$  и  $TS_{sum}$  была существенной и составляла 1.6 и 2.0 °C, соответственно (рис. 4 В, Г). Значимых корреляционных связей между значениями SR и TS для выделенных типов экосистем выявлено не было.

*Дыхание почв в различных типах леса.* Разброс значений  $SR_{sum}$  и  $SR_{max}$  среди лесных экосистем был весьма существенным и составлял 7.1 и 8.0 г  $C/m^2/сут$ , соответственно, превышая средние значения в 1.6–1.7 раза. Поэтому была предпринята попытка оценить влияние преобладающей древесной породы на величины  $SR_{sum}$  и  $SR_{max}$ . С этой целью лесные экосистемы были поделены на семь групп, на каждую из которых пришлось от 2 до 9 ПМ (рис. 1 Г). Самые низкие средние значения  $SR_{sum}$  и  $SR_{max}$ , составляющие  $1.98 \pm 0.58$  и  $2.37 \pm 0.82$  г  $C/m^2/сут$ , были зафиксированы для лесов с доминированием лиственницы (рис. 5 А, Б). Эти леса

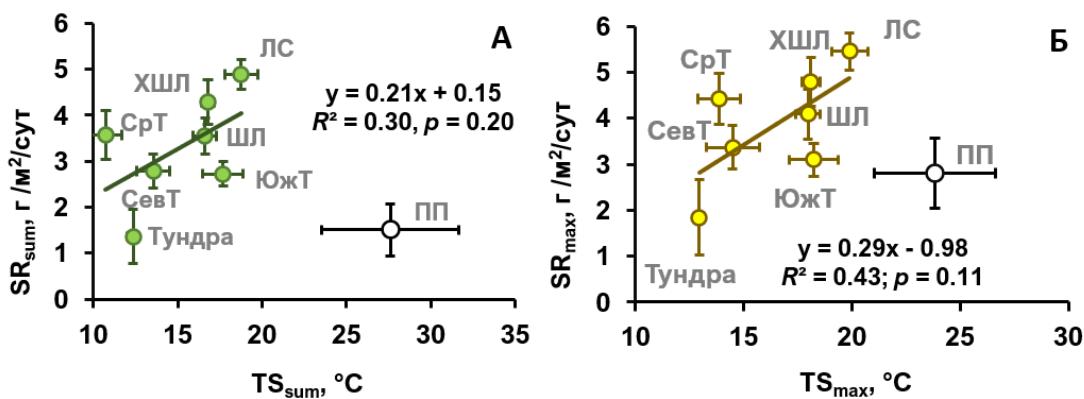
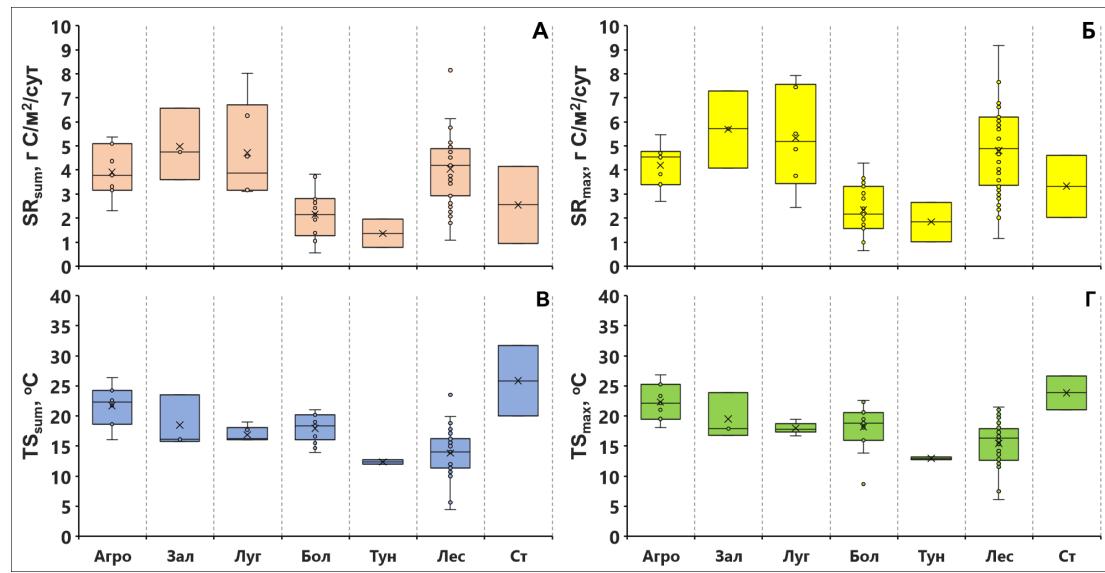


