НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ

Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 2, с. 66–71 http://www.izdatgeo.ru

ПАЛЕОКРИОГЕНЕЗ И ПОЧВООБРАЗОВАНИЕ

УДК 631.4 (574.4)

ПРОДУЦИРОВАНИЕ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА ПОЧВАМИ СЕВЕРНОЙ ТАЙГИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ (НАДЫМСКИЙ СТАЦИОНАР)

О.Ю. Гончарова, Г.В. Матышак, А.А. Бобрик, Н.Г. Москаленко*

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, ф-т почвоведения, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; goncholgaj@rambler.ru
** Институт криосферы Земли СО РАН, 625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия*

На основе результатов двухлетних полевых исследований показано, что для северотаежных почв Западной Сибири характерны невысокие значения продукции диоксида углерода, что свидетельствует об их низкой биологической активности. Величина эмиссии CO_2 в пик вегетационного сезона варьирует от (40 ± 21) и (108 ± 41) мг/(м^2·ч) на крупнобугристом и плоскобугристом торфяниках до (210 ± 68) мг/(м^2·ч) на лесном участке. Наиболее низкие значения эмиссии диоксида углерода и его концентраций внутри профиля характерны для почв с близким залеганием многолетнемерзлых пород и, как следствие, с низкими показателями температурного режима.

Западная Сибирь, эмиссия CO_2, *торфяники, криогенез, парниковые газы*

CARBON DIOXIDE PRODUCTION BY NORTHERN TAIGA SOILS OF WEST SIBERIA (NADYM SITE)

O.Yu. Goncharova, G.V. Matyshak, A.A. Bobrik, N.G. Moskalenko*

Lomonosov Moscow State University, Soil Science Department, 119991, Moscow, Leninskie Gory, 1, Russia; goncholgaj@rambler.ru
** Earth Cryosphere Institute, SB RAS, 625026, Tyumen, Malygina str., 86, Russia*

Two-year field research has revealed that soils of northern West Siberia are characterized by high values of carbon dioxide production, which indicates their low biological activity. The value of CO_2 emission in peak of a vegetative season varies from (40 ± 21) mg/(m^2·h) on the old and (108 ± 41) mg/(m^2·h) on the young frozen peatland to (210 ± 68) mg/(m^2·h) in the forest. The lowest values of carbon dioxide emissions and the concentration inside the profile are observed for soils with shallow permafrost and as a result, low temperature.

West Siberia, CO_2 *emission, peatland, cryogenesis, greenhouse gases*

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы интерес к криогенным почвам планеты заметно возрос, что связано с осознанием глобальных биосферных функций почвенного покрова. Наряду с традиционными проблемами загрязнения и нарушения почв и почвенного покрова Севера большое внимание уделяется проблеме углеродного баланса северных экосистем в связи с угрозой глобального изменения климата, а также возможной деградацией многолетнемерзлых пород [*Федовов-Давыдов, Гиличинский, 1993; Курганова, Тупе, 2003; Масягина и др., 2005; Шмелев и др., 2013; Billings, 1983; Christensen, 1992; Davidson et al., 2002; Zamolodchikov, 2003; Reth et al., 2005; Heimann, Reichstein, 2008*]. В связи с тем, что данные экосистемы функционируют в условиях жесткого дефицита тепла, они наиболее чувствительны к изменениям температурного режима.

Основная тенденция проблемы глобального изменения климата – моделирование его сценариев с оценкой чувствительности этих моделей к таким параметрам, как свойства почв, гидротермические, биологические свойства и др. [*Billings, 1983; Heimann, Reichstein, 2008*]. Недостаточно изученным является вопрос влияния криогенеза на процессы, связанные с продукцией углекислого газа в почвах и его поведением в почвенном профиле.

