

УДК 631.412

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ УГЛЕРОДНОГО ЦИКЛА ПОЧВ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ СЕВЕРНОЙ, СРЕДНЕЙ И ЮЖНОЙ ТАЙГИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

© 2020 г. А. А. Бобрик^{a, *}, О. Ю. Гончарова^a, Г. В. Матьшак^a,
И. М. Рыжова^a, М. И. Макаров^a, М. В. Тимофеева^a

^aМГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, Москва, 119991 Россия

*e-mail: ann-bobrik@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.01.2020 г.

После доработки 20.04.2020 г.

Принята к публикации 24.04.2020 г.

В ходе исследований, проведенных в типичных лесных экосистемах северной, средней и южной тайги Западной Сибири в пик вегетационного сезона, оценено пространственное варьирование и взаимосвязь эмиссии CO_2 почв, содержания экстрагируемого и микробного углерода почв, а также гидротермических параметров почв. Исследованные параметры углеродного цикла почв характеризуется высокой пространственной вариабельностью во всех исследованных экосистемах. Данный факт говорит о необходимости детального исследования эмиссии парниковых газов почв из всех экосистем, которые типичны для данной природной зоны. Почвы сосняков зеленомошных северной тайги статистически значимо отличаются от почв сосняков лишайниковых и характеризуются превышением таких показателей, как содержание углерода микробной биомассы в 1.5 раза (195 ± 24 и 127 ± 16 мг С/кг почвы соответственно), содержание экстрагируемого углерода в 4 раза (157 ± 25 и 41 ± 5 мг С/кг почвы соответственно), эмиссия CO_2 в 1.7 раза (324 ± 20 и 190 ± 10 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \text{ ч})$ соответственно). В северо-таежной зоне эмиссия диоксида углерода почвами сосняков зеленомошных в большей степени определяется температурой почвы, а в меньшей — влажностью почвы. Для почв сосняков лишайниковых северо-таежной зоны характерна другая зависимость: наибольшее влияние на эмиссию CO_2 почв оказывает содержание экстрагируемого углерода почв. Значимыми факторами, оказывающим влияние на эмиссию CO_2 почв лесных экосистем таежной зоны, являются содержание экстрагируемого и микробного углерода почв, а также гидротермические параметры почв.

Ключевые слова: эмиссия CO_2 , экстрагируемый углерод, углерод микробной биомассы, Podzols

DOI: 10.31857/S0032180X20110052

ВВЕДЕНИЕ

Ключом к пониманию глобального цикла углерода является оценка эмиссии CO_2 из почв, как интегрального показателя их биологической активности [28, 31, 33, 36, 39, 41, 43]. Основной тенденцией мировых исследований данной проблемы является моделирование последствий глобального изменения климата с оценкой чувствительности этих моделей к разным параметрам, включающим как свойства почвы, так и гидротермические, биологические и другие факторы. В связи с этим особое внимание уделяется количественной оценке содержания и запасов компонентов углеродного цикла в почвах и, в том числе эмиссии углерода из них [4, 13, 28, 41]. Как правило, такие оценки основаны на материалах почвенных карт и немногочисленных баз данных [21, 28]. Редки работы по изучению пространственной вариабельности эмиссии парниковых газов и запасов органического углерода

в почвах бореальных и арктических экосистем, которые необходимы для надежных оценок потоков углерода [9, 18, 38, 45]. Неоднозначные оценки баланса углерода на территории Российской Федерации, имеющиеся в литературе, требуют уточнения существующих величин баланса CO_2 . В связи с этим очевидна необходимость в количественной оценке эмиссии парниковых газов с учетом ее пространственной изменчивости, а также в изучении ее зависимости от свойств почв и факторов среды.

Исследования эмиссии газов из почв лесных экосистем являются актуальными в связи с глобальными проблемами парникового эффекта и загрязнения атмосферы [6, 11, 29, 31, 39, 45]. Лесные экосистемы представляют особый интерес для исследователей, так как являются хранилищем углерода, аккумулированного в живых растениях, их остатках различной степени деструкции, в гумусе и торфах. В зависимости от природ-

но-экономической ситуации лесные экосистемы могут быть либо хранителем (стоком) углерода, либо его источником (эмиссией) поступления в биосферу. Бореальные леса, занимая значительные площади, являются крупнейшим резервуаром углерода органического вещества [4, 13, 31]. Ведущими учеными разрабатываются схемы районирования территории Западной Сибири по эмиссии парниковых газов [10].

Цель работы — оценка пространственного распределения компонентов углеродного цикла (эмиссия CO_2 , содержание экстрагируемого и микробного углерода) в почвах лесных экосистем северной, средней и южной тайги Западной Сибири. В задачи входило: 1 — охарактеризовать факторы среды (растительность, гидротермические свойства почв) и компоненты углеродного цикла почв (эмиссию CO_2 , содержание экстрагируемого и микробного углерода) лесных экосистем тайги Западной Сибири; 2 — определить пространственную вариабельность факторов среды и компонентов углеродного цикла почв; 3 — оценить зависимость эмиссии CO_2 от гидротермических параметров почв и содержания в них экстрагируемого и микробного углерода.

Данная работа продолжает цикл статей, отражающих результаты исследования закономерностей распределения компонентов углеродного цикла в почвах типичных экосистем Западной Сибири вдоль биоклиматической и геоэкологической трансекты от южной тайги до южной тундры [1–3].

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования. Исследования проводились в пик вегетационного сезона в июне–августе 2017–2019 гг. в типичных лесных экосистемах северной, средней и южной тайги Западной Сибири (рис. 1). Таежная зона занимает до 60% территории Западной Сибири и выделяется по преобладанию растительных сообществ бореального типа.

Район исследования в подзоне северной тайги расположен на севере Западной Сибири (Надымский район, Тюменская область, ЯНАО; $65^{\circ}18' \text{N}$, $72^{\circ}54' \text{E}$), в краевой части третьей озерно-аллювиальной террасы р. Надым. Приречные слаборасчлененные части равнины залесены, для центральных нерасчлененных ее частей характерна большая заболоченность и заозеренность [5]. Территория относится к зоне прерывистого распространения многолетнемерзлых пород (ММП). Острова ММП, занимающие до 50% площади, приурочены к торфяникам, торфяным болотам и буграм пучения. В целом для района исследования характерны суровые климатические условия: продолжительный зимний период, низкие среднегодовые температуры воздуха (-5°C), температура наиболее холод-

ного месяца варьирует от -10 до -25°C , сумма активных температур более 10°C составляет 400–1250 $^{\circ}\text{C}$, количество осадков варьирует от 450 до 650 мм в год. В автоморфных лесных экосистемах, расположенных на отложениях легкого гранулометрического состава, многолетнемерзлые породы отсутствуют. При этом значительное влияние на морфологию и свойства почв этих экосистем оказывают проявления палеокриогенного этапа развития территории. Согласно почвенно-географическому районированию [8], этот район относится к Нижнеобской провинции фации холодных длительно промерзающих почв подзоны глееподзолистых почв, глееземов и подзолов северной тайги Европейско-Западно-Сибирской таежно-лесной области бореального пояса.

Объектами исследования являлись автоморфные лесные экосистемы, представленные двумя типами кочковато-западинных сосняков лишайниковых (рис. 2): 1) сосняки зеленомошные, характеризующиеся преобладанием в напочвенном покрове мхов *Sphagnum* sp., *Polytrichum strictum*, *Pleurozium schreberi* (проективное покрытие мохово-лишайникового яруса в среднем составляло 90%, травяно-кустарничкового — 35%, древесного — 40%) и распространением подбуров (Entic Podzols), 2) сосняки лишайниковые, характеризующиеся преобладанием в напочвенном покрове лишайников *Cladonia rangiferina*, *Cladonia stellaris*, *Cetraria islandica* (проективное покрытие мохово-лишайникового яруса в среднем составляло 99%, травяно-кустарничкового — 20%, древесного — 10%), и распространением подзолов иллювиально-железистых супесчаных (Folic Albic Podzols).