Рис. 3. Зависимость среднелетней (А) и максимальной (Б) интенсивности дыхания почв от среднелетней ( $TS_{sum}$ ) и максимальной ( $TS_{max}$ ) температуры почвы в пределах основных биоклиматических зон на территории РФ. Тундра – тундровая зона, СевТ, СрТ и ЮжТ – северная, средняя и южная тайга, ХШЛ и ШЛ – хвойно-широколиственные и широколиственные леса, ЛС – лесостепь и ПП – полупустыня. Приведены средние и их стандартные ошибки.



**Рис. 4.** Среднелетняя (А) и максимальная (Б) скорости дыхания почв и среднелетняя (В) и максимальная (Г) температуры почвы по типам экосистем. Обозначения статистических характеристик приведены на рис. 2. Агро – агроценоз, Зал – залежь, Луг – травяные экосистемы, Бол – болото, Тун, Лес и Ст – тундровые, лесные и степные экосистемы.

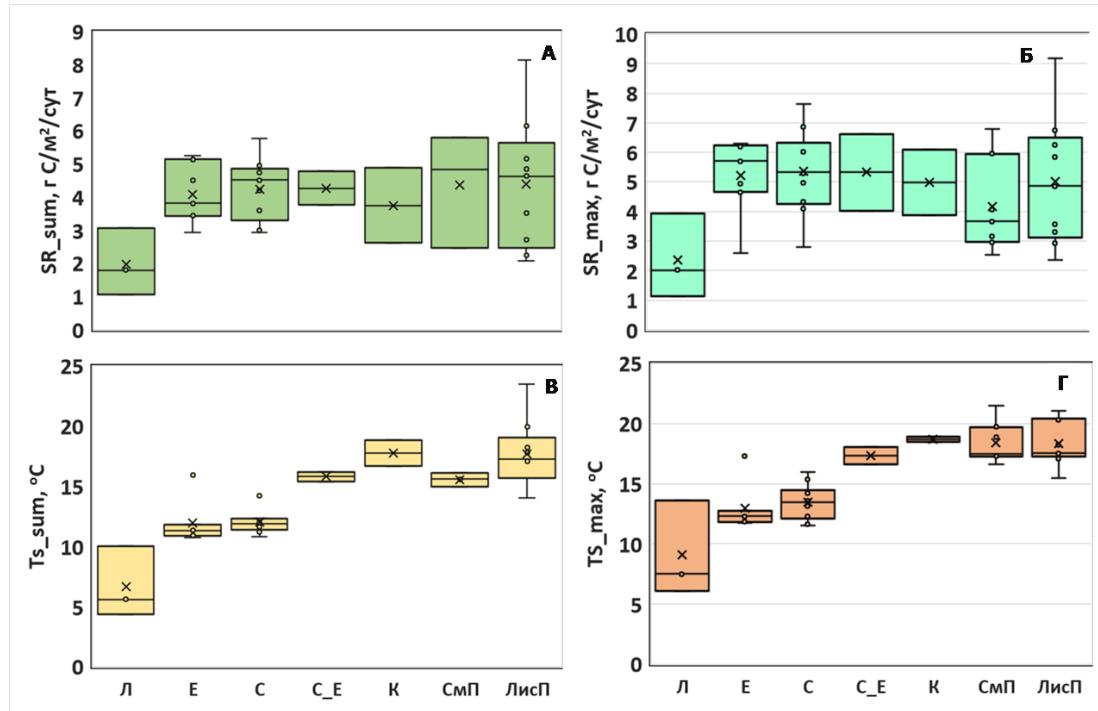
характеризовались самой низкой TS среди всех видов лесных экосистем:  $TS_{sum} = 6.07 \pm 1.70$  и  $TS_{max} = 9.07 \pm 2.30^{\circ}\text{C}$  (рис. 5 В, Г). Остальные типы лесов продемонстрировали близкие средние скорости  $SR_{sum}$ , варьирующие от  $3.75 \pm 1.13$  до  $4.39 \pm 0.66$  г C/m<sup>2</sup>/сут в диапазоне  $TS_{sum}$  от 11.9 до  $17.7^{\circ}\text{C}$ . Величины  $SR_{max}$  были в 1.1–1.3 раза выше по сравнению с  $SR_{sum}$  (рис. 5 Б), сохраняя те же закономерности распределения.