При рассмотрении вопросов о потоках углекислого газа необходимо разделять понятия: эмиссия CO_2 – процесс, характеризующий выделение

© О.Ю. Гончарова, Г.В. Матышак, А.А. Бобрик, Н.Г. Москаленко, 2014

CO_2 с поверхности почвы в атмосферу, и продукция CO_2 – образование этого газа в результате биогенных и абиогенных процессов в почве. Часто используют также понятие “дыхание почвы” – процесс выделения CO_2 и потребления кислорода почвой. Величина эмиссии CO_2 варьирует в почвах в пределах *n*(10–1000) мг/(м^2·ч). Продукция CO_2 в почве включает несколько составляющих: микробное разложение корневых выделений, корневое дыхание, микробное разложение органического вещества [*Davidson et al., 2002*], и является важным интегральным показателем биологической активности почв. Среди компонентов, принимающих участие в почвенном дыхании, максимальное значение имеют микроорганизмы, тогда как на долю корней приходится около трети общей продукции CO_2 [*Дыхание..., 1993; Кобак, 1988*]. Интенсивность дыхания и содержание CO_2 в почвенном воздухе зависят от гидротермических показателей, уровня грунтовых вод, физических свойств субстрата, от роста надземной и корневой массы, а также от особенностей трансформации органического материала. Некоторыми исследователями [*Смагин и др., 2010*] было показано, что нельзя отождествлять эмиссию газов из трехфазных биокосных систем с их биологической активностью и интерпретировать закономерности реакции процесса дыхания на изменения температуры и влажности с чисто биологических позиций. Почвенное дыхание характеризует, с одной стороны, совокупный метаболизм почвенных животных, микроорганизмов и подземных органов растений, а с другой – отражает особенности физических и физико-химических процессов в толще органоминерального субстрата [*Наумов, 2009*]. Наример, по некоторым оценкам, общая продукция CO_2 в гидроморфных почвах может в 1,2–1,5 раза превышать его поверхностную эмиссию в связи с аккумуляцией, перераспределением, боковым и вертикальным транспортом газа и его взаимодействием с водной и твердой фазами почвы [*Смагин, 2005*]. В современной литературе практически отсутствуют данные о влиянии многолетнемерзлых пород на интенсивность продукции CO_2 и о его дальнейшей судьбе в криогенных почвах.

Задачи настоящей работы: 1) оценка закономерностей продуцирования диоксида углерода почвами контрастных по геокриологическим условиям экосистем Западной Сибири; 2) выявление причин вариабельности данного показателя; 3) оценка влияния геокриологических условий на газовую функцию почв.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились на севере Западной Сибири (Надымский район, Тюменская область) на междуречье рек Хейгияха–Левая Хета. Важными чертами рассматриваемого региона являются его расположение на северной границе распространения северотаежных территорий, высокая обводненность и наличие островных многолетнемерзлых пород, распространенных локально под массивами торфяников, что обусловливает уникальность территории в плане сочетания и степени выраженности разномасштабных и разновременных криогенных процессов. Особенности территории позволяют выбрать объекты, резко различающиеся по геокриологическим условиям и расположенные на относительно небольшой территории.

Ландшафты территории резко контрастируют и подразделяются на два основных типа, различающихся по степени гидроморфизма и наличию многолетнемерзлых пород. Это автоморфные лесные ландшафты, где многолетняя мерзлота в настоящее время отсутствует, и гидроморфные ландшафты, представленные как собственно олиготрофными болотами, так и специфическими вариантами мерзлотного рельефа – плоско- и крупнобугристыми торфяниками с расположением многолетнемерзлых пород в пределах 1–2 м [*Москаленко, 2012*].

В качестве ключевых были выбраны три площадки мониторинга, специфические как в ботаническом, так и в почвенном и геокриологическом аспектах: сосняк (65°18′52,8″ с.ш., 72°52′54,2″ в.д.), плоскобугристый торфяник (65°18′54,4″ с.ш., 72°52′10,0″ в.д.), крупнобугристый торфяник (65°18′55,1″ с.ш., 72°52′33,9″ в.д.).

