

ДЫХАНИЕ ПОЧВ В ПРИРОДНЫХ ЦЕНОЗАХ

УДК 631.4

ДЫХАНИЕ ПОЧВ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ ЮГА ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

© 2023 г. А. В. Иванов^{a, *} (ORCID: 0000-0003-4560-9824), Д. Г. Замолодчиков^{b, c}, М. А. Сало^d,
А. В. Кондратова^a, О. А. Пилецкая^a, С. В. Брянин^a

^aИнститут геологии и природопользования ДВО РАН, Релочный пер., 1, Благовещенск, 675000 Россия

^bЦентр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Профсоюзная, 84/32, Москва, 117234 Россия

^cНациональный исследовательский университет “Высшая школа экономики”,

Покровский бул., 11, Москва, 109028 Россия

^dСихотэ-Алинский государственный природный биосферный заповедник, Терней, 692150 Россия

*e-mail: aleksandrsg86@mail.ru

Поступила в редакцию 10.03.2023 г.

После доработки 10.05.2023 г.

Принята к публикации 11.05.2023 г.

Дальний Восток – наименее изученная в отношении потоков углерода часть России. Проведен обзор результатов натурных измерений эмиссии CO₂ с поверхности лесных почв, полученных на 26 участках в южной части Дальнего Востока на территории 4 субъектов России. Измерения выполнены в разных лесных формациях (лиственничники, кедровники, дубняки, ясенево-ильмовые леса), включая леса в зоне многолетней мерзлоты. Представлены сведения о сезонной и суточной динамике эмиссии. По 14 участкам представлены параметры уравнений для оценки эмиссии по данным о температуре воздуха на ближайшей метеостанции. Годичные потоки варьируют по пунктам измерения в пределах 5.5–10.1 т С/га, с максимальным значением в старовозрастном кедрово-пихтовом лесу южного Приморья. Вклад летнего сезона в годовой поток составляет 46–65%. В Республике Бурятия эмиссия CO₂ с поверхности почв сильно зависит от температуры и влажности почв. В переувлажненных почвах на эмиссию значимо влияет уровень грунтовых вод ($R^2 = 0.42$).

Ключевые слова: эмиссия CO₂, органический углерод почвы, температура почвы, температура воздуха, лесные формации

DOI: 10.31857/S0032180X23600397, **EDN:** FKKVGO

ВВЕДЕНИЕ

Всестороннее изучение процессов эмиссии CO₂ с поверхности почв, расширение баз данных по почвенному дыханию (здесь и далее термины “эмиссия”, “дыхание почвы” и обозначение SR используются как синонимы), организация сети мониторинга элементов углеродного цикла в России и других странах мира иллюстрируют необходимость понимания и корректного расчета углеродного баланса на разных территориальных уровнях. Дыхание почв – важная функциональная характеристика экосистем, определяющая величину баланса углерода в конкретных условиях. В настоящее время глобальный поток углерода из почв оценивается в 91 Гт С/год, а антропогенные эмиссии составляют 11.2% этой величины [15]. Для России аналогичные величины составляют 4.3 Гт С/год и 13.9% [2, 21]. Рост температуры воздуха ускоряет процессы минерализации почвенного органического вещества, поэтому наблюдается достоверный тренд увеличения дыхания почв в мире со скоростью 0.09 Гт С/год [15].

В этих изменениях значима роль бореальных лесов, которые обеспечивают 15% всей почвенной эмиссии и 23% ее ежегодного увеличения [16]. Усиление эмиссий в бореальном биоме на 45% вызвано климатическими причинами и на 55% – изменениями в землепользовании [16].

Существенные неопределенности региональных оценок бюджета углерода и дыхания почв связаны с рядом проблем, одной из которых является недостаточно репрезентативная выборка точек измерений. Наиболее полная база данных по дыханию почв, включающая 10366 записей по материалам 2266 публикаций, содержит всего 10 записей для территории Дальнего Востока России, из которых 6 приходятся на Якутию и 4 – на Приморский край [19]. Такое же количество записей в этой базе данных приходится на Антарктиду. При этом Дальний Восток России занимает 4.6% всей площади суши.

Леса Дальнего Востока подвергаются интенсивным нарушениям, что приводит к усилению эмиссий и снижению стоков углерода. Согласно “Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации на период до 2030 года” [20], в настоящее время леса Дальнего Востока являются основным источником эмиссии парниковых газов в России.

ской Федерации до 2030 г.”, Дальневосточный федеральный округ (ДФО) имеет наибольший показатель по площади лесов, переданных в пользование, – 100 млн га [11]. Это, прежде всего, площадь лесов, арендованных в целях заготовки древесины. Одновременно ДФО отличается наибольшей долей площадей, затронутых лесными пожарами. В 2019 г. здесь зафиксировано 3.9 млн га гарей, что составляет 67% всех лесных гарей страны [1]. Дополнительным эмиттером углерода является протаивающая многолетняя мерзлота, распространенная почти на всей площади ДФО.

Цель настоящей работы – формирование региональной базы данных по дыханию лесных почв южной части Дальнего Востока. Анализ литературы и общение с экспертами показали, что полевых измерений выполнено значительно больше, чем содержится в известных базах данных и опубликовано в высокорейтинговых журналах. Для составления базы использованы публикации в журналах, материалах и тезисах конференций, личные архивы, а также собственные данные авторов, не опубликованные до настоящего времени.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования. Анализ литературных источников и обработка собственных данных позволили получить информацию о дыхании почв лесных экосистем для 26 участков, расположенных в четырех субъектах России (табл. 1). Два участка измерений расположены в Республике Бурятия в сосново-лиственничных лесах на многолетней мерзлоте, три участка – в лиственничниках различной степени нарушения пожарами и рубками в Амурской области, один участок – во вторичном дубняке в Хабаровском крае и двадцать участков – в Приморском крае в хвойно-широколиственных лесах различных стадий лесовозобновительного процесса.

