

На правах рукописи



БОБРИК Анна Александровна

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЭМИССИИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ
ПОЧВАМИ СЕВЕРОТАЕЖНЫХ И ЛЕСОТУНДРОВЫХ
ЭКОСИСТЕМ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

Специальность 03.02.13 - ПОЧВОВЕДЕНИЕ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата биологических наук

Москва - 2016

Работа выполнена на кафедре общего почвоведения факультета почвоведения Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Научный руководитель: **Рыжова Ирина Михайловна**
доктор биологических наук, профессор кафедры общего почвоведения факультета почвоведения ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Официальные оппоненты: **Курганова Ирина Николаевна**
доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории почвенных циклов азота и углерода ФГБУН «Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН»

Головацкая Евгения Александровна
доктор биологических наук, старший научный сотрудник ФГБУН «Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН»

Ведущая организация: **ФГБУН «Институт географии РАН»**

Защита состоится «22» ноября 2016 года в 15 часов 30 минут в аудитории М-2 на заседании диссертационного совета Д 501.001.57 при ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» по адресу: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы д.1, стр. 12, МГУ имени М.В. Ломоносова, факультет почвоведения. С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» и на сайте факультета (<http://soil.msu.ru/nauka/uchenyj-sovet>).

Приглашаем Вас принять участие в обсуждении диссертации на заседании диссертационного совета. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба присылать по адресу: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы д.1, стр. 12, МГУ имени М.В. Ломоносова, факультет почвоведения.

Автореферат разослан « » 2016 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета:



Никифорова Алла Сергеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований

Взаимодействие криогенных экосистем с атмосферой в условиях глобального изменения климата является особенно важным для общей судьбы биосферы [Федоров-Давыдов, Гиличинский, 1993; Карелин, Замолотчиков, 2008; IPCC, 2007; Rodionov et al., 2007; Kuhry et al., 2013; Johnston et al., 2014; Ping et al., 2015]. Криогенные почвы занимают 15% площади всех почв, но при этом они хранят 50% от общего почвенного органического углерода в метровой толще и являются значимыми наземными пулами углерода на планете [Tarnocai et al., 2009]. В условиях изменяющегося климата северные экосистемы из стока органического углерода могут стать его источником [Oechel et al., 1993; Davidson, Janssens, 2006; Koven et al., 2011].

Ключом к пониманию глобального цикла углерода является оценка эмиссии CO_2 из криогенных почв, как интегрального показателя их биологической активности [Raich, Potter, 1995; Wang et al., 2002; Chris et al., 2005; Yue-Lin et al., 2008; Kelsey et al., 2012; Ping et al., 2015]. К сожалению, редко работы по изучению пространственной вариабельности эмиссии парниковых газов и содержания органического углерода в почвах бореальных и арктических экосистем, которые необходимы для надежных оценок потоков углерода [Замолотчиков и др., 2014; Rodionov et al., 2007; Kelsey et al., 2012]. Представляется, что недостаточно изученным остается вопрос непосредственного влияния криогенеза на биологическую активность почв [Матышак, 2009]. В связи с этим очевидна необходимость в количественной оценке эмиссии парниковых газов с учетом ее пространственной изменчивости, а также в изучении ее зависимости от факторов среды в различных условиях проявления криогенеза. Данная работа направлена на решение фундаментальных проблем почвоведения, связанных с оценкой потоков углерода в почвах криолитозоны и функционированием почв в условиях меняющегося климата.

Цель и задачи исследования

Целью настоящей работы является оценка закономерностей эмиссии парниковых газов почвами экосистем северной тайги и лесотундры в различных условиях проявления криогенеза.