Лесной участок представлен кочковато-западинным сосняком лишайниковым. Растительный покров состоит преимущественно из *Pinus sibirica*, *Larix sibirica*, *Betula* sp. в верхнем ярусе; представителей семейства Ericaceae, а именно *Vaccinium uliginosum*, *Vaccinium myrtillus*, *Vaccinium vitis-idaea*, *Ledum* sp. – в среднем ярусе; *Polytrichum strictum*, *Cladonia rangiferina*, *Sphagnum* sp. – в нижнем. Почва, формирующаяся в условиях глубокого залегания многолетнемерзлых пород, была классифицирована как подзол иллювиально-железистый супесчаный [*Классификация..., 2004*]. Профиль подзола состоит из оторфованной подстилки мощностью около 10 см, фрагментарно выраженного осветленного опесчаненного элювиального горизонта (от 0 до 5 см), иллювиально-железистого супесчаного горизонта мощностью до 30 см, постепенно переходящего в песчаную породу неоднородной окраски – от серой до желтовато-бурой. Реакция среды изменяется от сильнокислой (3,4) в органогенном горизонте до кислой (4,5) в нижележащих. В органогенном горизонте содержание органического углерода достигает 45 %, в минеральной толще – около 1 %.

Растительность плоскобугристого торфяника представлена в напочвенном покрове – различны-

ми лишайниками и мхами (*Cladonia rangiferina*, *Cladonia stellaris*, *Cladonia sylvatica*, *Sphagnum* sp.), в кустарничковом ярусе – *Betula nana*, *Rubus chamaemorus*, *Ledum* sp., *Vaccinium uliginosum*, *Vaccinium myrtillus*, для травяного яруса наиболее характерны представители семейства Cyperaceae – *Eriophorum* sp., *Carex* sp. Мерзлые породы были вскрыты в среднем на 60 см в слое песка. Почва была классифицирована как торфяно-криозем потечно-гумусовый супесчано-легкосуглинистый. Профиль состоит из ягелевого очеса, торфяного горизонта, слаборазложенного в верхней части и среднеразложенного в нижней. В нижней части торфяного горизонта наблюдаются белесые опесчаненные прослои. Общая мощность торфяной толщи составляет около 40 см. Торф относится к верховому типу. Для него характерна степень разложения около 50 % и преобладание остатков *Sphagnum* sp. и корешков кустарничков семейства Ericaceae. Минеральная часть представлена сильнотурбированными супесчаными горизонтами неоднородной окраски – серой, белесой, коричневатой. Почва кислая, pH слабо варьирует по горизонтам от 4,2 в органической части до 5,0 в минеральной. Содержание органического углерода в торфяных горизонтах около 40 %, в минеральных не превышает 0,3–1,5 %. Зольность торфа составляет в среднем 9 %.

Крупнобугристый торфяник представляет собой мелкобугорковатую поверхность гряды из приподнятых над уровнем болота бугров. Для данного участка характерно отсутствие сплошного растительного покрова: встречаются значительные участки обнаженного торфа с растрескавшейся, нарушенной поверхностью. Растительность на заросших участках представлена *Ledum* sp., *Betula nana*, в понижениях – *Cladonia* sp. Мерзлые торфяные породы были вскрыты в среднем на 40 см.

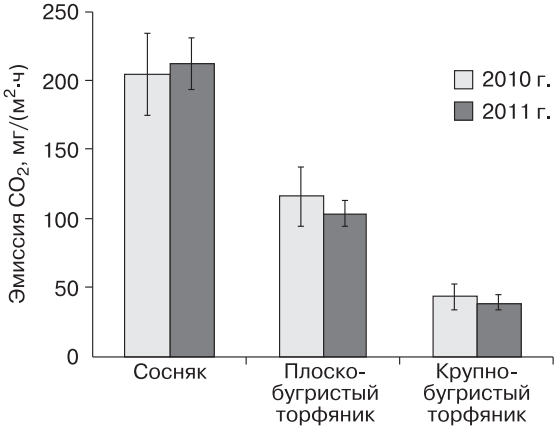

Рис. 1. Эмиссия углекислого газа с поверхности почв (август–сентябрь).

Вертикальный отрезок – доверительный интервал.