Все данные о дыхании почв, за исключением участков 1 и 2 в Республике Бурятия, получены камерным методом. Измерения в Бурятии выполнены абсорбционным методом [12]. Измерения дыхания почв на участках 7–25 выполнены по единой методике с использованием газоанализатора на основе сенсора AZ. Подробное описание объектов исследования представлено в работах [3, 4, 17].

Полнота данных на участках различается. Только для 13 из них проведен расчет годичной эмиссии CO₂. Для всех 26 участков представлено среднесуточное значение потока CO₂ с поверхности почвы за летний период, рассчитанное как среднее арифметическое по фактическим измеренным *n* значениям. Для тех участков, на которых представлены величины суммарных летних потоков, среднесуточная летняя эмиссия может

быть рассчитана как отношение суммарной величины к числу дней летнего периода (92 сут).

Согласно данным, вклад летнего периода в общую годичную эмиссию изменяется в пределах 46–65%. Изменчивость этого показателя может быть связана как с широтным и высотным градиентами температуры, так и с особенностями формирования снежного покрова в конкретный год и близостью к морю. Максимальный вклад летнего периода отмечен на участках 22–25 в Сихотелинском заповеднике, наиболее близких к морскому побережью. В Приморье возможны бесснежные зимы, когда почва сильно промерзает и продукция CO₂ в холодный период сильно снижается.

Расчет годичных потоков эмиссии. Одним из возможных способов расчета суммарного дыхания почвы за год является оценка значений эмиссии по температуре. Обычно исходные данные представлены непрерывным рядом значений температуры с определенным шагом (ч, сут) и уравнением зависимости эмиссии от этой температуры. Важно, чтобы зависимость была построена на данных соответствующего ряда температур. Регулярные данные по температуре воздуха и почвы непосредственно на участках измерения могут быть получены с помощью логгеров (регистраторов) температуры. Также могут быть использованы данные о температуре воздуха с ближайшей метеостанции.

Как правило, самая тесная связь получается при построении зависимости дыхания почвы от температуры почвы на участке измерения. Такие зависимости, имеющие коэффициенты детерминации $R^2 = 0.7–0.9$, были определены для некоторых участков, представленных в табл. 1 [4, 17].

В настоящей работе для расчета суммарной эмиссии использованы данные о температуре воздуха на ближайших к объектам исследования метеостанциях, поскольку они являются регулярными и открытыми. Связь дыхания почвы с температурой описывается экспоненциальным уравнением, которое для удобства может быть приведено к виду линейного. Расчет годичного потока выполнен на основе линейной модели:

$$\ln(SR) = kT + b,$$

где SR – эмиссия CO₂, г C/(м² сут); *T* – температура воздуха по метеостанции; °C, *k* и *b* – коэффициенты уравнения.

Суммарные потоки CO₂ за год и летний период для измерений, выполненных в Приморье, рассчитаны на основе однофакторных зависимостей дыхания от температуры воздуха ближайшей метеостанции (табл. 2). Для участков 7–19 использованы данные метеостанции “Тимирязевская”, для участков 20, 21 – “Красный Яр”, для участков 22–25 – “Терней”.

Таблица 1. Данные по дыханию лесных почв южных регионов Дальнего Востока. T_{cp} – среднегодовая температура воздуха, R – годовая сумма осадков, n – число измерений, SR_m – средняя эмиссия за лето, SR_{sum} – суммарная эмиссия за лето, SR_{tot} – суммарная эмиссия за год, PS – вклад летнего периода

№	Координаты (широта N, долгота E)	T_{cp} , °C	R , мм	Вид древостоя	Возраст, лет	Почва	Период измерений	SR_m , г C/(м ² сут)	SR_{sum} , т C/(га год)	SR_{tot} , т C/(га год)	PS , %	Источник
Бурятия												
1	52.538, 112.375	-5.0	370	Разреженный лиственничник на мерзлоте	–	Haplic Chernozem	Июль–октябрь 2004	0.28	–	–	–	[7]
2	52.133, 106.300	-1.0	412	Сосновый лес на приречной равнине р. Селенга	–	Umbric Albeluvisol	Май–сентябрь 2007–2012	5.61	5.05	–	–	[9]
Амурская область												
3	54.014, 127.039			Лиственничник	5			9.79				
4	54.008, 127.047	4.7	690	Лиственничник после пожара	60	Dystric Cambisol	Май–сентябрь 2018	8.57	–	–	–	[10]
5	54.011, 127.038			Вырубка 2003 г.	70			7.96				
Приморский край												
6	43.026, 131.896	4.9	818	Вторичный дубняк	60–80	Haplic Cambisol	Апрель–ноябрь 2018	2.92	2.57	–	–	[6]
7	43.649, 132.259			Кедровник	50	Albic Cambisol		5.11	3.80	8.08	47	
8	43.639, 132.246			Кедровник	80			4.53	3.14	6.87	46	[17]
9	43.643, 132.268			Кедровник	130	Haplic Cambisol	2014–2016	5.27	3.63	7.56	48	
10	43.652, 132.261			Кедровник	200			6.00	4.77	10.14	47	
11	43.649, 132.194	4.7	760	Дубняк	10			6.27	–	–	–	
12	43.656, 132.215			Дубняк	40			6.77				
13	43.652, 132.220			Дубняк	80	Dystric Cambisol	2013–2014	7.63				[3]
14	43.655, 132.216			Дубняк	90			5.28				
15	43.661, 132.212			Дубняк	120			7.36				

