

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**¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, ф-т почвоведения,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; ann-bobrik@yandex.ru²Институт 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**¹Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science,1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; ann-bobrik@yandex.ru²Earth 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.

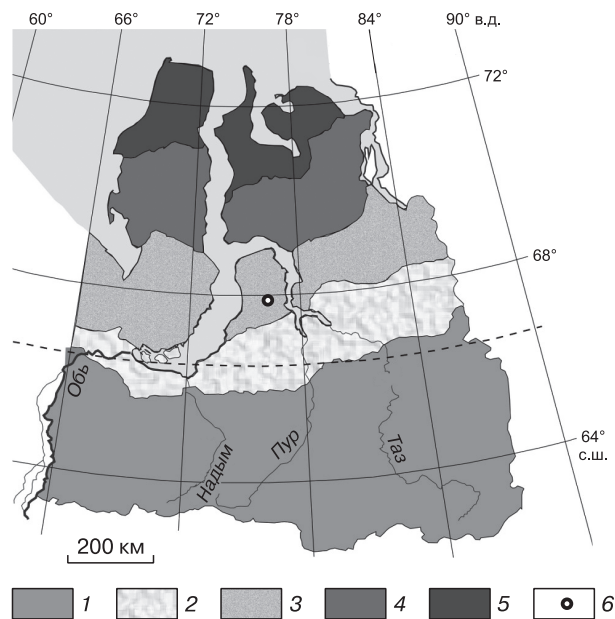


Рис. 1. Местоположение района исследований.

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 эрозийных 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 $C_{\text{микро}} = F_C/k_C$, 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*), багульниковом (*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-

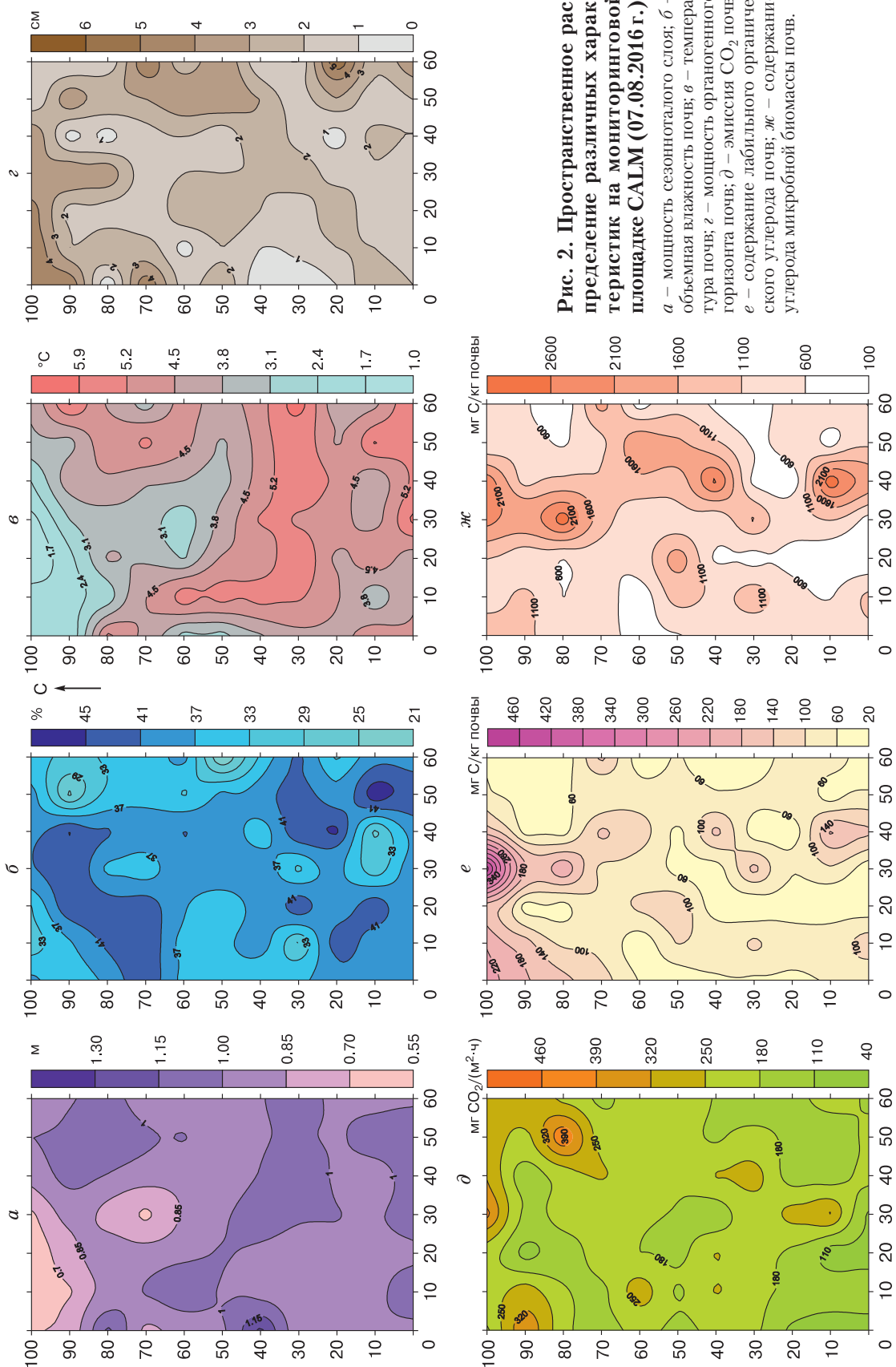


Рис. 2. Пространственное распределение различных характеристик на мониторинговой площадке САЛМ (07.08.2016 г.):

a – мощность сезонного слоя; *б* – объемная влажность почвы; *в* – температура почвы; *г* – мощность органического горизонта почвы; *д* – эмиссия CO₂ почв; *е* – содержание лабильного органического углерода почв; *жс* – 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:

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

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

Пространственное варьирование содержания C_{микр} 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 плоскобугристых 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 плоскобугристых 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., Гидрометеиздат, 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.*