Положительная корреляционная связь между  $SR_{sum}$  и  $TS_{sum}$  была выявлена в пределах общей выборки лесных экосистем в интервале  $TS_{sum}$  от 6.7 до  $17.7^{\circ}\text{C}$  ( $R^2 = 0.57$ ;  $p = 0.05$ ). После исключения из анализа лесов с преобладанием лиственницы, наблюдалась достаточно тесная (для выборки из шести объектов) отрицательная связь между  $SR_{max}$  и  $TS_{max}$  ( $R^2 = 0.56$ ;  $p = 0.09$ ). Отрицательная корреляция здесь связана с тем, что в более северных лесах с меньшими значениями  $TS_{max}$ , величина  $SR_{max}$  может превышать таковую в лесных экосистемах с более высокими значениями  $TS_{max}$ . Для северных лесных почв характерен более мощный органогенный, часто оторфованный, горизонт, обладающий высокой дыхательной активностью в течение всего лета. При движении на юг, с увеличением значений  $TS_{max}$  в лесных экосистемах начинают преобладать лиственные породы, листва которых в основном и формирует лесную подстилку. Листовая подстилка к середине лета может в значительной степени деградировать или

сильно пересыхать, что приводит к уменьшению величины  $SR_{max}$ .

Проведённые обобщения наблюдений за SR в летний период 2023 г. показали, что для БКЗ и среди лесных экосистем температурный фактор оказывает существенное влияние на величины  $SR_{sum}$  и  $SR_{max}$ . В рамках исследования не рассматривалось количественное влияние влажности почв на величину SR, поскольку определение этого параметра не было однотипным на всех площадках мониторинга. В будущем определение гидротермических параметров потребует дальнейшей унификации с целью поиска многомерных связей величины SR с метеорологическими и гидротермическими характеристиками, такими как сумма активных температур, количество осадков и индексы увлажнения (Kurganova et al., 2022).

Ранее было показано, что летние потоки CO<sub>2</sub> из почв составляют от 40 до 80% годового потока в зависимости от среднегодовой температуры воздуха [16], и этот вклад в пределах одной БКЗ характеризуется вариабельностью, не превышающей 11–12% [5]. Это означает, что закономерности, установленные в этом исследовании для средних летних значений SR должны с высокой долей вероятности относиться и к годовым потокам CO<sub>2</sub> из почв. Однако для снижения неопределенности полученных оценок, созданная



**Рис. 5.** Среднелетняя (А) и максимальная (Б) интенсивность дыхания почв и сопряжённые с ними среднелетняя (В) и максимальная (Г) температуры почвы в разных типах лесных экосистем. Обозначения статистических характеристик приведены на рис. 2. Л – лиственничник, Е, С, С\_E – еловый, сосновый и сосново-еловыи древостои, К – кедровник, СмП и ЛисП – смешанные и лиственничные древостои.

в рамках ВИПГЗ сеть мониторинга дыхания почв должна расширяться, а частота измерений на ПМ увеличиваться и составлять не менее 3–4 раз в месяц. В первую очередь, в рамках развития национальной сети мониторинга дыхания почв нужно расширять наблюдения в полупустынной, степной, лесотундровой и тундровой зонах, а также в агроценозах и на пастбищах. Необходимо увеличение длительности наблюдений до преимущественно круглогодичных и многолетних (5 и более лет) с целью получения более достоверных оценок годовых потоков  $\text{CO}_2$  из почв. Немаловажной задачей является унификация расчётных алгоритмов при переходе от отдельных измерений к оценкам месячных величин SR и от летних потоков – к годовым.