Таблица 1. Окончание

№	Координаты (широта N, долгота E)	T_{cp} , °C	R, мм	Вид древостоя	Возраст, лет	Почва	Период измерений	n	SR _m , г C/(м ² сут)	SR _{sum} , т C/(га год)	SR _{tot} , т C/(га год)	PS, %	Источник
16	43.648, 132.256			Ясенежник	50	Dystric Cambisol		35	6.55	5.60	9.82	57	
17	43.651, 132.259			Ясенежник	60		2015–2017	38	6.73	5.36	9.57	56	[4]
18	43.640, 132.242			Ясенежник	90	Haplic Cambisol		34	3.78	2.90	5.58	52	
19	43.638, 132.240			Топольник	110	Cambic Fluvisol		38	4.94	3.90	7.36	53	
20	46.694, 135.765			Старовозрастный кедровник	250	Cambisol	Апрель–октябрь 2016	8	5.63	4.22	8.12	52	–
21	46.538, 135.377	1.2	960	Кедровник с елью	180	Gleyic Cambisol		7	5.11	3.78	7.72	49	
22	45.139, 136.319			Вторичный березняк	100			13	3.7	3.58	5.51	65	
23	45.138, 136.315			Вторичный березняк после ветровала	100			13	5.18	4.93	7.83	63	
24	45.137, 136.303	4.2	1088	Кедровник	200	Dystric Cambisol	2019–2021	13	4.5	4.23	6.61	64	[18]
25	45.133, 136.300			Кедровник после ветровала	200			13	3.4	3.74	5.75	65	
Хабаровский край													
26	47.972, 135.231	–0.3	995	Вторичный дубняк	40	Dystric Cambisol	Июль 2012	4	6.6	–	–	–	–

Таблица 2. Коэффициенты уравнения для определения эмиссии CO_2 с поверхности почв по температуре воздуха по данным метеостанции (7–19 – “Тимирязевская”, 20–21 – “Красный Яр”, 22–25 – “Терней”). $SE(k)$, $SE(b)$ – стандартные ошибки коэффициентов. Диапазон температур для применения уравнений от -40 до 40°C

№ (табл. 1)	Вид древостоя	k	b	$SE(k)$	$SE(b)$	R^2	p
7	Кедровник 50 лет	0.062	0.155	0.007	0.14	0.65	<0.001
8	Кедровник 80 лет	0.058	0.054	0.008	0.17	0.58	<0.001
9	Кедровник 130 лет	0.064	0.064	0.007	0.15	0.67	<0.001
10	Кедровник 200 лет	0.062	0.385	0.008	0.16	0.58	<0.001
16	Ясеневник 50 лет	0.094	-0.230	0.016	0.29	0.79	<0.001
17	Ясеневник 60 лет	0.091	-0.146	0.013	0.23	0.77	<0.001
18	Ясеневник 90 лет	0.078	-0.460	0.011	0.21	0.77	<0.001
19	Топольник 110 лет	0.082	-0.241	0.011	0.19	0.76	<0.001
20	Старовозрастной кедровник 250 лет	0.060	0.300	0.006	0.08	0.66	<0.001
21	Кедровник с елью 180 лет	0.054	0.337	0.008	0.10	0.46	<0.001
22	Вторичный березняк 100 лет	0.117	-0.900	0.012	0.19	0.88	<0.001
23	Вторичный березняк после ветровала 100 лет	0.092	-0.114	0.014	0.21	0.84	<0.001
24	Кедровник 200 лет	0.091	-0.268	0.021	0.31	0.72	<0.001
25	Кедровник после ветровала 200 лет	0.102	-0.593	0.017	0.25	0.67	<0.001

Для четырех участков в Сихотэ-Алинском заповеднике (участки 22–25) дополнительно проведено сравнение результатов расчетов годовых потоков с использованием двух вариантов данных: температуры почвы с логгеров на участках измерений и по данным измерения температуры воздуха на ближайшей метеостанции (рис. 1). Расчет по данным температуры воздуха дает как завышенные, так и заниженные значения относительно величин, полученных на основе данных с регистраторов температуры почвы. Среднее отклонение составляет 7.8%, а различия не являются значимыми ($p > 0.05$). При этом ошибка спрогнозированных величин (RMSE), вычисленная на основе фактических и предсказанных значений, составляет 40–50%. Источником ошибки при вычислении эмиссии по температуре воздуха являются сильно различающиеся значения эмиссионных потоков в межсезонья (ранняя весна и поздняя осень) при близких значениях температуры. Например, на участке 16 измерения 27 апреля и 11 октября 2014 г. были выполнены при температурах воздуха 17.3 и 16.9°C , а эмиссия CO_2 с поверхности почв различалась в 2 раза и составила 1.15 и 3.44 г $\text{C}/(\text{m}^2 \text{сут})$ соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Локальная и региональная специфика величин эмиссии. Участок исследований 1 (здесь и далее номера соответствуют табл. 1) расположен в условиях мерзлотных почв Витимского плоскогорья, Республика Бурятия [7]. Дефицит влаги, в связи с малым количеством осадков, обуславливает за-

висимость дыхания от влажности почв: летние осадки приводят к кратному возрастанию эмиссии. В целом дыхание почв весной и летом определялось ходом температуры, а в летний период больше зависело от влажности почвы [7].

Исследование, проведенное в Бурятии на участке 2, является наиболее продолжительным – авторы измеряли эмиссию на протяжении сезонов 2007–2012 гг. с частотой один раз в 7–10 дней с мая по сентябрь [9]. При этом летний суммарный поток имеет сильную изменчивость по годам – от 3.6 до 6.0 т $\text{C}/(\text{га год})$. В целом связь дыхания с температурой и влажностью почвы аналогична закономерностям, полученным в работе [7], однако средние за летний период показатели дыхания почв для двух районов Бурятии сильно отличаются, что может быть связано как с различиями объектов исследования, так и с различиями в постановке натурных работ.

Для почв лиственничников Зейского заповедника (Амурская область, участки 3–5) показаны максимальные из имеющихся данных значения среднесуточной эмиссии за летний период 8–10 г $\text{C}/(\text{m}^2 \text{сут})$ [10]. При этом потоки CO_2 из почв нарушенных лесов (более 10 лет после пожара и рубки) были меньше, чем на контрольном участке.