Почву диагностировали как торфяную олиготрофную деструктивную мерзлотную. Профиль состоит из серии торфяных горизонтов разного состава: от горизонта с преобладанием остатков *Betula nana* L. и корешков кустарничков семейства Ericaceae в верхней части профиля, что позволяет отнести его к верховому березовому типу, до горизонта с наличием остатков *Equisetum palustre* L., *Comarum palustre* L., *Betula pubescens* Ehrh., *Carex* sp. (в том числе *Carex lasiocarpa* Ehrh.) в нижней части профиля, что определяет тип торфа как низинный. Степень разложения торфа меняется вниз по профилю от 60 до 45 %. Почва кислая по всему профилю, pH изменяется от 4,0 до 4,5. Торф низкозольный с повышенным содержанием органического углерода (около 50 % по всему профилю). В торфе крупнобугристого торфяника также наблюдается повышенное содержание общего азота. Данные радиоуглеродного датирования свидетельствуют, что возраст торфа на данном типе ландшафта существенно больше возраста торфа плоскобугристого торфяника (5000 и 1500 лет соответственно) [*Матышак, 2009*]. Все эти данные указывают на реликтовый характер торфяника. В настоящий момент он, предположительно, находится в стадии разрушения.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

На участках проведены режимные температурные наблюдения, которые включали измерение температуры воздуха, поверхности почвы и горизонтов на глубинах 10, 20, 40, 60 см с интервалом 3 ч. Для измерений использованы логгеры Thermochron iButton™. Режимные измерения эмиссии углекислого газа с поверхности почвы проводились камерным методом [*Орлов и др., 1987; Reth et al., 2005*] в 5-кратной повторности, несколько раз в сутки в августе–сентябре 2010–2011 гг. (общая повторность более 100 для каждой площадки). Для измерения концентрации углекислого газа на разных глубинах в почву были помещены герметично закрытые трубки диаметром 1 см с перфорацией в нижней части. Отбор проб производили через резиновую пробку несколько раз в сутки. Измерения концентрации CO_2 осуществляли на портативном газоанализаторе GAZ ANALYZER DX6210. Статистическая обработка данных проведена в программе Statistica 6.0.

ЭМИССИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

В ходе исследований установлено, что эмиссия диоксида углерода почвами исследованных биогеоценозов невысокая и составляет в среднем для всех объектов (119 ± 84) мг/(м^2·ч). Полученные величины CO_2 существенно различаются по исследованным объектам (рис. 1): от (40 ± 21) мг/(м^2·ч) на крупнобугристом торфяни-

ке до (210 ± 68) мг/(м^2·ч) на лесном участке. Промежуточное положение занимает плоскобугристый торфяник, где эмиссия CO_2 составляет (108 ± 41) мг/(м^2·ч). Высокие величины стандартного отклонения объясняются, с одной стороны, высокой вариабельностью показателя по объектам и годам, а с другой – тем, что измерения проводились с учетом суточной динамики. Важно отметить, что по результатам статистической обработки объекты достоверно различаются по величине эмиссии углекислого газа и доверительные интервалы за два года измерений практически совпадают (см. рис. 1). Полученные показатели свидетельствуют о низкой биологической активности почв региона, несмотря на то, что исследования, как было отмечено выше, проводились в пик вегетационного сезона.

КОНЦЕНТРАЦИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В ПОЧВЕ

Величина эмиссии не полностью отражает биологическую активность почв, так как является функцией не только биологических процессов, происходящих в почве, а в большой степени физических процессов. Процессы диффузии газов связаны с влажностью почвы, характером порового пространства, температурой, климатическими показателями приземного воздуха и т. д. Оценка газовой функции только по величине эмиссии может быть занижена, так как часть газа аккумулируется и перераспределяется в почве [*Смагин, 2005*].

Для более детальной оценки продукции углекислого газа в почвах и сравнения объектов по данному показателю нами были измерены величины концентрации газа непосредственно в почве на разных глубинах по описанной выше методике. Одновременно с измерением концентрации CO_2 проводилось измерение температуры почвы на тех же глубинах.

Общей тенденцией для всех исследованных почв является постепенное увеличение концентрации углекислого газа с глубиной от 0,1 до 0,2–0,5 %, что связано с его стоком вниз по профилю. Данный тип кривой (колоколообразный) изменения концентрации углекислого газа характерен для большинства автоморфных почв.

Максимальными усредненными величинами концентраций CO_2 (0,18–0,50 % – в 2011 г.) характеризуется подзол лесного биогеоценоза, несмотря на малую мощность органогенного горизонта, где в основном генерируется газ. Концентрации углекислого газа в мерзлотных почвах сходны: от 0,1 % в верхних горизонтах до 0,2–0,3 % в надмерзлотных. Следует отметить, что наблюдается увеличение различий по данному показателю для исследованных объектов с глубиной. Так, на глубине 20 см различия в концентрации CO_2 составляют менее 0,1 %, а на 60 см достигают 0,3 % (рис. 2).