Настоящее исследование, обобщающее результаты одномоментных измерений дыхания почвы в масштабе РФ, представляет первые оценки дыхания почв, выполненные на основе единого методического подхода. Новые данные в совокупности с информацией, полученной ранее [7, 16], могут быть использованы для обоснования мероприятий по адаптации

природопользования к изменениям климата в различных БКЗ. Полученные результаты также будут служить основой для верификации эмпирических или имитационных моделей, позволяющих оценивать величину SR с учётом различных климатических сценариев [19, 20], а также для моделей углеродного баланса. Кроме того, в природных и антропогенно-измененных экосистемах существуют локальные “горячие точки” (hot spots), в которых выделение  $\text{CO}_2$  происходит с очень высокой интенсивностью, или могут наблюдаться его спонтанные выбросы, связанные с непериодическими внешними воздействиями (пожары, ветровалы и проч.). К таким “горячим точкам” можно также отнести выделение  $\text{CO}_2$  и других парниковых газов с поверхности полей фильтрации промышленных и с/х предприятий и водоснабжения, компостные хранилища, места содержания с/х животных, свалки твёрдых бытовых отходов и т.п. Дальнейшее пространственно-временное расширение сети мониторинга позволит лучше учесть вклад таких факторов в годовой баланс углерода.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На территории России впервые создана единичная сеть мониторинга дыхания почвы – одного из наиболее значительных потоков в глобальном цикле углерода. Благодаря этому, значительная часть наземных экосистем России обеспечена полевыми наблюдениями не только в европейской, но и в азиатской части страны. Выявлены зональные экосистемы, которые требуют повышенного внимания исследователей в силу ограниченности имеющейся по ним информации – это, прежде всего, степи и тундры. Кроме того, важно расширить сеть наблюдений за дыханием почв в агроценозах и других антропогенно-измененных экосистемах. Полученные данные представляют несомненный национальный и международный интерес и значимость.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках реализации ВИПГЗ “Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пуллов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учёта данных о потоках климатически активных веществ и бюджета углерода в лесах и других наземных экологических системах”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bond-Lamberty B., Thomson A.* Temperature-associated increases in the global soil respiration record // *Nature*. 2010. V. 464. P. 579–582.  
<https://doi.org/10.1038/nature08930>
2. *Kudeyarov V.N.* Soil respiration and carbon sequestration // *Eurasian Soil Science*. 2023. V. 56. No. 9. P. 1011–1022.  
<https://doi.org/10.1134/S1064229323990012>
3. *Xu M., Shang H.* Contribution of Soil Respiration to the Global Carbon Equation // *Journal of Plant Physiology*. 2016. 203. 16–28.  
<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.08.007>
4. *Karelin D.V., Zamolodchikov D.G., Kaganov V.V., Pochikalov A.V., Gitarskii M.L.* Microbial and root components of respiration of sod-podzolic soils in boreal forest // *Contemporary Problems of Ecology*. 2017. V. 10. № 7. P. 717–727.  
<https://doi.org/10.1134/S199542551707006X>
5. *Kurganova I.N., Lopes de Gerenuy V.O., Khoroshaev D.A., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Zhmurin V.A., Kudeyarov V. N.* Analysis of the long-term soil respiration dynamics in the forest and meadow cenoses of the Prioksko-Terrasny biosphere reserve in the perspective of current climate trends // *Eurasian Soil Science*. 2020. V. 53. № 10. P. 1421–1436.  
<https://doi.org/10.1134/s1064229320100117>
6. *Kurganova I.N., Lopes de Gerenuy V.O., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Khoroshaev D.A., Ableeva V.A.* Temperature Sensitivity of Soil Respiration in Grasslands in Temperate Continental Climate Zone: Analysis of 25-Year-Long Monitoring Data // *Eurasian Soil Science*. 2023. V. 56. No. 9. P. 1232–1246.
7. *Mukhortova L., Schepaschenko D., Moltchanova E., Shvidenko A., Khabarov N., See L.* Respiration of Russian soils: Climatic drivers and response to climate change // *Science of the Total Environment*. 2021. 785. 147314.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147314>
8. *Kurganova I.N., Lopes de Gerenuy V.O., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Savin I.Y., Shorohova E.V.* Carbon balance in forest ecosystems of southern part of Moscow region under a rising aridity of climate // *Contemporary Problems of Ecology*. 2017. V. 10. № 7. P. 748–760.
9. *Desai A.R., Murphy, B.A., Wiesner S., Thom J., Butterworth B.J., Koupaei-Abyazani N., et al.* Drivers of decadal carbon fluxes across temperate ecosystems // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2022. V. 127(12). e2022JG007014.  
<https://doi.org/10.1029/>
10. *Ballantyne A., Smith W., Anderegg W., Kauppi P., Sarmiento J., Tans P., et al.* Accelerating net terrestrial carbon uptake during the warming hiatus due to reduced respiration // *Nature Climate Change*. 2017. 7(2). 148–152.  
<https://doi.org/10.1038/nclimate3204>
11. *Metz E.-M., Vardag S. N., Basu S., Jung M., Ahrens B., El-Madany T., et al.* Soil respiration-driven CO<sub>2</sub> pulses dominate Australia’s flux variability // *Science*. 2023. 379(6639). P. 1332–1335.
12. *Bond-Lamberty B., Ballantyne A., Berryman E., Fluet-Chouinard E., Jian J., Morris K.A., et al.* Twenty years of progress, challenges, and opportunities in measuring and understanding soil respiration // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2024. V. 129. e2023JG007637.  
<https://doi.org/10.1029/2023JG007637>
13. *Bond-Lamberty B., Thomson A.* A global database of soil respiration data // *Biogeosciences*. 2010. V. 7. P. 1915–1926.  
<https://doi.org/10.5194/bg-7-1915-2010>
14. A Global Database of Soil Respiration Data, Version 5.0  
<https://doi.org/10.3334/ORNLDAC/1827> B
15. *Kurganova I.N., Kudeyarov V.N., Lopes de Gerenuy V.O.* Updated estimate of carbon balance on Russian Territory // *Tellus*. 2010. V. 62B. P. 497–505