Измерение дыхания почвы в Приморье в дубняке на территории кампуса Дальневосточного федерального университета на о. Русском (г. Владивосток) выполнено в 2018 г. В данной работе получены наименьшие величины средней эмиссии за летний период – 2.92 г $\text{C}/(\text{m}^2 \text{сут})$ и суммарного летнего дыхания – 2.57 т $\text{C}/(\text{га год})$. Основ-

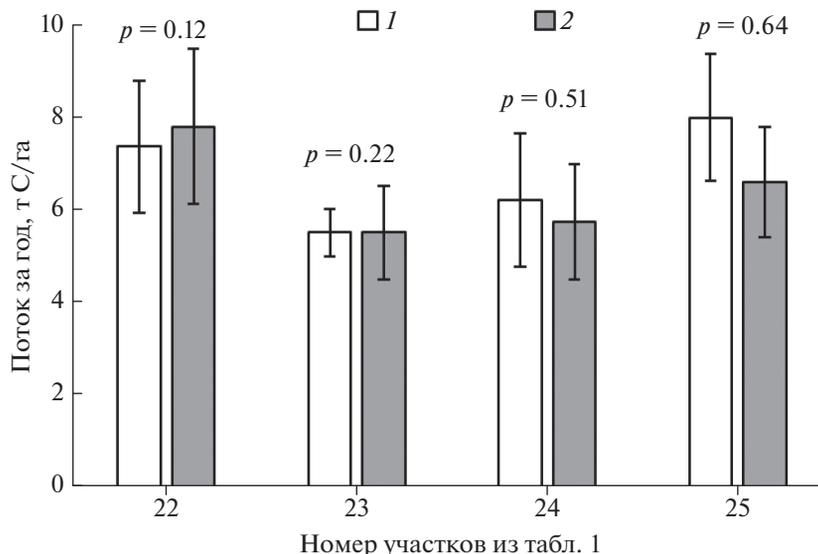


Рис. 1. Годичные потоки SR на четырех участках в Сихотэ-Алинском заповеднике, рассчитанные по температуре почвы на участке измерения с логгеров (1) и по температуре воздуха метеостанции “Терней” (2).

ной причиной низкой биологической активности исследуемой почвы является высокая рекреационная нагрузка на участок леса.

Лесные насаждения участков 7–10 представляют собой хронологическую последовательность развития кедровника одного типа леса. Суммарная годовая эмиссия возрастает в интервале возраста от 80 до 200 лет с 6.87 до 10.14 т С/(га год) или в среднем на 28 кг/год. При этом 200-летний лес представляет собой старовозрастное многовидовое сообщество с господством кедра корейского (*Pinus koraiensis* Siebold & Zucc.) и пихты цельнолистной (*Abies holophylla* Maxim.), с отсутствием признаков рубок и пожаров.

Закономерностей в изменении дыхания почв с возрастом в дубняках (участки 11–15) и пойменных лесах (16–19) не прослеживается, что связано с различиями почвенно-грунтовых условий и рельефа между участками. Ясенево-ильмовые леса, произрастающие в поймах рек, характеризуются более интенсивной эмиссией CO₂ с поверхности почв в течение года, по сравнению с кедровниками, преимущественно занимающими склоны и террасы (средние значения 8.9 и 8.1 т С/(га год) соответственно).

В национальном парке “Бикин” на севере Приморского края дыхание почв измерялось в 2016 г. на двух участках, один из которых (участок 20) расположен в 5 км от с. Красный Яр, а другой – в 40 км выше по течению р. Бикин, в месте впадения р. Ульмы (участок 21). Оба района исследований удалены на 600 км к северу от рассмотренных выше участков 7–19. Однако эта удаленность в пространстве не нашла отражения в различии величин суммарного годовичного дыхания почв, хотя

среднегодовая температура в “Бикине” на 3.5°С выше, чем в южном Приморье.

На территории Сихотэ-Алинского заповедника в 2019–2021 гг. изучалось влияние ветровала на почвенную эмиссию CO₂ [18]. Измерения выполняли на 4 пробных площадях: березняк-контроль, березняк-ветровал, кедровник-контроль, кедровник-ветровал (участки 22–25). Спустя 4 года после ветровала показатели эмиссии в березняке уменьшились на 25%, а в кедровнике, наоборот, увеличились на 29%, что, по-видимому, связано с разными темпами разложения тонких корней у хвойных и лиственных видов [17].

На территории Хабаровского края (участок 26) измерения дыхания почвы выполнены в окрестностях с. Павленково во вторичном низкопродуктивном дубняке. Измерения проводили в июле 2012 г. Среднее значение, равное 6.6 г С/(м² сут), соответствовало средним показателям для почв в дубняках Приморского края. При этом средняя эмиссия за июль в дубняках Приморья, расположенных на 550 км южнее, была на 20% выше.

Сезонная динамика дыхания почв проанализирована на примере объектов Приморского края (рис. 2). В целом пространственная изменчивость ($C_v = 19\%$) существенно меньше сезонной ($C_v = 45–74\%$), что характерно и для других регионов России [5, 8, 23]. Согласно анализу данных, включенных в настоящий обзор, максимальные значения дыхания почв для территории Приморья и всей южной части Дальнего Востока наблюдались в начале августа. Эмиссия в январе–феврале на юге Приморского края при наличии снежного покрова (20–30 см) составляла 0.1–0.3 г С/(м² сут). Вклад зимнего периода в общее дыхание составляет 4–7%, на лето приходится 45–65%.