Почвы торфяников характеризуются существенно меньшими увеличениями концентрации CO_2 с глубиной по сравнению с лесной почвой. Авторы предполагают, что это связано с растворением углекислого газа в холодном растворе, образующемся при таянии сезонномерзлого слоя почвы. На уровне кровли многолетнемерзлых пород деятельность аэробной микрофлоры может быть ингибирована за счет низких температур, приближающихся к 0 °С, и повышенной влажности, несмотря на наличие необходимого для жизнедеятельности субстрата: в почве крупнобугристого торфяника – это торф, в почве плоскобугристого торфяника – органическое вещество, накопленное в надмерзлотной части профиля.

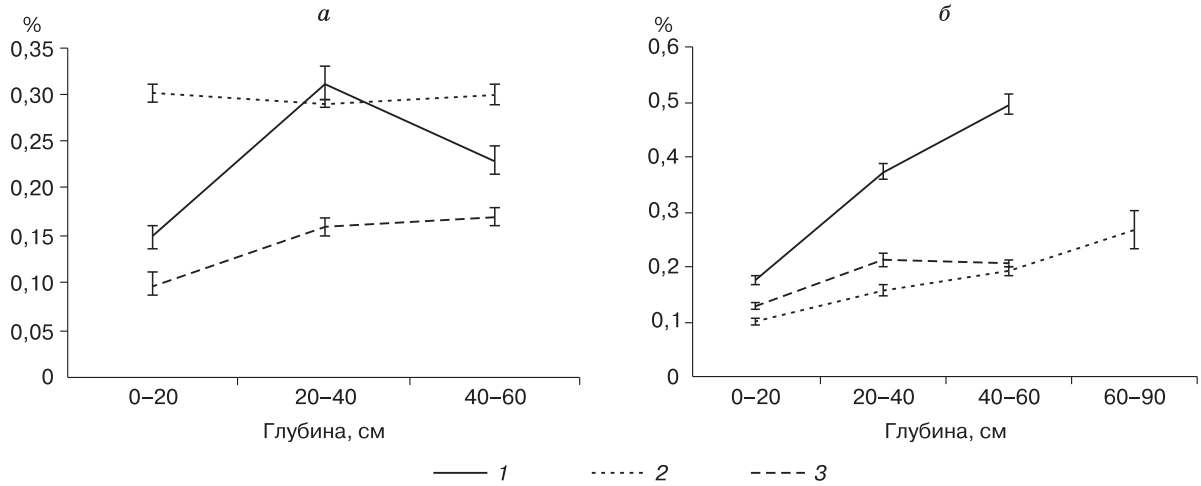

Рис. 2. Концентрация углекислого газа в почвенном воздухе:

а – 2010 г.; *б* – 2011 г.; *1* – сосняк; *2* – плоскобугристый торфяник; *3* – крупнобугристый торфяник. Вертикальный отрезок – доверительный интервал.

Таким образом, общая тенденция изменения концентрации углекислого газа в почвенных профилях объектов исследования, так же как и эмиссии, сохраняется. Особо следует отметить, что различия в эмиссии углекислого газа с поверхности лесной почвы и почв гидроморфных экосистем гораздо более существенны и достоверны, чем различия в концентрациях этого газа в почвенном воздухе (см. рис. 1, 2). Это связано, по-видимому, с определяющей ролью термического фактора внутри почвенного профиля и ведущей ролью многолетнемерзлых пород. Наличие и близость залегания многолетнемерзлых пород определяют как величины продукции углекислого газа в почвах, так и процессы его диффузии и иммобилизации в почвенном профиле.

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ПОЧВ

С целью оценки влияния глубины залегания многолетнемерзлых пород на величины продукции диоксида углерода был выполнен анализ температурных данных, полученных в августе 2010 и 2011 гг. Анализ кривых средних температур выявляет существенные различия лишь в нижних частях профилей почв исследованных участков (рис. 3). По мнению авторов, более показательным является представление данных в виде сумм температур на разных глубинах за исследованный период, а также минимальные и максимальные значения температур. Из приведенных в табл. 1 показателей следует, что максимальные различия среди исследованных объектов наблюдаются для участков с разными геокриологическими условиями. Наиболее “теплыми” являются почвы под лесной растительностью.