16. Kudeyarov V.N., Kurganova I.N. Respiration of Russian Soils: Database Analysis, Long-Term Monitoring, and General Estimates // Eurasian Soil Science. 2005. V. 38. №. 9. P. 983–992.
17. Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН. 2016. 208 с.
18. Карелин Д.В., Замолодчиков Д.Г. Углеродный обмен в криогенных экосистемах. М.: Наука, 2008. 344 с.
19. Kivalov S., Lopes de Gerenuy V., Khoroshaev D., Myakshina T., Sapronov D., Ivashchenko K., Kurganova I. Soil temperature, organic-carbon storage, and water-holding ability should be accounted for the empirical soil respiration model selection in two forest ecosystems // Forests. 2023. V. 14. 1568. <https://doi.org/10.3390/f14081568>.
20. Piputina I.V., Bykhovets S.S., Frolov P.V., Chertov O.G., Kurganova I.N., Lopes de Gerenuy V.O., Sapronov D.V., Myakshina T.N. Application of Mathematical Models ROMUL and Romul\_Hum for Estimating CO<sub>2</sub> Emissions and Dynamics of Organic Matter in Albic Luvisol under Deciduous Forest in Southern Moscow Region // Eurasian Soil Science. 2020. V. 53. № 10. P. 1480–1491.

