

КРИОПЕДОЛОГИЯ

УДК 631.4 (574.4)

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-6(45-54)

**ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ
УГЛЕРОДНОГО ЦИКЛА ПОЧВ И ФАКТОРОВ СРЕДЫ
В ЮЖНОТУНДРОВЫХ ЭКОСИСТЕМАХ НА ПОЛУОСТРОВЕ ТАЗОВСКИЙ**

**А.А. Бобрик¹, О.Ю. Гончарова¹, Г.В. Матышак¹, М.О. Тархов¹,
Н.М. Петржик¹, Д.С. Дроздов², О.Е. Пономарева²**

¹*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, ф-т почвоведения,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; ann-bobrik@yandex.ru*

²*Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия*

Пространственное распределение эмиссии диоксида углерода из почв на территории стационара “Новый Уренгой” в южной тундре Тазовского полуострова определяется объемной влажностью почвы, содержанием лабильного углерода почв и абсолютными высотами местности. Содержание лабильного и микробного углерода почв характеризуется высокой пространственной изменчивостью. Пространственное варьирование содержания микробного углерода на 19 % связано с мощностью органогенного горизонта почв, на 8 % с влажностью почв. Факторы окружающей среды (мощность сезонноталого слоя, влажность и температура почвы) характеризуются слабой пространственной неоднородностью, что обусловлено однородным характером почвенного и растительного покровов, малой мощностью органогенного горизонта почв.

Криогенные почвы, эмиссия CO₂, лабильный углерод почв, углерод микробной биомассы почв, влажность почв, температура почв

**SPATIAL DISTRIBUTION OF SOIL CARBON CYCLE COMPONENTS AND ENVIRONMENTAL FACTORS
IN SOUTHERN TUNDRA ECOSYSTEMS OF THE TAZ PENINSULA**

**A.A. Bobrik¹, O.Yu. Goncharova¹, G.V. Matyshak¹, M.O. Tarkhov¹,
N.M. Petrzhik¹, D.S. Drozdov², O.E. Ponomareva²**

¹*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science,*

1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; ann-bobrik@yandex.ru

²*Earth Cryosphere Institute, SB RAS, 86, Malygina str., Tyumen, 625000, Russia*

The spatial distribution of soil CO₂ efflux measured at Novyi Urengoy station in southern tundra (Taz Peninsula) is determined by the soil volumetric moisture content and water-extractable organic carbon and with elevations above sea level. The contents of soil water-extractable and microbial biomass carbon are highly variable over the territory. The spatial distribution of the soil microbial carbon content partly depends on organic layer thickness and soil moisture, which are responsible for 19 % and 8 % of its variance, respectively. The environmental factors of active layer thickness, soil volumetric moisture, and soil surface temperature are relatively stable as the soil and vegetation covers are homogeneous while the soil organic layer is thin.

Permafrost-affected soils, CO₂ efflux, soil labile carbon, microbial biomass carbon, soil moisture, soil temperature

ВВЕДЕНИЕ

Пристальное внимание как в России, так и за рубежом в настоящее время уделяется изучению функционирования криогенных почв в условиях меняющегося климата, их гидротермического режима и параметров биологической активности [Карелин, Замолодчиков, 2008; Головацкая, Дюкарев, 2012; Гончарова и др., 2014; Davidson, Janssens, 2006; Turetsky et al., 2007; Schuur et al., 2008, 2009; Natali et al., 2011; Fouche et al., 2014; Jensen et al., 2014; Ping et al., 2015]. Основной тенденцией мировых исследований данной проблемы является

моделирование последствий глобального изменения климата с оценкой чувствительности этих моделей к разным параметрам, таким как свойства почвы, гидротермические, биологические и другие факторы. В связи с этим особое внимание уделяется количественной оценке запасов компонентов углеродного цикла в криогенных почвах, в том числе эмиссии углерода из них. Как правило, эти оценки основаны на материалах почвенных карт и немногочисленных баз данных [Честных и др., 2004; Hugelius et al., 2013]. Редки работы по изуче-

нию пространственной вариабельности эмиссии парниковых газов и запасов органического углерода в почвах бореальных и арктических экосистем, которые необходимы для надежных оценок потоков углерода [Замолодчиков и др., 2014; Rodionov et al., 2007; Kelsey et al., 2012].

Эмиссия парниковых газов с поверхности почвы в атмосферу – важный интегральный показатель биологической активности почв. Эмиссия CO₂ зависит от многих почвенных показателей и термодинамических условий: температуры и влажности почвы, уровня грунтовых вод, скорости ветра, роста надземной и корневой массы, особенностей трансформации органического материала и др. [Смагин, 2005]. В зависимости от конкретных условий будут проявляться те или иные отклики, часто взаимно противоположные, поэтому “корреляции” дыхания почв с температурой, влажностью почв или другими факторами может вообще не быть [Смагин, 2005]. Эмиссия парниковых газов из криогенных почв в связи с определяющими ее факторами в зонах прерывистого и сплошного распространения многолетнемерзлых пород (ММП) в северной тайге и тундре Западной Сибири до настоящего времени оставалась малоизученной.

Цель данной работы – оценка пространственного распределения компонентов углеродного цикла (эмиссии CO₂, содержания лабильного и микробного углерода) в почвах типичных экосистем южной тундры Западной Сибири.

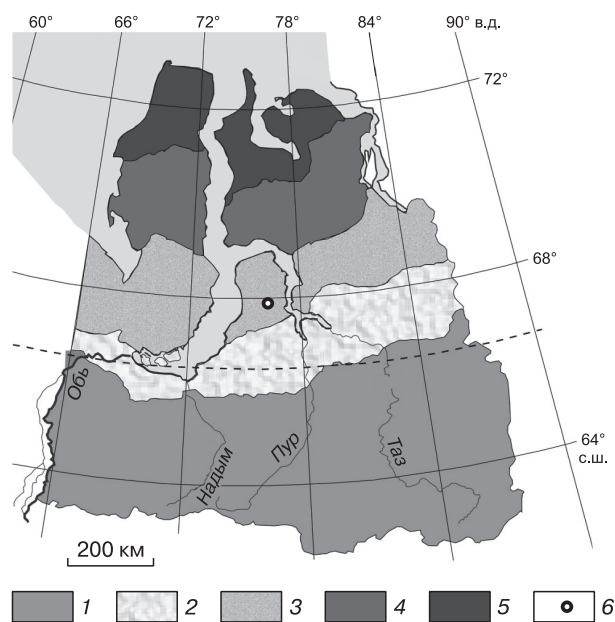


Рис. 1. Местоположение района исследований.

1–5 – ландшафтные зоны и подзоны: 1 – северная тайга, 2 – лесотундра, 3 – южная тундра, 4 – типичная тундра; 5 – арктическая тундра; 6 – Новоуренгойский стационар (площадка CALM R50B).

Задачи исследования: 1) охарактеризовать факторы среды (растительность, рельеф, мощность сезонного слоя, гидротермические свойства почв) и компоненты углеродного цикла почв основных экосистем южной тундры; 2) определить пространственную вариабельность факторов среды и компонентов углеродного цикла почв; 3) оценить взаимосвязь факторов среды; 4) получить зависимость эмиссии CO₂ от гидротермических и геокриологических параметров почв и содержания в них лабильного и микробного углерода.

По мнению авторов, площадки мониторинговой программы CALM (Circumpolar Active Layer Monitoring) являются оптимальными для оценки пространственной вариабельности содержания почвенного углерода и эмиссии диоксида углерода из почвы.

Основная цель международной программы CALM – это наблюдение за реакцией ММП на изменение климата в течение длительного периода времени.

На территории Российской Федерации находятся 64 мониторинговые площадки CALM, из них 13 – в Западной Сибири. В 2008 г. в южной тундре, в 100 км севернее г. Новый Уренгой, была заложена площадка CALM R50B для мониторинга глубины сезонного протаивания (рис. 1).

Данная работа продолжает цикл статей, отражающих результаты исследования закономерностей распределения компонентов углеродного цикла в почвах типичных экосистем Западной Сибири вдоль биоклиматического и геокриологического трансекта от южной тайги до южной тундры [Бобрик и др., 2015, 2016, 2017].

МЕСТОПОЛОЖЕНИЕ И ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются ландшафты и почвы мониторинговой площадки CALM R50B (67°48' с.ш., 76°69' в.д.), расположенной в подзоне южной тундры Западной Сибири на левобережье р. Хадуттэ, в пределах III морской террасы (абс. отметка 30–40 м) (см. рис. 1). Для равнины характерен пологохолмистый рельеф, расчлененный древовидной сетью ложбин и логов. Почвообразующие породы представлены преимущественно верхнечетвертичными пылеватыми суглинками с прослоями и линзами песков. Сильнольдистые ММП (суммарная влажность суглинков до 60 %, песков – 21–28 %) имеют сплошное распространение с поверхности [Дроздов и др., 2010; Украинцева и др., 2011]. Площадка CALM находится на пологонаклонной вершине холма со слабовыраженным (зарастающим) пятнисто-медальонным микрорельефом, доминирует травяно-кустарничковый мохово-лишайниковый расти-

тельный покров с редкими оголенными участками минеральных пятен-медальонов. В ложбинах и логах встречаются низкорослые ивняки и ерники с фрагментами травяно-моховых болот. По днищам крупных эрозионных форм развиты невысокие бугры многолетнего пучения [Украинцева и др., 2011].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В августе 2016 г. на всех пикетах мониторинговой площадки, расположенных по регулярной сетке с шагом 10 м (70 × 100 м, 77 точек опробования), проведено описание почвенного и растительного покровов, определены абсолютные высоты методом нивелирной съемки оптическим нивелиром SAL24ND berger. Определена мощность торфа 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 CALM R1 и R50A [Бобрик и др., 2015, 2016, 2017]. Определение эмиссии диоксида углерода с поверхности почвы проводилось однократно за полевой сезон 7 августа 2016 г. в дневные часы (с 11.00 до 14.00) для каждого пикета мониторинговой площадки методом статичных закрытых камер с удалением растительного покрова [Смагин, 2005; Riveros-Iregui et al., 2008]. Измерение концентрации CO₂ в пробах осуществлялось с помощью портативного газоанализатора с инфракрасным датчиком RMT DX6210. Параллельно измерялась температура воздуха с помощью программируемого микротермодатчика Thermochron iButton™ [Смагин, 2005]. Объемную влажность почвы измеряли в верхнем 20-сантиметровом слое почвы с помощью влагомера Spectrum TDR 100. Прибор рассчитывает объемную влажность на основе контрастного сопротивления почвы и воды постоянному электрическому току. Проведены разовые измерения температуры почвы электронным термометром TP3001 (разрешение 0.1 °C, точность ±1 °C) в верхнем 10-сантиметровом слое почвы с трехкратной повторностью для каждого пикета. Измерение температуры почвы на глубине 10 см является стандартным для подобного рода исследований. Мощность СТС определялась методом зондирования щупом, представляющим собой заостренный металлический стержень диаметром 10 мм и длиной 2 м [ГОСТ 26262-2014, 2015].

Проведен отбор образцов из горизонтов исследованных почв. Образцы хранили при естественной влажности и температуре 4 °C для микробиологических исследований (“свежие” образцы).

В лабораторных условиях определение содержания углерода лабильного органического веще-

ства проводилось в вытяжке 0.05 М K₂SO₄ на автоматическом анализаторе TOC-V_{CPN} (Shimadzu) с пятикратной повторностью [Chantigny, 2003]. Следует заметить, что в данном методе раствор K₂SO₄ низкой концентрации выступает не как экстрагент, а как агент коагуляции почвенных коллоидов, поэтому экстрагируемый углерод можно считать водоизвлекаемым [Макаров и др., 2013]. Влажность образцов почв определяли с помощью весового измерителя влажности OHAUS MB-35.

Определение содержания углерода микробной биомассы проводилось методом фумигации–экстракции с пятикратной повторностью [Vance et al., 1987]. Компоненты микробных клеток, погибших в результате обработки почвы парами хлороформа, экстрагируют раствором соли. В качестве экстрагента авторы использовали раствор K₂SO₄ в концентрации 0.05 М [Макаров и др., 2013]. Экстракция проводилась для контрольной (нефумигированной) и фумигированной частей пробы. В настоящей работе использовали фумигацию “свежих” образцов почвы при естественной влажности парами хлороформа, стабилизированного амиленом, без этанола в течение 1 суток. Содержание углерода в растворах определяли на автоматическом анализаторе TOC-V_{CPN} (Shimadzu). Содержание микробного углерода рассчитывалось как $C_{\text{микр}} = F_C/k_C$, где F_C – разница содержания углерода в фумигированных и нефумигированных образцах; k_C – поправочный коэффициент, показывающий полноту экстракции углерода из почв [Joergensen et al., 2011]. Для органогенных почв (с содержанием органического углерода более 10 %, подстилки, торфяных горизонтов) поправочный коэффициент $k_C = 0.45$, для минеральных $k_C = 0.33$ [Vance et al., 1987; Martens, 1995; Joergensen et al., 2011].

Проведен статистический анализ полученных данных в программном пакете Statistica 7.0. Определен тип распределения (проверка нормальности стандартными методами). Представлены средние значения с учетом стандартного отклонения. Сравнение средних значений проводилось по параметрическому критерию Стьюдента (t -критерий) (уровень значимости $p < 0.05$) и непараметрическому критерию Вилкоксона (уровень значимости $\alpha = 0.05$). В случае распределения, отличающегося от нормального, корреляционный анализ выполнялся по методу ранговой корреляции Спирмена. Коэффициент корреляции $r > 0.24$ считается значимым при объеме выборки $n > 77$ (уровень значимости $p < 0.05$) [Дмитриев, 1995]. Объем выборки каждого исследованного показателя на мониторинговой площадке CALM R50B равен 77. Структуру пространственной вариабельности параметров исследовали при помощи картограмм в пакете “Golden Software Surfer 8”.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По данным нивелирной съемки на мониторинговой площадке, превышение максимальной отметки над минимальной составляло 2.48 м, средние абсолютные высоты составляли (31.95 ± 0.76) м. Этот показатель характеризовался низкой пространственной вариабельностью (коэффициент вариации 2 %), его распределение описывается нормальным типом. Наблюдается общий уклон поверхности мониторинговой площадки в северном направлении.

Объект исследования характеризовался однородной фациальной структурой растительного покрова. Растительность представлена в напочвенном покрове различными лишайниками (*Cladonia* spp.) и мхами (*Sphagnum* spp., *Pleurozium* spp., *Politrichum* spp.). Проективное покрытие мохово-лишайникового яруса в среднем составляло 85 % (коэффициент вариации 36 %), его распределение асимметрично, медиана смещена в сторону высоких значений. Экосистемы, расположенные на 73 % точек опробования, характеризовались проективным покрытием мохово-лишайникового яруса от 90 до 100 %.

В травяно-кустарничковом ярусе растительность представлена черникой (*Vaccinium myrtillus*), голубикой (*Vaccinium uliginosum*), брусникой (*Vaccinium vitis-idaea*), багульником (*Ledum palustre*), а также осокой различных видов (*Carex* spp.), моршккой (*Rubus chamaemorus*), пушицей (*Eriophorum* spp.), андромедой (*Andromeda* spp.). Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса в среднем составляло 37 % (коэффициент вариации 54 %), его распределение асимметрично, медиана смещена в сторону низких значений. Проективным покрытием мохово-лишайникового яруса от 20 до 60 % характеризовались экосистемы, расположенные на 74 % точек опробования.

Почвенный покров площадки отличается слабой неоднородностью и представлен комплексом криометаморфических и криотурбированных почв, приуроченным к элементам криогенного микрорельефа. Несмотря на преобладание суглинистых отложений, наиболее типичны неглеевые подтипы почв с выраженными признаками криотурбаций и маломощным органопротилем, состоящим из 1–2 торфянистых горизонтов разной степени разложения. Минеральный профиль почв представляет собой набор горизонтов (2–3) со слабовыраженными процессами гумусообразования и оглеения и выраженными проявлениями криогенного оструктурирования и криотурбаций. Свообразным вариантом являются почвы, формирующиеся на минеральных пятнах-медальонах и занимающие около 5 % площадки. Характерная черта этих почв – полное отсутствие органопротилема. Наибольшее распространение имеют органопротилемные криометаморфические и криометаморфические

грубогумусовые почвы, развитые на пониженных и повышенных элементах микрорельефа соответственно. Более редкими вариантами, приуроченными к пятнам-медальонам, являются криоземы грубогумусовые типичные и глееземы криотурбированные.

Мощность сезонноталого слоя на мониторинговой площадке варьировала от 0.59 до 1.34 м и в среднем составляла (0.95 ± 0.13) м (рис. 2, а). Это показатель с низкой пространственной вариабельностью (коэффициент вариации 14 %), его распределение описывается нормальным типом. Мощность СТС от 0.9 до 1.0 м имеют экосистемы, расположенные на 50 % точек опробования.

Объемная влажность почвы (в верхнем слое 0–20 см) мониторинговой площадки характеризовалась низкой пространственной вариабельностью (коэффициент вариации 13 %), тип ее распределения нормальный. Значение влажности почвы варьировало в пределах 20.5–48.3 %, в среднем составляя (37.8 ± 5.1) %. Влажностью от 35 до 45 % характеризовались почвы, расположенные на 70 % точек опробования (см. рис. 2, б).

Температура почвы на глубине 10 см в дневное время отличалась невысокой пространственной вариабельностью (коэффициент вариации 29 %), тип ее распределения нормальный. Значение температуры почвы мониторинговой площадки варьировало в широких пределах – от 1.0 до 6.3 °С, при этом среднее равно (4.2 ± 1.2) °С (см. рис. 2, в). Температурой более 4 °С характеризовались почвы, расположенные на 60 % точек опробования. Температура воздуха в дневные часы составила 22 °С.

Мощность органогенного горизонта почв на мониторинговой площадке варьировала от 0 до 6 см, в среднем составляя (2.2 ± 1.4) см (см. рис. 2, г). Этот показатель характеризовался высокой пространственной вариабельностью (коэффициент вариации 61 %), его распределение асимметрично, медиана смещена в сторону низких значений.

Эмиссия диоксида углерода почвами мониторинговой площадки варьировала в широких пределах (от 60 до 470 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$) и составляла в среднем (198 ± 75) мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ (см. рис. 2, д). Этот показатель отличался невысокой пространственной вариабельностью: коэффициент вариации равен 36 %. Распределение значений эмиссии CO_2 относилось к нормальному. Почвы, расположенные на 10 % точек опробования, характеризовались эмиссией CO_2 менее 100 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, а расположенные на 12 % точек опробования – эмиссией CO_2 более 300 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Содержание лабильного органического углерода почв в верхней 15-сантиметровой толще почв мониторинговой площадки варьировало в широких пределах (от 2 до 486 мг С/кг почвы) и в сред-

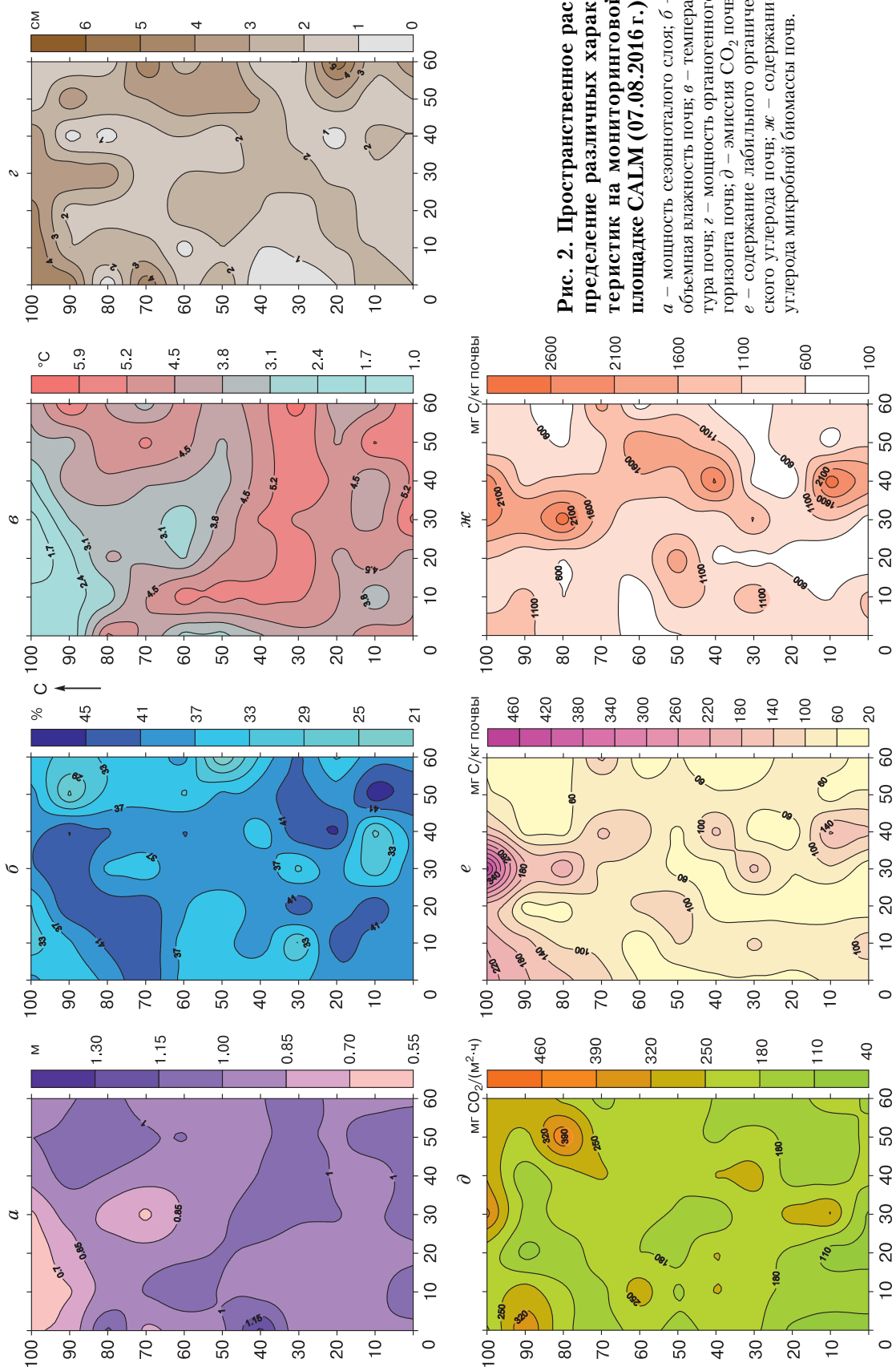


Рис. 2. Пространственное распределение различных характеристик на мониторинговой площадке САЛМ (07.08.2016 г.):

а — мощность сезонного слоя; **б** — объемная влажность почвы; **в** — температура почвы; **г** — мощность органического горизонта почвы; **д** — эмиссия CO_2 почв; **е** — содержание лабильного органического углерода почвы; **ж** — содержание углерода микробной биомассы почв.