Район исследования в подзоне средней тайги расположен в центральной части Западно-Сибирской равнины (Ханты–Мансийский автономный округ–Югра; $60^{\circ}55' \text{N}$, $68^{\circ}43' \text{E}$) (рис. 1). Исследованная территория расположена в умеренно холодном климатическом районе: среднегодовая температура воздуха не превышает 1.3°C , температура наиболее холодного месяца — -24°C , сумма активных температур более 10°C составляет 1200–1600 $^{\circ}\text{C}$, количество осадков варьирует от 480 до 550 мм в год. Эта подзона отличается от северо-таежной большей теплообеспеченностью и положительными среднегодовыми температурами. Растительный покров представлен елово-пихтово-кедровыми лесами, приуроченными к наиболее дренированным участкам, и сосняками зеленомошными на породах легкого гранулометрического состава. Среднетаежные леса отличаются от северо-таежных большей производительностью. В целом по продуктивности и емкости биологического круговорота ельники средней тайги примерно в два раза превосходят северо-таежные еловые леса. Согласно почвенно-географическому районированию [8], этот район относится к Нижнеиртышской провинции фации хо-

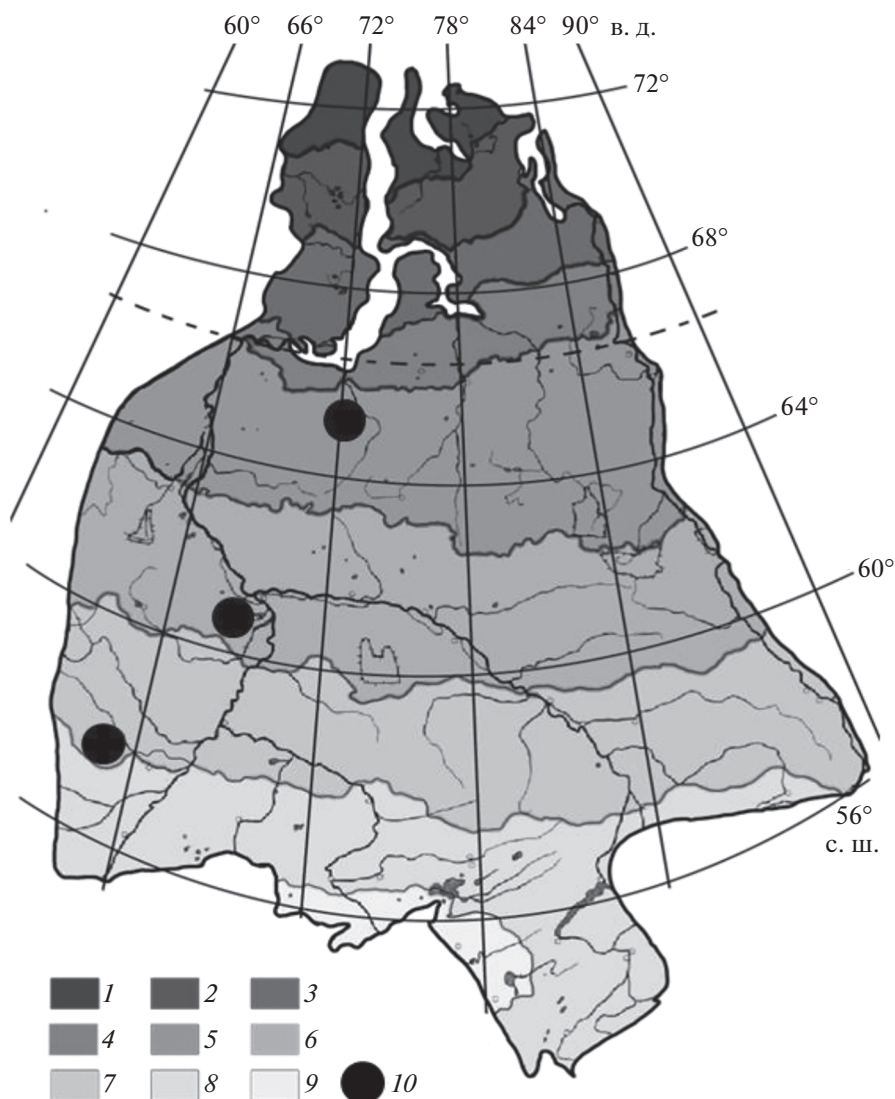


Рис. 1. Местоположение района исследований. Обозначения: 1 – арктическая тундра, 2 – типичная тундра, 3 – южная тундра, 4 – лесотундра, 5 – северная тайга, 6 – средняя тайга, 7 – южная тайга, 8 – лесостепь, 9 – степь, 10 – объекты исследования.

лодных длительно промерзающих почв подзоны подзолистых почв, глееземов и подзолов средней тайги Европейско-Западно-Сибирской таежно-лесной области бореального пояса.

Объектом исследования выбран ельник зеленомошный, расположенный на левобережье р. Иртыш, в 20 км к юго-западу от города Ханты-Мансийск, и характеризующийся однородной фациальной структурой растительного покрова (проективное покрытие мохово-лишайникового яруса в среднем составляло 80%, травяно-кустарничкового – 60%, древесного – 80%) и распространением подзолов (Albic Podzols).

Район исследования в подзоне южной тайги расположен на юге Западной Сибири (Тюменский

район, Тюменская область; 57°19' N, 64°58' E). Исследованная территория расположена в умеренно холодном климатическом районе: среднегодовые температуры воздуха достигают 1.7°C, температура наиболее холодного месяца варьирует от –20 до –25°C, сумма активных температур более 10°C составляет 1600–2450°C, количество осадков варьирует от 350 до 500 мм в год. Для климата зоны характерно достаточное увлажнение при значительно большей обеспеченности теплом по сравнению со среднетаежной подзоной. Зональные темнохвойные кедрово-елово-пихтовые зеленомошно-кисличные с элементами широколиственного леса приурочены к небольшим по площади хорошо дренированным участкам высоких надпоймен-

ных террас и приречных частей водоразделов. Согласно почвенно-географическому районированию [8] этот район относится к Среднеобской провинции фации холодных длительно промерзающих почв подзоны дерново-подзолистых почв и дерново-подзолов южной тайги Европейско-Западно-Сибирской таежно-лесной области бореального пояса.

Объектом исследования выбран сосняк зеленомошный, расположенный на правобережной террасе р. Тура, в 40 км к юго-западу от города Тюмень, характеризующийся однородной фациальной структурой растительного покрова (проективное покрытие мохово-лишайникового яруса в среднем составляло 85%, травяно-кустарничкового — 10%, древесного — 60%) и распространением дерново-подзолов (Umbric Podzols).

Такой обширный ареал подзолов (от южной тундры до южной тайги) связан с тем, что специфика почвообразования определяется здесь, прежде всего, литологическим фактором, обеспечивающим свободный внутренний дренаж в условиях холодного гумидного климата [8].

Методы исследования. Основным методом исследования являлось изучение всех показателей по пикетам мониторинговых площадок. На всех пикетах мониторинговых площадок, расположенных по регулярной сетке с шагом 5 м (50 × 50 м, 121 точка опробования в северной тайге (рис. 2); 50 × 20 м, 55 точек опробования в средней тайге; 50 × 25 м, 66 точек опробования в южной тайге), проведено описание почвенного и растительного покрова [44]. Определена мощность органогенного слоя с помощью почвенного бура-ложки (фирмы Eijkelkamp) для пробоотбора мягких агрегированных почв (влажная глина, торфяные отложения и т. п.) с сохранением структуры образца. Аналогичные методики использованы в предыдущих исследованиях на мониторинговых площадках [1, 2].