Задачи:

1. Охарактеризовать факторы среды (растительность, рельеф, мощность сезонноталого слоя) и почвы (гидротермические свойства, содержание общего, лабильного и микробного углерода) основных типов экосистем северной тайги и лесотундры в Западной Сибири;
2. Определить величины эмиссии парниковых газов из почв изучаемых экосистем;
3. Дать сравнительную оценку эмиссии CO_2 из почв на уровне зон (северная тайга и лесотундра) и основных типов экосистем;

4. Определить пространственную вариабельность ландшафтных характеристик, почвенных свойств и эмиссии CO_2 на мониторинговых площадках программы CALM в лесотундре и северной тайге;
5. Исследовать зависимость ландшафтных факторов, гидротермических параметров почв, содержания в них общего, лабильного и микробного углерода и эмиссии CO_2 от микрорельефа (на примере плоскобугристых торфяников);
6. Определить зависимость эмиссии CO_2 от гидротермических и геокриологических параметров почв и содержания в них общего, лабильного и микробного углерода в различных условиях проявления криогенеза.

Научная новизна

Эмиссия парниковых газов из криогенных почв переходной зоны от прерывистого к сплошному распространению многолетнемерзлых пород в северной тайге и лесотундре Западной Сибири до настоящего времени оставалась мало изученной. Впервые определены эмиссия парниковых газов и содержание общего, лабильного и микробного углерода в почвах этого региона. Полученные данные послужили основой для сравнительной оценки эмиссии CO_2 из почв на уровне зон (северная тайга и лесотундра) и основных типов экосистем. Важным элементом новизны является исследование зависимости эмиссии CO_2 от ландшафтных факторов и физико-химических свойств почв в различных условиях проявления криогенеза методами математической статистики на основе большого фактического материала. Впервые в рамках международной программы циркумполярного мониторинга активного слоя (CALM), основной целью которой является наблюдение за реакцией многолетнемерзлых пород на изменение климата, изучалась эмиссия диоксида углерода из почв и содержание в них общего, лабильного и микробного углерода. В результате впервые получена оценка этих показателей и их пространственного варьирования в зависимости от микрорельефа.

Теоретическая и практическая значимость

Выводы диссертационной работы, сделанные на основе статистического анализа большого массива данных, полученных в течение пяти полевых сезонов, служат лучшему пониманию роли криогенного фактора в эмиссии парниковых газов. Количественная сравнительная характеристика эмиссии CO_2 из почв основных типов экосистем северной тайги и лесотундры в Западной Сибири позволяет получить более точные оценки суммарного потока парниковых газов для этого региона. Полученные данные и установленные зависимости эмиссии диоксида углерода из криогенных почв от условий среды могут быть использованы для экспериментального обеспечения и проверки региональных и глобальных моделей, описывающих взаимодействия углеродного цикла и климата. Они также могут быть использованы для оценки современного состояния и мониторинга криогенных почв Западной Сибири.

Апробация работы, гранты и публикации

Основные положения и результаты исследования были представлены автором в виде устных и стендовых докладов на 19 международных и всероссийских конференциях, включая “Ломоносов” (Москва, 2013, 2014, 2015), “The 4th European Conference on Permafrost” (Эвора, Португалия, 2014), 9th International Soil Science Congress (Сиде, Турция, 2014), “Arctic Change” (Оттава, Канада, 2014), “Polar Climate and Environmental change in Last Millennium (Торунь, Польша, 2015), “The 45th International Arctic Workshop” (Берген, Норвегия, 2015), “Arctic Frontiers: Industry and Environment” (Тромсе, Норвегия, 2016) и др. Исследования поддерживались грантами РФФИ, в которых автор выступал в качестве исполнителя (проекты 13-04-01577-а, 16-04-00808-а, 15-34-50316-мол-нр). Работа прошла апробацию на кафедре общего почвоведения. По материалам диссертации опубликовано 25 печатных работ, включая 6 статей в реферируемых журналах, входящих в список ВАК Минобрнауки РФ.

Личный вклад автора

Автору принадлежит подбор и обобщение литературного материала, участие в организации и проведении полевых работ (Июль-Август 2010 - 2015), измерение различных параметров почв и экосистем *in situ*, лабораторный анализ отобранных проб почв, статистическая обработка массива экспериментальных данных, обобщение и интерпретация полученных результатов, подготовка публикаций и настоящей рукописи.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, обзора литературы, описания объектов и методов исследования, изложения результатов и их обсуждения, заключения, выводов, списка литературы, приложения. Список литературы содержит 223 источника, из них 106 на иностранном языке. Работа изложена на 166 страницах машинописного текста, содержит 42 рисунка и 13 таблиц.