нем составляло (91 ± 71) мг С/кг почвы (см. рис. 2, е). Содержание лабильного углерода в почвах отличалось высокой пространственной вариабельностью: коэффициент вариации составил 77 %, его распределение асимметрично, медиана смещена в сторону низких значений. Содержанием лабильного углерода менее 100 мг С/кг характеризовались почвы, расположенные на 70 % точек опробования.

Содержание углерода микробной биомассы почв в верхней 15-сантиметровой толще почв мониторинговой площадки варьировало в широких пределах (от 98 до 2990 мг С/кг почвы) и в среднем составляло (1005 ± 647) мг С/кг почвы (см. рис. 2, ж). Содержание микробного углерода в почвах отличалось высокой пространственной вариабельностью: коэффициент вариации составил 65 %, его распределение асимметрично, медиана смещена в сторону низких значений. Содержанием микробного углерода более 1500 мг С/кг характеризовались почвы, расположенные на 20 % точек опробования.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Взаимосвязь факторов среды. С помощью регрессионного анализа установлено, что температура почвы (дневное время, 07.08.2016 г.) имеет статистически значимую связь с мощностью СТС и мощностью органогенного горизонта почв:

$$\begin{aligned} \text{температура почвы } [^{\circ}\text{C}] &= -1.8 [^{\circ}\text{C}] + 6.3 [^{\circ}\text{C}/\text{м}] \times \\ &\times \text{мощность СТС } [\text{м}]; r = 0.69, p\text{-level} < 0.05, \\ &n = 77; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{температура почвы } [^{\circ}\text{C}] &= 5.1 [^{\circ}\text{C}] - 0.37 [^{\circ}\text{C}/\text{см}] \times \\ &\times \text{мощность органогенного горизонта почв } [\text{см}]; \\ r &= -0.42, p\text{-level} < 0.05, n = 77. \end{aligned} \quad (2)$$

Пространственное варьирование температуры почвы на 48 % связано с мощностью СТС, на 18 % с мощностью органогенного горизонта почв, а на 34 % варьирование этих признаков осуществляется взаимно независимо.

С мощностью органогенного горизонта почв также имеет статистически значимую связь мощность СТС мониторинговой площадки:

$$\begin{aligned} \text{мощность СТС } [\text{м}] &= 1.1 [\text{м}] - 0.04 [\text{м}/\text{см}] \times \\ &\times \text{мощность органогенного горизонта почв } [\text{см}], \\ r &= -0.45, p\text{-level} < 0.05, n = 77. \end{aligned} \quad (3)$$

Пространственное варьирование мощности СТС на 20 % связано с мощностью органогенного горизонта почв, на 48 % с температурой почвы, а на 32 % варьирование этих признаков осуществляется взаимно независимо. Полученные нами ре-

зультаты согласуются с исследованиями, проведенными А.П. Тыртиковым на севере Западной Сибири [Тыртиков, 1980]. Им установлено, что формирование торфянистого горизонта и усиленный рост мхов ведут к существенному уменьшению глубины протаивания. Торфяные горизонты обладают низкой теплопроводностью в талом состоянии, следовательно, обеспечивают изолирующее воздействие на ММП [Гончарова и др., 2015; Zimov et al., 1993; Mazhitova et al., 2004].

Мощность органогенного горизонта почв имеет статистически значимую связь с объемной влажностью почвы:

$$\begin{aligned} \text{влажность } [\%] &= 40.6 [\%] - 1.3 [\%/ \text{см}] \times \\ &\times \text{мощность органогенного горизонта почв } [\text{см}], \\ r &= -0.34, p\text{-level} < 0.05, n = 77. \end{aligned} \quad (4)$$

Установлено, что на 12 % варьирование влажности почв связано с мощностью органогенного горизонта, а на 88 % варьирование этих признаков осуществляется взаимно независимо (4).

Заметим, что в ходе исследования были установлены слабые, но статистически значимые связи мощности органогенного горизонта почв со всеми рассматриваемыми факторами среды. Это указывает важную роль почвенно-растительного покрова в формировании глубины сезонного протаивания и подтверждает необходимость проведения почвенно-ботанических исследований при оценке геокриологических условий территории.

Дыхание почвы. В ходе исследования установлено, что почвы южной тундры, так же как северной тайги и лесотундры Западной Сибири, характеризуются невысокими значениями эмиссии диоксида углерода (198 ± 75 , 142 ± 21 и 202 ± 142 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ соответственно) [Бобрик и др., 2016, 2017], что свидетельствует об их низкой биологической активности по сравнению с почвами других природных зон [Наумов, 2009; Курганова, 2010; Семенюк и др., 2013]. Средние значения эмиссии CO_2 из почв изученных регионов статистически значимо не различаются, что объясняется ее высокой пространственной вариабельностью (коэффициенты вариации равны 85 и 73 % в северной тайге и лесотундре соответственно).

В результате регрессионного анализа получено, что эмиссия CO_2 почв мониторинговой площадки (07.08.2016 г.) имеет статистически значимую связь с влажностью почвы:

$$\begin{aligned} \text{эмиссия } [\text{мг } \text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})] &= 357 [\text{мг } \text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})] - \\ &- 4.2 [\text{мг } \text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})/\%] \times \text{влажность } [\%], \\ r &= -0.28, p\text{-level} < 0.05, n = 77. \end{aligned} \quad (5)$$

Коэффициент детерминации этой модели довольно низкий (0.08), что обусловлено, вероятно,

использованием данных о влажности почвы только в августе. На наш взгляд, он был бы значительно выше в случае интегральных характеристик влажности почв за весь теплый период.

Эмиссия CO₂ почв площадки CALM имеет статистически значимую связь также с содержанием лабильного углерода почв и абсолютными высотами:

$$\begin{aligned} \text{эмиссия [мг CO}_2\text{/(м}^2\cdot\text{ч)]} &= 164 \text{ [мг CO}_2\text{/(м}^2\cdot\text{ч)]} + \\ &+ 0.38 \text{ [мг CO}_2\text{/(м}^2\cdot\text{ч)]/мг C/кг почвы} \times \\ &\times C_{\text{лаб}} \text{ [мг C/кг почвы]}, r = 0.36, p\text{-level} < 0.05, \\ &n = 77; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{эмиссия [мг CO}_2\text{/(м}^2\cdot\text{ч)]} &= 1227 \text{ [мг CO}_2\text{/(м}^2\cdot\text{ч)]} - \\ &- 32 \text{ [мг CO}_2\text{/(м}^2\cdot\text{ч)]/м} \times \text{абс. высота [м]}, \\ &r = -0.33, p\text{-level} < 0.05, n = 55. \end{aligned} \quad (7)$$

На 8 % варьирование эмиссии диоксида углерода связано с объемной влажностью почвы, на 13 % с содержанием лабильного углерода, на 10 % с абсолютными высотами местности, а на 69 % варьирование этих признаков осуществляется взаимно независимо. Выявленная авторами обратная связь эмиссии диоксида углерода с абсолютными значениями высот местности может быть обусловлена перераспределением влажности и температуры почв по элементам микрорельефа.

Полученные авторами статистически значимые корреляции эмиссии диоксида углерода с влажностью почвы согласуются с выводами ведущих ученых о важной роли абиотических факторов (температура и влажность почвы, уровень грунтовых вод и т. д.) в продуцировании, перераспределении и выделении парниковых газов из почв [Кобак, 1988; Смагин, 2005; Наумов, 2009; Liu et al., 2006].

Не установлено статистически значимых связей эмиссии диоксида углерода с другими изученными параметрами почв и экосистем (мощность СТС, температура почвы, мощность органогенного горизонта почв, содержание углерода микробной биомассы), что может быть обусловлено недоучетом такого параметра, как корневое дыхание.

Содержание лабильного и микробного углерода почв. Значительное влияние на эмиссию диоксида углерода оказывает состав органического вещества почвы, в частности, наличие или отсутствие лабильного легко минерализуемого субстрата, от которого, в свою очередь, зависит активность микроорганизмов [Головацкая, Дюкарев, 2012].

При анализе данных по содержанию углерода почв была установлена статистически значимая связь содержания лабильного углерода с мощностью органогенного горизонта почв и абсолютными высотами местности:

$$\begin{aligned} C_{\text{лаб}} \text{ [мг C/кг почвы]} &= 40 \text{ [мг C/кг почвы]} + \\ &+ 23 \text{ [мг C/кг почвы/см]} \times \text{мощность органогенного} \\ &\text{горизонта почв [см]}, r = 0.44, p\text{-level} < 0.05, \\ &n = 77; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} C_{\text{лаб}} \text{ [мг C/кг почвы]} &= 1476 \text{ [мг C/кг почвы]} - \\ &- 43 \text{ [мг C/кг почвы/м]} \times \text{абс. высота [м]}, \\ &r = -0.42, p\text{-level} < 0.05, n = 55. \end{aligned} \quad (9)$$

Варьирование содержания C_{лаб} связано на 20 % с мощностью органогенного горизонта почв, на 18 % со значением гипсометрического уровня, а на 62 % варьирование этих признаков осуществляется взаимно независимо.

Выявленная связь содержания лабильного углерода почв с абсолютными высотами местности может носить косвенный характер и объясняться высокой подвижностью лабильных форм углерода и аккумуляцией их в пониженных формах рельефа.

Установлено, что содержание углерода микробной биомассы почв имеет статистически значимую связь только с мощностью органогенного горизонта и влажностью почв:

$$\begin{aligned} C_{\text{микро}} \text{ [мг C/кг почвы]} &= 543 \text{ [мг C/кг почвы]} + \\ &+ 206 \text{ [мг C/кг почвы/см]} \times \text{мощность органогенного} \\ &\text{горизонта почв [см]}, r = 0.44, p\text{-level} < 0.05, \\ &n = 77; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} C_{\text{микро}} \text{ [мг C/кг почвы]} &= 2374 \text{ [мг C/кг почвы]} - \\ &- 36 \text{ [мг C/кг почвы/\%]} \times \text{влажность [\%]}, \\ &r = -0.28, p\text{-level} < 0.05, n = 77. \end{aligned} \quad (11)$$

Пространственное варьирование содержания C_{микро} на 19 % связано с мощностью органогенного горизонта почв, на 8 % с влажностью почв, а на 73 % варьирование этих признаков осуществляется взаимно независимо.

Полученные авторами данные по содержанию углерода микробной биомассы почв сопоставимы с литературными данными для экосистем северной тайги и тундры [Cheng, Virginia, 1993; Cheng et al., 1998; Fisk et al., 2003; Potila, Sarjala, 2004].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все изученные факторы среды (мощность сезонноталого слоя, влажность почвы, температура почвы) мониторинговой площадки CALM R50B, расположенной на севере Западной Сибири (п-ов Тазовский), характеризуются низкой пространственной вариабельностью, что обусловлено однородным характером почвенного и растительного покровов, малой мощностью органогенного горизонта почв. Это одна из причин выявления слабых, но статистически значимых связей между параметрами.

Исследованные экосистемы южной тундры в пик вегетационного сезона (август 2016 г.) отличаются невысокими значениями мощности СТС и ее низкой пространственной вариабельностью (0.95 ± 0.13 м, коэффициент вариации 14 %). Пространственное распределение мощности СТС на этой территории связано с температурой почвы ($r = 0.69$, p -level < 0.05) и мощностью органогенного горизонта почв ($r = -0.45$, p -level < 0.05).

В результате статистического анализа установлено, что мощность органогенного горизонта почв оказывает прямое влияние на все рассмотренные факторы среды (мощность сезонноталого слоя, $r = -0.45$, p -level < 0.05; температура почвы, $r = -0.42$, p -level < 0.05; влажность почвы, $r = -0.34$, p -level < 0.05) и компоненты углеродного цикла ($C_{\text{лаб}}$, $r = 0.44$, p -level < 0.05; $C_{\text{микро}}$, $r = 0.44$, p -level < 0.05), кроме эмиссии CO_2 почвы. На последний параметр функционирования почвы мощность органогенного горизонта почв влияет косвенно через формирование гидротермического режима почв и особенности трансформации органического материала.

Почвы мониторинговой площадки в пик вегетационного сезона характеризуются невысокими значениями эмиссии диоксида углерода и ее низкой пространственной вариабельностью (198 ± 75 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, коэффициент вариации 36 %). Пространственное распределение эмиссии диоксида углерода на изученной территории определяется влажностью почвы ($r = -0.28$, p -level < 0.05), содержанием лабильного углерода почв ($r = 0.36$, p -level < 0.05) и абсолютными высотами местности ($r = -0.33$, p -level < 0.05). Содержание лабильного и микробного углерода почв отличается высокой пространственной вариабельностью (коэффициенты вариации 77 и 65 % соответственно).

В ходе исследования впервые определено пространственное распределение компонентов углеродного цикла (эмиссия CO_2 , содержание лабильного и микробного углерода) в почвах типичных экосистем южной тундры Западной Сибири. Полученные данные и установленные зависимости послужат основой для сравнительной оценки эмиссии CO_2 из почв типичных экосистем Западной Сибири вдоль биоклиматического и геокриологического трансекта от южной тайги до южной тундры.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ (проект № МК-1181.2018.5) и РФФИ (проект № 16-04-00808 А).

Литература

Бобрик А.А., Гончарова О.Ю., Матьшак Г.В. и др. Взаимосвязь геокриологических условий и гидротермических параметров почв плоскостристых торфяников севера За-

падной Сибири (стационар Надым) // Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 4, с. 31–38.

Bobrik, A.A., Goncharova, O.Yu., Matyshak, G.V., Ryzhova, I.M., Moskalenko, N.G., Ponomareva, O.E., Ogneva, O.A., 2015. Correlation of active layer thickness and landscape parameters of peatland in northern West Siberia (Nadym station). *Earth's Cryosphere* XIX (4), 29–35.

Бобрик А.А., Гончарова О.Ю., Матьшак Г.В. и др. Влияние геокриологических условий и свойств почв на пространственное варьирование эмиссии CO_2 почвами плоскостристых болот островной криолитозоны Западной Сибири // Почвоведение, 2016, № 12, с. 1445–1456, DOI: 10.7868/S0032180X1610004X.

Bobrik, A.A., Goncharova, O.Yu., Matyshak, G.V., Ryzhova, I.M., Makarov, M.I., 2016. State of permafrost and soil properties as controls of soil CO_2 efflux from peatlands in areas of sporadic permafrost of West Siberia. *Pochvovedeniye*, No. 12, 1445–1456.

Бобрик А.А., Гончарова О.Ю., Матьшак Г.В. и др. Вклад абиотических факторов в пространственное варьирование эмиссии CO_2 почв лесотундровой зоны Западной Сибири (Новый Уренгой) // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 2, с. 52–59.

Bobrik, A.A., Goncharova, O.Yu., Matyshak, G.V., Drozdov, D.S., Ponomareva, O.E., 2017. Spatial variability of soil CO_2 efflux in the forest-tundra zone of West Siberia (Novyi Urengoi): abiotic controls. *Earth's Cryosphere* XXI (2), 46–51.

Головацкая Е.А., Дюкарев Е.А. Влияние факторов среды на эмиссию CO_2 с поверхности олиготрофных торфяных почв Западной Сибири // Почвоведение, 2012, № 6, с. 658–667.

Golovatskaya, E.A., Dyukarev, E.A., 2012. Environment effects on CO_2 efflux from oligotrophic peaty soils in West Siberia. *Pochvovedenie*, No. 6, 658–667.

Гончарова О.Ю., Матьшак Г.В., Бобрик А.А., Москаленко Н.Г. Продуцирование диоксида углерода почвами северной тайги Западной Сибири (Надымский стационар) // Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 2, с. 66–71.

Goncharova, O.Yu., Matyshak, G.V., Bobrik, A.A., Moskalenko, N.G., 2014. Carbon dioxide production by northern taiga soils of West Siberia (Nadym site). *Earth's Cryosphere* XVIII (2), 58–63.

Гончарова О.Ю., Матьшак Г.В., Бобрик А.А. и др. Температурные режимы северотаежных почв Западной Сибири в условиях островного распространения многолетнемерзлых пород // Почвоведение, 2015, № 12, с. 1462–1473, DOI: 10.7868/S0032180X15100032.

Goncharova, O.Yu., Matyshak, G.V., Bobrik, A.A., et al., 2015. Thermal regime of northern taiga soils in areas of discontinuous permafrost in West Siberia. *Pochvovedenie*, No. 12, 1462–1473.

ГОСТ 26262-2014. Методы полевого определения глубины сезонного оттаивания. М., Стандартинформ, 2015, 11 с.

State Standard, 2015. Working Document GOST 26262-2014. Methods of Field Thaw Depth Measurements. Standartinform, Moscow, 11 pp. (in Russian)

Дмитриев Е.А. Математическая статистика в почвоведении. М., Изд-во Моск. ун-та, 1995, 320 с.

Dmitriev, E.A., 1995. *Mathematical Statistics in Soil Science*. Moscow University Press, Moscow, 320 pp. (in Russian)

Дроздов Д.С., Украинцева Н.Г., Царев А.М., Чекрыгина С.Н. Изменения температурного поля мерзлых пород и состояния геосистем на территории Уренгойского месторождения за последние 35 лет (1974–2008) // Криосфера Земли, 2010, т. XIV, № 1, с. 22–31.

Drozdov, D.S., Ukraintseva, N.G., Tsarev, A.M., Chekrygina, S.N., 2010. Changes of permafrost temperature field and

- geosystem state on the Urengoy oil-gas-field territory during the last 35 years (1974–2008). *Earth's Cryosphere XIV* (1), 22–31.
- Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Курц В.А.** Управление балансом углерода лесов России: прошлое, настоящее и будущее // *Устойчивое лесопользование*, 2014, № 2, с. 23–31.
- Zamolodchikov, D.G., Grabovskiy, V.I., Kurtz, V.A., 2014. Management of carbon budget in Russian forests: past, present, and future. *Ustoichivoe Lesopolzovanie*, No. 2, 23–31.
- Карелин Д.В.** Углеродный обмен в криогенных экосистемах / Д.В. Карелин, Д.Г. Замолодчиков. М., Наука, 2008, 344 с.
- Karelin, D.V., Zamolodchikov, D.G., 2008. Carbon Exchange in Permafrost Ecosystems. Nauka, Moscow, 344 pp. (in Russian)
- Кобак К.И.** Биотические компоненты углеродного цикла. М., Гидрометеоздат, 1988, 248 с.
- Kobak, K.I., 1988. Biotic Components of the Carbon Cycle. *Gidrometeoizdat*, Moscow, 248 pp. (in Russian)
- Курганова И.Н.** Эмиссия и баланс диоксида углерода в наземных экосистемах России: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Пушино, 2010, 50 с.
- Kurganova, I.N., 2010. Soil Carbon Dioxide Efflux and Budget in Terrestrial Ecosystems of Russia. Author's Abstract, Doctor Thesis (Biology). Pushchino, 50 pp. (in Russian)
- Макаров М.И., Шулева М.С., Малышева Т.И., Меняйло О.В.** Растворимость лабильных форм углерода и азота почв в K_2SO_4 разной концентрации // *Почвоведение*, 2013, № 4, с. 408–413.
- Makarov, M.I., Shuleva, M.S., Malysheva, T.I., Menyailo, O.V., 2013. Solubility of water-extractable carbon and soil nitrogen in K_2SO_4 of different concentrations. *Pochvovedenie*, No. 4, 408–413.
- Наумов А.В.** Дыхание почвы: составляющие, экологические функции, географические закономерности. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2009, 208 с.
- Naumov, A.V., 2009. Soil Respiration: Components, Environmental Functions, and Geographic Patterns. *Izd-vo. SO RAN*, Novosibirsk, 208 pp. (in Russian)
- 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.
- Semenyuk, O.V., Iliyashenko, M.A., Bobrik, A.A., 2013. Estimating environmental functions of park soils based on biological activity. *Problemy Agrokhimii i Ecologii*, No. 3, 35–39.
- Смагин А.В.** Газовая фаза почв. М., Изд-во Моск. ун-та, 2005, 301 с.
- Smagin, A.V., 2005. Soil Gas Phase. Moscow University Press, Moscow, 301 pp. (in Russian)
- Тыртиков А.П.** Влияние растительного покрова на температуру грунтов на севере Западной Сибири // *Природные условия Западной Сибири*. М., Изд-во Моск. ун-та, 1980, 112 с.
- Tyrtikov, A.P., 1980. Effect of Vegetation on Soil Temperature in Northern West Siberia, in: *Natural Conditions of West Siberia*. Moscow University Press, Moscow, 112 pp. (in Russian)
- Украинцева Н.Г., Дроздов Д.С., Попов К.А. и др.** Ландшафтная индикация локальной изменчивости свойств многолетнемерзлых пород (Уренгойское месторождение, Западная Сибирь) // *Криосфера Земли*, 2011, т. XV, № 4, с. 37–40.
- Ukraintseva, N.G., Drozdov, D.S., Popov, K.A., Gravis, A.G., Matyshak, G.V., 2011. Landscape indication of local permafrost variability (West Siberia, Urengoy territory). *Earth's Cryosphere XV* (4), 32–35.
- Честных О.В., Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И.** Общие запасы биологического углерода и азота в почвах лесного фонда России // *Лесоведение*, 2004, № 4, с. 30–42.
- Chestnykh, O.V., Zamolodchikov, D.G., Utkin, A.I., 2004. Total resources of biogenic carbon and nitrogen in forest soils of Russia. *Lesovedeniye*, No. 4, 30–42.
- Chantigny, М.Н.** Dissolved and water-extractable organic matter in soils: a review on the influence of land use and management practices // *Geoderma*, 2003, vol. 113, p. 357–380, DOI: 10.1016/S0016-7061(02)00370-1.
- 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, vol. 25, No. 1, p. 135–141.
- Cheng, W., Virginia, R.A., Oberbauer, S.F., et al.** Soil nitrogen, microbial biomass and respiration along an arctic toposequence // *Soil Sci. Soc. America J.*, 1998, vol. 62, p. 654–662.
- Davidson, E.A., Janssens, I.A.** Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change // *Nature*, 2006, vol. 440, p. 165–173.
- Fisk, M.C., Ruether, K.F., Yavitt, J.B.** Microbial activity and functional composition among northern peatland ecosystems // *Soil Biol. Biochem.*, 2003, vol. 35, No. 4, p. 591–602.
- Fouche, J., Keller, C., Allard, M., Ambrosi, J.P.** Increased CO_2 fluxes under warming tests and soil solution chemistry in Histic and Turbic Cryosols, Salluit, Nunavik, Canada // *Soil Biol. Biochem.*, 2014, No. 68, p. 185–199.
- Hugelius, G., Tarnocai, C., Broll, G., et al.** The Northern Circumpolar Soil Carbon Database: spatially distributed datasets of soil coverage and soil carbon storage in the northern permafrost regions // *Earth Syst. Sci. Data*, 2013, No. 5, p. 3–13.
- Jensen, A.E., Lohse, K.A., Crosby, B.T., Mora, C.I.** Variations in soil carbon dioxide efflux across a thaw slump chronosequence in northwest Alaska // *Environ. Res. Lett.*, 2014, vol. 9, p. 1–11.
- Joergensen, R.G., Wu, J., Brookes, P.C.** Measuring soil microbial biomass using an automated procedure // *Soil Biol. Biochem.*, 2011, vol. 43, No. 5, p. 873–876.
- Kelsey, K.C., Wickland, K.P., Striegl, R.G., Neff, J.C.** Variation in soil carbon dioxide efflux at two spatial scales in a topographically complex boreal forest // *Arctic, Antarctic and Alpine Res.*, 2012, vol. 44, No. 4, p. 457–468.
- Liu, Q., Edwards, N.T., Post, W.M., et al.** Temperature-independent diel variation in soil respiration observed from a temperate deciduous forest // *Global Change Biol.*, 2006, vol. 12 (11), p. 2136–2145.
- Martens, R.** Current methods for measuring microbial biomass C in soil: Potentials and limitations // *Biol. Fertil. Soils*, 1995, vol. 19, p. 87–99.
- Mazhitova, G., Malkova, G., Chestnykh, O., Zamolodchikov, D.** Active-layer spatial and temporal variability at European Russian Circumpolar-Active-Layer-Monitoring (CALM) sites // *Permafrost and Periglacial Processes*, 2004, vol. 15, No. 2, p. 123–139.
- Natali, S.M., Schuur, E.A.G., Trucco, C., et al.** Effects of experimental warming of air, soil and permafrost on carbon balance in Alaskan tundra // *Global Change Biol.*, 2011, vol. 17, p. 1394–1407.
- Ping, C.L., Jastrow, J.D., Jorgenson, M.T., et al.** Permafrost soils and carbon cycling // *Soil*, 2015, vol. 1, p. 147–171.
- Potila, H., Sarjala, T.** Seasonal fluctuation in microbial biomass and activity along a natural nitrogen gradient in a drained peatland // *Soil Biol. Biochem.*, 2004, No. 36, p. 1047–1055.