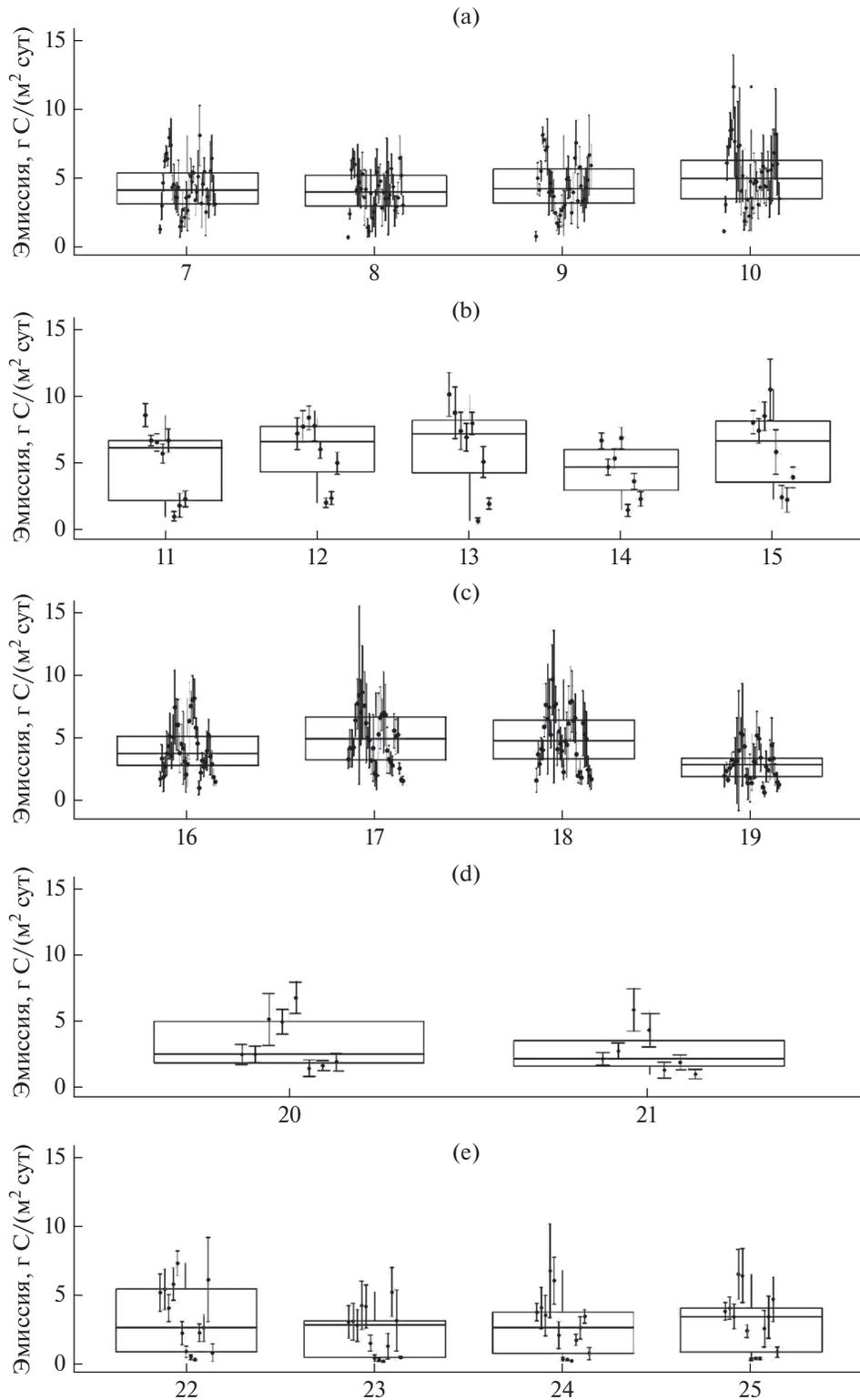


Рис. 2. Дыхание почв разных лесных формаций в Приморском крае: а – кедровники, б – дубняки, с – пойменные леса, д – кедровники национального парка “Бикин”, е – контрольные и ветровальные участки в Сихотэ-Алинском заповеднике. Период измерений указан в табл. 1. Планки показывают стандартное отклонение ($n = 8$).