Благодарности

Автор глубоко признателен руководству кафедры общего почвоведения факультета почвоведения МГУ за предоставленную возможность проведения исследований по теме диссертации. Автор благодарит научного руководителя д.б.н., профессора И. М. Рыжову, д.б.н., профессора М.И. Макарова, к.б.н. М.С. Розанову, сотрудников института Криосферы Земли СО РАН д.г.м.н. Н.Г. Москаленко, к.г.н. О.Е. Пономареву, а также всех сотрудников и преподавателей факультета почвоведения МГУ за ценные советы и плодотворные консультации. Отдельную благодарность автор выражает к.б.н. О.Ю. Гончаровой и к.б.н. Г.В. Матышаку за помощь в проведении полевых и лабораторных исследований, подготовке публикаций, за профессиональную и дружескую поддержку, а также за открытие автору мира полярных исследований. Особую благодарность автор выражает своим родным и близким за моральную поддержку и заботу, а к.п.н. А.А. Анциферовой за неиссякаемый оптимизм и вдохновение.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

В литературном обзоре рассмотрены особенности эмиссии парниковых газов почвами высоких широт, обусловленные влиянием экологических факторов, геокриологических условий и содержанием активного органического вещества почв. Дана характеристика наиболее используемых в современных исследованиях методов определения углерода микробной биомассы и лабильного углерода почв.

Рассмотрены особенности исследования криогенных торфяных почв. Криогенные почвы являются ключевым компонентом криосферы и играют значимую роль в глобальном цикле углерода, функционировании биосферы и поддержании биоразнообразия [Макеев, 1977, 1981; Васильевская и др., 1986; Карелин, Замолодчиков, 2008; Матышак, 2009; Гончарова и др., 2016; Tarnocai et al., 2009; Schuur et al., 2009; Kuhry et al., 2013; Ping et al., 2015].

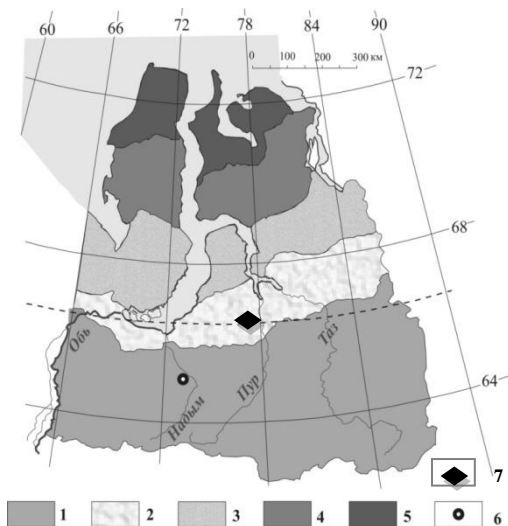
Около 40-60% территории Западно-Сибирской равнины, занимающей площадь более 2 млн. км², приходится на торфяные болота и болотные массивы [Нейштадт, 1971]. Исследования эмиссии диоксида углерода и метана, начатые здесь в 1992 г., были ограничены фактически несколькими болотными массивами, расположенными в подзоне южной тайги [Panikov et al., 1995; Инишева, Сергеева, 2006; Сергеева, Инишева, 2008; Глаголев и др., 2007, 2010; Курганова, 2010; Головацкая, 2013]. Эмиссия парниковых газов в болотных экосистемах северной тайги до последнего времени оставалась практически не изученной [Наумов, 2009; Инишева и др., 2012].

ГЛАВА 2. ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования по теме диссертационной работы проведены в экотонной зоне северной тайги и лесотундры Западной Сибири (рис. 1).

Исследования на северной границе **северной тайги** (Надымский район, Тюменская область, ЯНАО) проведены в краевой части III-ей озерно-аллювиальной террасы р. Надым, на междуречье Хейгияха — Левая Хетта. Территория относится к зоне прерывистого распространения многолетнемерзлых пород (ММП). В целом для района исследования характерны суровые климатические условия. Это регион сплошных водораздельных плоскобугристых болот [Шумилова, 1969]. Переход между северной тайгой и лесотундрой постепенный. Переходные зоны являются высококонтрастными по своей природе, им свойственна особая динамичность, разнообразие ландшафтов и почв, а также высокая чувствительность к колебаниям внешних факторов [Матышак, 2009].