Определение эмиссии диоксида углерода с поверхности почвы проводилось однократно на каждой мониторинговой площадке одновременно в дневные часы (с 11.00 до 14.00) для каждого пикета методом статичных закрытых камер с удалением растительного покрова (10 августа 2017 г. в северной тайге, 29 июня 2019 г. в средней тайге, 17 июня 2018 г. в южной тайге). Суть метода статических (закрытых) камер или в зарубежной интерпретации закрытых нестационарных непроточных камер заключается в измерении эмиссии газа в ограниченном объеме камеры в течение фиксированного времени [20, 22, 35, 37]. Измерение концентрации CO₂ осуществлялось на портативном газоанализаторе RMTDX6210. Портативный газоанализатор DX6210 фирмы RMT Ltd. снабжен инфракрасным датчиком и предназначен для определения содержания CO₂ в газовых пробах в

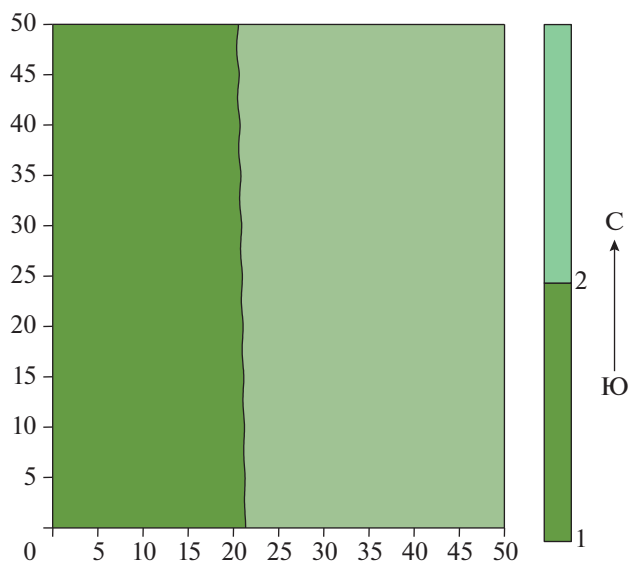


Рис. 2. Ландшафтная схема мониторингового участка в северо-таежной зоне: 1 — сосняки зеленомошные, 2 — сосняки лишайниковые.

диапазоне концентраций 0–2%, с разрешением 0.001% и точностью 0.002%.

Параллельно проводили измерение температуры воздуха с помощью программируемого микро-термодатчика Thermochron iButton™ [20]. Объемную влажность почвы измеряли в верхнем (0–15 см) слое почвы с помощью влагомера SpectrumTDR 100. Проведены разовые измерения температуры почвы термометром электронным TP3001 (разрешение 0.1°C, точность ±1°C) в верхнем (0–15 см) слое почвы в трехкратной повторности для каждого пикета. Измерение температуры почвы на глубине 15 см является стандартным для подобного рода исследований.

На каждом объекте исследования проведен отбор образцов из верхнего (0–15 см) слоя почв. Образцы хранили при естественной влажности и температуре 4°C для микробиологических исследований (“свежие” образцы). Перед проведением лабораторных анализов каждый образец почв был перемешан и измельчен.

Определение содержания углерода экстрагируемого органического вещества (С экстр) проводилось в вытяжке 0.05 М K₂SO₄ на автоматическом анализаторе TOC-V_{CPN} (Shimadzu) в трехкратной повторности [24]. Определение влажности образцов почв проводилось с помощью измерителя влажности весового OHAUS MB-35.

Определение содержания углерода микробной биомассы (С мик) проводилось методом фумигации–экстракции в трехкратной повторности [16, 23, 42]. Компоненты микробных клеток, погибших в результате обработки почвы парами хлоро-

Таблица 1. Описательная статистика параметров углеродного цикла и свойств почв лесных экосистем северной тайги Западной Сибири

Показатель	Сред- нее	Медиа- на	Нижний квартиль	Верхний квартиль	Стандартное отклонение	Ошибка среднего	Коэффициент вариации, %
Северная тайга (август 2017 г.). Сосняки зеленомошные, $n = 55$							
Эмиссия CO ₂ , мг CO ₂ /(м ² ч)	324	285	205	404	148	20	46
С мик, мг С/кг почвы	195	143	92	234	151	24	77
С экстр, мг С/кг почвы	157	99	53	186	166	25	106
Температура почвы, °С	7.6	7.5	7.1	7.8	0.7	0.1	9
Объемная влажность, %	14.1	14.7	11.7	16.7	4.6	0.6	32
Мощность орг. г-та, см	5.4	5.0	4.0	7.0	2.3	0.3	43
Северная тайга (август 2017 г.). Сосняки лишайниковые, $n = 66$							
Эмиссия CO ₂ , мг CO ₂ /(м ² ч)	190	171	131	233	84	10	44
С мик, мг С/кг почвы	127	90	64	119	128	16	100
С экстр, мг С/кг почвы	41	29	21	48	45	5	108
Температура почвы, °С	9.1	8.9	8.5	9.6	0.9	0.1	10
Объемная влажность, %	11.5	10.4	8.0	14.6	5.1	0.6	44
Мощность орг. г-та, см	1.6	1.0	1.0	2.0	1.7	0.2	102

форма, экстрагируют раствором соли. В качестве экстрагента использовался раствор K₂SO₄ в концентрации 0.05 М, а не традиционно используемой для подобного анализа концентрации 0.5 М [16]. Экстракция проводилась для контрольной (не фумигированной) и фумигированной части пробы. В настоящей работе использовали фумигацию “свежих” образцов почвы при естественной влажности парами хлороформа, стабилизированного амиленом, без этанола в течение 1 суток. Определение содержания С в растворах проводили на автоматическом анализаторе TOC-V_{CPN} (Shimadzu). Содержание микробного углерода рассчитывалось как $C_{\text{мик}} = Fc/kc$, где Fc — это разница содержания углерода в фумигированных и нефумигированных образцах, kc — поправочный коэффициент, показывающий полноту экстракции углерода из почв [30]. Для органогенных почв (с содержанием органического углерода более 10%, подстилки, торфяных горизонтов) был использован поправочный коэффициент k_{ec} равный 0.45, а для минеральных — 0.33 [30, 32, 40, 42].

Для анализа полученных результатов наблюдений и аналитических данных использованы следующие методы математической статистики: описательная статистика; сравнение средних по параметрическому критерию Стьюдента (t -критерий) и непараметрическому критерию Вилкоксона; дисперсионный анализ; корреляционный анализ с включением определения рангового коэффициента корреляции Спирмена; регрессионный анализ. Выбранный уровень значимости $\alpha = 0.05$. Для статистической обработки данных использовалась Statistica 7.0. Структуру пространственной вариабельности параметров исследовали при помощи картограмм в пакете “GoldenSoftwareSurfer 8”.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сосняки северной тайги. Установлено, что почвы сосняков зеленомошных характеризуются большей мощностью органогенного слоя, влажностью почвы, содержанием экстрагируемого углерода и углерода микробной биомассы, но меньшей температурой почвы на глубине 15 см по сравнению с почвами сосняков лишайниковых (табл. 1). Почвы исследованных экосистем характеризуются высокой пространственной вариабельностью содержания экстрагируемого углерода и углерода микробной биомассы (рис. 3).

Почвы сосняков зеленомошных статистически значимо отличаются от почв сосняков лишайниковых по величине эмиссии CO₂ (324 ± 148 мг CO₂/(м² ч), $n = 55$ и 190 ± 84 мг CO₂/(м² ч), $n = 66$ соответственно), а также по всем остальным исследованным параметрам углеродного цикла почв и параметрам, характеризующих условия среды.

Взаимосвязь факторов среды. Методом регрессионного анализа установлено, что температура почвы на глубине 15 см сосняков лишайниковых (дневное время, август) имеет статистически значимую связь с влажностью почвы и мощностью органогенного слоя почв:

$$T = 10.4 - 0.1W - 0.2 \text{ мощность}, \quad (1)$$

$$r = 0.71, P < 0.05, n = 66,$$

где T — температура почвы на глубине 15 см, °С; W — влажность, % (об.); мощность — мощность органогенного горизонта почв, см.