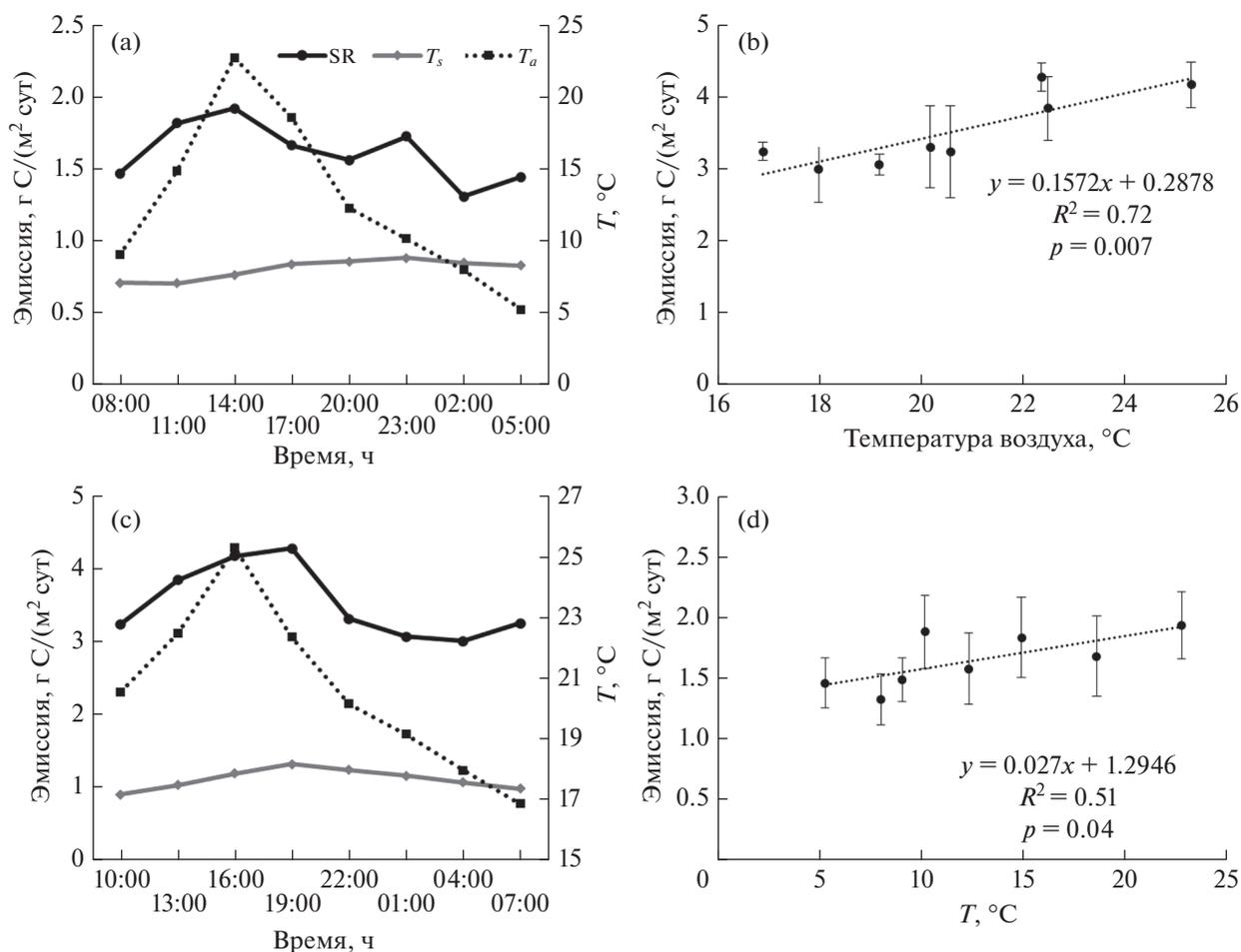


Рис. 3. Суточная динамика дыхания почв в дубняке (участок 13) 10–11 августа 2014 г. (а) и кедровнике (участок 10) 21–22 мая 2015 г. (с), SR – эмиссия CO₂, T_s – температура почвы, T_a – температура воздуха. (в) и зависимости дыхания почв от температуры воздуха в течение суток для этих объектов (b – дубняк, d – кедровник). Планки показывают стандартное отклонение ($n = 6$).

На территории Бурятии, где выпадает 300–400 мм осадков, влажность почв, наряду с температурой, вносит значительный вклад в объяснение сезонной динамики дыхания почв [7, 9], тогда как в Приморском крае влажность почвы отвечает не более чем за 10% изменчивости эмиссии [17], что связано с лучшей влагообеспеченностью региона (количество осадков 800–1100 мм).

Суточная динамика дыхания почв определялась на двух участках в Приморском крае – в 80-летнем дубняке (участок 13) и 200-летнем кедровнике (участок 10) (рис. 3). Измерения выполняли в дубняке 10 августа 2014 г., в кедровнике – 21 мая 2015 г. на 6 камерах с временным интервалом 1 раз в 3 ч. В обоих случаях суточные изменения эмиссии хорошо объяснялись динамикой температуры воздуха в течение суток.

Дыхание почв и уровень грунтовых вод. На участке 90-летнего пойменного леса (участок 18) параллельно с измерениями дыхания почв прово-

дили измерения уровня грунтовых вод. Получена значимая ($R^2 = 0.42$, $p < 0.05$) линейная зависимость эмиссии от глубины залегания грунтовых вод (рис. 4). При этом показатели эмиссии на этом участке были ниже, чем из почв остальных пойменных лесов данного района исследований, разница составила в среднем 37%. Таким образом, в лесах с высоко располагающимися грунтовыми водами уровень воды является значимым фактором эмиссии.

ОБСУЖДЕНИЕ

Из обзора данных по дыханию лесных почв разных регионов мира следует, что годовое дыхание почв в северных бореальных лесах составляет 3.22 т С/га, в зоне средней и южной тайги – 6.81 т С/га, в тропических влажных лесах – 12.50 т С/га [25]. Приведенные в настоящей работе оценки для

лесных почв Дальнего Востока (среднее значение 7.61 т С/га) соответствуют этому ряду значений.

Территорией, близкой к южным районам российского Дальнего Востока по климатическим и почвенно-растительным условиям, является северо-восточная часть Китая, где активно ведутся измерения потоков углерода из почв лесных экосистем. Измерения в лиственнично-березовых лесах провинции Хэйлунцзян показывают средние значения эмиссионных потоков за летний период на уровне 2.4–3.3 г С/(м² сут) [13]. В лиственничниках Большого Хингана был поставлен эксперимент по оценке влияния пожара на почвенное дыхание. Средние значения за летний период составили в этом исследовании 2.9–6.1 г С/(м² сут), а большие показатели эмиссии зафиксированы в послепожарных лесах [14]. Эти значения очень близки к данным, полученным в Бурятии на участках 1 и 2. При этом в исследованиях в Китае средние летние потоки оказались в 2 раза ниже, чем в исследованиях в лесах той же формации в Зейском заповеднике [10]. Причины расхождений могут заключаться как в методических подходах, так и в локальных различиях климата и пожарных нарушений.

В лесах Большого Хингана, произрастающих на многолетней мерзлоте, определены годовые потоки углерода, которые составили для сосняка 6.97, лиственничника 6.52, березняка 5.81 т С/га [14], что близко к значениям, полученным в северном Приморье. Климат северо-восточного Китая более теплый и сухой по сравнению с южной частью российского Дальнего Востока. По-видимому, сходные значения общей годичной эмиссии связаны как с уменьшением среднесуточных значений, так и с увеличением безморозного периода в Китае по сравнению с Россией.

Согласно опубликованному обзору исследований дыхания почв в лесах Китая [26], включющему 139 оценок годового потока CO₂, 33 выполнены в хвойно-широколиственных лесах – формации, наиболее близкой к лесам Приморья и Хабаровского края. Среднее значение показателей эмиссии для этой группы лесов в Китае составило 7.9 т С/(га год). Среднее значение для рассмотренных в данной работе участков Приморского края – 7.1 т С/(га год). Несмотря на более аридный климат, в расположенном южнее Китае повышение температуры приводит к увеличению общего эмиссионного потока углерода с поверхности почв хвойно-широколиственных лесов. Вместе с этим в провинции Хэйлунцзян влажность почв становится существенным лимитирующим фактором почвенного дыхания [14, 26].