Район исследования на южной границе **лесотундры** (Ново-Уренгойский район, Тюменская область, ЯНАО) расположен в пределах IV озерно-аллювиальной равнины Надым-Пуровской подпровинции морских и озерно-аллювиальных равнин. Район характеризуется суровыми климатическими условиями и сплошным распространением многолетнемерзлых пород.



Основные факторы, определяющие характер почвообразовательного процесса в исследованном регионе: избыточное увлажнение, недостаток тепла и близкое к поверхности залегание кровли ММП.

Рис. 1. Район исследований: 1 – северная тайга, 2 – лесотундра, 3 – южная тундра, 4 – типичная тундра; 5 – арктическая тундра; 6 – Надымский стационар; 7 – Ново-Уренгойский стационар.

ГЛАВА 3. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования являются почвы основных экосистем, расположенных в северной тайге (1-4) (рис. 2) и лесотундре (5-7) (рис.3):

1) Лесные экосистемы

Лесной участок (65°18'52.8" с.ш., 72°52'54.2" в.д.) представлен кочковато-западинным сосняком лишайниковым со слабовыраженным скрытополигональным рельефом. ММП отсутствуют. Наиболее распространены подзолы глеевые иллювиально-железистые супесчаные.

2) Плоскобугристые торфяники

Плоскобугристый торфяник (65°18'54.4" с.ш., 72°52'10.0" в.д.) представлен плоскими крупнокочковатыми основными поверхностями торфяников. Торфяник приподнят над общим уровнем верховых болот на 0,5–1,5 м. ММП расположены на глубинах в среднем 80 см. Наиболее распространены торфяно-криоземы потечногумусовые супесчано-легкосуглинистые.

3) Крупнобугристые торфяники

Крупнобугристый торфяник (65°18'55.1" с.ш., 72°52'33.9" в.д.) представляет собой мелкобугорковатую поверхность гряды из приподнятых над уровнем болота на 3-4 метра бугров. Для него характерны обширные оголенные пятна торфа, растрескивание и относительное иссушение поверхностных торфяных горизонтов, а также разреженная растительность. ММП расположены на глубинах в среднем 60 см в слое торфа. Наиболее распространены торфяные олиготрофные деструктивные мерзлотные почвы.

4) Олиготрофное болото

Заболоченные участки (65°18' с.ш., 72°52' в.д.) представляют переувлажненное олиготрофное сфагновое болото и пушицево-осоково-моховые сообщества мочажин, сформированные в понижении между плоскобугристыми торфяниками. Почвы относятся к торфяным олиготрофным типичным.



Рис.2. Исследуемые экосистемы и почвы северотаежной зоны

5) Лиственничные лишайниковые редины

Лиственничные лишайниковые редины ($66^{\circ}18'50.9''$ с.ш. $76^{\circ}54'13.8''$ в.д.) 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.

6) Ерники

Ерники ($66^{\circ}18'50.9''$ с.ш. $76^{\circ}54'13.8''$ в.д.) 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 типичных.

7) Плоскобугристые торфяники

Плоскобугристые торфяники ($66^{\circ}18'50.9''$ с.ш. $76^{\circ}54'13.8''$ в.д.) характеризуются багульниково-лишайниковым и морошково-сфагновым растительным покровом и комплексом торфяно-криоземов типичных и перегнойных. Также отдельно выделяются кустарничко-моховые безлесные мелкобугристые торфяники, характеризующиеся комплексом торфяно-глееземов типичных и криотурбированных. В ходе исследований было установлено, что плоскобугристые торфяники значительно отличаются по растительному покрову, и принято решение о разделении их на 3 группы: 1. Багульниково-лишайниковые плоскобугристые торфяники; 2. Морошково-сфагновые плоскобугристые торфяники; 3. Кустарничко-моховые безлесные мелкобугристые торфяники.