Riveros-Iregui, D.A., McGlynn, B.L., Epstein, H.E., Welsh, D.L. Interpretation and evaluation of combined measurement techniques for soil CO₂ efflux: Discrete surface chambers and continuous soil CO₂ concentration probes // J. Geophys. Res., 2008, vol. 113, p. 1–11.

Rodionov, A., Flessa, H., Grabe, M., et al. Organic carbon and total nitrogen variability in permafrost-affected soils in a forest tundra ecotone // Europ. J. Soil Sci., 2007, No. 58, p. 1260–1272.

Schuur, E.A.G., Bockheim, J., Canadell, J.G., et al. Vulnerability of permafrost carbon to climate change: implications for the global carbon cycle // Bioscience, 2008, vol. 58, p. 701–714.

Schuur, E.A.G., Vogel, J.G., Crummer, K.G., et al. The effect of permafrost thaw on old carbon release and net car-

bon exchange from tundra // Nature, 2009, vol. 459, p. 556–559.

Turetsky, M.R., Wieder, R.K., Vitt, D.H., et al. The disappearance of relict permafrost in boreal north America: Effects on peatland carbon storage and fluxes // Global Change Biol., 2007, vol. 13, p. 1922–1934.

Vance, E.D., Brookes, P.C., Jenkinson, D.S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C // Soil Biol. Biochem., 1987, No. 19, p. 703–707.

Zimov, S.A., Zimova, G.M., Davydov, S.P., et al. Winter biotic activity and production of CO₂ in Siberian soils: a factor in the greenhouse effect // J. Geophys. Res., 1993, vol. 98, p. 5017–5023.

*Поступила в редакцию
15 января 2018 г.*

ПАЛЕОКРИОГЕНЕЗ И ПОЧВООБРАЗОВАНИЕ

УДК 631.4 (574.4)

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-2(52-59)

**ВКЛАД АБИОТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ
В ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ВАРЬИРОВАНИЕ ЭМИССИИ CO₂ ПОЧВ
ЛЕСОТУНДРОВОЙ ЗОНЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ (НОВЫЙ УРЕНГОЙ)**

А.А. Бобрик¹, О.Ю. Гончарова¹, Г.В. Матышак¹, Д.С. Дроздов², О.Е. Пономарева²

¹ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
ф-т почвоведения, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; ann-bobrik@yandex.ru*
² *Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия*

В результате исследования на территории стационара Новый Уренгой (CALM R50, север Западной Сибири) установлено, что эмиссия диоксида углерода, мощность сезонноталого слоя и ландшафтные условия (рельеф, влажность, температура почв) характеризуются высокой пространственной вариабельностью. Пространственное распределение эмиссии диоксида углерода на изученной территории определяется мощностью сезонноталого слоя, температурой и объемной влажностью почвы, а также гипсометрическим уровнем. Установлено, что основной вклад в пространственную вариабельность влажности и температурного режима почв мониторинговой площадки вносит глубина залегания многолетнемерзлых пород.

Многолетнемерзлые породы, криогенные почвы, торф, влажность почв, эмиссия CO₂

**SPATIAL VARIABILITY OF SOIL CO₂ EFFLUX
IN THE FOREST-TUNDRA ZONE OF WEST SIBERIA (NOVY URENGOI):
CONTROL OF ABIOTIC FACTORS**

A.A. Bobrik¹, O.Yu. Goncharova¹, G.V. Matyshak¹, D.S. Drozdov², O.E. Ponomareva²

¹ *Lomonosov Moscow State University, Department of Soil Science,
1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; ann-bobrik@yandex.ru*
² *Earth Cryosphere Institute, SB RAS, 86, Malygina str., Tyumen, 625400, Russia*

Studies at site CALM R50 in Novy Urengoi, northern West Siberia, reveal high spatial variability in the patterns of soil CO₂ efflux, active layer thickness and landscape parameters (elevations, soil moisture, and soil surface temperature). The distribution of carbon dioxide emission from soil over the area is determined by active layer thickness, soil surface temperature and volumetric moisture content, as well as elevation. Active layer thickness is the major control of soil moisture and temperature spatial distribution.

Permafrost, permafrost-affected soils, peat, soil moisture, CO₂ efflux

ВВЕДЕНИЕ

Ключом к пониманию глобального цикла углерода является оценка пространственного варьирования эмиссии CO₂ из почв как интегрального показателя их биологической активности [Wang et al., 2002; Chris et al., 2005; Yue-Lin et al., 2008]. Как правило, такие оценки основаны на материалах почвенных карт и немногочисленных баз данных [Честных и др., 2004; Hugelius et al., 2013]. Особое внимание уделяется количественной оценке запасов углерода в криогенных почвах и его эмиссии из них в связи с возможными последствиями климатических изменений. Поэтому запас углерода в эталонном почвенном профиле для каждого из

почвенных контуров умножается на его площадь. Данный подход не учитывает вариабельность содержания почвенного углерода и его эмиссии внутри почвенных контуров. Работ по изучению пространственной изменчивости эмиссии парниковых газов и содержания органического углерода в почвах бореальных и арктических экосистем немного [Бобрик и др., 2016; Rodionov et al., 2007]. В связи с этим очевидна необходимость оценки пространственной вариабельности эмиссии углерода из почвы.

Оптимальными для оценки пространственной вариабельности содержания почвенного угле-

рода и эмиссии углерода из почвы представляются исследованием на площадках мониторинговой программы (Circumpolar Active Layer Monitoring, CALM). Основной целью Международной программы циркумполярного мониторинга активного слоя CALM является наблюдение за реакцией многолетнемерзлых пород на изменение климата в течение длительного временного периода (www.gwu.edu/~calm/data/north.html). На территории РФ находятся 64 мониторинговые площадки, из них 13 – в Западной Сибири. В 2008 г. в южной лесотундре в 30 км севернее г. Новый Уренгой была заложена площадка (CALM R50) для мониторинга сезонного протаивания (рис. 1).

Цель данной работы – оценка взаимосвязи эмиссии диоксида углерода из почв, мощности сезонноталого слоя (СТС), ландшафтных условий и их пространственного варьирования в лесотундровой зоне. Основные задачи: оценка пространственного распределения биотических (растительность) и абиотических (мощность сезонноталого слоя, влажность почвы, температура почвы) факторов в пределах изучаемой территории; оценка пространственного варьирования эмиссии диоксида углерода почвами; изучение связи эмиссии CO₂ с мощностью сезонноталого слоя и ландшафтными условиями в пространственном масштабе.

МЕСТОПОЛОЖЕНИЕ И ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются почвы и ландшафты мониторинговой площадки CALM R50, расположенной в лесотундровой зоне Западной Сибири. Заболоченность лесотундры очень высокая. В лесотундре и примыкающей к ней части северной тайги на Западно-Сибирской низменности болотные экосистемы занимают 50 % площади. На Надым-Пурском междуречье болота занимают до 70 % территории [Романова, 1985]. Мониторинговая площадка представляет собой плоскую и слабоаклонную крупнокочковатую основную поверхность типичного бугристого торфяника, сменяющуюся вблизи долины ручья лиственничными лишайниковыми рединами и кустарниковыми ерниками [Украинцева и др., 2011].

Почвенный покров площадки характеризуется высокой неоднородностью и представлен комплексом органогенных (торфяных), альфегумусовых, криотурбированных и глеевых почв. В целом преобладают торфяные варианты и (за исключением участков лишайниковых редины) профиль почв представляет собой набор горизонтов (2–3) слабо- и среднеразложённых олиготрофных торфов, мощностью более 30 см, подстилаемых минеральными горизонтами разного типа. В лишайниковых редины маломощный оторфованный

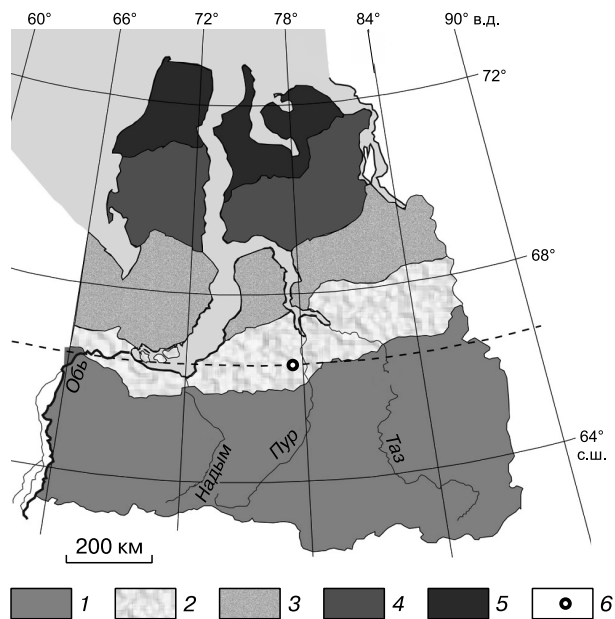


Рис. 1. Район исследований.

1 – северная тайга; 2 – лесотундра; 3 – южная тундра; 4 – типичная тундра; 5 – арктическая тундра; 6 – Новоуренгойский стационар.

органопрофиль (<10 см) сменяется, как правило, песчаным субстратом (подзолистый или альфегумусовый почвенный горизонт).

На основе материалов Н.Г. Украинцевой на данной площадке авторами выделено пять фаций (рис. 2, а), обладающих одинаковой литологией, однообразным рельефом, сходным микроклиматом, однотипным набором почв и одним биоценозом. Для выделенных фаций характерны следующие характеристики. 1. Лиственничные лишайниковые редины с западинно-бугристым микрорельефом представлены участком леса, характеризующимся относительно невысокой плотностью деревьев, отстоящих друг от друга на заметном удалении и не образующих сомкнутого лесного полога. Почвенный покров представлен подзолами глеевыми и торфяно-подбурами иллювиально-железистыми. 2. Ерники представлены густыми зарослями кустарниковой березы (высотой до 1.0–1.5 м) с травяно-моховым покровом и кочковатыми травяно-кустарничково-моховыми ложбинами с преобладанием торфяно-криоземов перегнойных. 3. Багульниково-лишайниковые плоскобугристые торфяники характеризуются комплексом торфяно-криоземов типичных и торфяных олиготрофных мерзлотных почв. 4. Морошково-сфагновые плоскобугристые торфяники характеризуются комплексом торфяно-криоземов типичных и торфяно-криоземов перегнойных. 5. Кустарничково-моховые безлесные мелкбуг-

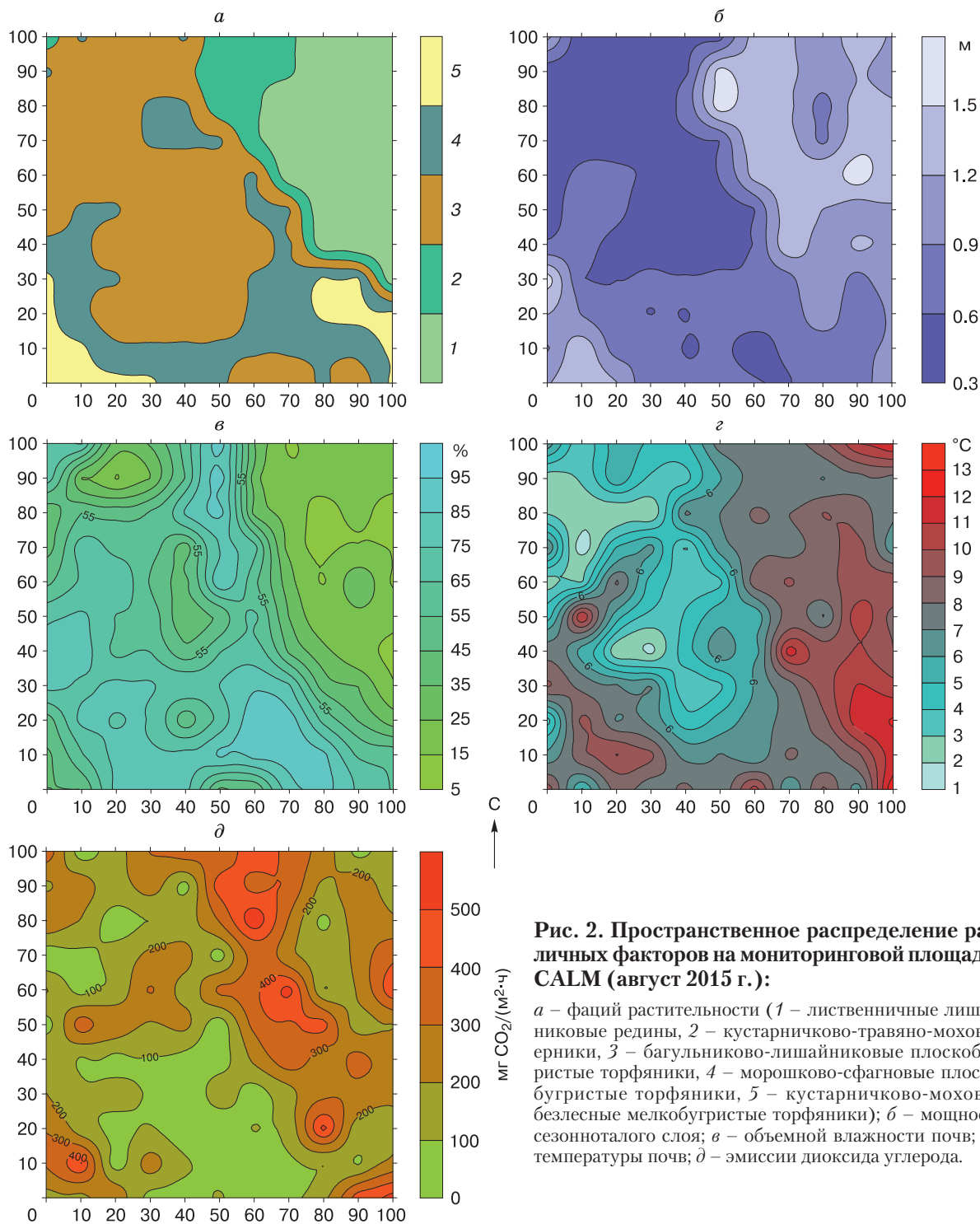


Рис. 2. Пространственное распределение различных факторов на мониторинговой площадке CALM (август 2015 г.):

а – фаций растительности (1 – лишайниковые редины, 2 – кустарничково-травяно-моховые ерники, 3 – багульниково-лишайниковые плоскобугристые торфяники, 4 – морошково-сфагновые плоскобугристые торфяники, 5 – кустарничково-моховые безлесные мелкобугристые торфяники); *б* – мощности сезонноталого слоя; *в* – объемной влажности почв; *г* – температуры почв; *д* – эмиссии диоксида углерода.

ристые торфяники характеризуются комплексом торфяно-глеземов типичных и глеземов криотурбированных. Названия почв приведены в соответствии с классификацией почв РФ [Классификация..., 2004].

По данным нивелирной съемки, на мониторинговой площадке превышение максималь-

ной отметки над минимальной составляет 3.56 м (рис. 3), средние абсолютные высоты местности составляют 59.51 ± 0.52 м. Установлено, что четыре из пяти выделенных фаций характеризуются близкими средними значениями абсолютных высот (см. таблицу). Фация ерников занимает наименьшую позицию и характеризуется статисти-

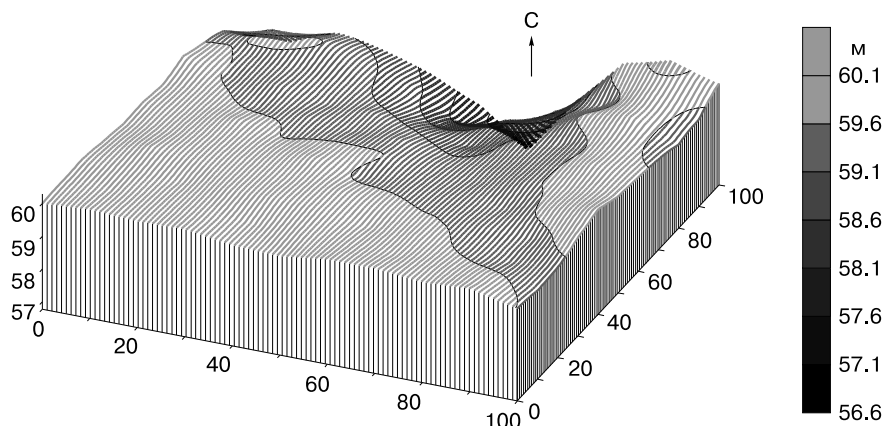


Рис. 3. Гипсометрическая характеристика мониторинговой площадки CALM (август 2015 г.).

Средние значения исследованных показателей по фациям

Фация	<i>n</i>	Превышение высот, м	Мощность СТС, м	Объемная влажность почвы, %	Температура почвы, °С	Эмиссия CO ₂ , мг CO ₂ /(м ² ·ч)	Мощность торфа, см
Лиственничные лишайниковые редины	25	59.61 ± 0.29	1.20 ± 0.23	18.4 ± 6.0	8.8 ± 1.4	246 ± 100	3.9 ± 3.2
Кустарничково-травяно-моховые ерники	10	58.25 ± 0.63	1.29 ± 0.32	63.5 ± 28.0	7.3 ± 0.6	417 ± 61	29.7 ± 10.9
Багульниково-лишайниковые плоскобугристые торфяники	37	59.63 ± 0.29	0.52 ± 0.11	56.3 ± 18.0	4.4 ± 1.6	140 ± 90	39.5 ± 3.5
Морошково-сфагновые плоскобугристые торфяники	34	59.56 ± 0.39	0.71 ± 0.19	72.1 ± 15.0	7.6 ± 1.7	161 ± 90	40.3 ± 4.4
Кустарничково-моховые безлесные мелкобугристые торфяники	15	59.77 ± 0.27	1.17 ± 0.25	54.3 ± 16.3	9.8 ± 2.1	277 ± 75	37.6 ± 10.6

Примечание. Показатель = среднее значение ± стандартное отклонение. Курсивом выделены значения, которые статистически значимо отличаются от остальных. *n* – число повторностей измерения.

чески значимо меньшей абсолютной высотой (58.25 ± 0.63 м).

Растительность мониторинговой площадки представлена в напочвенном покрове различными лишайниками (*Cladonia* sp.) и мхами (*Sphagnum* sp., *Pleurozium* sp., *Politrichum* sp.); в травяно-кустарничковом ярусе – черникой (*Vaccinium myrtillus*), голубикой (*Vaccinium uliginosum*), брусникой (*Vaccinium vitis-idaea*), багульником (*Ledum palustre*), а также различного вида осокой (*Carex* sp.), морошкой (*Rubus chamaemorus*), пушицей (*Eriophorum* sp.), андромедой (*Andromeda* sp.); в кустарничковом ярусе – карликовой и кустарниковой березой (*Betula nana*, *Betula fruticosa*); в древесном ярусе – лиственницей (*Larix* sp.).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В августе 2015 г. на всех пикетах, расположенных по регулярной сетке с шагом 10 м (100 × 100 м, 121 точка опробования), мониторинговой площад-

ки CALM R50 проведено описание почвенного и растительного покрова, определен гипсометрический уровень (абсолютные высоты местности) методом нивелирной съемки. Определена мощность торфа 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 мониторинговой площадке CALM R1 [Бобрин и др., 2015]. Определение эмиссии диоксида углерода с поверхности почвы проводилось однократно за полевой сезон в начале августа (11.08.2015) одновременно в дневные часы (с 12.00 до 15.00) для каждого 121 пикета мониторинговой площадки методом статических закрытых камер с удалением растительного покрова [Смагин, 2005; Riveros-Iregui et al., 2008]. Измерение концентрации CO₂ в пробах осуществлялось с помощью портативного газоанализатора с инфра-

красным датчиком RMT DX6210. Проведены разовые измерения объемной влажности с помощью влагомера Spectrum TDR 100 и измерения температуры почвы термощупом в верхнем 10-сантиметровом слое почвы с трехкратной повторностью для каждого пикета. Мощность СТС определялась методом зондирования щупом, представляющим собой заостренный металлический стержень диаметром 10 мм и длиной 2 м [Мельников и др., 2005; ГОСТ 26262-2014, 2015].