Проблемой оценки и сравнительного анализа дыхания почв в ареале распространения лиственницы является крайне высокое разнообразие вариантов стадий послепожарного восстановления

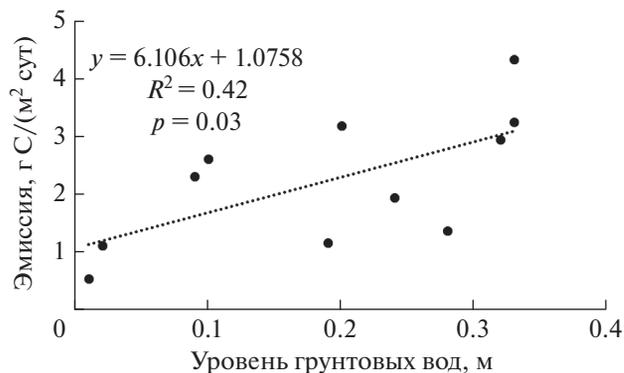


Рис. 4. Влияние уровня грунтовых вод на эмиссию в пойменном лесу (участок 18).

древостоев этой обширной лесной формации [26], которые характеризуются сильно различающимися величинами дыхания почв.

Оценки вклада разных сезонов года в общее дыхание почвы продолжают оставаться немногочисленными. В результате многолетних измерений дыхания лесной дерново-подзолистой почвы в Московской области вклад зимнего и летнего периодов установлен на уровне 12 и 43% соответственно, что может объясняться более мягким климатом по сравнению с Дальним Востоком [22]. Доля холодного периода (ноябрь–апрель) в общем дыхании почвы 60- и 120-летних залежей в более южной Орловской области составила 9.6 и 9.8%, что близко к результатам, полученным в Приморье [20]. Исследования, выполненные в окрестностях оз. Эби-Нур в аридном регионе Северного Китая, установили вклад зимнего дыхания в диапазоне 4–31% для разных экосистем [24], что в среднем выше, чем в Приморском крае.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ предоставляет новые сведения о дыхании лесных почв в южных районах Дальнего Востока. Исследования в 4 дальневосточных субъектах России, выполненные на основе современных методов, дают возможность детально рассмотреть региональную специфику процессов почвенной эмиссии CO₂. Использование полученных оценок в рамках создаваемой в России сети мониторинга элементов углеродного цикла будет способствовать уточнению имеющихся региональных и глобальных расчетов бюджета углерода и уменьшению их неопределенностей.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения “Разработка системы наземного и дистанционного

мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах” (рег. № 123030300031-6).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Барталев С.А., Егоров В.А., Ефремов В.Ю., Лупян Е.А., Стыценок Ф.В., Флитман Е.В.* Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-TM/ETM+ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 9–26.
2. *Ваганов Е.А., Порфирьев Б.Н., Широков А.А., Колпаков А.Ю., Пыжжев А.И.* Оценка вклада российских лесов в снижение рисков климатических изменений // Экономика региона. 2021. Т. 17. Вып. 4. С. 1096–1109. <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2021-4-4>
3. *Иванов А.В., Замолодчиков Д.Г., Линева Д.А., Осипов Э.А.* Почвенная эмиссия CO₂ в дубняках разного возраста в условиях южного Сихотэ-Алиня // Инновации и технологии в лесном хозяйстве. Тез. докл. IV междунауч.-пр. конф. СПб., 2014. С. 52.
4. *Иванов А.В., Момот А.А.* Эмиссия углерода с поверхности почв пойменных лесов на юге Приморского края // Вестник Поволжского гос. технол. ун-та. Сер. Лес. Экология. Природопользование. 2016. № 1. С. 69–78.
5. *Карелин Д.В., Азовский А.И., Куманяев А.С., Замолодчиков Д.Г.* Значение пространственного и временного масштаба при анализе факторов эмиссии CO₂ из почвы в лесах Валдайской возвышенности // Лесоведение. 2019. № 1. С. 29–37.
6. *Ковошицкий С.А., Маркезини Л.Б., Трегубова В.Г.* Оценка сезонной динамики эмиссии углекислого газа и метана почвами островных территорий (на примере почв о. Русский, Приморский край) // Природа без границ. Сб. мат.-лов. Владивосток, 2018. С. 145–147.
7. *Малханова Е.В., Егорова Р.А., Чимитдоржиева Г.Д.* Сезонная динамика эмиссии CO₂ мерзлотными почвами Забайкалья // Агрехимия. 2008. № 2. С. 66–69.
8. *Махныкина А.В., Прокушкин А.С., Ваганов Е.А. и др.* Динамика потоков CO₂ с поверхности почвы в сосновых древостоях Средней Сибири // Журн. Сибирского федерального ун-та. Сер. Биология. 2016. Т. 9. № 3. С. 338–357. <https://doi.org/10.17516/1997-1389-2016-9-3-338-357>
9. *Мильхеев Е.Ю., Чимитдоржиева Г.Д.* Сезонная эмиссия углекислого газа из почв дельты р. Селенга (Западное Забайкалье) // Агрехимия. 2015. № 2. С. 46–51.
10. *Пилецкая О.А.* Эмиссия углекислого газа в нарушенных бореальных лесах // Сборник избранных статей по материалам научных конференций ГНИИ “Нацразвитие”. Мат. науч. конф. СПб., 2019. С. 82–84.
11. Распоряжение Правительства Российской Федерации “Об утверждении стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации” до 2030 года от 20.09.2018 № 1989-р. <https://inlnk.ru/9PP7Ra> (дата обращения 01.03.2023).
12. *Шарков И.Н.* Совершенствование абсорбционного метода определения выделения CO₂ из почвы в полевых условиях // Почвоведение. 1987. № 1. С. 127–133.
13. *Duan B., Xiao R., Cai T., Man X., Ge Z. et al.* Strong responses of soil greenhouse gas fluxes to litter manipulation in a boreal larch forest, Northeastern China // Forests. 2022. V. 13. P. 1–16. <https://doi.org/10.3390/f13121985>
14. *Duan B., Cai T., Man X., Xiao R., Gao M. et al.* Different variations in soil CO₂, CH₄, and N₂O fluxes and their responses to edaphic factors along a boreal secondary forest successional trajectory // Sci. Total Environ. 2022. V. 838. P. 155983. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155983>
15. *Hashimoto S., Carvalhais N., Ito A., Migliavacca M., Nishina K., Reichstein M.* Global spatiotemporal distribution of soil respiration modeled using a global database // Biogeosciences. 2015. V. 12. P. 4121–4132. <https://doi.org/10.5194/bg-12-4121-2015>
16. *Huang N., Wang L., Song X.-P., Black T.A., Jassal R.S., Myneni R.B. et al.* Spatial and temporal variations in global soil respiration and their relationships with climate and land cover // Sci. Adv. 2020. V. 6. P. 8508. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abb8508>
17. *Ivanov A.V., Tataurov V.A., Braun M.* Seasonal and daily dynamics of the CO₂ emission from soils of pinus koraiensis forests in the south of the Sikhote-Alin range // Eurasian Soil Science. 2018. T. 51. P. 290–295. <https://doi.org/10.1134/S1064229318030043>
18. *Ivanov A.V., Salo M.A., Tolstikova Y.Yu., Bryanin S.V.; Zamolodchikov D.G.* Effects of Windfall on Soil Surface Carbon Emission and Fine Root Stocks in the Central Sikhote-Alin // Eurasian Soil Science. V. 55. P. 1405–1413. <https://doi.org/10.1134/s1064229322100052>
19. *Jian J., Vargas R., Anderson-Teixeira K.J., Stell E., Herrmann V., Horn M., Kholod N. et al.* // A Global Database of Soil Respiration Data, Version 5.0. ORNL DAAC, 2021. Oak Ridge, Tennessee, USA. <https://doi.org/10.3334/ornldaac/1827>
20. *Karelin D.V., Goryachkin S.V., Kudikov A.V. et al.* Changes in carbon pool and CO₂ emission in the course of postagrogenic succession on gray soils (Luvic Phaeozems) in European Russia // Eurasian Soil Science. 2017. V. 50. P. 559–572. <https://doi.org/10.1134/S1064229317050076>
21. *Kudeyarov V.N.* Soil Respiration and Biogenic Carbon Dioxide Sink in the Territory of Russia: An Analytical Review // Eurasian Soil Science. 2018. V. 5. P. 599–612. <https://doi.org/10.1134/S1064229318060091>
22. *Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Zhmurin V.A., Kudeyarov V.N., Romash-*