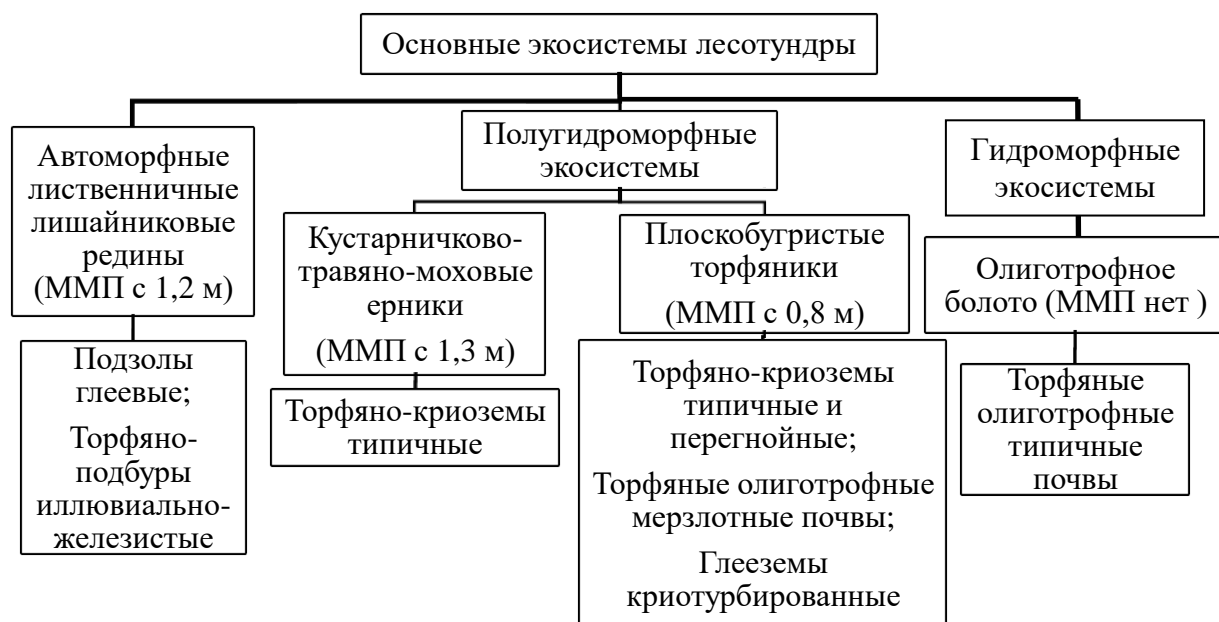


Рис.3. Исследуемые экосистемы и почвы лесотундровой зоны

Детальные исследования почв проведены в экосистемах, расположенных на мониторинговых площадках **CALM R1** и **R50** вблизи Надыского и Ново-Уренгойского стационаров соответственно. Основной целью международной программы циркумполярного мониторинга активного слоя (CALM) является наблюдение за реакцией многолетнемерзлых пород на изменение климата в течение длительного временного периода. На площадках CALM размером 100x100м по регулярной сетке через каждые 10 м заложены пикеты (всего 121 точка опробования) для длительных наблюдений за различными параметрами почв и экосистем.

ГЛАВА 4. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В полевых условиях проведено:

Определение **эмиссии диоксида углерода и метана** методом закрытых статических камер в дневные часы с поверхности почвы с удаленным растительным покровом [Смагин, 2005; Bekele et al., 2007]. Измерение концентрации CO_2 осуществлялось на портативном газоанализаторе RMT DX6210, снабженном инфракрасным датчиком. Измерение концентрации CH_4 в пробах осуществлялось в лабораториях факультета почвоведения МГУ с помощью газового хроматографа “Кристалл 5000” (Россия).

Проведены режимные наблюдения за **концентрацией диоксида углерода** в профиле почв методом мембранных пробоотборников. Для выполнения этой задачи в почву на глубины 20, 40, 60 см были помещены герметично закрытые с поверхности трубки диаметром 1 см [Смагин, 2005; Bekele et al., 2007].