Пространственное варьирование температуры почвы на глубине 15 см на 32% связано с варьированием влажности почвы, на 29% — с варьированием мощности органогенного горизонта почв, а

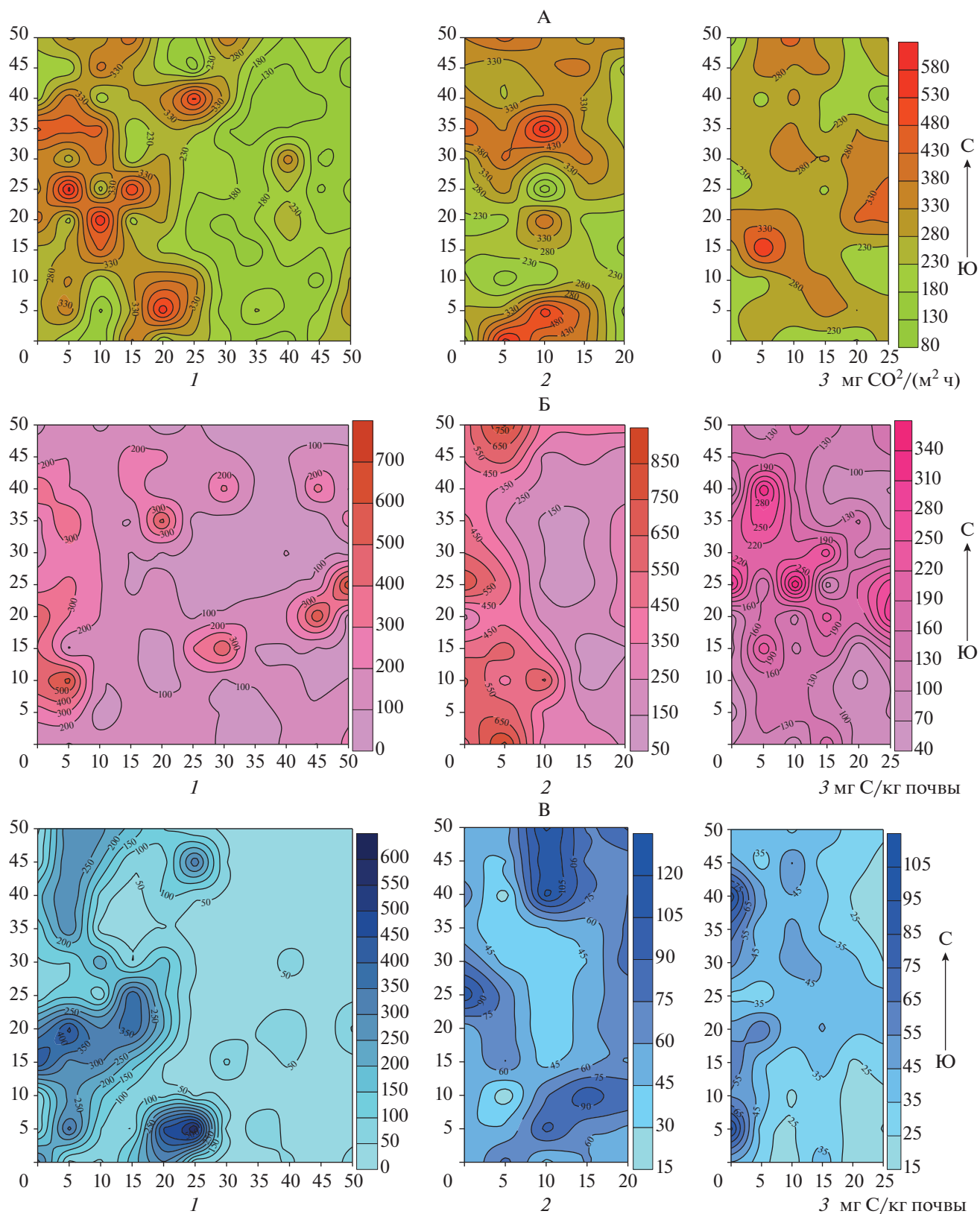


Рис. 3. Пространственное распределение эмиссии углекислого газа почв (А), содержания С мик почв (Б), содержания С экстр почв (В) мониторинговой площадки в сосняках северной тайги (август 2017 г., 1), в ельниках средней тайги (июнь 2018 г., 2), в сосняках южной тайги (июнь 2019 г., 3). Размеры площадок приведены в метрах.

на 39% варьирование этих признаков осуществляется взаимно независимо. В результате множественного регрессионного анализа данных сосняков зеленомошных установлено отсутствие зависимости факторов среды между собой.

Эмиссия CO₂ почв. Методом регрессионного анализа установлено, что эмиссия CO₂ почв сосняков зеленомошных (август, 2017) имеет статистически значимую связь с влажностью в слое 0–15 см и температурой почвы на глубине 15 см (2):

$$\text{Эмиссия} = 64 - 12.2W + 56.9T, \quad (2)$$

$$r = 0.47, P < 0.05, n = 55;$$

$$\text{Эмиссия} = 152 + 0.98C_{\text{экстр}}, \quad (3)$$

$$r = 0.27, P < 0.05, n = 66;$$

$$\text{Эмиссия} = 538 + 0.32C_{\text{экстр}} - 5.3W - 30.8T, \quad (4)$$

$$r = 0.49, P < 0.05, n = 121,$$

где эмиссия, мг CO₂/(м² ч); T – температура почвы на глубине 15 см, °C; W – влажность в слое 0–15 см, % (об.); $C_{\text{экстр}}$ – содержание экстрагируемого углерода почв, мг C/кг почвы.

Множественный коэффициент корреляции, характеризующий связь эмиссии CO₂ с рассмотренным набором факторов среды, равен 0.47, коэффициент детерминации, характеризующий качество рассмотренной линейной регрессионной модели, равен 0.22. Коэффициент детерминации этой модели довольно низкий, что обусловлено, вероятно, использованием данных о влажности почвы только в августе. На наш взгляд, он был бы значительно выше при использовании интегральных характеристик влажности почв за весь теплый период.

Эмиссия CO₂ почв сосняков лишайниковых (август, 2017) имеет статистически значимую связь только с содержанием экстрагируемого органического углерода (3). Множественный коэффициент корреляции, характеризующий связь эмиссии CO₂ с рассмотренным набором факторов среды, равен 0.27, коэффициент детерминации, характеризующий качество рассмотренной линейной регрессионной модели, равен 0.07. Не установлено статистически значимых связей эмиссии диоксида углерода почв сосняков лишайниковых с другими исследованными параметрами почв и экосистем, что может быть обусловлено недоучетом такого параметра, как корневое дыхание.

Методом множественного регрессионного анализа данных установлена следующая зависимость эмиссии CO₂ почв лесных экосистем северной тайги от факторов среды (4). Вклад каждого из факторов в оценку эмиссии CO₂ характеризует регрессионное уравнение в стандартизованном виде:

$$\text{Эмиссия} = 0.32C_{\text{экстр}} - 0.22W - 0.28T. \quad (5)$$

Наибольшее значение имеет содержание экстрагируемого органического вещества в почве. Множественный коэффициент корреляции, характеризующий связь эмиссии CO₂ с рассмотренным набором факторов среды, равен 0.51, коэффициент детерминации, характеризующий качество рассмотренной линейной регрессионной модели, равен 0.25.

Содержание экстрагируемого и микробного углерода почв. Установлена статистически значимая связь содержания углерода микробной биомассы только с мощностью органогенного горизонта почв (6):

$$C_{\text{мик}} = -91 + 35 \text{ мощность}, \quad (6)$$

$$r = 0.56, P < 0.05, n = 55;$$

$$C_{\text{мик}} = -75 + 8.4W, \quad (7)$$

$$r = 0.31, P < 0.05, n = 66;$$

$$C_{\text{экстр}} = 92 + 13 \text{ мощность}, \quad (8)$$

$$r = 0.54, P < 0.05, n = 66;$$

$$C_{\text{мик}} = -128 + 25 \text{ мощность}, \quad (9)$$

$$r = 0.41, P < 0.05, n = 121;$$

$$C_{\text{экстр}} = 455 + 13 \text{ мощность} - 41T, \quad (10)$$

$$r = 0.54, P < 0.05, n = 121,$$

где $C_{\text{экстр}}$ – содержание экстрагируемого углерода почв, мг C/кг почвы; W – влажность слоя 0–15 см, % (об.); $C_{\text{мик}}$ – содержание углерода микробной биомассы почв, мг C/кг почвы; мощность – мощность органогенного горизонта почв, см.