- kin I.V. Experimental and model estimates of respiration of the forest sod-podzolic soil in the Prioksko-Terrasny nature reserve // Contemporary Problems of Ecology. 2020. V. 7. P. 813–824.
23. Menyailo O.V., Matvienko A.I., Stepanov A.L., Makarov M.I. Measuring soil CO₂ efflux: Effect of collar depth // Russ. J. Ecology. 2015. V. 46. P. 152–156. <https://doi.org/10.1134/S1067413615020071>
24. Qin L., Lv G.H., He X. M. et al. Winter soil CO₂ efflux and its contribution to annual soil respiration in different ecosystems of Ebinur Lake Area // Eurasian Soil Science. 2015. V. 48. P. 871–880. <https://doi.org/10.1134/S1064229315080050>
25. Raich J.W., Schlesinger W.H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate // Tellus. 1992. V. 44B. P. 81–89. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v44i2.15428>
26. Song X., Wang G., Ran F., Chang R. et al. Effects of topography and fire on soil CO₂ and CH₄ flux in boreal forest underlain by permafrost in northeast China // Ecological Engineering. 2017. V. 106. P. 35–43. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.05.033>

Soil Respiration of Forest Ecosystems in the South of the Far East

A. V. Ivanov^{1, *}, D. G. Zamolodchikov^{2, 3}, M. A. Salo⁴, A. V. Kondratova¹,
O. A. Piletskaya¹, and S. V. Bryanin¹

¹Institute of Geology and Nature Management of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Blagoveshchensk, 675000 Russia

²Center for Ecology and Forest Productivity of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117234 Russia

³National Research University “Higher School of Economics”, Moscow, 109028 Russia

⁴Sikhote-Alinsky State Natural Biosphere Reserve, Terney, 692150 Russia

*e-mail: aleksandrgrg86@mail.ru

The Far East has been and remains the part of Russia least studied with respect to carbon fluxes. We reviewed the results of in situ measurements of carbon emission from the surface of forest soils obtained at 26 points in the southern part of the Far East on the territory of 4 constituent entities of Russia. The measurements were taken in different forest formations (larch, cedar, oak, ash, and elm forests), including forests in the permafrost zone. Information on seasonal and daily dynamics of emission is presented. Equations are presented for 14 sites to estimate the emission from the air temperature of the nearest weather station. Annual fluxes vary by measurement points in the range of 5.5–10.1 t C/ha, with a maximum value in the old-growth cedar-fir forest of southern Primorye. The contribution of the summer season to the annual flux is 49–81%. In the western part of the territory under consideration (Buryatia), carbon emission from the soil surface strongly depends on soil temperature and moisture. In over moistened soils, the emission is significantly affected by the groundwater level ($R^2 = 0.42$). In Primorye forests, the soil moisture factor ceases to have a significant effect on the emission. Discussion of the results in the context of modern studies in other regions shows comparability of the survey estimates and possibility of their use for analysis of global trends and regularities. Translated with www.DeepL.com/Translator (free version).

Keyword: CO₂ emissions, soil organic carbon, soil temperature, air temperature, forest formations