Выполнен статистический анализ полученных данных в программном пакете Statistica 7.0. Определен тип распределения (проверка нормальности стандартными методами). Результаты представлены в форме: среднее значение \pm стандартное отклонение. Сравнение средних значений проводилось по параметрическому критерию Стьюдента (t -критерий) (уровень значимости $p < 0.05$) и непараметрическому критерию Вилкоксона (уровень значимости $\alpha = 0.05$). В случае распределения, отличающегося от нормального, корреляционный анализ проводился по методу ранговой корреляции Спирмена. Коэффициент корреляции $r > 0.18$ считается значимым при объеме выборки $n > 119$ (уровень значимости $p < 0.05$). Объем выборки каждого исследованного показателя на мониторинговой площадке CALM R50 равен 121. Структуру пространственной вариабельности параметров исследовали при помощи картограмм в пакете Golden Software Surfer 8.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Мощность сезонноталого слоя. Мощность СТС на мониторинговой площадке варьировала от 0.31 до 1.71 м и в среднем составляла 0.85 ± 0.37 м в августе 2015 г. (см. рис. 2, б). Минимальные значения мощности СТС характерны для багульниково-лишайниковых плоскобугристых торфяников, максимальные – для листовничных лишайниковых редиин. Этот показатель характеризуется высокой пространственной вариабельностью (коэффициент вариации 44 %), его распределение асимметрично, медиана смещена в сторону низких значений. Фации редиин, ерников, мелкобугристых торфяников характеризуются близкими средними значениями мощности СТС (среднее значение по трем фациям составляет 1.22 ± 0.30 м). Фации багульниково-лишайниковых и морошково-сфагновых плоскобугристых торфяников статистически значимо отличаются от описанных ранее фаций по мощности СТС и характеризуются ее меньшими значениями (среднее по двум фациям составляет 0.62 ± 0.15 м). Это может быть объяснено большой мощностью торфяного горизонта на плоскобугристых торфяниках. Торфяные горизонты обладают низкой теплопроводностью, следовательно, обеспечивают изолирующее воздействие на многолетнемерзлые

породы [Гончарова и др., 2015; Zimov et al., 1998; Mazhitova et al., 2004].

Влажность почвы. Влажность почв обусловлена типом субстрата и является важным показателем для биологической активности почв. Объемная влажность почвы мониторинговой площадки характеризуется высокой пространственной вариабельностью (коэффициент вариации 48 %), его распределение асимметрично, медиана смещена в сторону высоких значений. Значение объемной влажности почвы меняется в широких пределах – от 7.0 до 91.0 %, при этом среднее составляет 52.5 ± 25.1 %. Около 48 % пикетов характеризуются влажностью более 60 % (см. рис. 2, в). Установлено, что четыре из пяти выделенных фаций имеют близкие средние значения объемной влажности (среднее по четырем фациям составляет 61.3 ± 19.4 %) (см. таблицу). Фация редиин характеризуется минимальным значением объемной влажности почв (18.4 ± 6.0 %) и статистически значимо отличается от других фаций по этому показателю, что связано с минеральным характером верхнего горизонта почв. Наибольшие средние значения объемной влажности почвы характерны для фаций ерников и морошково-сфагновых плоскобугристых торфяников, что можно объяснить пониженным положением в рельефе первой фации и особенностями торфяного горизонта второй фации. Установлено, что почвы фации редиин и остальных четырех фаций статистически значимо различались по вариабельности объемной влажности.

Температура почвы. Показатель температуры почвы на глубине 10 см в дневное время характеризуется высокой пространственной вариабельностью (коэффициент вариации 38 %), тип его распределения относится к нормальному. Значение температуры почвы мониторинговой площадки меняется в широких пределах – от 1.2 до 13.0 °С, при этом среднее составляет 7.4 ± 1.8 °С (см. рис. 2, г). Фация багульниково-лишайниковых плоскобугристых торфяников характеризуется наименьшим значением температуры почвы и статистически значимо отличается от других фаций по этому показателю (см. таблицу). Это связано с близким залеганием кровли многолетнемерзлых пород на данном участке.

Эмиссия диоксида углерода. Эмиссия диоксида углерода почвами мониторинговой площадки варьировала в широких пределах (от 10 до 590 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$) и составляла в среднем 202 ± 142 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ (см. рис. 2, д). Этот показатель характеризуется высокой пространственной вариабельностью: коэффициент вариации составил 73 %. Распределение значений эмиссии CO_2 асимметрично, медиана смещена в сторону низких значений. Почвы фации ерников характеризуются наибольшим средним значением эмиссии диоксида

углерода (417 ± 61 мг CO₂/(м²·ч)), оно статистически значимо отличается от средних значений эмиссии почв других фаций. Это обусловлено как большой мощностью СТС (1.29 ± 0.32 м) и, следовательно, благоприятными гидротермическими условиями для микробной деятельности на данном участке, так и значительным вкладом корневого дыхания густых зарослей кустарников, которые характерны для данной фации. Установлено, что почвы ерников и остальных четырех фаций статистически значимо различаются по вариабельности эмиссии CO₂.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Взаимосвязь факторов среды. Для криогенных почв мощность сезонноталого слоя является важным показателем особенностей функционирования экосистем. Многолетнемерзлые породы, являясь, с одной стороны, водоупорным горизонтом, а с другой – низкотемпературной средой, оказывают влияние на развитие экосистем и почв, детерминируя в первую очередь гидротермический режим [Макеев, 1999].

С помощью регрессионного анализа установлено, что мощность СТС мониторинговой площадки (август 2015 г.) имеет статистически значимую связь с объемной влажностью почвы (1) и температурой почвы (2), а также с эмиссией диоксида углерода (4):

$$(1) \quad \text{Объемная влажность [\%]} = 73.3 [\%] - 24.5 [\%/м] \times \text{Мощность СТС [м]}, r = -0.28, p\text{-level} < 0.05;$$

$$(2) \quad \text{Температура почвы [°C]} = 3.5 [°C] + 4.1 [°C/м] \times \text{Мощность СТС [м]}, r = 0.65, p\text{-level} < 0.05.$$

Температура почвы также имеет статистически значимую связь с объемной влажностью почвы (3):

$$(3) \quad \text{Температура почвы [°C]} = 8.1 [°C] - 0.02 [°C/\%] \times \text{Объемная влажность [\%]}, r = -0.21, p\text{-level} < 0.05.$$

Установлено, что на 43 % варьирование температуры почвы связано с варьированием мощности СТС, а на 4.5 % – с варьированием объемной влажности почвы. Установлено, что на 8 % варьирование объемной влажности почвы связано с варьированием мощности СТС, а на 72 % варьирование этих признаков осуществляется взаимно независимо.

Не установлено статистически значимой связи мощности СТС мониторинговой площадки со значениями абсолютных высот местности. Только для фации морошково-сфагновых плоскобугристых торфяников характерна прямая связь мощности СТС с гипсометрическим уровнем ($r = 0.65$, $p\text{-level} < 0.05$, $n = 34$).

Дыхание почвы. Величина эмиссии диоксида углерода является интегральным показателем биологической активности почв и зависит от гидротермических условий, физических свойств субстрата, от роста надземной и корневой массы, а также от особенностей трансформации органического материала [Кобак, 1988].

В результате анализа данных по эмиссии диоксида углерода авторами установлено, что исследованные почвы, функционирующие в подзоне южной лесотундры, характеризуются низкой биологической активностью по сравнению с почвами других природных зон [Наумов, 2009; Гончарова и др., 2014; Бобрик и др., 2016; Гончарова и др., 2016].

С помощью регрессионного анализа установлено, что эмиссия CO₂ почв мониторинговой площадки (август 2015 г.) имеет статистически значимую связь с мощностью СТС (4), с объемной влажностью почвы (5), температурой почвы (6) и абсолютными высотами (7):

$$(4) \quad \text{Эмиссия [мг CO}_2\text{/(м}^2\text{·ч)}] = 9 [\text{мг CO}_2\text{/(м}^2\text{·ч)}] + 255.5 [\text{мг CO}_2\text{/(м}^2\text{·ч)/м}] \times \text{Мощность СТС [м]}, r = 0.50, p\text{-level} < 0.05;$$

$$(5) \quad \text{Эмиссия [мг CO}_2\text{/(м}^2\text{·ч)}] = 291 [\text{мг CO}_2\text{/(м}^2\text{·ч)}] - 1.3 [\text{мг CO}_2\text{/(м}^2\text{·ч)/\%}] \times \text{Объемная влажность [\%]}, r = -0.27, p\text{-level} < 0.05;$$

$$(6) \quad \text{Эмиссия [мг CO}_2\text{/(м}^2\text{·ч)}] = 119 [\text{мг CO}_2\text{/(м}^2\text{·ч)}] + 15.2 [\text{мг CO}_2\text{/(м}^2\text{·ч)/°C}] \times \text{Температура почвы [°C]}, r = 0.23, p\text{-level} < 0.05;$$

$$(7) \quad \text{Эмиссия [мг CO}_2\text{/(м}^2\text{·ч)}] = 8767 [\text{мг CO}_2\text{/(м}^2\text{·ч)}] - 143 [\text{мг CO}_2\text{/(м}^2\text{·ч)/м}] \times \text{Абс. высота [м]}, r = -0.42, p\text{-level} < 0.05.$$

Установлено, что на 25 % варьирование эмиссии диоксида углерода связано с варьированием мощности СТС, на 18 % – с варьированием абсолютных высот местности, на 7.5 % – с варьированием объемной влажности почвы, на 5.5 % – с варьированием температуры почвы, а на 44 % варьирование этих признаков осуществляется взаимно независимо.

Полученные авторами статистически значимые корреляции эмиссии диоксида углерода с температурой и влажностью почвы подтверждаются сделанными ранее выводами ведущих ученых о важной роли абиотических факторов в продуцировании, перераспределении и выделении парниковых газов из почв [Кобак, 1988; Смагин, 2005; Наумов, 2009; Liu et al., 2006]. Выявленная нами обратная связь эмиссии диоксида углерода с абсолютными значениями превышений высоты местности может быть обусловлена спецификой фаций и свойствами почв. Например, почвы ерников характеризуются наименьшими значениями гипсометрического уровня и наибольшими величинами эмиссии диоксида углерода (см. таблицу).

Наибольший интерес представляет выявленная статистически значимая связь мощности СТС и биологической активности почв. Установлено, что почвам с наибольшей мощностью СТС соответствуют максимальные значения эмиссии CO_2 . Это может быть связано с повышенной микробиологической активностью в верхних слоях почвы за счет лучших гидротермических условий (удаляющегося фронта низких температур и пониженной влажности). Следовательно, при увеличении глубины сезонного протаивания биологическая активность почв возрастает.

Установленная связь эмиссии CO_2 почв с мощностью СТС объясняет необходимость оценки пространственной неоднородности мощности СТС как значимого фактора, определяющего региональные выбросы CO_2 . Можно заключить, что недоучет пространственной неоднородности геокриологических условий на территориях распространения многолетнемерзлых пород может привести к существенным искажениям оценок суммарных потоков диоксида углерода.

ВЫВОДЫ

1. Все изученные абиотические параметры (мощность сезонноталого слоя, влажность и температура почвы) мониторинговой площадки CALM R50 характеризуются высокой пространственной неоднородностью (коэффициенты вариации 38–48 %). Основной вклад в пространственную вариабельность влажности и температурного режима почв мониторинговой площадки вносит глубина залегания многолетнемерзлых пород.

2. Почвы мониторинговой площадки CALM R50 в пик вегетационного сезона характеризуются низкими значениями эмиссии диоксида углерода и ее высокой пространственной вариабельностью (202 ± 142 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, коэффициент вариации 73 %). Ерники характеризуются статистически значимо большей эмиссией диоксида углерода почв (417 ± 61 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$) по сравнению с другими фациями.

3. Пространственное распределение эмиссии диоксида углерода в пик вегетационного сезона (август 2015 г.) на изученной территории определяется мощностью СТС ($r = 0.50$, p -level < 0.05), температурой ($r = 0.23$, p -level < 0.05) и объемной влажностью почвы ($r = -0.27$, p -level < 0.05), а также гипсометрическим уровнем ($r = -0.42$, p -level < 0.05), что связано с более высокой микробиологической активностью в верхнем слое почвы при глубоком залегании многолетнемерзлых пород за счет лучших гидротермических условий (удаляющегося фронта низких температур и пониженной влажности).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-04-00808 А).

Литература

- Бобрик А.А., Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Рыжова И.М., Москаленко Н.Г., Пономарева О.Е., Огнева О.А.** Взаимосвязь геокриологических условий и гидротермических параметров почв плоскобугристых торфяников севера Западной Сибири (стационар Надым) // Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 4, с. 31–38.
- Бобрик А.А., Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Рыжова И.М., Макаров М.И.** Влияние геокриологических условий и свойств почв на пространственное варьирование эмиссии CO_2 почвами плоскобугристых болот островной криолитозоны Западной Сибири // Почвоведение, 2016, № 12, с. 1445–1456, DOI: 10.7868/S0032180X1610004X.
- Гончарова О.Ю., Бобрик А.А., Матышак Г.В., Макаров М.И.** Роль почвенного покрова в сохранении структурной и функциональной целостности северотаежных экосистем Западной Сибири // Сиб. эколог. журн., 2016, № 1, с. 3–12.
- Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Бобрик А.А., Москаленко Н.Г.** Продуцирование диоксида углерода почвами северной тайги Западной Сибири (Надымский стационар) // Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 2, с. 66–71.
- Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Бобрик А.А. и др.** Температурные режимы северотаежных почв Западной Сибири в условиях островного распространения многолетнемерзлых пород // Почвоведение, 2015, № 12, с. 1462–1473, DOI: 10.7868/S0032180X15100032.
- ГОСТ 26262-2014.** Методы полевого определения глубины сезонного оттаивания. М., Стандартиформ, 2015, 11 с.
- Классификация и диагностика почв России** / Авт. и сост. Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск, Ойкумена, 2004, 342 с.
- Кобак К.И.** Биотические компоненты углеродного цикла / К.И. Кобак. М., Гидрометеиздат, 1988, 248 с.
- Макеев О.В.** Почва, мерзлота, криопедология // Почвоведение, 1999, № 8, с. 947–957.
- Мельников Е.С., Васильев А.А., Лейбман М.О., Москаленко Н.Г.** Динамика сезонноталого слоя в Западной Сибири // Криосфера Земли, 2005, т. IX, № 2, с. 23–32.
- Наумов А.В.** Дыхание почвы: составляющие, экологические функции, географические закономерности / А.В. Наумов. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2009, 208 с.
- Романова Е.А.** Растительность болот // Растительный покров Западно-Сибирской равнины / Отв. ред. В.В. Воробьева, А.В. Белов. Новосибирск, Наука, 1985, с. 138–159.
- Смагин А.В.** Газовая фаза почв / А.В. Смагин. М., Изд-во Моск. ун-та, 2005, 301 с.
- Украинцева Н.Г., Дроздов Д.С., Попов К.А., Гравис А.Г., Матышак Г.В.** Ландшафтная индикация локальной изменчивости свойств многолетнемерзлых пород (Уренгойское месторождение, Западная Сибирь) // Криосфера Земли, 2011, т. XV, № 4, с. 37–40.
- Честных О.В., Замолдчиков Д.Г., Уткин А.И.** Общие запасы биологического углерода и азота в почвах лесного фонда России // Лесоведение, 2004, № 4, с. 30–42.
- Chris J., Claire M., Kevin C. et al.** Global climate change and soil carbon stocks; predictions from two contrasting models for the turnover of organic carbon in soil // Global Change Biol., 2005, No. 11, p. 154–166.
- Hugelius G., Tarnocai C., Broll G. et al.** The Northern Circumpolar Soil Carbon Database: spatially distributed datasets of soil coverage and soil carbon storage in the northern permafrost regions // Earth Syst. Sci. Data, 2013, No. 5, p. 3–13.

- Liu Q., Edwards N.T., Post W.M. et al.** Temperature-independent diel variation in soil respiration observed from a temperate deciduous forest // *Glob. Change Biol.*, 2006, vol. 12 (11), p. 2136–2145.
- Mazhitova G., Malkova G., Chestnykh O., Zamolodchikov D.** Active-layer spatial and temporal variability at European Russian Circumpolar-Active-Layer-Monitoring (CALM) sites // *Permafrost and Periglacial Processes*, 2004, No. 15, p. 123–139.
- 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. Geophys. Res.*, 2008, vol. 113, p. 1–11.
- Rodionov A., Flessa H., Grabe M. et al.** Organic carbon and total nitrogen variability in permafrost-affected soils in a forest tundra ecotone // *Europ. J. Soil Sci.*, 2007, No. 58, p. 1260–1272.
- 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 // *Sci. Total Environment*, 2002, vol. 291 (1–3), p. 207–217.
- Yue-Lin Li, Otieno D., Owen K. et al.** Temporal variability in soil CO₂ emission in an orchard forest ecosystem // *Pedosphere*, 2008, No. 18 (3), p. 273–283.
- Zimov S.A., Zimova G.M., Daviodov S.P. et al.** Winter biotic activity and production of CO₂ in Siberian soils: a factor in the greenhouse effect // *J. Geophys. Res.*, 1998, vol. 98, p. 5017–5023.
- www.gwu.edu/~calm/data/north.html – web site for the Circumpolar Active Layer Monitoring Network-CALM: Long-Term Observations of the Climate-Active Layer-Permafrost System (дата обращения: 18.05.2016).

*Поступила в редакцию
24 февраля 2016 г.*

ВЛИЯНИЕ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ И СВОЙСТВ ПОЧВ НА ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ВАРЬИРОВАНИЕ ЭМИССИИ CO₂ ПОЧВАМИ ПЛОСКОБУГРИСТЫХ БОЛОТ ОСТРОВНОЙ КРИОЛИТОЗОНЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

© 2016 г. А. А. Бобрик*, О. Ю. Гончарова, Г. В. Матьшак, И. М. Рыжова, М. И. Макаров

МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы

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

Поступила в редакцию 08.05.2015 г.

Мощность сезонно-талого слоя, эмиссия CO₂ и содержание органического вещества (общий, лабильный углерод и углерод микробной биомассы) почв плоскобугристого торфяника и заболоченного участка, исследованных на территории стационара Надым (север Западной Сибири, мониторинговая площадка CALM R1), характеризуются высокой пространственной вариабельностью. Установлена приуроченность низких значений эмиссии CO₂ к микроповышениям торфяника. Высокими значениями эмиссии (>200 мг CO₂/(м² ч)) характеризуются почвы с наибольшим содержанием углерода микробной биомассы и наименьшим количеством лабильного углерода. Почвы торфяника и заболоченного участка статистически значимо отличаются по содержанию общего, лабильного и микробного углерода, а также по эмиссии CO₂. Почвы торфяника характеризуются высоким содержанием углерода микробной биомассы (4260 ± 880 мг С/кг почвы), но при этом низкими значениями эмиссии CO₂ (158 ± 23 мг CO₂/(м² ч)), что объясняется особенностями структурной организации микробных сообществ криогенных почв, влиянием гидротермических условий.

Ключевые слова: сезонно-талый слой, эмиссия CO₂, органическое вещество, торфяно-криоземы (Histic Oxyaquic Turbic Cryosol), торфяно-глееземы (Histic Reductaquic Cryosol), глееземы криотурбированные (Reductaquic Turbic Cryosol), криоземы (Oxyaquic Turbic Cryosol), торфяные олиготрофные типичные почвы (Fibric Histosol)

DOI: 10.7868/S0032180X1610004X

ВВЕДЕНИЕ

Многолетняя мерзлота и связанные с ней криогенные почвы считаются наиболее значимыми наземными пулами углерода на планете. Хотя криогенные почвы занимают лишь 16% площади всех почв, они хранят 50% от общего почвенного органического углерода в метровой толще [39]. Эти почвы на протяжении сотен лет аккумулировали органический углерод и азот в условиях короткого вегетационного периода, низких температур, постоянно повышенной влажности, наличия многолетнемерзлых пород (ММП). В условиях меняющегося климата северные экосистемы из стока CO₂ могут стать его источником [30]. Органическое вещество, законсервированное в ММП, может сыграть важную роль в глобальной динамике углерода, так как их деградация при изменении (потеплении) климата может привести к образованию существенных объемов парниковых газов [7, 34, 36, 39]. Израэль с соавт. оценили увеличение среднегодовой температуры воздуха в холодных регионах России на 0.2–0.3°C в год за по-

следние 30 лет и прогнозируют увеличение температур на 3–5°C в следующие 50 лет [28]. По данным метеостанции Надым, отмечено существенное потепление климата на севере Западной Сибири (Надымский регион, Ямало-Ненецкий автономный округ) за последние 17 лет за счет увеличения температуры воздуха в среднем с –6 до –4°C [4]. В связи с наблюдаемым потеплением в северных регионах, изучение функционирования мерзлотных почв и динамики органического вещества почв становится все более актуальным.

Особое внимание уделяется количественной оценке запасов углерода в криогенных почвах и эмиссии углерода из них. Как правило, такие оценки основаны на материалах почвенных карт и немногочисленных баз данных [20, 27]. Запас углерода в эталонном почвенном профиле для каждого из почвенных контуров умножается на его площадь. Этот подход не учитывает вариабельность содержания почвенного углерода и его эмиссии внутри почвенных контуров. Работы по изучению пространственной изменчивости содержания органического углерода в почвах боре-

альных и арктических экосистем редки [35]. В связи с этим очевидна необходимость в оценке пространственной вариабельности содержания почвенного углерода и эмиссии углерода из почвы.