Пространственное варьирование содержания $C_{\text{мик}}$ на 31% связано с варьированием мощности органогенного горизонта почв, а на 69% варьирование этих признаков осуществляется взаимно независимо.

Достоверных корреляционных связей между содержанием экстрагируемого углерода почв сосняков зеленомошных и исследованными параметрами почв найдено не было.

Установлено, что содержание углерода микробной биомассы почв сосняков лишайниковых имеет статистически значимую связь только с влажностью почв (7), а содержание экстрагируемого углерода – только с мощностью органогенного слоя (8). Пространственное варьирование содержания $C_{\text{мик}}$ на 10% связано с варьированием влажности почв, а на 90% варьирование этих признаков осуществляется взаимно независимо, а пространственное варьирование содержания $C_{\text{экстр}}$ на 29% связано с варьированием влажности почв, а на 71% варьирование этих признаков осуществляется взаимно независимо.

Пространственное варьирование содержания $C_{\text{мик}}$ на 17% связано с варьированием мощности органогенного слоя, а на 83% варьирование

Таблица 2. Описательная статистика параметров углеродного цикла и свойств почв лесных экосистем средней и южной тайги Западной Сибири

Показатель	Сред- нее	Медиа- на	Нижний квартиль	Верхний квартиль	Стандартное отклонение	Ошибка среднего	Коэффициент вариации, %
Средняя тайга (июнь 2019 г.). Ельники зеленомошные, $n = 55$							
Эмиссия CO_2 , мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \text{ ч})$	312	292	237	381	110	15	35
С мик, мг С/кг почвы	357	312	205	496	197	27	55
С экстр, мг С/кг почвы	63	60	47	75	24	3	38
Температура почвы, °С	7.6	7.6	7.4	8.0	0.3	0.1	4
Объемная влажность, %	15.9	15.0	11.6	19.0	5.5	0.7	35
Мощность орг. г-та, см	8.1	7.5	6.0	10.5	3.5	0.5	43
Южная тайга (июнь 2018 г.). Сосняки зеленомошные, $n = 66$							
Эмиссия CO_2 , мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \text{ ч})$	257	255	217	291	52	6	20
С мик, мг С/кг почвы	150	139	99	172	70	9	47
С экстр, мг С/кг почвы	38	36	26	44	16	2	43
Температура почвы, °С	7.0	7.0	6.7	7.3	0.9	0.1	13
Объемная влажность, %	3.7	3.7	2.6	4.6	1.4	0.2	38
Мощность орг. г-та, см	5.0	5.1	4.7	5.4	1.5	0.2	23

этих признаков осуществляется взаимно независимо (9).

Установлено, что содержание экстрагируемого углерода почв лесных экосистем северной тайги имеет статистически значимую связь с температурой почв и мощностью органомного слоя (10). Наибольшее значение имеет температура почвы, но, вероятно, это обусловлено косвенным влиянием через формирование условий гидротермического режима. Множественный коэффициент корреляции, характеризующий связь эмиссии CO_2 с рассмотренным набором факторов среды, равен 0.54, коэффициент детерминации, характеризующий качество рассмотренной линейной регрессионной модели, равен 0.28.

Ельники средней тайги. Эмиссия диоксида углерода почвами мониторинговой площадки, расположенной в ельнике средней тайги, варьировала в широких пределах (от 88 до 623 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \text{ ч})$) и составляла в среднем 312 ± 110 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \text{ ч})$. Этот показатель характеризовался невысокой пространственной вариабельностью, его распределение ассиметрично, медиана смещена в сторону низких значений (рис. 3).

Содержание углерода микробной биомассы в верхней (0–10 см) толще почв мониторинговой площадки варьировало в широких пределах (от 80 до 884 мг С/кг) и составляет в среднем 357 ± 197 мг С/кг почвы. Содержание микробного углерода в почвах характеризуется высокой пространственной вариабельностью, его распределение ассиметрично, медиана смещена в сторону низких значений (табл. 2).

Взаимосвязь факторов среды. Методом регрессионного анализа установлено, что температура почвы ельников средней тайги (дневное время,

август) имеет статистически значимую связь с влажностью почвы (11):

$$T = -31.1 + 6.1W, \quad r = 0.39, \quad P < 0.05, \quad n = 55, \quad (11)$$

где T – температура почвы на глубине 15 см, °С; W – влажность в слое 0–15 см, % (об.).

Пространственное варьирование температуры почвы на 15% связано с варьированием влажности почвы, а на 85% варьирование этих признаков осуществляется взаимно независимо.

Дыхание почвы. Методом множественного регрессионного анализа данных установлена следующая зависимость эмиссии CO_2 почв ельников средней тайги от факторов среды (12):

$$\begin{aligned} \text{Эмиссия} &= 403 - 11T, \\ r &= 0.36, \quad P < 0.05, \quad n = 55, \end{aligned} \quad (12)$$

где эмиссия, мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \text{ ч})$; T – температура почвы на глубине 15 см, °С.

Установлено, что наибольшее значение на пространственное варьирование эмиссии CO_2 почв среди всех исследованных параметров оказывает температура почвы. Множественный коэффициент корреляции, характеризующий связь эмиссии CO_2 с рассмотренным набором факторов среды, равен 0.36, коэффициент детерминации, характеризующий качество рассмотренной линейной регрессионной модели, равен 0.13. Не установлено статистически значимых связей эмиссии диоксида углерода почв с другими исследованными параметрами почв и экосистем.

Содержание экстрагируемого углерода и углерода микробной биомассы почв. Установлена следующая зависимость содержания углерода микроб-

ной биомассы почв ельников средней тайги от факторов среды (13):

$$\begin{aligned} C_{\text{мик}} &= 2216 - 9W - 235T, \\ r &= 0.60, P < 0.05, n = 55, \end{aligned} \quad (13)$$

где $C_{\text{мик}}$ — содержание углерода микробной биомассы почв, мг С/кг почвы; W — влажность, % (об.); T — температура почвы на глубине 15 см, °С.

Вклад каждого из факторов в оценку эмиссии CO_2 характеризует регрессионное уравнение в стандартизованном виде:

$$C_{\text{мик}} = -0.24W - 0.41T. \quad (14)$$

Множественный коэффициент корреляции, характеризующий связь эмиссии CO_2 с рассмотренным набором факторов среды, равен 0.60, коэффициент детерминации, характеризующий качество рассмотренной линейной регрессионной модели, равен 0.37. Выявленная связь содержания углерода микробной биомассы с температурой почвы может быть обоснована органо-минеральным характером поверхностного слоя, носить косвенный характер и быть опосредована особенностями гидротермического режима почв.

Статистически значимой связи содержания экстрагируемого углерода почв ельников средней тайги ни с одним из исследованных параметров не выявлено.

Сосняки южной тайги. Эмиссия диоксида углерода почвами мониторинговой площадки, расположенной в сосняках южной тайги, варьировала в широких пределах (от 121 до 435 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \text{ ч})$) и составляла в среднем 257 ± 52 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \text{ ч})$ (табл. 2). Этот показатель характеризовался невысокой пространственной вариабельностью (рис. 3). Распределение значений эмиссии CO_2 относилось к нормальному. Почвы, расположенные на 9% точек опробования, характеризовались эмиссией CO_2 менее 200 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \text{ ч})$, а расположенные на 15% точек опробования, — эмиссией CO_2 более 300 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \text{ ч})$.

Содержание экстрагируемого органического углерода в верхней (0–15 см) толще почв сосняков южной тайги варьировало в широких пределах (от 15 до 102 мг С/кг почвы) и в среднем составило 38 ± 16 мг С/кг почвы. Для содержания экстрагируемого углерода характерна высокая пространственная вариабельность, его распределение ассиметрично, медиана смещена в сторону низких значений.