Причина этого состоит как в отсутствии многолетней мерзлоты, так и в микроклиматических особенностях лесных сообществ – приход тепла на поверхность лесных почв выше (сумма среднесуточных температур на поверхности). Если оценивать температуры на глубине 20 см, наиболее “холодными” для данного периода года можно назвать криоземы плоскобугристого торфяника. Низкие температуры на глубине 20 см объясняются минеральным характером почвенной массы, обладающим высокой теплопроводностью и повышенной по сравнению с другими почвами влажностью. Органогенный (торфяной) характер профиля почвы деградирующего торфяника обусловливает более высокие температуры на глубине 20 см и более низкие на глубине 40 см (близко к многолетнемерзлым породам).

Можно заключить, что температурный режим почв, безусловно, оказывает значительное и непосредственное влияние на величины продукции углекислого газа. Заметим также, что не установлено прямой зависимости концентрации углекислого газа в почвенном профиле от температуры на этой же глубине, что связано с определяющей ролью физических процессов газопереноса.

Интересно, что почва крупнобугристого торфяника, характеризующаяся самыми низкими величинами продукции CO_2 и близким залеганием многолетнемерзлых пород, хорошо прогревается на глубине 20 см. Очевидно, что на показатели продукции углекислого газа в данном случае оказывают влияние и другие факторы, в частности состав и возраст торфа.

Можно предположить, что почвы с близким залеганием кровли многолетнемерзлых пород (в исследованном районе с островным типом распространения мерзлоты это почвы гидроморфных ландшафтов) служат стоком углекислого газа, ко-

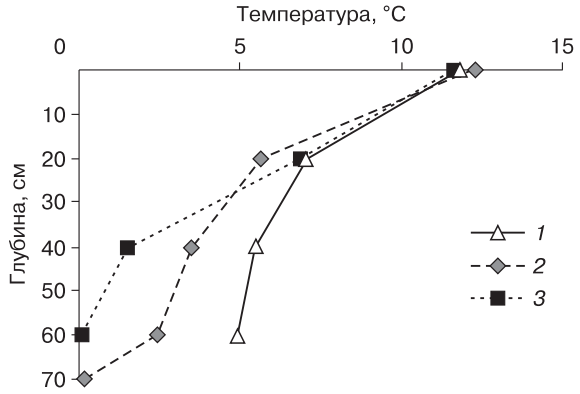

Рис. 3. Средние температуры по профилю почв в период наблюдения (2011 г.):

1 – сосняк; *2* – плоскобугристый торфяник; *3* – крупнобугристый торфяник.

Температурный режим почв района исследований

Объект	Сумма среднесуточных температур воздуха		Температура на глубине 20 см за период наблюдений, °C		Сумма среднесуточных температур почвы, °C		
					Глубина, см		
	>0 °C	>10 °C	макс.	мин.	0	20	40
Сосняк	65,1/34,4	65,1/0,0	7,5/6,1	6,5/5,5	59,2/37,1	34,6/28,8	27,6/26,2
Плоскобугристый торфяник	65,1/34,4	65,1/0,0	6,0/1,6	4,5/1,5	62,7/31,0	27,3/7,6	18,0/5,0
Крупнобугристый торфяник	65,1/34,4	65,1/0,0	7,5/3,6	5,5/2,9	56,5/31,0	33,0/16,3	7,7/2,3

Примечание. Период наблюдений – август 2011 г. (числитель), август 2010 г. (знаменатель). Суммы среднесуточных величин рассчитаны по данным за 5 сут в указанные периоды наблюдений.

торый фиксируется в почвенном профиле не только биологически (в виде запасов торфа), но и физически – в почвенном растворе и мерзлом слое почвы.

ВЫВОДЫ

1. Эмиссия диоксида углерода северотаежными почвами Западной Сибири низкая, в среднем составляет около 120 мг/(м^2·ч), что свидетельствует о низкой биологической активности почв.

