

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 среднеразложившихся олиготрофных торфов, мощностью более 30 см, подстилаемых минеральными горизонтами разного типа. В лишайниковых редины маломощный оторфованный

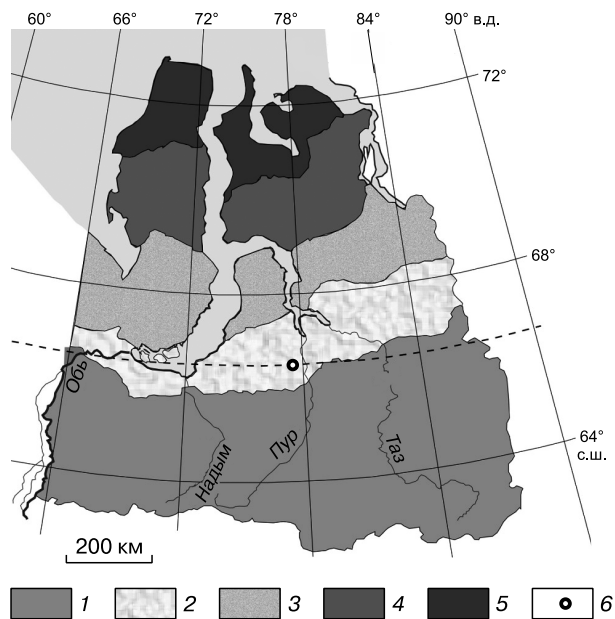


Рис. 1. Район исследований.

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-

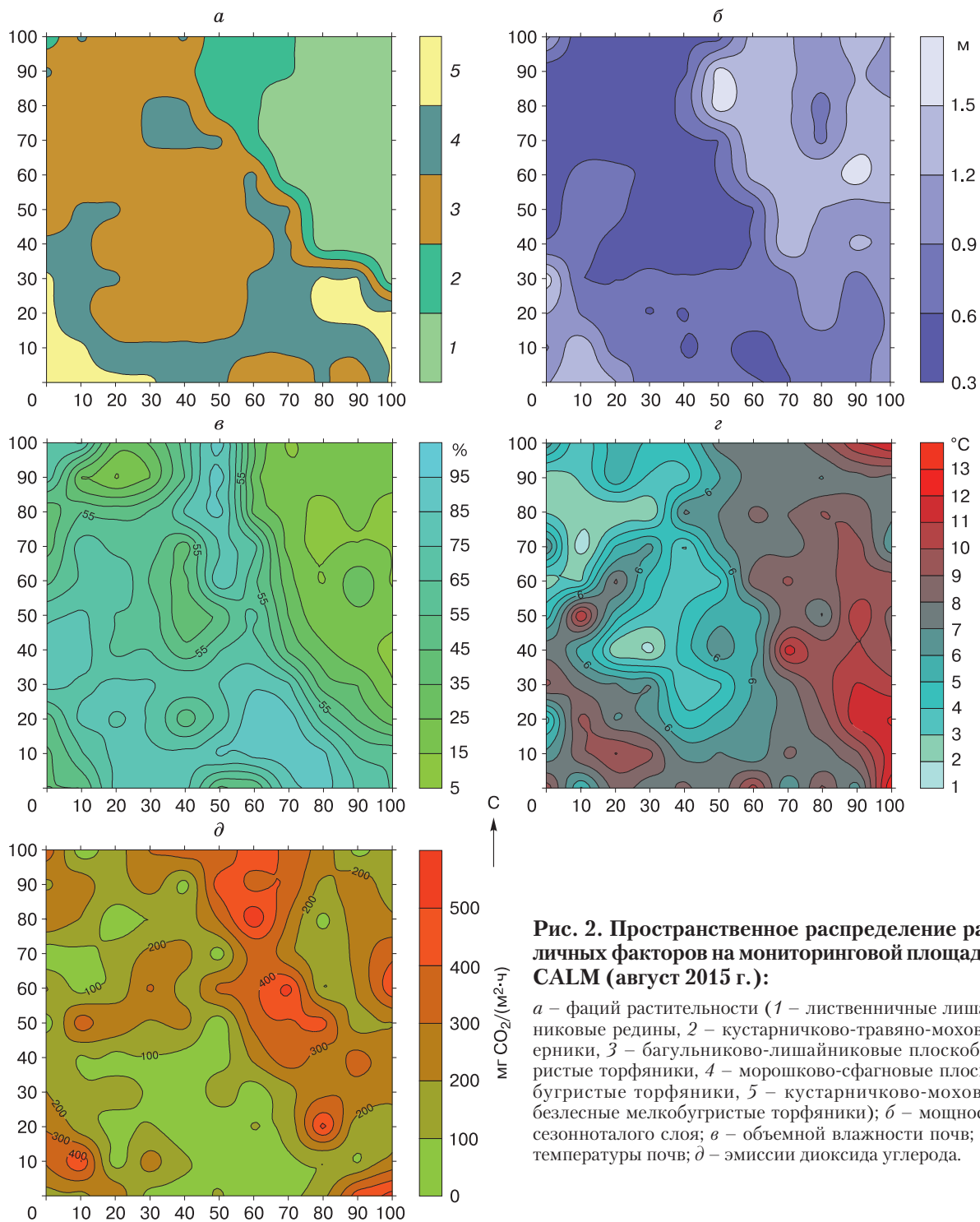


Рис. 2. Пространственное распределение различных факторов на мониторинговой площадке CALM (август 2015 г.):

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-

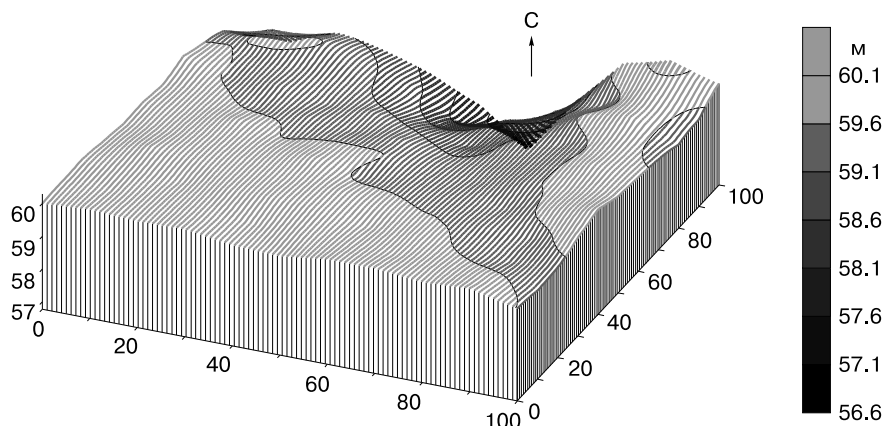


Рис. 3. Гипсометрическая характеристика мониторинговой площадки CALM (август 2015 г.).

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 ($202 \pm 142 \text{ мг CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, коэффициент вариации 73 %). Ерники характеризуются статистически значимо большей эмиссией диоксида углерода почв ($417 \pm 61 \text{ мг CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$) по сравнению с другими фациями.

3. Пространственное распределение эмиссии диоксида углерода в пик вегетационного сезона (август 2015 г.) на изученной территории определяется мощностью СТС ($r = 0.50$, $p\text{-level} < 0.05$), температурой ($r = 0.23$, $p\text{-level} < 0.05$) и объемной влажностью почвы ($r = -0.27$, $p\text{-level} < 0.05$), а также гипсометрическим уровнем ($r = -0.42$, $p\text{-level} < 0.05$), 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.*