Содержание углерода микробной биомассы в верхней (0–15 см) толще почв варьировало в широких пределах (от 53 до 373 мг С/кг почвы) и в среднем составило 150 ± 70 мг С/кг почвы. Для этого показателя характерна высокая пространственная вариабельность, его распределение ассиметрично, медиана смещена в сторону низких значений.

Невысокое содержание экстрагируемого органического углерода и углерода микробной биомассы почв связано с тем, что верхний (0–15 см) слой подзолов характеризуется органо-минеральным составом.

Взаимосвязь факторов среды. В результате множественного регрессионного анализа данных сосняков южной тайги установлено отсутствие зависимости факторов среды между собой.

Дыхание почвы. Установлено, что наибольшее значение на пространственное варьирование эмиссии CO_2 почв сосняков южной тайги среди всех исследованных параметров оказывает температура почвы:

$$\begin{aligned} \text{Эмиссия} &= 286 - 16T, \\ r &= 0.37, P < 0.05, n = 66. \end{aligned} \quad (15)$$

Множественный коэффициент корреляции, характеризующий связь эмиссии CO_2 с рассмотренным набором факторов среды, равен 0.37, коэффициент детерминации, характеризующий качество рассмотренной линейной регрессионной модели, равен 0.13. Не установлено статистически значимых связей эмиссии диоксида углерода почв с другими исследованными параметрами почв и экосистем.

Содержание экстрагируемого углерода и углерода микробной биомассы почв. Методом множественного регрессионного анализа установлена следующая зависимость содержания углерода микробной биомассы почв сосняков южной тайги от факторов среды (16):

$$\begin{aligned} C_{\text{мик}} &= 439 - 20W - 0.22T, \\ r &= 0.53, P < 0.05, n = 66. \end{aligned} \quad (16)$$

Вклад каждого из факторов характеризует регрессионное уравнение в стандартизованном виде:

$$C_{\text{мик}} = -0.40W - 0.30T. \quad (17)$$

Наибольшее значение имеет влажность почвы. Множественный коэффициент корреляции, характеризующий связь эмиссии CO_2 с рассмотренным набором факторов среды, равен 0.53, коэффициент детерминации, характеризующий качество рассмотренной линейной регрессионной модели, равен 0.28.

Не выявлено статистически значимой связи содержания экстрагируемого углерода почв сосняков южной тайги ни с одним из исследованных параметров.

Взаимосвязь компонентов углеродного цикла почв и факторов среды в лесных экосистемах таежной зоны Западной Сибири. Методом регрессионного анализа установлено, что температура почв лесных экосистем таежной зоны имеет статистически значимую связь с влажностью почвы (18):

$$T = 7.6 + 0.02W; r = 0.13, P < 0.05, n = 242. \quad (18)$$

Пространственное варьирование температуры почвы на 16% связано с варьированием влажности почвы, а на 84% варьирование этих признаков осуществляется взаимно независимо.

Пространственное варьирование содержания углерода микробной биомассы почв лесных экосистем таежной зоны на 30% связано с варьированием влажности почв (19):

$$\begin{aligned} C_{\text{мик}} &= 155 - 4.4W, \\ r &= 0.17, P < 0.05, n = 242, \end{aligned} \quad (19)$$

где $C_{\text{мик}}$ — содержание углерода микробной биомассы почв, мг С/кг почвы; W — влажность, %.

Методом множественного регрессионного анализа данных, полученных в результате изучения почв лесных экосистем северной, средней и южной тайги, установлена следующая зависимость эмиссии CO_2 от следующих параметров и свойств почв (20):

$$\begin{aligned} \text{Эмиссия} &= 355 + 0.23C_{\text{экстр}} + 0.16C_{\text{мик}} - \\ &- 17.7T, r = 0.48, P < 0.05, n = 242, \end{aligned} \quad (20)$$

где эмиссия, мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \text{ ч})$; T — температура почвы на глубине 15 см, °С; $C_{\text{экстр}}$ — содержание экстрагируемого углерода почв, мг С/кг почвы; $C_{\text{мик}}$ — содержание углерода микробной биомассы почв, мг С/кг почвы.

Вклад каждого из факторов в оценку эмиссии CO_2 характеризует регрессионное уравнение в стандартизованном виде:

$$\text{Эмиссия} = 0.29C_{\text{экстр}} + 0.26C_{\text{мик}} - 0.20T. \quad (21)$$

Наибольшее значение имеет содержание экстрагируемого углерода и углерода микробной биомассы почв, меньшее значение — температура почв. Множественный коэффициент корреляции, характеризующий связь эмиссии CO_2 с рассмотренным набором факторов среды, равен 0.48, коэффициент детерминации, характеризующий качество рассмотренной линейной регрессионной модели, равен 0.23.

ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание экстрагируемого углерода и углерода микробной биомассы почв. Анализ данных по содержанию экстрагируемого и микробного углерода почв свидетельствует об их высокой пространственной вариабельности во всех исследованных экосистемах. Особенно сильно это отмечается в почвах сосняков зеленомошных и лишайниковых северо-таежной подзоны.

Почвы сосняков северной и южной тайги статистически значимо не отличаются по средним величинам содержания углерода микробной биомассы в верхнем (0–15 см) слое (153 ± 64 и 150 ± 70 мг С/кг почвы соответственно). Установлено, что содержание углерода микробной биомассы

почв лесных экосистем средней тайги статистически значимо отличается и в 2.3 раза превышает аналогичный параметр почв лесных экосистем северной и южной тайги.

Статистически значимые различия содержания углерода микробной биомассы почв в северной тайге выявляются на экосистемном уровне. Содержание углерода микробной биомассы в 1.5 раза больше в почвах сосняков зеленомошных, чем сосняков лишайниковых. Полученные данные по содержанию углерода микробной биомассы почв сопоставимы с литературными материалами для экосистем северной тайги и тундры [25–27, 34].

Сравнительный анализ данных, характеризующих почвы лесных экосистем в северной, средней и южной тайге, показал, что ведущим фактором, определяющим содержание углерода микробной биомассы почв, является влажность почвы. Кроме этих факторов статистически значимое влияние на содержание углерода микробной биомассы почв в северной тайге оказывает мощность органо-генного слоя, а в средней и южной тайге — температура почвы.

Установлено, что среднее содержание экстрагируемого углерода почв достоверно отличается и возрастает при перемещении с юга на север в следующем ряду: сосняки южной тайги < ельники средней тайги < сосняки северной тайги. Статистически значимые различия по содержанию экстрагируемого углерода характерны и для почв лесных экосистем северной тайги. Содержание экстрагируемого углерода почти в 4 раза больше в почвах сосняков зеленомошных, чем сосняков лишайниковых.

Ведущим фактором, определяющим варьирование содержания экстрагируемого углерода почв, является мощность органо-генного слоя. Впрочем, данная зависимость была выявлена только для сосняков северной тайги, что обусловлено большим влиянием других факторов в средней и южной тайге, а также органо-минеральным характером верхнего (0–15 см) слоя почвы.

Эмиссия CO_2 почв. Почвы лесных экосистем южной тайги, так же как северной тайги Западной Сибири, в пик вегетационного сезона (июнь–август 2017, 2018 гг.) характеризуются невысокими значениями эмиссии диоксида углерода (256 ± 6 и 251 ± 12 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \text{ ч})$ соответственно), что свидетельствует об их невысокой биологической активности по сравнению с почвами других природных зон [14, 15, 17, 19, 29, 39]. Средние значения эмиссии CO_2 из почв сравниваемых регионов статистически значимо не различаются, что объясняется ее высокой пространственной вариабельностью.

В северной тайге эмиссия CO_2 из подзолов сосняков зеленомошных в 1.7 раза выше, чем из подбуров сосняков лишайниковых. Причиной этого

является как большая мощность органогенного слоя и значительная доля корневого дыхания, так и особенности органического вещества. Органическое вещество почв сосняков зеленомошных характеризуется высоким содержанием лабильных, легкодоступных форм и большим по сравнению с почвами сосняков лишайниковых содержанием углерода микробной биомассы, что обуславливает высокие скорости деструкции, выражающиеся в интенсивной эмиссии диоксида углерода. Биологическая активность более богатых элементами питания почв зеленомошных лесов выше по сравнению с лишайниковыми. Установлено, что эмиссия CO_2 почвами сосняков зеленомошных в большей степени определяется температурой почвы, а в меньшей — влажностью почвы. Для почв сосняков лишайниковых характерна другая зависимость: наибольшее влияние на эмиссию CO_2 почв оказывает содержание экстрагируемого углерода почв.