2. Выявлены достоверные различия как в величинах эмиссии углекислого газа, так и в значениях его концентраций внутри профиля для почв различных биогеоценозов. Величина эмиссии CO_2 в пик вегетационного сезона варьирует от (40 ± 21) и (108 ± 41) мг/(м^2·ч) на крупнобугристом и плоскобугристом торфянике до (210 ± 68) мг/(м^2·ч) на лесном участке.

3. Показано, что наименьшие значения продукции углекислого газа характерны для почв с близким залеганием многолетнемерзлых пород и, как следствие, наиболее низкими показателями теплообеспеченности.

4. Близкое залегание кровли многолетнемерзлых пород не только существенно тормозит биологическую активность почв, но и физически снижает интенсивность потерь CO_2 из почвенного профиля.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 13-04-01577-а).

Литература

Дыхание почвы: Сб. науч. тр. НЦБИ РАН / Под ред. Г.А. Заварзина, В.Н. Кудеярова. Пущино, НЦБИ РАН, 1993, 144 с.

Классификация и диагностика почв России / Авторы 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., Гидрометеоиздат, 1988, 248 с.

Курганова И.Н., Типе Р. Влияние процессов замерзания–оттаивания на дыхательную активность почв // Почвоведение, 2003, № 9, с. 1095–1105.

Масягина О.В., Прокушин С.Г., Абаимов А.П. и др. Эмиссия CO_2 с поверхности напочвенного покрова в лиственничниках центральной Эвенкии // Лесоведение, 2005, № 6, с. 19–29.

Матышак Г.В. Особенности формирования почв севера Западной Сибири в условиях криогенеза: Дис. ... канд. биол. наук. М., 2009, 151 с.

Москаленко Н.Г. Изменения криогенных ландшафтов северной тайги Западной Сибири в условиях меняющегося климата и техногенеза // Криосфера Земли, 2012, т. XVI, № 2, с. 38–42.

Наумов А.В. Дыхание почвы: составляющие, экологические функции, географические закономерности. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2009, 208 с.

Орлов Д.С., Минько О.И., Аммосова Я.М. и др. Методы исследования газовой функции почвы // Современные физические и химические методы исследования почв. М., Изд-во Моск. ун-та, 1987, с. 118–156.

Смагин А.В. Газовая фаза почв / А.В. Смагин. М., Изд-во Моск. ун-та, 2005, 301 с.

Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Щерба Т.И., Шнырев Н.А. Абиотические факторы дыхания почв // Экол. вестн. Северного Кавказа, 2010, т. 6, № 1, с. 5–13.

Федоров-Давыдов Д.Г., Гиличинский Д.А. Особенности динамики выделения CO_2 из мерзлотных почв // Дыхание почвы: Сб. науч. тр. НЦБИ РАН. Пущино, 1993, с. 76–100.

Шмелев Д.Г., Краев Г.Н., Веремеева А.А., Ривкина Е.М. Содержание углерода в мерзлых отложениях северо-востока Якутии // Криосфера Земли, 2013, т. XVII, № 3, с. 50–59.

Billings W.D. Increasing atmospheric carbone dioxide: possible effects on arctic tundra // Oecologia, 1983, vol. 58, p. 286–289.

Christensen T. Seasonal emission of methane from the active layer of organic tundra soils – scale and controlling factors // Post-seminar Proc. (Pushino, Nov. 15–16, 1992). Pushino, 1992, p. 325–341.

Davidson E.A., Savage K., Bolstad P. et al. Belowground carbon allocation in forests estimated from litterfall and IRGA-based soil respiration measurements // Agricultural and Forest Meteorol., 2002, vol. 113, p. 39–51.

Heimann M., Reichstein M. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks // Nature, 2008, vol. 451, p. 289–292.

Reth S., Reichstein M., Falge E. The effect of soil water content, soil temperature, soil pH-value and the root mass on soil CO_2 efflux – A modified model // Plant and Soil, 2005, vol. 268, p. 21–33.

Zamolodchikov D.G., Karelin D.V., Ivaschenko A.I. et al. CO_2 flux measurements in Russian Far East tundra using eddy covariance and closed chamber techniques // Tellus, 2003, vol. 55B, No. 4, p. 879–892.

Поступила в редакцию
23 мая 2013 г.