Цель работы – оценка пространственного варьирования эмиссии CO_2 и содержания органического углерода почв плоскобугристых торфяников, а также их взаимосвязи с геокриологическими условиями в зоне островного распространения ММП на основе мониторинговой площадки CALM R1. Подробно программа мониторинга CALM описана ниже. В задачи исследования входили: 1) характеристика пространственного распределения растительности, микрорельефа и геокриологических условий (мощность сезонно-талого слоя) в пределах изучаемой территории; 2) количественная оценка пространственного варьирования эмиссии CO_2 почвами, а также содержания общего, лабильного и микробного углерода почв; 3) изучение связи эмиссии CO_2 почвами с содержанием органического вещества почв и факторами среды.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Район исследования расположен на севере Западной Сибири (Надымский р-н, Тюменская обл., Ямало-Ненецкий автономный округ, 65°20' N, 72°55' E) на северной границе подзоны северной тайги, в краевой части третьей озерно-аллювиальной террасы р. Надым, на междуречье Хейгияха–Левая Хетта [2, 15]. Территория относится к зоне островного распространения ММП. Острова ММП, занимающие до 50% площади, приурочены к торфяникам, торфяным болотам и буграм пучения [13, 18]. В целом для района исследования характерны суровые климатические условия: продолжительный зимний период, низкие среднегодовые температуры воздуха (-5°C), количество осадков варьирует от 450 до 650 мм/год.

Ландшафты территории резко контрастируют и четко подразделяются на два основных типа, отличающихся по степени гидроморфизма и наличию ММП. Это автоморфные лесные ландшафты, где ММП отсутствуют и гидроморфные ландшафты бугристых болот, представленные комплексом собственно олиготрофных болот и специфических вариантов мерзлых плоско- и крупнобугристых торфяников с расположением ММП на глубине 1–2 м [2, 12, 14].

Исследование проводили на мониторинговой площадке CALM R1 на севере Западной Сибири в рамках международной программы циркумполярного мониторинга активного слоя (CALM), основной целью которой является наблюдение за реакцией активного слоя (сезонно-талого слоя (СТС)) и ММП на изменение климата в течение длительного временного периода (несколько десятиле-

тий). Созданная в 1990 г. система мониторинга CALM включает в себя участников из 15 стран мира и состоит из 260 площадок в обоих полушариях. Большинство площадок расположено в арктической и субарктической зоне, где исследования проводятся по сетке от 100 до 10000 м² [42]. Комплексные исследования на площадках CALM ведутся на Аляске [26, 38], в Канаде [29], Гренландии [24], Антарктике [31], России [10, 13, 40].

На территории России находятся 64 мониторинговые площадки, 13 из них – в Западной Сибири. Мониторинговая площадка CALM R1 представляет собой уникальный объект исследования, так как является самой южной в Западной Сибири и расположена в зоне островного распространения ММП. Изучение временной изменчивости мощности СТС и температурных параметров в рамках проекта CALM на Надымском стационаре (R1) проводится с 1997 г. Впервые в рамках программы CALM проведено исследование эмиссии CO_2 почвами и содержания органического вещества почв.

Мониторинговая площадка CALM R1 охватывает два типа экосистем: 1) типичный участок плоскобугристого торфяника, представляющий собой плоскую и слабо наклонную крупнокочковатую основную поверхность, приподнятую над общим уровнем болотных экосистем; 2) заболоченный участок, представляющий собой переувлажненное олиготрофное сфагновое болото, сформированное в понижении между плоскобугристыми торфяниками.

При небольшой площади исследуемой площадки на ней выделены пять почвенных разновидностей [12]. К плоскобугристому торфянику приурочены торфяно-криоземы (Histic Oxyaquic Turbic Cryosol) и торфяно-глееземы (Histic Reductaquic Cryosol) (37 и 21% пикетов соответственно), встречаются также глееземы криотурбированные (Reductaquic Turbic Cryosol) и криоземы (Oxyaquic Turbic Cryosol). Торфяные олиготрофные типичные почвы (Fibric Histosol) приурочены к заболоченному участку [8, 41].

Основным методом исследования являлось изучение всех показателей по пикетам мониторинговой площадки CALM R1. На площадке размером 100 × 100 м по сетке через каждые 10 м заложены пикеты (всего 121 точка опробования) для длительных наблюдений за различными геокриологическими параметрами.

В августе 2014 г. для всех пикетов мониторинговой площадки проведено описание форм микрорельефа и растительного покрова. Мощность СТС в почвенном профиле определяли методом зондирования шупом, представляющим собой заостренный металлический стержень диаметром 10 мм и длиной 2 м [5]. Измерение максимальной мощности СТС на мониторинговых площадках

CALM традиционно проводили в конце августа (период наибольшего оттаивания) 2013, 2014 гг. [13].

Эмиссию CO_2 с поверхности почвы с удаленным растительным покровом определяли однократно за полевой сезон в конце августа (17.08.2013, 26.08.2014) одновременно в дневные часы (с 12.00 до 15.00) для всех пикетов мониторинговой площадки методом закрытых камер [19, 33]. Измерение концентрации CO_2 осуществляли на портативном газоанализаторе RMT DX6210. Портативный газоанализатор DX6210 фирмы RMT Ltd. снабжен инфракрасным датчиком и предназначен для определения содержания CO_2 в газовых пробах в диапазоне концентраций 0–2%, с разрешением 0.001% и точностью 0.002%. Для измерения эмиссии CO_2 с поверхности почв использовали камеры из нержавеющей стали закрытого типа объемом 0.9 л. Камеры устанавливали на глубину 1–2 см в почву. Места установки камер были подготовлены заранее (прорезана щель для установки и удален растительный покров). Пробы газа объемом 10 см³ отбирали с помощью шприцев-пробоотборников через резиновую пробку в камере сразу после ее установки и через 20 мин экспонирования. Перед каждым отбором пробы воздух в камере перемешивался троекратным прокачиванием поршнем шприца. После этого отобранную пробу газа вводили в прибор и определяли концентрацию CO_2 в камере в начальный момент и в конце экспозиции.

В августе 2013 г. проведен отбор образцов из верхнего 15-сантиметрового слоя почвы под каждым пикетом с помощью почвенного бура-“ложки” (фирмы Eijkelkamp) для пробоотбора мягких агрегированных почв (влажная глина, торфяные отложения и др.) с сохранением структуры образца. Половину каждого образца хранили при естественной влажности и температуре 4°C для микробиологических исследований (“свежие” образцы), другую половину высушивали для определения общих свойств почв.

Определение содержания общего углерода и азота проводили на экспресс-анализаторе Vario EIII (Elementar). Содержание углерода лабильного органического вещества исследовали в вытяжке 0.05 М K_2SO_4 на автоматическом анализаторе $\text{TOC-V}_{\text{CPN}}$ (Shimadzu) [22]. Влажность образцов почв определяли с помощью измерителя влажности весового ОНАУС МВ-35.

Содержания углерода микробной биомассы исследовали методом фумигации-экстракции. Компоненты микробных клеток, погибших в результате обработки почвы парами хлороформа, экстрагировали раствором соли. В качестве экстрагента использовали раствор K_2SO_4 в концентрации 0.05 М, а не в традиционно используемой для подобного анализа концентрации 0.5 М [11].

Экстракцию проводили для контрольной (нефумигированной) и фумигированной частей пробы. В настоящей работе использовали фумигацию свежих образцов почвы при естественной влажности парами хлороформа, стабилизированного амиленом, без этанола в течение суток. Содержание С в растворах определяли на автоматическом анализаторе $\text{TOC-V}_{\text{CPN}}$ (Shimadzu). Содержание микробного углерода рассчитывали как $\text{C}_{\text{микр}} = Fc/kc$, где Fc – разница содержания углерода в фумигированных и нефумигированных образцах, kc – поправочный коэффициент, показывающий полноту экстракции углерода из почв [21, 23]. Для органогенных почв использовали поправочный коэффициент, равный 0.45 [37].

Статистический анализ полученных данных осуществляли с помощью программного пакета Statistica 6.0. Определяли 95% доверительные интервалы среднего для каждого показателя ($\text{mean} \pm 1.96\text{SD}$) и тип распределения (проверка нормальности). Сравнение средних значений проводили по параметрическому критерию Стьюдента (t -критерий) (уровень значимости $P < 0.05$) и непараметрическому критерию Вилкоксона (уровень значимости $\alpha = 0.05$). Дисперсии сравнивали по критерию Фишера (уровень значимости $\alpha = 0.05$). Структуру пространственной вариабельности параметров исследовали при помощи картограмм в пакете Golden Software Surfer 8.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Топография, растительность и почвенный покров. Большая часть пикетов (60%) мониторинговой площадки расположена на торфянике, остальная – на заболоченном участке. По данным нивелирной съемки, на мониторинговой площадке превышение максимальной отметки над минимальной составляет 1.68 м (рис. 1), среднее относительное превышение – 0.54 ± 0.07 м. Все пикеты, находящиеся на заболоченном участке, характеризуются значением гипсометрического уровня не превышающим 0.5 м [1].

Микрорельеф торфяника представлен комплексом форм: ровные основные поверхности (27.5% пикетов), микроповышения в виде кочек (45% пикетов) и микропонижения в виде крупных мочажин (27.5% пикетов). Заболоченные участки представлены ровной поверхностью и микроповышениями в виде болотных кочек.

Растительность мониторинговой площадки представлена в напочвенном покрове различными лишайниками рода *Cladonia* spp. и мхами (*Sphagnum* spp., *Pleurozium* spp., *Politrichum* spp.), в кустарничковом ярусе карликовой березой (*Betula nana*), черникой (*Vaccinium myrtillus*), голубикой (*Vaccinium uliginosum*), брусничкой (*Vaccinium vitis-idaea*) и багульником (*Ledum palustre*), для травя-

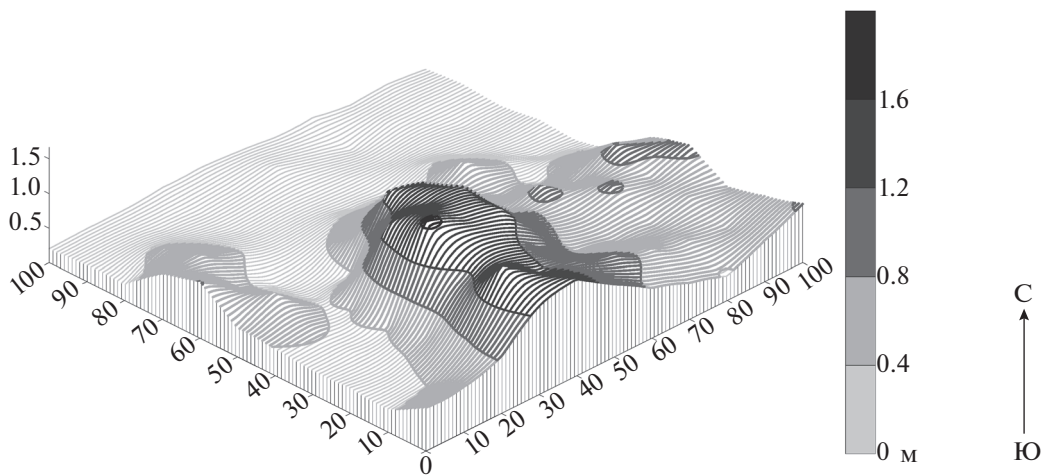


Рис. 1. Гипсометрическая характеристика мониторинговой площадки CALM.

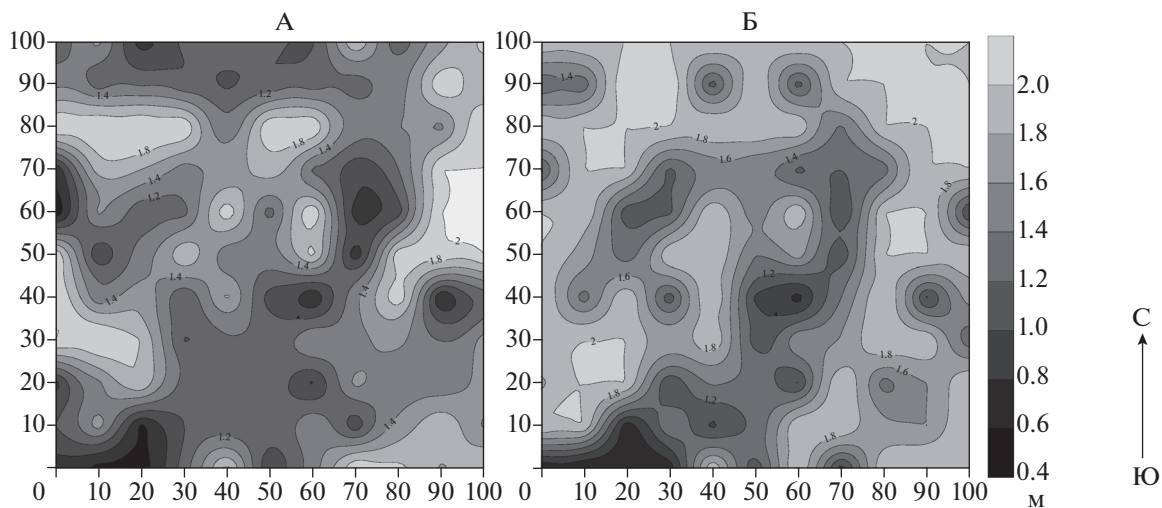


Рис. 2. Пространственное распределение мощности СТС на мониторинговой площадке CALM в августе 2013 г. (А) и 2014 г. (Б).

ного яруса наиболее характерны осоки различного вида (*Carex* spp.), пушица (*Eriophorum* spp.), андромеда (*Andromeda* spp.). Сфагновые и ягелевые сообщества (с примесью кустарничков, трав, осоки и без) встречаются на мониторинговой площадке практически одинаково (на 50.5 и 49.5% пикетов соответственно). Сфагновые сообщества без примеси других видов растений встречаются на 20% пикетов, так же, как и чисто ягелевые сообщества. Установлено, что для поверхности торфяника характерен ягелевый, кустарничко-ягелевый и кустарничко-сфагновый покров, а для заболоченного участка – сфагновый и осоково-сфагновый покров.

Верхний 15-сантиметровый слой почвы торфяника представлен торфом (80% пикетов торфяника) торфяно-криоземов и торфяно-глеезе-

мов; минеральным слоем пятен (5%); органо-минеральным слоем криоземов и глееземов (15%), где мощность торфа < 15 см. Мощность торфа на заболоченном участке превышает 0.50 м.

Мощность СТС на мониторинговой площадке изменялась от 0.43 до 2 м и глубже и составляла 1.36 ± 0.10 и 1.66 ± 0.08 м в августе 2013 и 2014 гг. (рис. 2). При этом площадь территории с мощностью СТС более 2 м в августе 2013 г. составляла 16%, а в августе 2014 увеличилась до 56%. В основном она приурочена к заболоченному участку и микропонижениям торфяника.

Сравнение дисперсий мощности СТС за два года по критерию Фишера ($\alpha = 0.05$) показало, что пространственная вариабельность мощности СТС статистически значимо не различалась (ко-

Таблица 1. Статистические характеристики мощности сезонно-талого слоя и эмиссии CO₂ почвой

Показатель	Торфяник		Заболоченный участок	
	2013	2014	2013	2014
Мощность СТС, м				
<i>n</i>	76	76	45	45
Среднее	1.33	1.56	1.44	1.82
Ошибка среднего	0.06	0.06	0.06	0.05
Стандартное отклонение	0.47	0.48	0.40	0.33
Коэффициент вариации, %	36	31	28	18
Минимум	0.43	0.55	0.70	1.09
Нижний квартиль	0.98	1.14	1.10	1.74
Медиана	1.30	1.70	1.35	2.00
Верхний квартиль	1.80	2.00	1.85	2.00
Максимум	>2.00	>2.00	>2.00	>2.00
Эмиссия CO ₂ почвой мг CO ₂ /(м ² ч)				
<i>n</i>	74	74	42	42
Среднее	158	120	127	133
Ошибка среднего	12	10	10	13
Стандартное отклонение	102	86	65	87
Коэффициент вариации, %	62	71	51	65
Минимум	11	0	22	17
Нижний квартиль	88	51	77	63
Медиана	158	108	116	114
Верхний квартиль	232	165	160	199
Максимум	397	359	331	319

эффиценты вариации 33 и 27% в августе 2013 и 2014 гг. соответственно). Установлено увеличение глубины протаивания на торфянике в среднем с 1.33 ± 0.11 до 1.56 ± 0.11 м, а на заболоченном участке с 1.44 ± 0.12 до 1.82 ± 0.10 м (отличие средних статистически значимо). На заболоченном участке 70% пикетов характеризуются мощностью СТС более 2 м (2014 г.), что связано с обогревающим действием воды.

Торфяник и заболоченный участок между собой статистически значимо различались по вариабельности мощности СТС только в 2014 г. Вариабельность мощности СТС обеих экосистем в августе 2013 и 2014 гг. (между годами) статистически значимо не различалась (табл. 1).

Под ягелевыми сообществами среднее значение мощности СТС (1.56 ± 0.05 м) статистически значимо ниже, чем под сфагновыми сообществами (1.68 ± 0.06 м). Мощность СТС более 2 м характерна в основном для пикетов под осоково-сфагновым сообществом.

Эмиссия CO₂ почвами мониторинговой площадки варьировала в широких пределах (от 10 до 400 мг CO₂/(м² ч)) и составляла в среднем 142 ± 21 и 127 ± 17 мг CO₂/(м² ч) (2013 и 2014 гг. соответственно) (рис. 3). Этот показатель характеризуется высокой пространственной вариабельностью:

коэффициент вариации составил 74% в 2013 г. и 73% в 2014.

Наблюдались меньшие значения эмиссии CO₂ почвами торфяника в 2014 г. (120 ± 20 мг CO₂/(м² ч)) по сравнению с 2013 г. (158 ± 23 мг CO₂/(м² ч)) (отличие средних статистически значимо). При этом заболоченный участок характеризуется схожими значениями эмиссии в августе 2013 и 2014 гг. (127 ± 20 и 133 ± 26 мг CO₂/(м² ч) соответственно). Таким образом, разница в эмиссии CO₂ почвами мониторинговой площадки за 2 года обусловлена в основном функционированием почв торфяника.

Установлено, что торфяник и заболоченный участок статистически значимо различались по вариабельности эмиссии CO₂ как в 2013, так и 2014 г. Вариабельность эмиссии CO₂ почвами заболоченного участка, статистически значимо различалась в 2013 и 2014 гг. А вариабельность этого показателя для торфяника не зависела от года.

Внимание привлекают единичные экстремальные величины эмиссии CO₂ на заболоченном участке (450–900 мг CO₂/(м² ч)), что связано с аккумуляцией газа в полостях, образующихся под сплошным поверхностным слоем влаги, и его последующим единовременным выделением.

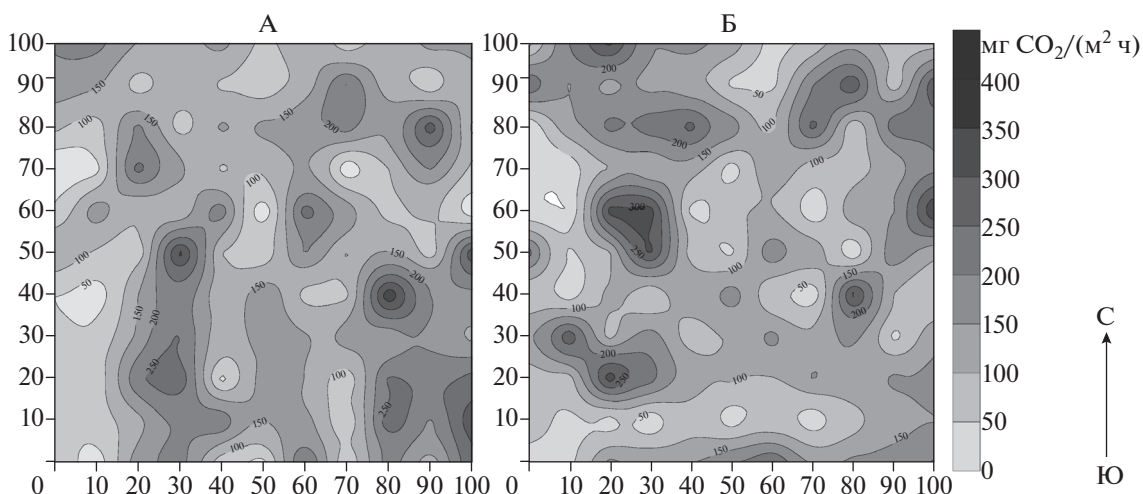


Рис. 3. Пространственное распределение эмиссии углекислого газа почв мониторинговой площадки CALM в августе 2013 г. (А) и 2014 г. (Б).

Экстремальные значения эмиссии были исключены из общей выборки.

Отличие средних значений эмиссии CO_2 почвами торфяника по элементам микрорельефа статистически значимо. Микропонижения торфяника характеризуются наибольшими значениями эмиссии (187 ± 32 и 144 ± 20 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \text{ч})$ в 2013 и 2014 гг. соответственно), а микроповышения — наименьшими (148 ± 27 и 98 ± 18 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \text{ч})$ в 2013 и 2014 гг. соответственно).

По данным 2013 г. установлено, что значения эмиссии CO_2 под выделенными растительными сообществами отличаются статистически значимо. Под сфагновыми сообществами эмиссия составила 120 ± 20 , под ягельными сообществами — 180 ± 35 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \text{ч})$. По данным 2014 г. такая закономерность не выявлена, так как средние значения эмиссии под всеми растительными сообществами статистически значимо не отличались. На участках с осоково-сфагновым покровом средние значения эмиссии CO_2 составили 175 ± 27 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \text{ч})$ и не отличались по годам. Установлено, что болотные участки мониторинговой площадки со сфагновым покровом и осоково-сфагновым покровом статистически значимо отличаются именно по показателю эмиссии CO_2 .

Общий углерод. Среднее содержание органического углерода и азота в верхней 15-сантиметровой толще почв мониторинговой площадки составляет 34.24 ± 1.92 и $1.10 \pm 0.06\%$, при этом в почвах торфяника эти показатели составляют 31.88 ± 3.02 и $1.06 \pm 0.10\%$ соответственно (рис. 3). Наблюдается высокое содержание органического углерода и азота на заболоченном участке (37.96 ± 2.00 и $1.16 \pm 0.10\%$ соответственно). Содержание общего углерода характеризуется высокой

пространственной вариабельностью, его распределение ассиметрично, медиана смещена в сторону высоких значений (табл. 2).

Детальный статистический анализ данных по общему, лабильному и микробному углероду проведен только для почв торфяника, так как для заболоченного участка объем выборки ($n = 3$) для такого анализа недостаточен.