Полученные результаты показывают, что пространственная вариабельность эмиссии CO_2 значительно связана с температурой и влажностью почвы, свойствами органического вещества почв, а также корневым дыханием. Сравнение результатов множественного регрессионного анализа данных, характеризующих почвы сосняков северной, средней и южной тайги, показало, что ведущим фактором, определяющим эмиссию CO_2 почв, является температура почвы. Кроме этого фактора статистически значимое влияние на эмиссию CO_2 в почвах северной тайги оказывает содержание экстрагируемого органического вещества и ее влажность. Изучаемая зависимость эмиссии CO_2 из почв от рассматриваемых условий среды более четко проявляется в северной тайге, о чем свидетельствует лучшее качество регрессионной модели. В целом коэффициенты детерминации этих моделей довольно низкие, что обусловлено, вероятно, недоучетом такого параметра, как корневое дыхание. Для почв лесных экосистем велика доля дыхания корней в общей эмиссии диоксида углерода. Как известно, под естественной растительностью она может достигать от 20 до 90% [17]. Установлено, что для региона исследования, по нашим данным, доля корневого дыхания составляет 10–50% в зависимости от типа биогеоценоза [7].

Анализ взаимосвязи компонентов углеродного цикла почв и факторов среды в лесных экосистемах таежной зоны Западной Сибири установил, что наибольшее влияние на эмиссию CO_2 почв в пик вегетационного сезона оказывает содержание экстрагируемого углерода и углерода микробной биомассы почв, меньшее значение — температура почв, а на содержание углерода микробной биомассы — влажность почв.

Полученные статистически значимые корреляции эмиссии диоксида углерода с влажностью и температурой почвы согласуются с выводами

ведущих ученых о важнейшей роли абиотических факторов (температуры и влажности почвы, уровня грунтовых вод и т.д.) в продуцировании, перераспределении и выделении парниковых газов из почв [12, 14, 17, 20, 29, 39, 45]. Суммарный вклад таких факторов, как температура и влажность почв, во временную динамику оценивают от 70 до 90% [20], при этом на долю влажности почвы приходится не более 15% [22].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований свойств почв и факторов среды можно констатировать, что эмиссия CO_2 почв, содержание экстрагируемого и микробного углерода почв характеризуется высокой пространственной вариабельностью во всех исследованных экосистемах. Особенно сильно это отмечается в почвах сосняков зеленомошных и лишайниковых северо-таежной подзоны. Данный факт говорит о необходимости детального исследования эмиссии парниковых газов почв из всех экосистем, которые типичны для данной природной зоны. Недоучет пространственной неоднородности свойств почв и особенностей режимов их функционирования может привести к существенным искажениям оценок суммарных потоков парниковых газов и созданных на их основе прогнозных моделей климатических изменений.

Сосняки зеленомошные и сосняки лишайниковые, расположенные в северо-таежной зоне, статистически значимо отличаются по всем исследованным параметрам углеродного цикла почв и факторам среды. Почвы сосняков зеленомошных характеризуются превышением по сравнению с почвами сосняков лишайниковых таких показателей, как содержание углерода микробной биомассы (в 1.5 раза), содержание экстрагируемого углерода (в 4 раза), эмиссия CO_2 (в 1.7 раза). В северо-таежной зоне эмиссия диоксида углерода почвами сосняков зеленомошных в большей степени определяется температурой почвы, а в меньшей — влажностью почвы. Для почв сосняков лишайниковых северо-таежной зоны характерна другая зависимость: наибольшее влияние на эмиссию CO_2 почв оказывает содержание экстрагируемого углерода почв.

Главным фактором, определяющим эмиссию CO_2 почв лесных экосистем северной, средней и южной тайги, является температура почвы. Кроме этого фактора статистически значимое влияние на эмиссию CO_2 в почвах северной тайги оказывает содержание экстрагируемого органического вещества и их влажность. Изучаемая зависимость эмиссии CO_2 из почв от рассматриваемых условий среды более четко проявляется в северной тайге, о чем свидетельствует лучшее качество регрессионной модели.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках Госзадания № 116020950097-4. Экспедиционные и лабораторные исследования осуществляли при финансовой поддержке гранта Президента РФ (проект № МК-1181.2018.5).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобрик А.А., Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Дроздов Д.С., Пономарева О.Е. Вклад абиотических факторов в пространственное варьирование эмиссии CO₂ почв лесотундровой зоны Западной Сибири (Новый Уренгой) // Криосфера Земли. 2017. Т. 21. № 2. С. 52–59.
2. Бобрик А.А., Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Петрижик Н.М., Дроздов Д.С. Пространственное распределение компонентов углеродного цикла почв и факторов среды в южнотундровых экосистемах на полуострове Тазовский // Криосфера Земли. 2018. Т. 22. № 6. С. 45–54.
3. Бобрик А.А., Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Рыжова И.М., Макаров М.И. Влияние геоэкологических условий и свойств почв на пространственное варьирование эмиссии CO₂ почвами плоскобугристых болот островной криолитозоны Западной Сибири // Почвоведение. 2016. № 12. С. 1445–1456. <https://doi.org/10.7868/S0032180X1610004X>
4. Ваганов В.А., Ведрова Э.Ф., Верховец С.В., Ефремов С.П., Ефремова Т.Т., Круглов В.Б., Онучин А.А., Сухинин А.И., Шибистова О.Б. Леса и болота Сибири в глобальном цикле углерода // Сибирский экологический журн. 2005. № 4. С. 631–649.
5. Васильевская В.Д., Иванов В.В., Богатырев Л.Г. Почвы севера Западной Сибири. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. 227 с.
6. Глаголев М.В., Головацкая Е.А., Шнырев Н.А. Эмиссия парниковых газов на территории Западной Сибири // Сибирский экологический журн. 2007. № 2. С. 197–210.
7. Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Бобрик А.А., Тимофеева М.В., Сефилян А.Р. Оценка вклада корневого и микробного дыхания в общий поток CO₂ из торфяных почв и подзолов севера Западной Сибири методом интеграции компонентов // Почвоведение. 2019. № 2. С. 234–245.
8. Добровольский Г.В., Урусевская И.С. География почв. М.: Изд-во Моск. ун-та. 2004. 460 с.
9. Замолотчиков Д.Г., Грабовский В.И., Курц В.А. Управление балансом углерода лесов России: прошлое, настоящее и будущее // Устойчивое лесопользование. 2014. № 2. С. 23–31.
10. Инишева Л.И., Сергеева М.А., Смирнов О.Н. Денитрирование и эмиссия углерода болотами Западной Сибири // Научный диалог. Вып. 7. Естественные и экология. 2012. С. 61–74.
11. Кадулин М.С., Смирнова И.Е., Копчик Г.Н. Эмиссия диоксида углерода почвами лесных экосистем заповедника “Пасвик” в Кольской Субарктике // Почвоведение. 2017. № 9. С. 1098–1112.
12. Кобак К.И. Биотические компоненты углеродного цикла. М.: Гидрометеоиздат, 1988. 248 с.
13. Кудеяров В.Н., Заварзин Г.А., Благодатский С.А. и др. Пули и потоки углерода в наземных экосистемах России. М.: Наука, 2007. 315 с.
14. Курганова И.Н. Эмиссия и баланс диоксида углерода в наземных экосистемах России. Автореф. дис. ... докт. биол. н. Пушино, 2010. 50 с.
15. Курганова И.Н., Кудеяров В.Н. Оценка потоков диоксида из почв таежной зоны России // Почвоведение. 1998. № 9. С. 1058–1070.
16. Макаров М.И., Шулева М.С., Малышева Т.И., Меньило О.В. Растворимость лабильных форм углерода и азота почв в K₂SO₄ разной концентрации // Почвоведение. 2013. № 4. С. 408–413.
17. Наумов А.В. Дыхание почвы: составляющие, экологические функции, географические закономерности. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 208 с.
18. Рыжова И.М., Подвезенная М.А. Пространственная вариабельность запасов органического углерода в почвах лесных и степных биогеоценозов // Почвоведение. 2008. № 12. С. 1429–1437.
19. Семенюк О.В., Ильяшенко М.А., Бобрик А.А. Оценка экологических функций парковых почв на основе показателей их биологической активности // Проблемы агрохимии и экологии. 2013. № 3. С. 35–39.
20. Смагин А.В. Газовая фаза почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 301 с.
21. Честных О.В., Замолотчиков Д.Г., Уткин А.И. Общие запасы биологического углерода и азота в почвах лесного фонда России // Лесоведение. 2004. № 4. С. 30–42.
22. Bekele A., Kellman L., Beltrami H. Soil Profile CO₂ concentrations in forested and clear cut sites in Nova Scotia, Canada // Forest Ecology and Management. 2007. 242. P. 587–597.
23. Brookes P.C., Landman A., Pruden G., Jenkinson D.S. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil // Soil Biol. Biochem. 1985. № 17. P. 837–842. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(85\)90144-0](https://doi.org/10.1016/0038-0717(85)90144-0)
24. Chantigny M.H. Dissolved and water – extractable organic matter in soils: a review on the influence of land use and management practices // Geoderma. 2003. V. 113. P. 357–380. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00370-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00370-1)
25. Cheng W., Virginia R.A. Measurement of microbial biomass in Arctic tundra soils using fumigation-extraction and substrate-induced respiration procedures // Soil Biol. Biochem. 1993. V. 25. № 1. P. 135–141.
26. Cheng W., Virginia R.A., Oberbauer S.F., Tenhunen J.D., Gillespie C.T., Reynolds J.F. Soil nitrogen, microbial biomass and respiration along an arctic toposequence // Soil Science Society of America J. 1998. V. 62. P. 654–662.
27. Fisk M.C., Ruether K.F., Yavitt J.B. Microbial activity and functional composition among northern peatland ecosystems // Soil Biol. Biochem. 2003. № 35. P. 591–602.
28. Filipchuk A., Moiseev B., Malysheva N., Strakhov V. Russian forests: A new approach to the assessment of carbon stocks and sequestration capacity // Environmental Development. 2018. № 26. P. 68–75.