## THE PILOT NATIONAL NETWORK OF SOIL RESPIRATION MONITORING IN RUSSIA: THE FIRST RESULTS AND PROSPECTS

I. N. Kurganova<sup>a, #</sup>, D. V. Karelina<sup>b</sup>, academician of the RAS V. M. Kotlyakov<sup>b</sup>,  
 A. S. Prokushkin<sup>c</sup>, D. G. Zamolodchikov<sup>d</sup>, A. V. Ivanov<sup>e</sup>, D. V. Ilyasov<sup>f</sup>,  
 D. A. Khoroshaev<sup>a</sup>, V. O. Lopez De Gertheny<sup>a</sup>, A. A. Bobrik<sup>g</sup>, S. V. Bryanin<sup>e</sup>,  
 O. Yu. Goncharova<sup>g</sup>, V. V. Ershov<sup>h</sup>, D. G. Ivanov<sup>i</sup>, S. Yu. Zorina<sup>j</sup>, V. V. Kaganov<sup>d</sup>,  
 E. A. Kapitsa<sup>k</sup>, G. N. Kopsik<sup>g</sup>, M. A. Kuznetsov<sup>l</sup>, A. S. Kumanyaev<sup>d</sup>, A. V. Kuprin<sup>m</sup>,  
 A. V. Mamai<sup>n</sup>, A. I. Matvienko<sup>c</sup>, A. V. Makhnykina<sup>c</sup>, A. S. Mostovaya<sup>d</sup>,  
 E. V. Moshkina<sup>n</sup>, S. Yu. Mothenov<sup>i</sup>, N. S. Ryabov<sup>h</sup>, D. V. Sapronov<sup>a</sup>,  
 N. V. Sidenko<sup>c</sup>, L. G. Sokolova<sup>i</sup>, A. S. Sorokin<sup>g</sup>, G. G. Suvorov<sup>i</sup>,  
 O. E. Sukhoveeva<sup>b</sup>, A. S. Chumabaev<sup>o</sup>, N. Yu. Shmakova<sup>p</sup>

<sup>a</sup>Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science  
of the Russian Academy of Sciences, Pushchino, Russian Federation

<sup>b</sup>Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation  
Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch

of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russian Federation

<sup>d</sup>Center of Forest Ecology and Productivity

of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

<sup>e</sup>Institute of Geology and Nature Management, Far Eastern Branch

of the Russian Academy of Sciences, Blagoveshchensk, Russian Federation

<sup>f</sup>Ugra State University, Khanty-Mansiysk, Russian Federation

<sup>g</sup>Lomonosov Moscow State University, Soil Science Faculty, Moscow, Russian Federation

<sup>h</sup>Institute of North Industrial Ecology Problems of the Kola Science Center

of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Murmansk district, Russian Federation

<sup>i</sup>A.V. Severtsov Institute of Problems of Ecology and Evolution

of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

<sup>j</sup>Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry of the Siberian Branch

of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation

<sup>k</sup>Saint-Petersburg State Forest Technical University, Saint-Petersburg, Russian Federation

<sup>l</sup>Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity

of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russian Federation

<sup>m</sup>Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch

of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar, Russian Federation

<sup>n</sup>Forest Research Institute of the Karelian Research Centre

of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russian Federation

<sup>o</sup>Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch

of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>p</sup>N.A. Avrorin Polar-Alpine Botanical Garden-Institute

of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Murmansk district, Russian Federation

\*E-mail: ikurg@mail.ru

Soil respiration (SR) is one of the largest fluxes in the global carbon cycle, exceeding anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions by more than an order of magnitude. Estimation of the heterotrophic component of SR is necessary to assess the carbon balance at ecosystem, regional, national and global scales. Within the framework of the Most Important National Innovation Project “Development of the system of ground and remote monitoring of carbon pools and greenhouse gas fluxes on the territory of the Russian Federation” the first Russian national network of CO<sub>2</sub> emission from soils is organized. For the first time on the entire territory of Russia on the basis of methodologically unified SR field measurements were conducted. This study combines first measurements conducted in the summer period (June – August) of 2023 at 75 monitoring sites in different ecosystems in the main Russian bioclimatic zones from tundra to semi-desert. SR values and its relationship with the temperature of the upper 5–10-cm layer of soil (Ts) were analyzed. Positive effect of soil temperature on mean summer SR rate and maximum monthly SR values is observed in the interval of mean Ts from 10 to 20°C. Among the studied ecosystems, the lowest SR values were found in tundra and bog ecosystems, while the highest values were found in forest-steppe. Amongst forest ecosystems, the lowest SR rates are characteristic of larch forests, while the highest SR values were observed in broad-leaved forests of the forest-steppe zone. To clarify the obtained regularities, it is necessary to expand studies in all bioclimatic zones, but mainly in agroecosystems, tundra and steppe ecosystems.

*Keywords:* biogenic carbon cycle, soil CO<sub>2</sub> emission, terrestrial ecosystems, bioclimatic zones, terrestrial monitoring, temperature factor, climate change