Отличие средних значений содержания общего углерода почв по элементам микрорельефа торфяника статистически значимо. Наибольшее содержание характерно для ровной поверхности торфяника ($37.45 \pm 3.42\%$), а наименьшее — для микропонижений ($28.20 \pm 2.34\%$). Это связано с тем, что большая часть микропонижений торфяника занята глееземами и криоземами, верхний 15-сантиметровый слой которых характеризуется органо-минеральным составом. Для распределения общего азота характерна обратная зависимость: наибольшие значения наблюдаются на микропонижениях торфяника ($1.15 \pm 0.15\%$), а наименьшие — на микроповышениях ($0.97 \pm 0.14\%$).

Содержание общего углерода почв статистически значимо выше на участках с небольшой мощностью СТС (< 1 м). Установлено, что участки со сфагновым покровом характеризуются большим содержанием общего углерода почв ($35.35 \pm 1.01\%$), чем участки с ягельным покровом ($32.60 \pm 1.70\%$). Наибольшее содержание общего углерода ($37.00 \pm 1.01\%$) и общего азота ($1.15 \pm 0.10\%$) характерно для участков с осоково-сфагновым покровом (отличие средних статистически значимо).

Лабильный углерод. Среднее содержание лабильного органического углерода в верхней 15-сантиметровой толще почв мониторинговой площадки составляет 13100 ± 2100 мг С/кг почвы, при этом в почвах торфяника — 1400 ± 300 мг С/кг

Таблица 2. Статистические характеристики содержания органического углерода в почве торфяника ($n = 74$)

Показатель	С общ	Н общ	С слаб	С мик	С слаб	С мик
	%		мг С/кг почвы		% от С общ	
Среднее	31.88	1.06	1400	4260	0.46	1.54
Ошибка среднего	1.54	0.05	100	330	0.03	0.09
Стандартное отклонение	13.27	0.45	850	2720	0.28	0.77
Коэффициент вариации, %	42	43	61	64	62	50
Минимум	6.17	0.06	100	100	0.09	0.09
Нижний квартиль	17.00	0.89	820	1680	0.25	0.98
Медиана	37.85	1.00	1220	4380	0.37	1.45
Верхний квартиль	43.08	1.43	1860	6440	0.59	1.99
Максимум	47.52	1.96	3920	9840	1.32	3.30

Таблица 3. Категории эмиссии CO₂ почвой мониторинговой площадки CALM

Категория эмиссии CO ₂ , мг CO ₂ /(м ² ч)	Мощность СТС, м		С общ, %	С слаб	С микр
	2013	2014		мг С/кг почвы	
0–100	1.15 ± 0.10	1.60 ± 0.10	35.02 ± 2.82	14700 ± 2500	2900 ± 1020
101–200	1.34 ± 0.11	1.63 ± 0.14	33.65 ± 3.80	13410 ± 3620	2860 ± 1130
201–300	1.45 ± 0.10	1.68 ± 0.10	32.93 ± 4.88	7900 ± 1200	5140 ± 1130
301–400	1.70 ± 0.15	2.00 ± 0.10	40.28 ± 2.85	7800 ± 1610	4710 ± 1280

Примечание. Доверительный интервал среднего (95%) ($\text{mean} \pm 1.96\text{SD}$).

почвы, а на заболоченном участке — 31100 ± 2200 мг С/кг почвы (рис. 4). Это связано с аккумуляцией лабильных форм углерода на заболоченном участке за счет латерального стока. Содержание лабильного углерода в почвах торфяника характеризуется высокой пространственной вариабельностью, его распределение ассиметрично, медиана смещена в сторону низких значений (табл. 3). Содержание лабильного углерода почв статистически значимо ниже на участках торфяника с небольшой мощностью СТС (<1 м).

Содержание лабильного углерода почв зависит от микрорельефа торфяника. Отличие средних значений статистически значимо. Наибольшее содержание лабильного углерода характерно для микропонижений (2700 ± 500 мг С/кг почвы), а наименьшее — для микроповышений и ровной поверхности торфяника (1800 ± 550 и 1400 ± 400 мг С/кг почвы соответственно). Это объясняется высокой подвижностью лабильных форм углерода и аккумуляцией их в пониженных формах рельефа.

Установлено, что участки со сфагновым и осоково-сфагновым покровом характеризуется большим содержанием лабильного углерода почв (31100 ± 1100 и 21600 ± 4200 мг С/кг почвы), чем участки с ягелевым покровом (2350 ± 710 мг С/кг почвы). Это связано с тем, что сфагновый покров в основном распространен на заболоченном участке, а ягелевый — на поверхности торфяника.

Для почв мониторинговой площадки доля лабильного углерода от общего составляет $3.50 \pm 0.60\%$.

В почвах торфяника лабильный углерод занимает $0.46 \pm 0.10\%$ от общего, широко варьируя от 0.09 до 1.32%. На заболоченном участке доля лабильного углерода от общего достигает 8.20%. Установлено, что в почвах мониторинговой площадки под ягелевым покровом доля лабильного углерода от общего до 2 раз меньше, чем в почвах под кустарничко-ягелевым покровом (0.47 ± 0.13 и $0.82 \pm 0.20\%$ соответственно).

Углерод микробной биомассы. Среднее содержание углерода микробной биомассы в верхней 15-сантиметровой толще почв мониторинговой площадки составляет 3300 ± 600 мг С/кг почвы. При этом в почвах торфяника оно более чем в 17 раз выше, чем на заболоченном участке (4260 ± 880 мг С/кг почвы и 240 ± 50 мг С/кг почвы соответственно). Содержание микробного углерода в почвах торфяника характеризуется высокой пространственной вариабельностью, его распределение ассиметрично, медиана смещена в сторону высоких значений.

Наибольшее среднее содержание микробного углерода в почвах торфяника характерно для микроповышений и ровной поверхности (5660 ± 850 и 6460 ± 1000 мг С/кг почвы соответственно), а наименьшее — для микропонижений (3280 ± 550 мг С/кг почвы). Отличие средних по элементам микрорельефа торфяника статистически значимо.

Содержание микробного углерода почв до 2 раз выше на участках торфяника с небольшой

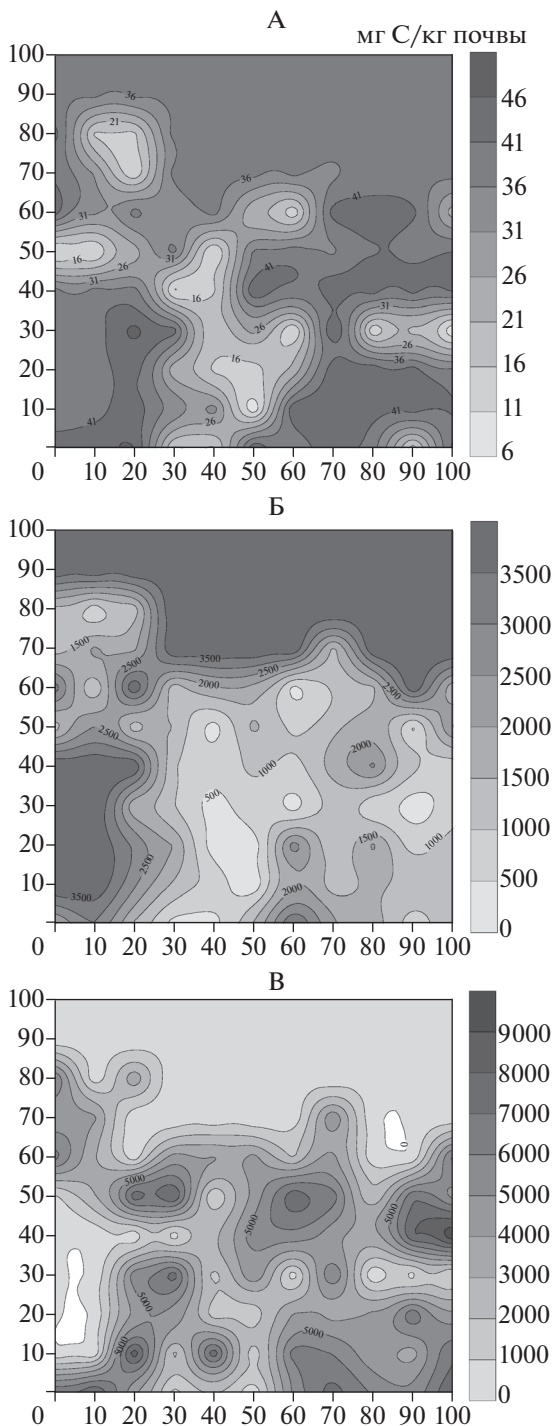


Рис. 4. Пространственное распределение содержания общего (А), лабильного (Б) и микробного (В) углерода в почвах мониторинговой площадки CALM (август, 2013); деление шкалы для лабильного углерода составляет 500 мг С/кг почвы, при этом наибольшая категория (>3500) равна 31100 мг С/кг почвы.

мощностью СТС (<1 м). Участки с ягелевым и кустарничково-ягелевым покровом характеризуются бóльшим содержанием микробного углерода

почв (6160 ± 900 и 4290 ± 900 мг С/кг почвы соответственно), чем участки со сфагновым покровом (1600 ± 800 мг С/кг почвы). Для почв мониторинговой площадки доля микробного углерода от общего составляет $1.00 \pm 0.19\%$. На заболоченном участке доля микробного углерода от общего составляет 0.06% . В почвах торфяника микробный углерод занимает $1.54 \pm 0.22\%$ от общего, широко варьируя от 0.09 до 3.30%.

ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание углерода в почвах. Проведенный анализ данных по распределению содержания общего, лабильного и микробного углерода почв свидетельствует о его высокой пространственной вариабельности. Особенно сильно для почв торфяника варьируют значения содержания лабильного и микробного углерода. Содержание общего углерода и азота характеризуется меньшей изменчивостью, но и для них коэффициенты вариации достаточно высоки. Почвы торфяника и заболоченного участка площадки CALM статистически значимо отличаются по содержанию общего, лабильного и микробного углерода.

Общий углерод. Полученные значения содержания общего углерода и азота почв сопоставимы с литературными данными [6, 17]. С помощью регрессионного анализа установлено, что содержание общего углерода в верхней органической толще почв торфяника зависит от влажности почвы:

$$C_{\text{общ}} = 2.33 + 0.49W, \quad r = 0.70, \quad P < 0.05, \quad (1)$$

где $C_{\text{общ}}$ – содержание общего углерода, %; W – влажность, %.

Взаимосвязь содержания общего углерода с влажностью почвы может быть обоснована характером поверхностного горизонта.

Лабильный углерод. Лабильная часть органического вещества почвы наиболее значима для поддержания микробной активности и является чувствительным индикатором ранних изменений количества и качества органического вещества под действием природных и антропогенных факторов [22].

В почвах торфяника мониторинговой площадки доля микробного углерода от общего в 3 раза больше доли лабильного углерода. При этом для заболоченного участка характерна обратная зависимость: доля лабильного углерода от общего в сотни раз превышает долю микробного углерода. Это может быть связано с высоким содержанием лабильных форм углерода и ингибированием микробной микрофлоры в условиях повышенной влажности заболоченного участка. Для почв торфяника характерны более благоприятные условия для микробной активности, но при этом происхо-

дит вынос лабильных форм углерода почвенными растворами и аккумуляция их на заболоченном участке. Торфяные горизонты торфяно-криоземов и торфяно-глееземов характеризуются большим содержанием лабильного углерода, чем органоминеральные горизонты криоземов и глееземов.

Для почв торфяника установлена статистически значимая связь содержания лабильного углерода в верхней органогенной толще с содержанием общего углерода, влажностью почвы и гипсометрическим уровнем:

$$C_{\text{лаб}} = 456 + 30 C_{\text{общ}}, \quad r = 0.47, P < 0.05; \quad (2)$$

$$C_{\text{лаб}} = -254 + 28W, \quad r = 0.62, P < 0.05; \quad (3)$$

$$C_{\text{лаб}} = 2056 - 897h, \quad r = -0.38, P < 0.05; \quad (4)$$

где $C_{\text{лаб}}$ – содержание лабильного углерода, мг С/кг почвы; $C_{\text{общ}}$ – содержание общего углерода, %; W – влажность, %; h – гипсометрический уровень, м.

Углерод микробной биомассы. Известно, что около половины общего потока CO_2 из почв образуется за счет микробного дыхания. Углерод микробной биомассы – составная часть и индикатор состояния почвенного углерода, чувствительная к условиям среды [9, 16]. Анализ углерода микробной биомассы почв является необходимым при оценке особенностей функционирования почв. Полученные значения содержания углерода микробной биомассы почв сопоставимы с литературными данными для экосистем северной тайги и лесотундры [23, 25, 32].

Содержание углерода микробной биомассы в верхней 15-сантиметровой толще почв мониторинговой площадки характеризуется высокой пространственной вариабельностью. Низкое содержание микробного углерода на болотных участках может быть связано с ингибированием микробной микрофлоры даже при высоком содержании лабильного органического вещества.

Установлена статистически значимая связь содержания углерода микробной биомассы в верхней органогенной толще почв торфяника с содержанием общего углерода почв и влажностью почвы:

$$C_{\text{мик}} = 352 + 123C_{\text{общ}}, \quad r = 0.62, P < 0.05; \quad (5)$$

$$C_{\text{мик}} = -1481 + 97W, \quad r = 0.70, P < 0.05. \quad (6)$$

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

Дыхание почвы. Величина эмиссии CO_2 является интегральным показателем биологической активности почв и зависит от гидротермических условий, физических свойств субстрата, роста надземной и корневой массы, а также от особенностей трансформации органического материала [9].

На основе анализа данных по эмиссии CO_2 исследованные почвы, функционирующие на северной границе подзоны северной тайги, характеризуются низкой биологической активностью по сравнению с почвами других природных зон [16]. Исследованные плоско-бугристый торфяник и заболоченный участок характеризуются промежуточным значением эмиссии CO_2 по сравнению с другими биогеоценозами района исследования, которые отличаются по геокриологическим и гидротермическим условиям (лесная экосистема – 213 ± 17 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \text{ ч})$; крупнобугристый торфяник – 39 ± 15 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \text{ ч})$) [3]. Низкие значения эмиссии CO_2 почвами на мониторинговой площадке CALM, как и во всех экосистемах района исследования, определяются особенностями трансформации органического вещества, зависящими от гидротермических условий.

Почвы торфяника и заболоченного участка статистически значимо отличаются по эмиссии CO_2 и характеризуются высокой пространственной вариабельностью этого показателя.

Для показателя эмиссии CO_2 почв торфяника мониторинговой площадки CALM в августе 2014 г. характерно меньшее значение, чем в 2013 г. Это может быть связано с тем, что среднесуточная температура воздуха в течение 2 дней, включая день измерения, в 2013 существенно выше чем в 2014 (15.7 и 8.2°C соответственно). Заболоченный участок оказался менее чувствителен к изменению погодных условий, что проявилось в одинаковых значениях эмиссии CO_2 в дни измерения в разные годы.

Между эмиссией CO_2 (мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \text{ ч})$) почвы торфяника в августе 2013 г. и мощностью СТС (м) получено регрессионное уравнение (7) со значимым но очень низким коэффициентом корреляции:

$$\begin{aligned} \text{Эмиссия} &= 112 + 0.131\text{СТС}, \\ r &= 0.25, \quad P < 0.05. \end{aligned} \quad (7)$$

Учитывая, что данное уравнение описывает только 6% общей вариабельности данных, следует заключить, что о зависимости эмиссии CO_2 почвы торфяника от мощности СТС говорить затруднительно.

По данным 2014 г. такая зависимость не выявлена. Для почв заболоченного участка не установлена статистически значимая связь эмиссии CO_2 с мощностью СТС ни для одного из годов наблюдения.

В связи с тем, что по данным регрессионного анализа не выявлена статистически значимая связь эмиссии CO_2 с другими параметрами почв мониторинговой площадки проведен углубленный анализ варьирования этого показателя. Для этого величи-

ны эмиссии CO_2 поделены на четыре категории (с шагом, равным $100 \text{ мг CO}_2/(\text{м}^2 \text{ ч})$) (табл. 3). Почвам с наибольшим содержанием углерода микробной биомассы соответствуют наибольшие значения эмиссии CO_2 ($>200 \text{ мг CO}_2/(\text{м}^2 \text{ ч})$). Зависимость эмиссии CO_2 от содержания микробного углерода почв объясняется тем, что основная масса углерода, связанного в органическом веществе торфа, освобождается в аэробных условиях гетеротрофными организмами, образующими главный поток CO_2 . При этом почвам с наибольшим содержанием лабильного углерода соответствуют наименьшие значения эмиссии CO_2 ($<200 \text{ мг CO}_2/(\text{м}^2 \text{ ч})$). Не выявлено общих закономерностей в распределение общего углерода почвы и эмиссии CO_2 .

Почвам с наибольшей мощностью СТС соответствуют наибольшие значения эмиссии CO_2 . Это может быть связано с повышенной микробиологической активностью в верхних слоях почвы за счет лучших гидротермических условий (удаляющегося фронта низких температур и повышенной влажности). Следовательно, при увеличении глубины сезонного протаивания увеличивается биологическая активность почв.

Установленная связь эмиссии CO_2 почв с мощностью СТС объясняет необходимость оценки пространственной неоднородности мощности СТС как значимого фактора, определяющего региональные выбросы CO_2 . Можно заключить, что недоучет пространственной неоднородности геофизиологических условий на территориях распространения ММП может привести к существенным искажениям оценок суммарных потоков CO_2 .

ВЫВОДЫ

1. Почвы мониторинговой площадки CALM R1, расположенной на плоскобугристом торфянике и прилегающем заболоченном участке, в пик вегетационного сезона характеризуются низкими значениями эмиссии CO_2 и высокой пространственной вариабельностью (142 ± 21 и $127 \pm 17 \text{ мг CO}_2/(\text{м}^2 \text{ ч})$ в 2013 и 2014 гг. соответственно). Почвы торфяника и заболоченного участка статистически значимо отличаются по эмиссии CO_2 .

2. Установлена приуроченность низких значений эмиссии CO_2 к микроповышениям торфяника. Показано, что высокими значениями эмиссии ($>200 \text{ мг CO}_2/(\text{м}^2 \text{ ч})$) характеризуются почвы с наибольшим содержанием углерода микробной биомассы и наименьшим количеством лабильного углерода.

3. Верхние горизонты почв торфяника и заболоченного участка статистически значимо отличаются по содержанию общего, лабильного углерода и углерода микробной биомассы. Эти показатели в почвах торфяника характеризуются

высокой пространственной вариабельностью. Их пространственное распределение зависит от влажности почвы ($P < 0.05$, $r = 0.70$, 0.62 , 0.70 соответственно) и выраженности микрорельефа. Статистически значимая связь с величиной гипсометрического уровня установлена только для содержания лабильного углерода ($r = -0.38$, $P < 0.05$).

4. Почвы торфяника характеризуются высоким содержанием углерода микробной биомассы ($4260 \pm 880 \text{ мг C/кг почвы}$), но при этом низкими значениями эмиссии CO_2 ($158 \pm 23 \text{ мг CO}_2/(\text{м}^2 \text{ ч})$). Это объясняется особенностями структурной организации микробных сообществ криогенных почв, влиянием гидротермических условий, а также перераспределением потоков CO_2 в результате физических и физико-химических процессов в толще почвы.