29. *Goncharov A.A., Gongalsky K.B., Yazrikova T.E., Kostina N.V., Korobushkin D.I., Makarov M.I., Zaitsev A.S.* Greenhouse gas-producing soil biological activity in burned and unburned forests along a transect in European Russia // *Applied Soil Ecology*. 2020. № 148. P. 103491.
30. *Joergensen R.G., Wu J., Brookes P.C.* Measuring soil microbial biomass using an automated procedure // *Soil Biol. Biochem.* 2011. V. 43. P. 873–876.
31. *Köster E., Köster K., Berninger F., Prokushkin A., Aaltonen H., Zhou X., Pumpanen J.* Changes in fluxes of carbon dioxide and methane caused by fire in Siberian boreal forest with continuous permafrost // *J. Environmental Management*. 2018. V. 228. P. 405–415.
32. *Martens R.* Current methods for measuring microbial biomass C in soil: Potentials and limitations // *Biol. Fertil. Soils*. 1995. V. 19. P. 87–99.
33. *Ping C.L., Jastrow J.D., Jorgenson M.T., Michaelson G.J., Shur Y.L.* Permafrost soils and carbon cycling // *Soil*. 2015. V. 1. P. 147–171.
34. *Polita H., Sarjala T.* Seasonal fluctuation in microbial biomass and activity along a natural nitrogen gradient in a drained peatland // *Soil Biol. Biochem.* 2004. № 36. P. 1047–1055.
35. *Pumpanen J., Kolari P., Ilvesniemi H. et al.* Comparison of different chamber techniques for measuring soil CO₂ efflux // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2004. V. 123. P. 159–176.
36. *Raich J.W., Potter C.S.* Global patterns of carbon dioxide emissions from soils // *Global Biogeochemical Cycles*. 1995. V. 9. P. 23–36.
37. *Riveros-Iregui D.A., McGlynn B. L., Epstein H.E., Welsch D.L.* Interpretation and evaluation of combined measurement techniques for soil CO₂ efflux: Discrete surface chambers and continuous soil CO₂ concentration probes // *J. Geophysical Research*. 2008. V. 113.
38. *Rodionov A., Flessa H., Grabe M., Kazansky O.A., Shishova O., Guggenberger G.* Organic carbon and total nitrogen variability in permafrost-affected soils in a forest tundra ecotone // *European J. Soil Science*. 2007. № 58. P. 1260–1272.
39. *Song X., Wang G., Hu Z., Ran F., Chen X.* Boreal forest soil CO₂ and CH₄ fluxes following fire and their responses to experimental warming and drying // *Science of the Total Environment*. 2018. № 664. P. 862–872.
40. *Sparling G.P., Feltham C.W., Reynolds J., West W., Singleton P.* Estimation of soil microbial C by a fumigation-extraction method: use on soils of high organic matter content, and a reassessment of the k_{ec}-factor // *Soil Biol. Biochem.* 1990. V. 22. № 3. P. 301–307.
41. *Tarnocai C. et al.* Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region // *Global Biogeochemical Cycles*. 2009. V. 23. Iss. 2.
42. *Vance E.D., Brookes P.C., Jenkinson D.S.* An extraction method for measuring soil microbial biomass C // *Soil Biol. Biochem.* 1987. V. 19. P. 703–707.
43. *Wang G.X., Qian J., Cheng G.D., Lai Y.M.* Soil organic carbon pool of grassland soils on the Qinghai-Tibetan Plateau and its global implication // *Science Total Environment*. 2002. V. 291(1–3). P. 207–217.
44. *World Reference Base for Soil Resources 2014.* International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.
45. *Xu M., Qi Y.* Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California // *Global Change Biology*. 2001. V. 7. P. 667–677.

Spatial Distribution of Components of Soils Carbon Cycle in Forest Ecosystems of North, Middle and South Taiga of Western Siberia

A. A. Bobrik^{1,*}, O. Yu. Goncharova¹, G. V. Matyshak¹, I. M. Ryzhova¹,
M. I. Makarov¹, and M. V. Timofeeva¹

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

*e-mail: ann-bobrik@yandex.ru

In the course of studies in typical forest ecosystems of the northern, middle, and southern taiga of Western Siberia performed at the peak of the growing season, the spatial variation and the relationship of CO₂ emissions of soils, the content of extracted and microbial carbon of soils, and also hydrothermal parameters of soils were estimated. The studied parameters of the soil carbon cycle are characterized by high spatial variability in all ecosystems studied. This fact indicates the need for a detailed investigation of the greenhouse gas emission from soils in all ecosystems that are typical for a natural zone. The soils of green-moss pine forests of the northern taiga significantly differ statistically of soils under the lichen pine forest, and are characterized by an excess of such indicators as the carbon content of microbial biomass by 1.5 times (195 ± 24 and 127 ± 16 mg C/kg of soil, respectively), the content of extracted carbon by 4 times (157 ± 25 and 41 ± 5 mg C/kg of soil, respectively), CO₂ emission by 1.7 times (324 ± 20 and 190 ± 10 mg CO₂/(m² h), respectively). In the northern taiga zone, carbon dioxide emissions from soils of green-moss pine forests are largely determined by the temperature of the soil, and to a lesser extent, by the moisture of the soil. Another relationship is characteristic of the soils of pine forests of the lichen taiga zone: the content of extracted carbon of soils has the greatest influence on the CO₂ emission by soils. Significant factors influencing the CO₂ emission from soils of forest ecosystems of the taiga zone are the content of extractable and microbial carbon of soils, as well as their hydrothermal parameters.

Keywords: CO₂ emission, extractable carbon, carbon of microbial biomass, Podzols