Благодарность. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 15-34-50316 мол_нр; проект 13-04-01577-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобрик А.А., Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Москаленко Н.Г., Пономарева О.Е. Пространственное варьирование и взаимосвязь геофизиологических условий и гидротермических параметров почв плоскобугристых торфяников (CALM R1, Надым, Западная Сибирь) // Криосфера Земли. 2015. № 4. С. 31–38.
2. Васильевская В.Д., Иванов В.В., Богатырев Л.Г. Почвы севера Западной Сибири. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. 227 с.
3. Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Бобрик А.А., Москаленко Н.Г. Продуцирование диоксида углерода почвами северной тайги Западной Сибири (Надымский стационар) // Криосфера Земли. 2014. № 2. С. 66–71.
4. Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Бобрик А.А. Температурный режим северотаежных почв Западной Сибири в условиях островного распространения многолетнемерзлых пород // Почвоведение. 2015. № 12. С. 1462–1473. doi 10.7868/S0032180X15100032
5. ГОСТ 26262-84. Методы полевого определения глубины сезонного оттаивания. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1984.
6. Ефимов В.Н. Торфяные почвы и их плодородие. Л.: Агропромиздат, 1986. 264 с.
7. Карелин Д.В., Замолодчиков Д.Г. Углеродный обмен в криогенных экосистемах. М.: Наука, 2008. 344 с.
8. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
9. Кобак К.И. Биотические компоненты углеродного цикла. М.: Гидрометиздат, 1988. 248 с.
10. Комплексный мониторинг северотаежных геосистем Западной Сибири. Новосибирск: Гео, 2012. 207 с.
11. Макаров М.И., Шулева М.С., Малышева Т.И., Меньило О.В. Растворимость лабильных форм углерода и азота почв в K_2SO_4 разной концентрации //

- Почвоведение. 2013. № 4. С. 408–413. doi 10.7868/S0032180X13040096
12. Матышак Г.В. Особенности формирования почв Севера Западной Сибири в условиях криогенеза. Дис. ... канд. биол. н. М., 2009.
 13. Мельников Е.С., Васильев А.А., Лейбман М.О., Москаленко Н.Г. Динамика сезонноталого слоя в Западной Сибири // Криосфера Земли. 2005. № 2. С. 23–32.
 14. Москаленко Н.Г. Антропогенная динамика растительности равнин криолитозоны России. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 280 с.
 15. Москаленко Н.Г. Изменение криогенных ландшафтов северной тайги Западной Сибири в условиях меняющегося климата и техногенеза // Криосфера Земли. 2012. Т. 16. № 2. С. 38–42.
 16. Наумов А.В. Дыхание почвы: составляющие, экологические функции, географические закономерности. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 208 с.
 17. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И. Органическое вещество почв Российской Федерации. М.: Наука, 1996. 256 с.
 18. Павлов А.В., Москаленко Н.Г. Термический режим почвы на севере Западной Сибири // Криосфера Земли. 2001. Т. 5. № 2. С. 11–19.
 19. Смагин А.В. Газовая фаза почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 301 с.
 20. Честных О.В., Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И. Общие запасы биологического углерода и азота в почвах лесного фонда России // Лесоведение. 2004. № 4. С. 30–42
 21. 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. V. 17. P. 837–842. doi 10.1016/0038-0717(85)90144-0
 22. 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. doi 10.1016/S0016-7061(02)00370-1
 23. 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.
 24. Christiansen H.H. Active layer monitoring in two Greenlandic permafrost areas: Zackenberg and Disko Island // Danish J. Geography. 1999. P. 117–121.
 25. Fisk M.C., Ruether K.F., Yavitt J.B. Microbial activity and functional composition among northern peatland ecosystems // Soil Biol. Biochem. 2003. V. 35. P. 591–602.
 26. Hinkel K.M., Nelson F.E. Spatial and temporal patterns of active layer thickness at Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) sites in northern Alaska, 1995–2000 // J. Geophys. Res. V. 108(D2). P. 8168. 2003. doi 10.1029/2001JD000927
 27. Hugelius G., Tarnocai C., Broll G., Canadell J.G., Kuhry P., Swanson D.K. The Northern Circumpolar Soil Carbon Database: spatially distributed datasets of soil coverage and soil carbon storage in the northern permafrost regions // Earth Syst. Sci. Data. 2013. № 5. P. 3–13.
 28. Izrael Y.A., Pavlov A.V., Anoknin Y.A. Analysis of current and future climate and permafrost changes in the Russian arctic // Russian Meteorology and Hydrology. 1999. № 3. P. 10–17.
 29. Nixon F.M., Taylor A.E. Active layer monitoring in natural environments, Mackenzie Valley, Northwest Territories // Current Research, Geological Survey of Canada. 1994. P. 27–34.
 30. Oechel W.C., Hastings S.J., Vourlitis G., Jenkins M., Riechers G., Grulke N. Recent change of Arctic tundra ecosystems from a net carbon dioxide sink to a source // Nature. 1993. № 361. P. 520–523.
 31. Pablo M.A., Pamler W., Ramos M. CALM-DAT: an under develop data mining software for active layer and frozen ground monitoring sites // Book of Abstracts of EUCOP4 –4th European Conference on Permafrost. 2014. Évora, Portugal, P. 441–441.
 32. 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.
 33. Riveros-Iregui D.A., McGlynn B.L., Epstein H.E., Welsh D.L. Interpretation and evaluation of combined measurement techniques for soil CO₂ efflux: Discrete surface chambers and continuous soil CO₂ concentration probes // J. Geophys. Res. 2008. V. 113.
 34. Rodionov A., Flessa H., Grabe M., Kazansky O., Guggenberger G. Organic matter composition and potential trace gas production of permafrost soils in the forest tundra in northern Siberia // Geoderma. 2006. V. 135. P. 49–62. doi 10.1016/j.geoderma.2005.10.008
 35. Rodionov A., Flessa H., Grabe M., Kazansky O.A., Shishitova O., Guggenberger G. Organic carbon and total nitrogen variability in permafrost-affected soils in a forest tundra ecotone // Europ. J. Soil Sci. 2007. № 58. P. 1260–1272.
 36. Schaefer K., Lantuit H., Romanovsky V.E., Schuur Edward A.G., Witt R. The impact of the permafrost carbon feedback on global climate // Environ. Res. Lett. 2014. № 9. 085003. P. 9.
 37. 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.
 38. Streletskiy D., Brown J., Clow G. Permafrost – active layer observation on the North slope of Alaska // Book of Abstracts of EUCOP4 – 4th European Conference on Permafrost. 2014. Évora, Portugal, p. 434.
 39. Tarnocai C., Canadell J.G., Schuur E.A.G., Kuhry P., Mazhitova G., Zimov S. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region // Global Biogeochemical Cycles. 2009. V. 23. Iss. 2. GB2023. doi 10.1029/2008GB003327
 40. Vasiliev A.A., Leibman M.O., Moskalenko N.G. Active layer monitoring in West Siberia under the CALM II program // Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost, Fairbanks, Alaska. 2008. V. 2. P. 1815–1820.
 41. 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.
 42. <http://www.gwu.edu/~calm> Web Site for the Circumpolar Active Layer Monitoring Network-CALM: Long-Term Observations of the Climate-Active Layer-Permafrost System.

ЭМИССИЯ CO₂ И ЗАПАСЫ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ПОЧВАХ СЕВЕРОТАЕЖНЫХ ЭКОСИСТЕМ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

© 2018 г. А. А. Бобрик^{1,*}, И. М. Рыжова¹, О. Ю. Гончарова¹, Г. В. Матышак¹,
М. И. Макаров¹, Д. А. Волкер²

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1

²Университет Аляски Фербэнкс, США, Фербенкс, Сауз Чандалар Драйв

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

Поступила в редакцию 08.03.2017 г.

Результаты исследования биологической активности почв северотаежных экосистем Западной Сибири: автоморфных лесных, гидроморфных (олиготрофных болот), полугидроморфных (мерзлых плоскобугристых и крупнобугристых торфяников), основаны на статистическом анализе большого массива данных, полученных в течение пяти полевых сезонов (2011–2015 гг.). Статистически значимые различия средних величин эмиссии CO₂ почвами выявляются на экосистемном уровне. Эмиссия CO₂ из подзолов автоморфных лесных экосистем в пик вегетационного сезона (при варьировании от 205 ± 30 до 410 ± 40 мг CO₂/(м² ч)) статистически значимо выше, чем из почв полугидроморфных экосистем торфяников (при варьировании от 70 ± 20 до 116 ± 10 мг CO₂/(м² ч)). Значимым фактором, оказывающим влияние на разнообразие экосистем и биологическую активность почв северной тайги, является наличие и глубина залегания многолетнемерзлых пород. Почвы северотаежных экосистем статистически значимо отличаются по содержанию и запасам общего, лабильного и микробного углерода. Запасы лабильного и микробного углерода в органогенной толще подзола (10 см) составляют 0.19 и 0.66 т/га соответственно, в органогенной толще торфяно-криозема (40 см) – 1.24 и 3.20 т/га, а в торфяной олиготрофной почве (50 см) – 2.76 и 1.35 т/га. Почвы значимо отличаются по показателю доли микробного углерода от общего (C_{мик}/C_{общ}, %) и выстраиваются в ряд по увеличению ее значений: торфяная олиготрофная почва < торфяно-криозем < подзол.

Ключевые слова: сезонно талый слой, эмиссия CO₂, органическое вещество, запасы углерода, подзолы (Folic Podzols), торфяно-криоземы (Histic Oxyaquic Turbic Cryosol), торфяные олиготрофные деструктивные мерзлотные почвы (Murshic Hemic Cryic Histosols).

DOI: 10.7868/S0032180X18060035

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость исследования продукции CO₂ в связи с определяющими ее факторами стоит перед многими отечественными и зарубежными учеными. Основной тенденцией мировых исследований данной проблемы является моделирование сценариев глобального изменения климата с оценкой чувствительности этих моделей к разным параметрам, включающим как свойства почвы, так и гидротермические, биологические и другие факторы [39]. В связи с этим особое внимание уделяется количественной оценке запасов углерода в криогенных почвах и эмиссии углерода из них. Как правило, такие оценки основаны на материалах почвенных карт и немногочисленных баз данных [30, 37]. К сожалению, работы по вариабельности содержания почвенного углерода и его эмиссии внутри почвенных контуров редки [2, 3, 45]. В связи с тем, что потоки парниковых газов в болотах отличаются значительной

пространственной (на уровне зон, экосистем, местоположений) и временной (межгодичной, сезонной, суточной) вариабельностью, ее необходимо учитывать при составлении баз данных и математических моделей [31, 45]. В настоящее время проведена недостаточно исследований углеродного баланса заболоченных земель. Все результаты исследований, представленные в печати, чаще всего являются разовыми, и почти не встречаются многолетние мониторинговые наблюдения [22, 27, 39]. В отношении севера Западной Сибири подобных исследований совсем мало, несмотря на то, что данный регион характеризуется большими запасами торфа и высоким содержанием депонированного углерода [26].

Газообмен сибирских болот изучен относительно мало. Исследования эмиссии CO₂ и CH₄, начатые здесь в 1992 г., ограничены фактически несколькими болотными массивами, расположенными в подзоне южной тайги [5, 6, 14, 16, 26, 41]. Эмиссия парниковых газов в болотных экосистемах северной тайги

до последнего времени оставалась практически не изученной [3, 7, 9, 15, 22]. Отсутствие информации о потоках CO₂ и CH₄ из болот значительной части территории не позволяет объективно оценивать их вклад в глобальные процессы.

Цель работы – оценка закономерностей эмиссии CO₂ и содержания органического углерода почв на уровне основных типов экосистем северной тайги в различных геоэкологических условиях.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Район исследования расположен на севере Западной Сибири (Надымский район, Тюменская область, ЯНАО; 65°20' N, 72°55' E) на северной границе подзоны северной тайги, в краевой части третьей озерно-аллювиальной террасы р. Надым, на междуречье Хейгыяха–Левая Хетта [4, 21] (рис. 1). Изучаемый регион находится в центре обширной Обь-Надым-Пур-Тазовской равнины. Рельеф равнины, имеющий абсолютные высоты 30–40 м, плоский и пологоволнистый, осложненный скоплениями бугров и гряд многолетнего пучения. Приречные слаборасчлененные части равнины покрыты лесом, для центральных нерасчлененных ее частей характерны большая заболоченность и множество озер [4, 21].

Территория относится к зоне прерывистого распространения многолетнемерзлых пород (ММП).

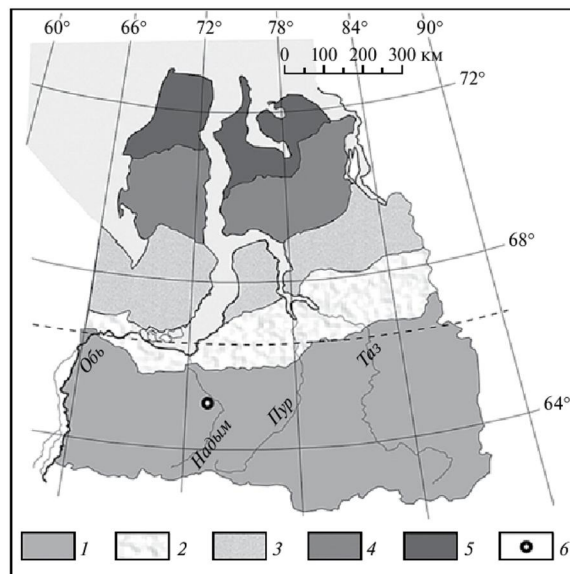


Рис. 1. Район исследований: 1 – северная тайга, 2 – лесотундра, 3 – южная тундра, 4 – типичная тундра; 5 – арктическая тундра; 6 – Надымский стационар.

Острова ММП, занимающие до 50% площади, приурочены к торфяникам, торфяным болотам и буграм пучения [20, 24]. В целом для района исследования характерны суровые климатические условия: продолжительный зимний период, низкие среднегодовые температуры воздуха (–5 °С), температура наиболее холодного месяца варьирует от –10 до –25 °С, сумма активных температур более 10 °С составляет 400–1250 °С, количество осадков варьирует от 450 до 650 мм/год.

Характерной особенностью Западно-Сибирского региона является большая площадь торфяных болот, которая достигает 42% от общей площади болот России [17] с содержанием 42.3 млрд т углерода, что составляет 36% от депонированного углерода России [13]. На севере Западной Сибири формирование торфяных залежей происходило очень медленно на фоне наличия многолетней мерзлоты при ограниченных тепловых ресурсах климата.

Объекты исследования. В подзоне северной тайги широко распространены разновозрастные экосистемы, характеризующиеся различной степенью проявления криогенеза. Экосистемы территории четко подразделяются на три основных типа, отличающихся по степени гидроморфизма и наличию ММП (рис. 2). Это автоморфные лесные экосистемы, где многолетнемерзлые породы отсутствуют; гидроморфные экосистемы, представленные собственными олиготрофными болотами; и полугидроморфные экосистемы – специфические варианты мерзлых плоскобугристых и крупнобугристых торфяников с расположением ММП в пределах 1–2 м [4, 19].

В автоморфных лесных экосистемах (65°18'52.8" N, 72°52'54.2" E), представленных кочковато-западными сосняками лишайниковыми, наиболее распространены подзолы глеевые иллювиально-железистые супесчаные (Gleyic Folic Albic Podzols (Siltic)). На плоскобугристых торфяниках (65°18'54.4" N, 72°52'10.0" E) наиболее распространены торфяно-криоземы потечногумусовые супесчано-легкосуглинистые (Histic Oxyaquic Turbic Cryosol (Siltic)). Для крупнобугристых торфяников, приподнятых на высоту от 3 до 10 м над уровнем болотных массивов, наиболее характерны торфяные олиготрофные деструктивные мерзлотные почвы (рис. 3). Гидроморфные экосистемы (65°18' N, 72°52' E), представленные переувлажненным олиготрофным сфагновым болотом и пушицево-осоково-моховыми сообществами мочажин, характеризуются преобладанием торфяных олиготрофных типичных почв (Hemic Histosol) [19].

Согласно почвенно-географическому районированию [12], этот район относится к Нижнеобской

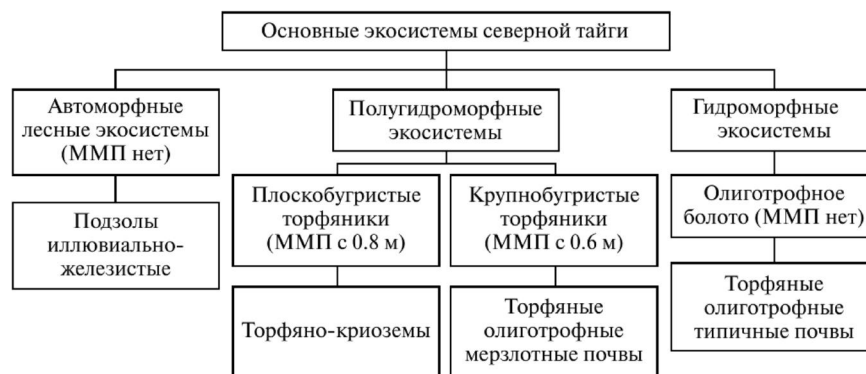


Рис. 2. Основные экосистемы и почвы северотаежной зоны.

провинции фации холодных длительно промерзающих почв подзоны глееподзолистых почв и подзолов северной тайги Европейско-Западно-Сибирской таежно-лесной области бореального пояса.

По данным нивелирной съемки, на изученной территории превышение максимальной отметки над минимальной составляет 3.00 м. Олиготрофное болото занимает самую низкую позицию в рельефе и характеризуется статистически значимо меньшим значением относительных высот местности (0.23 ± 0.10 м). Для лесных экосистем характерно небольшое значение превышений высот (0.50 ± 0.10 м). Обе описанные выше экосистемы характеризуются отсутствием многолетнемерзлых пород в почвенном профиле. Для крупнобугристых торфяников отмечено наибольшее значение превышения высот. В среднем оно составляет (2.55 ± 0.20 м) и значительно варьирует от 1.90

до 3.00 м. Плоскобугристые торфяники занимают промежуточное положение, значения превышений высот варьируют от 0.30 до 1.20 м, составляя в среднем 0.73 ± 0.07 м. Средняя глубина залегания ММП на плоскобугристом и крупнобугристом торфяниках статистически значимо не отличается (0.80 ± 0.30 и 0.60 ± 0.10 м соответственно).

Полевые методы. Полевые исследования проводили в пик вегетационного сезона (в августе) в течение 4 полевых сезонов (продолжительностью 7–14 дней) 2010–2015 гг. В результате получены описания почв и растительности изучаемых экосистем, определены гипсометрический уровень (относительные высоты местности), мощность сезонно талого слоя. Режимные измерения эмиссии CO_2 проводили в пятикратной повторности на каждом объекте исследования ($n = 75$ в 2010, $n = 135$ в 2011, $n = 261$ в 2013, $n = 177$ в 2015 гг.).

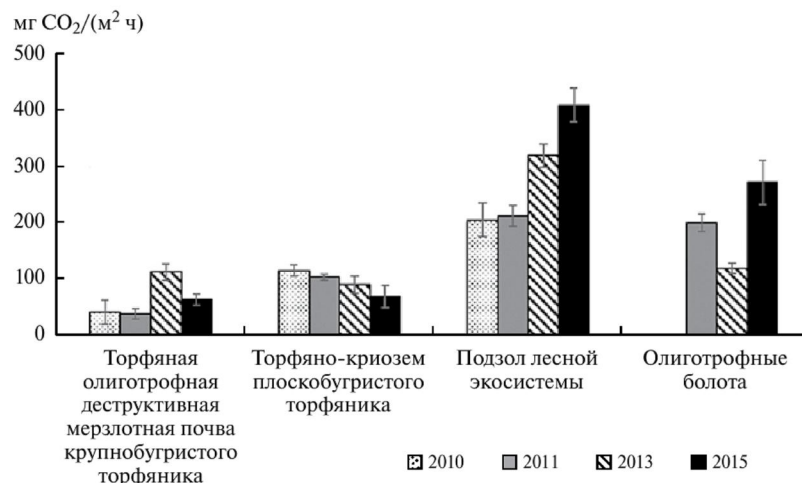


Рис. 3. Эмиссия CO_2 почвами экосистем северной тайги (дневное время, август), указан 95%-ный доверительный интервал среднего.

Определение мощности сезонно талого слоя в почвенном профиле проводили методом зондирования шупом, представляющим собой заостренный металлический стержень диаметром 8–10 мм и длиной 1.5–2 м в соответствии с ГОСТ 26262-2014.

Эмиссию CO₂ определяли методом закрытых статических камер в дневные часы с поверхности почвы с удаленным растительным покровом. Суть метода статических (закрытых) камер или в зарубежной интерпретации закрытых нестационарных непроточных камер (“closed non-steady-state non-through-flow chambers method”) заключается в измерении эмиссии газа в ограниченном объеме камеры в течение фиксированного времени [6, 27, 28, 32, 43, 44]. Концентрацию CO₂ измеряли на портативном газоанализаторе RMT DX6210. Портативный газоанализатор DX6210 фирмы RMT Ltd. снабжен инфракрасным датчиком и предназначен для определения содержания CO₂ в газовых пробах в диапазоне концентрации 0–2%, с разрешением 0.001% и точностью 0.002%. Для измерения эмиссии CO₂ с поверхности почв использовали камеры из нержавеющей стали закрытого типа, объемом 0.9 л. Камеры устанавливали на глубину 1–2 см в почву. Места установки камер готовили заранее (прорезали щель для установки и удаляли растительный покров). Пробы газа объемом 10 см³ отбирали с помощью шприцев-пробоотборников через резиновую пробку в камере сразу после ее установки и через 20 мин экспонирования. Перед каждым отбором пробы воздух в камере перемешивали трехкратным прокачиванием поршнем шприца. После этого отобранную пробу газа вводили в прибор и определяли концентрацию CO₂ в камере в начальный момент и в конце экспозиции.

В августе 2010 г. провели отбор образцов из горизонтов исследованных почв. Половину каждого образца хранили при естественной влажности и температуре 4 °C для микробиологических исследований (“свежие” образцы), другую половину высушивали для определения общих свойств почв.

Лабораторные методы. Определение содержания общего углерода и азота проводили на экспресс-анализаторе Vario EIII (Elementar). Содержание углерода лабильного органического вещества определяли в вытяжке 0.05 М K₂SO₄ на автоматическом анализаторе TOC-V_{CPN} (Shimadzu) в пятикратной повторности [34]. Стоит заметить, что в данном методе раствор K₂SO₄ низкой концентрации выступает не как экстрагент, а как агент коагуляции почвенных коллоидов, поэтому экстрагируемый углерод можно считать извлекаемым водой (WEOM) [18]. Влажность образцов почв исследовали с помощью весового измерителя влажности OHAUS MB-35.

Содержание углерода микробной биомассы определяли методом фумигации–экстракции в пятикратной повторности [18, 33, 47]. Компоненты микробных клеток, погибших в результате обработки почвы парами хлороформа, экстрагировали раствором соли. В качестве экстрагента применяли раствор K₂SO₄ в концентрации 0.05 М, а не традиционно используемой для подобного анализа концентрации 0.5 М [18]. Экстракцию проводили для контрольной (нефумигированной) и фумигированной частей пробы. В настоящей работе использовали фумигацию “свежих” образцов почвы при естественной влажности парами хлороформа, стабилизированного амиленом, без этанола в течение 1 сут. Содержание углерода в растворах исследовали на автоматическом анализаторе TOC-V_{CPN} (Shimadzu). Количество микробного углерода рассчитывали как $S_{\text{микр}} = F_c/k_c$, где F_c – разница содержания углерода в фумигированных и нефумигированных образцах, k_c – поправочный коэффициент, показывающий полноту экстракции углерода из почв [38]. Для органогенных почв (с содержанием органического углерода более 10%, подстилки, торфяных горизонтов) использовали поправочный коэффициент k_{ec} , равный 0.45, а для минеральных – 0.33 [38, 40, 46, 47].

Для анализа полученных результатов наблюдений и аналитических данных применяли следующие методы математической статистики: описательную статистику, 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 использовали программу Statistica 7.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Содержание общего углерода почв в органогенной толще всех исследованных почв варьирует значительно от 36.81 до 52.20% [19]. Среднее значение количества общего углерода в верхних горизонтах торфяно-криозема плоскобугристого торфяника составляет 39.31%. В минеральных горизонтах этот показатель равен 0.32%. Для подзола лесного участка характерны высокие значения содержания общего углерода в верхнем органогенном горизонте и низкие значения – в минеральных горизонтах. Для почв крупнобугристого торфяника характерно наибольшее среди изученных экосистем содержание общего углерода почв по всему профилю, среднее составило 51.90%. Установлено, что запасы общего углерода в органогенной толще подзола (10 см) составляют 32.7 т/га, в органогенной толще торфяно-криозема

Таблица 1. Содержание лабильного углерода и углерода микробной биомассы в почвах экосистем северной тайги (август, 2011)

Горизонт (мощность, см)	$C_{\text{лаб}}$	$C_{\text{мик}}$	$C_{\text{лаб}}$	$C_{\text{мик}}$	$\frac{C_{\text{мик}}}{C_{\text{общ}}}$
	мг С/кг почвы		запас, т/га		
Подзол лесного участка					
O1 (0–5)	3400 ± 190*	10140 ± 500	0.12	0.35	2.2
O2 (5–10)	1500 ± 145	6180 ± 310	0.08	0.31	1.4
Eg (10–15)	100 ± 10	80 ± 35	0.07	0.05	2.9
BFg, BCg (15–60)	80 ± 5	30 ± 10	0.50	0.19	3.0
Cg (60–90)	50 ± 5	20 ± 5	0.23	0.09	3.0
Торфяно-криозем плоскобугристого торфяника					
O (0–5)	2400 ± 200	8390 ± 450	0.06	0.21	2.0
T1 (5–15)	4600 ± 210	4530 ± 600	0.46	0.45	1.1
T2 (15–40)	1100 ± 90	3910 ± 230	0.72	2.54	0.9
CR ₁ (40–80)	100 ± 15	10 ± 1	0.61	0.06	0.1
Торфяная олиготрофная деструктивная крупнобугристого торфяника					
TOmd (0–20)	1900 ± 140	1590 ± 100	1.06	0.89	0.3
TO (20–35)	1800 ± 120	770 ± 130	0.78	0.33	0.2
TOte ₁ (35–50)	2100 ± 100	280 ± 75	0.91	0.12	0.1

* Приведен 95%-ный доверительный интервал среднего.

(40 см) – 299.8 т/га, а в торфяной олиготрофной почве (50 см) – 741.7 т/га. Изученные экосистемы статистически значимо отличаются по содержанию общего углерода.

Установлено, что химические свойства почв изученных экосистем в целом характерны для почв северотаежных экосистем [23].

Содержание лабильного и микробного органического углерода почв. Наибольшее содержание лабильного углерода характерно для подстилки подзола и двух верхних горизонтов торфяно-криозема (табл. 1). Почвы этих двух экосистем характеризуются увеличением доли лабильного углерода от общего углерода вниз по профилю, при этом для подзола эта зависимость выражена сильнее. Установлено, что запасы лабильного углерода в органической толще подзола (10 см) составляют 0.19 т/га, в органической толще торфяно-криозема (40 см) – 1.24 т/га, а в торфяной олиготрофной почве (50 см) – 2.76 т/га.

Все горизонты почв крупнобугристого торфяника характеризуются схожим по значению содержанием лабильного углерода. Среднее значение составило 1930 мг С/кг почвы. Для этих почв характерно наименьшее количество лабильного углерода по профилю, при наибольшем содержании общего углерода по сравнению с почвами других экосистем. Также для почв крупнобугристого

торфяника характерно незначительное уменьшение доли лабильного углерода от общего углерода с увеличением глубины.

Наибольшим содержанием углерода микробной биомассы характеризуется подстилка подзола и очес торфяно-криозема (8000–10000 мг С/кг почвы). Торфяные горизонты торфяно-криозема также характеризуются высоким содержанием углерода микробной биомассы (около 4000 мг С/кг почвы). Все торфяные горизонты крупнобугристого торфяника характеризуются низким (в несколько раз) по сравнению с органомными горизонтами других исследованных почв содержанием углерода микробной биомассы. Установлено, что исследованные экосистемы статистически значимо отличаются по содержанию микробного углерода.

В работе не приведены сведения о структуре запасов общего, лабильного и микробного углерода для торфяной олиготрофной типичной почвы олиготрофных болот из-за отсутствия возможности заложения почвенного разреза в данном типе экосистем.

Запасы углерода микробной биомассы в органической толще подзола (10 см) составляют 0.66 т/га, в органической толще торфяно-криозема (40 см) – 3.20 т/га, а в торфяной олиготрофной почве (50 см) – 1.35 т/га. При пересчете на 40 см

Таблица 2. Запасы общего, лабильного углерода и углерода микробной биомассы в слое 0–40 см почв экосистем северной тайги (август, 2011), т/га

Почва	C _{общ}	C _{лаб}	C _{мик}
Подзол лесной экосистемы	50.2	0.54	0.82
Торфяно-криозем плоскобугристого торфяника	299.8	1.24	3.20
Торфяная олиготрофная деструктивная крупнобугристого торфяника	589.5	2.15	1.27

слой почвы установлено, что запасы общего и лабильного углерода возрастают в ряду: подзол лесной экосистемы < торфяно-криозем плоскобугристого торфяника < торфяная олиготрофная почва крупнобугристого торфяника; а запасы углерода микробной биомассы возрастают в ряду: подзол < торфяная олиготрофная почва < торфяно-криозем (табл. 2).

Полученные в ходе исследования данные по содержанию углерода микробной биомассы сопоставимы с таковыми для органогенных горизонтов тундровых почв и являются высокими по сравнению с почвами других регионов [35, 36, 42]. Показатель запасов углерода почвы является более информативным, чем его содержание при сравнительной характеристике изучаемых почв.

Величина отношения C_{мик}/C_{общ} является удобным показателем доступности углерода для почвенных микроорганизмов [46], а также используется для сравнения почв с различным содержанием общего углерода, что особенно актуально для органогенных почв. Наиболее высокие величины отношения C_{мик}/C_{общ} характерны для современных горизонтов подстилки и очеса (подзол и торфяно-криозем) – около 2%. Для торфяных горизонтов торфяно-криозема эта величина колеблется около 1%. Низкие значения (0.1–0.3%) характерны для торфяных горизонтов торфяной олиготрофной деструктивной почвы. При сравнении с немногочисленными литературными данными, можно констатировать, что величины приведенного показателя низкие, а для торфяной деструктивной почвы – крайне низкие, что свидетельствует о небольшом содержании легкодоступного для микроорганизмов субстрата. Отмечено увеличение величины C_{мик}/C_{общ} в минеральных горизонтах подзола. Установлено, что почвы исследованных экосистем статистически значимо отличаются по показателю доли микробного углерода от общего (C_{мик}/C_{общ}, %) и выстраиваются в ряд по увеличению их значений: торфяная олиготрофная

почва < торфяно-криозем < подзол. Аналогичные тенденции установлены при анализе эмиссии CO₂.

Эмиссия CO₂ почв. В ходе исследований установлено, что эмиссия диоксида углерода почвами исследованных экосистем невысокая и составляла в среднем 121 ± 20, 139 ± 12, 161 ± 16 и 204 ± 25 мг CO₂/(м² ч) в августе 2010, 2011, 2013, 2015 гг. соответственно (коэффициент вариации 70–85%, n = 648 за 4 года измерений). Низкие значения эмиссии CO₂ свидетельствует о слабой биологической активности всех изученных почв, несмотря на то, что исследования проводили в пик вегетационного сезона. Но при этом различия между объектами наблюдаются (рис. 3).

Наибольшие для района исследования величины эмиссии CO₂ характерны для почв лесной (таежной) экосистемы, средние значения варьировали от 205 ± 30 (август, 2010) до 410 ± 40 мг CO₂/(м² ч) (август, 2015) (n = 170). Причиной этого является как отсутствие многолетнемерзлых пород в почвенном профиле, так и микроклиматические особенности, характерные для лесных сообществ. Почвы изученных экосистем, несмотря на близкое расположение, функционируют в различных температурных режимах. Согласно Димо [11], температурные режимы почв изученных ландшафтов относятся к двум типам: мерзлотному (очень холодный подтип) (торфяно-криозем и торфяная олиготрофная деструктивная) и длительно сезоннопромерзающему (холодный подтип) (подзол) [8]. Для подзола лесной экосистемы показатели суммы среднесуточных температур на поверхности и по глубинам, так же как минимальная и максимальная температура на глубине 20 см за период наблюдения существенно выше, чем на других участках [8]. Важным показателем температурного режима почв является глубина проникновения температур больше 10 °С. Она заметно возрастает в ряду (за период наблюдения 2011–2015 гг.): торфяно-криозем (10 см) < торфяная олиготрофная деструктивная (20 см) < подзол (40 см) [8]. Продолжительность периода с отрицательными температурами на глубине 20 см в три раза выше у криогенных почв, чем у подзола. Наблюдения показали, что теплообеспеченность лесных почв выше [1, 8].

Для почв лесной экосистемы велика доля дыхания корней в общей эмиссии CO₂. Как известно, под естественной растительностью она может достигать от 20 до 90% [22]. Доля корневого дыхания в общем потоке CO₂ из почв северотаежных экосистем достигает 80% [16]. Установлено, что для региона исследования, по нашим данным, доля корневого дыхания составляет 10–50% в зависимости от типа биогеоценоза [10]. Высокие значения эмиссии лесной экосистемы по сравнению с другими экосистемами изучаемой территории

обусловлены также оптимальными условиями увлажнения, то есть отсутствием переувлажнения, что не препятствует выходу газа в атмосферу и обеспечивает наличие аэробных условий. При переувлажнении биологическая активность почвы, то есть скорость деструкции в ней органического вещества, снижается, и скорость продукции ею углекислого газа уменьшается [29].

Почвы лесных экосистем – подзолы – характеризуются сравнительно малыми запасами органического углерода, но их существенно большая теплообеспеченность и оптимальная влажность, связанные с отсутствием современных многолетнемерзлых пород, обеспечивают высокую биологическую активность. Органическое вещество подзолов характеризуется высоким содержанием лабильных, легкодоступных форм органического вещества, максимальным содержанием углерода микробной биомассы, высокими скоростями деструкции, выражающимися в интенсивной эмиссии CO_2 .

Почвы торфяников, находящиеся под влиянием близкозалегающих ММП, отличаются по всем показателям как от почв лесных экосистем, так и между собой.

Плоскобугристый торфяник характеризуется низкими значениями эмиссии CO_2 , средние значения варьировали от 116 ± 10 (август, 2010) до 70 ± 20 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \text{ч})$ (август, 2015) ($n = 188$). В отличие от подзола лесного участка в почвах плоскобугристого торфяника отмечены меньшие значения эмиссии, что связано с различиями в условиях увлажнения и крайне низкой теплообеспеченностью верхней деятельной толщи торфяно-криозема. В связи с этим, почвы характеризуются низкой биологической активностью, даже при относительно высоком содержании лабильных форм органического углерода и углерода микробной биомассы.

Олиготрофные болота характеризуются невысокими значениями эмиссии CO_2 , средние значения варьировали значительно от 120 ± 10 (август, 2013) до 272 ± 40 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \text{ч})$ (август, 2015) ($n = 110$). В августе 2011 г. эмиссия CO_2 с поверхности олиготрофных болот значительно превышала значения этого показателя из почв плоскобугристых и крупнобугристых торфяников и статистически значимо не отличалась от эмиссии почв лесных экосистем. В августе 2013 г. величины эмиссии CO_2 с поверхности болот и почв плоскобугристых и крупнобугристых торфяников статистически значимо не отличались и были значительно меньше, чем из почв лесной экосистемы. В августе 2015 г. олиготрофные болота занимали промежуточное положение по эмиссии CO_2 между почвами торфяников и лесных экосистем. Причиной значительного пространственно-временного варьирования величин эмиссии CO_2 является сложный

характер функционирования болотных экосистем и специфические условия формирования эмиссионного потока в болотных водах.

Наименьшие величины эмиссии характерны для почв крупнобугристого торфяника, средние значения варьировали от 39 ± 10 (август, 2011) до 113 ± 15 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \text{ч})$ (август, 2013) ($n = 180$). Предположительно, причиной этого является близкое залегание ММП, разреженная растительность и, как следствие, низкое корневое дыхание, а также качество субстрата – это древний, практически полностью переработанный торф. Почвы крупнобугристого торфяника характеризуются максимальным запасом органического углерода в торфяной толще неоднородного состава (верховой и низинный торфа). Повышенное содержание общего углерода и азота, низкое содержание лабильных форм углерода и углерода микробной биомассы свидетельствуют о выраженной деградации торфа и дефиците свежего органического вещества. Об этом также говорит крайне низкая эмиссия CO_2 .

Высокие значения величин стандартного отклонения для средних значений эмиссии CO_2 почвами лесной экосистемы, плоскобугристого торфяника, крупнобугристого торфяника и олиготрофных болот (123, 81, 60 и 80 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \text{ч})$ соответственно), объясняются высокой пространственной вариабельностью показателя.

Установлено, что почвы изученных экосистем статистически значимо отличаются по величине эмиссии CO_2 (август 2010, 2011 гг.) и выстраиваются в ряд по увеличению ее значений: торфяная олиготрофная почва крупнобугристого торфяника < < торфяно-криозем плоскобугристого торфяника < < подзол лесной экосистемы.

Важно отметить, что во все периоды наблюдений, несмотря на различия в количестве осадков и температурных показателях в разные годы, эмиссия CO_2 из подзола автоморфной лесной экосистемы была в 3–6 раз выше, чем в полугидроморфных экосистемах торфяников. В 2010–2011 гг. эмиссия CO_2 из торфяно-криозема плоскобугристого торфяника была в 2.7 раза выше по сравнению с торфяной олиготрофной почвой крупнобугристого торфяника. В 2013 и 2015 гг. различия между ними оказались статистически незначимыми.

Гидроморфные экосистемы характеризуются большой вариабельностью показателя эмиссии CO_2 , что приводит к трудностям при сравнении с другими экосистемами.

Установлено, что эмиссия CO_2 почв лесной экосистемы имеет статистически значимую связь только с содержанием лабильного углерода почв ($r = 0.54$, $P < 0.05$). Не установлено статистически значимой связи эмиссии CO_2 почвами

крупнобугристого торфяника с изученными параметрами и характеристиками почв. Выявлена статистически значимая связь эмиссии CO₂ почв торфяника с мощностью сезонно талого слоя ($r = 0.25$, $P < 0.05$), что, вероятно, связано с высокой микробиологической активностью в верхнем слое почвы при глубоком залегании ММП за счет лучших гидротермических условий (удаляющегося фронта низких температур и пониженной влажности). Не установлено статистически значимой связи эмиссии CO₂ почвами плоскобугристого торфяника с другими изученными параметрами почв.

Установленная связь эмиссии CO₂ почв с мощностью сезонно талого слоя, которая является интегральным показателем теплообеспеченности территории, объясняет необходимость оценки ее пространственной неоднородности как значимого фактора, определяющего региональные выбросы CO₂. Можно заключить, что недоучет пространственной неоднородности геокриологических условий на территориях распространения ММП может привести к существенным искажениям оценок суммарных потоков CO₂ из почв.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований свойств почв и режимов их функционирования можно констатировать, что небольшая по площади территория в подзоне северной тайги представляет собой уникальный комплекс экосистем и почв. На основе анализа данных по эмиссии CO₂ исследованные почвы, функционирующие на северной границе подзоны северной тайги, характеризуются низкой биологической активностью по сравнению с почвами других природных зон [16, 22, 25].

Определяющим фактором, оказывающим наибольшее влияние на величины биологической активности почв и биоразнообразие экосистем района исследования, является наличие и близость залегания ММП, так как именно мерзлота определяет тип биогеоценоза, температурный режим, а, следовательно, и процессы трансформации органического вещества в подобных экосистемах.

Недоучет пространственной неоднородности свойств почв и особенностей режимов их функционирования в районе прерывистого и сплошного распространения ММП может привести к существенным искажениям оценок суммарных потоков парниковых газов и созданных на их основе прогнозных моделей климатических изменений.

Благодарность. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 16-04-00808 А) и NASA LCLUC (Grant No.t NNX14AO90G).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобрик А.А., Гончарова О.Ю., Матышак Г.В. и др. Взаимосвязь геокриологических условий и гидротермических параметров почв плоскобугристых торфяников севера Западной Сибири (стационар Надым) // Криосфера Земли. 2015. Т. 19. № 4. С. 31–38.
2. 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.
3. Бобрик А.А., Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Рыжова И.М., Макаров М.И. Влияние геокриологических условий и свойств почв на пространственное варьирование эмиссии CO₂ почвами плоскобугристых болот островной криолитозоны Западной Сибири // Почвоведение. 2016. № 12. С. 1445–1456. doi: 10.7868/S0032180X1610004X
4. Васильевская В.Д., Иванов В.В., Богатырев Л.Г. Почвы севера Западной Сибири. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. 227 с.
5. Глаголев М.В., Головацкая Е.А., Шнырев Н.А. Эмиссия парниковых газов на территории Западной Сибири // Сибирский экологический журнал. 2007. № 2. С. 197–210.
6. Глаголев М.В., Клепцова И.Е., Казанцев В.С., Филипов И.В., Максютов Ш.Ш. Эмиссия метана из болотных ландшафтов тундры западной Сибири // Вестник ТГПУ. 2010. Вып. 3(93). С. 78–86.
7. Гончарова О.Ю., Бобрик А.А., Матышак Г.В., Макаров М.И. Роль почвенного покрова в сохранении структурной и функциональной целостности северо-таежных экосистем Западной Сибири // Сибирский экологический журнал. 2016. № 1. С. 3–12.
8. Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Бобрик А.А. Температурный режим северо-таежных почв Западной Сибири в условиях островного распространения многолетне-мерзлых пород // Почвоведение. 2015. № 12. С. 1462–1473. doi: 10.7868/S0032180X15100032
9. Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Бобрик А.А., Москаленко Н.Г. Продуцирование диоксида углерода почвами северной тайги Западной Сибири (Надымский стационар) // Криосфера Земли. 2014. № 2. С. 66–71.
10. Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Бобрик А.А., Удовенко М.М., Сефилян А.Р. Методические подходы к полевому определению вклада корневого и микробного дыхания в эмиссию CO₂ почвами криолитозоны // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2018. № 1. С. 46–51.
11. Димо В.Н. Тепловой режим почв СССР. М.: Колос, 1972. 360 с.
12. Добровольский Г.В., Урусевская И.С. География почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004. 460 с.
13. Ефремов С.П., Ефремова Т.Т., Мелентьева Н.В. Запасы углерода в экосистемах болот // Углерод в экосистемах лесов и болот России / Под ред. В.А. Алексева, Р.А. Бердси. Красноярск, 1994. С. 128–139.
14. Инишева Л.И., Сергеева М.А. Условия образования и эмиссия метана в олиготрофных ландшафтах Васюганского болота // Вестник ТГПУ. Естественные и точные науки. 2006. Вып. 6 (57). С. 54–59.

15. *Инишева Л.И., Сергеева М.А., Смирнов О.Н.* Депонирование и эмиссия углерода болотами Западной Сибири // Научный диалог. Естественные науки и экология. 2012. Вып. 7. С. 61–74.
16. *Курганова И.Н.* Эмиссия и баланс диоксида углерода в наземных экосистемах России. Автореф. дис. ... докт. биол. наук. М., 2010, 50 с.
17. *Лисс О.Л., Абрамова Л.И., Аветов Н.А., Березина Н.А., Инишева Л.И., Курнишкова Т.В., Служка З.А., Толпышева Т.Ю., Шведчикова Н.К.* Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение. Тула: Гриф и К°, 2001. 584 с.
18. *Макаров М.И., Шулева М.С., Малышева Т.И., Меняйло О.В.* Растворимость лабильных форм углерода и азота почв в K₂SO₄ разной концентрации // Почвоведение. 2013. № 4. С. 408–413. doi:10.7868/S0032180X13040096
19. *Матышак Г.В., Богатырев Л.Г., Гончарова О.Ю., Бобрик А.А.* Особенности развития почв гидроморфных экосистем северной тайги Западной Сибири в условиях криогенеза // Почвоведение. 2017. № 10. С. 1155–1164. doi: 10.7868/S0032180X17100069
20. *Мельников Е.С., Васильев А.А., Лейбман М.О., Москаленко Н.Г.* Динамика сезонного слоя в Западной Сибири // Криосфера Земли. 2005. № 2. С. 23–32.
21. *Москаленко Н.Г.* Антропогенная динамика растительности равнин криолитозоны России. Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1999. 280 с.
22. *Наумов А.В.* Дыхание почвы: составляющие, экологические функции, географические закономерности. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 208 с.
23. *Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И.* Органическое вещество почв Российской Федерации. М.: Наука, 1996. 256 с.
24. *Павлов А.В., Москаленко Н.Г.* Термический режим почвы на севере Западной Сибири // Криосфера Земли. 2001. Т. 5. № 2. С. 11–19.
25. *Семенов О.В., Ильященко 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.
26. *Сергеева М.А., Инишева Л.И.* Биохимические процессы в олиготрофных торфяных залежах Васюганского болота // Вестник ТГПУ. 2008. Вып. 4(78). С. 57–63.
27. *Смагин А.В.* Газовая фаза почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 301 с.
28. *Смагин А.В.* Газовая функция почв // Почвоведение. 2000. № 10. С. 1211–1223.
29. *Федоров-Давыдов Д.Г., Гиличинский Д.А.* Особенности динамики выделения CO₂ из мерзлотных почв // Дыхание почвы: Сб. науч. тр. НИЦБИ РАН. Пушино, 1993. С. 76–100.
30. *Честных О.В., Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И.* Общие запасы биологического углерода и азота в почвах лесного фонда России // Лесоведение. 2004. № 4. С. 30–42
31. *Юстен Х., Сирип А.* Влияние болот на круговорот углерода и климат // Тез. докл. междунар. научн. конф. Резервуары и потоки углерода в лесных и болотных экосистемах бореальной зоны. Сыктывкар, 2011. 124 с.
32. *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. V. 242. P. 587–597.
33. *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. doi: 10.1016/0038-0717(85)90144-0
34. *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. doi:10.1016/S0016-7061(02)00370-1
35. *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.
36. *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 Sci. Soc. Am. J. 1998. V. 62. P. 654–662.
37. *Hugelius G., Tarnocai C., Broll G., Canadell J.G., Kuhry P., Swanson D.K.* The Northern Circumpolar Soil Carbon Database: spatially distributed datasets of soil coverage and soil carbon storage in the northern permafrost regions // Earth Syst. Sci. Data. 2013. № 5. P. 3–13.
38. *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.
39. *Khvorostyanov D.V., Ciais P., Krinner G., et al.* Vulnerability of permafrost carbon to global warming. Part 2: sensitivity of permafrost carbon stock to global warming. Published online. 2008. P. 265–275.
40. *Martens R.* Current methods for measuring microbial biomass C in soil: Potentials and limitations // Biol. Fert. Soils. 1995. V. 19. P. 87–99.
41. *Panikov N.S., Sizova M.V., Zelenev V.V., Machov G.A., Naumov A.V., Gadzhiev I.M.* Methan and carbon dioxide emission from several Vasyugan wetlands: spatial and temporal flux variations // Ecological Chemistry. 1995. V. 4. № 1. P. 13–23.
42. *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.
43. *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.
44. *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. Geophys. Res. 2008. V. 113.
45. *Rodionov A., Flessa H., Grabe M., Kazansky O.A., Shibistova O., Guggenberger G.* Organic carbon and total nitrogen variability in permafrost-affected soils in a forest tundra ecotone // European J. Soil Sci. 2007. № 58. P. 1260–1272.
46. *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_{cc}-factor // Soil Biol. Biochem. 1990. V. 22. № 3. P. 301–307.
47. *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.