Проведены режимные **наблюдения за температурой** почв с помощью программируемых микро-термодатчиков Thermochron iButton™ [Смагин, 2005]; определены **мощность торфа; объемная влажность** с помощью влагомера Spectrum TDR 100; **мощность сезонноталого слоя (СТС)**

методом щупового зондирования [ГОСТ 26262-84]. Также проведено морфологическое описание почв изученных экосистем. Определение классификационной принадлежности почв осуществлялось по «Классификации почв России» [2004]. Полевые исследования проходили в пик вегетационного сезона в течение 5 полевых сезонов (август, 2010-2015).

В лабораторных условиях проведено определение:

Ботанического состава торфа [Домбровская и др., 1959; Кац и др., 1977; ГОСТ 28245-89]; **зольности торфяных горизонтов** [ГОСТ 11306-83] и **потери при прокаливании минеральных горизонтов почв** [Аринушкина, 1961]; **содержания общего углерода и азота** методом сухого сжигания на экспресс-анализаторе Vario ElIII (Elementar).

Определение содержания **углерода микробной биомассы** проведено методом **фумигации-экстракции (ФЭ)** [Brookes et al., 1985; Макаров и др., 2013]. В настоящей работе проведена фумигация “свежих” образцов почвы при естественной влажности параами хлороформа. С целью сравнения методов проведено определение содержания микробного углерода методом **субстрат-индуцированного дыхания (СИД)** [Anderson, Domsch, 1978]. Определение содержания **углерода лабильного (водоизвлекаемого) органического вещества** проводилось в вытяжке 0.05М K₂SO₄ [Chantigny et al., 2003; Макаров и др., 2013]. Определение содержания экстрагированного углерода в вытяжках проводили на автоматическом анализаторе ТОС-V_{CPN} (Shimadzu).

Для анализа полученных результатов использованы следующие методы математической статистики: описательная статистика; сравнение средних по параметрическому критерию Стьюдента (t-критерий) и непараметрическому критерию Вилкоксона; дисперсионный анализ; корреляционный анализ с включением определения рангового коэффициента корреляции Спирмена; регрессионный анализ. Выбранный уровень значимости $\alpha=0,05$. Приведен 95% доверительный интервал среднего. Для статистической обработки данных использовалась Statistica 7.0. Структура пространственной вариабельности параметров представлена при помощи картограмм в пакете “Golden Software Surfer 8”.

ГЛАВА 5. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

5.1. ОСОБЕННОСТИ ЭМИССИИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ ПОЧВАМИ ЭКОСИСТЕМ СЕВЕРНОЙ ТАЙГИ

Химические свойства и температурный режим почв

Проведенные исследования свойств почв и режимов их функционирования позволяют констатировать, что небольшая по площади территория исследования представляет собой уникальный комплекс экосистем и почв. Установлено, что химические свойства почв изученных экосистем в целом характерны для почв северотаежной зоны [Васильевская и др., 1986; Орлов и др., 1996]. Почвы торфяников, находящиеся под влиянием близкозалегающих многолетнемерзлых пород, отличаются по всем

показателям как от почв лесных экосистем, так и между собой. Общие химические свойства торфяных олиготрофных мерзлотных почв крупнобугристых торфяников значительно отличаются от свойств почв других изученных экосистем и характеризуются слабодифференцированным распределением по профилю.

Почвы изученных экосистем, несмотря на близкое расположение, функционируют в различных температурных режимах. Максимальные различия по температурным параметрам среди объектов исследования наблюдаются для участков с различными геокриологическими условиями, то есть с отсутствием или присутствием многолетнемерзлых пород либо с глубиной их залегания. Ход среднегодовых температур почв по профилю значительно различается для трех экосистем (рис.4.1). Самый «теплый» профиль характерен для подзола лесной экосистемы. Важным показателем температурного режима почв является глубина проникновения температур больше 10°C. Она заметно возрастает в ряду: торфяно-криозем плоскобугристого торфяника < торфяная олиготрофная деструктивная мерзлотная почва крупнобугристого торфяника < подзол лесной экосистемы.

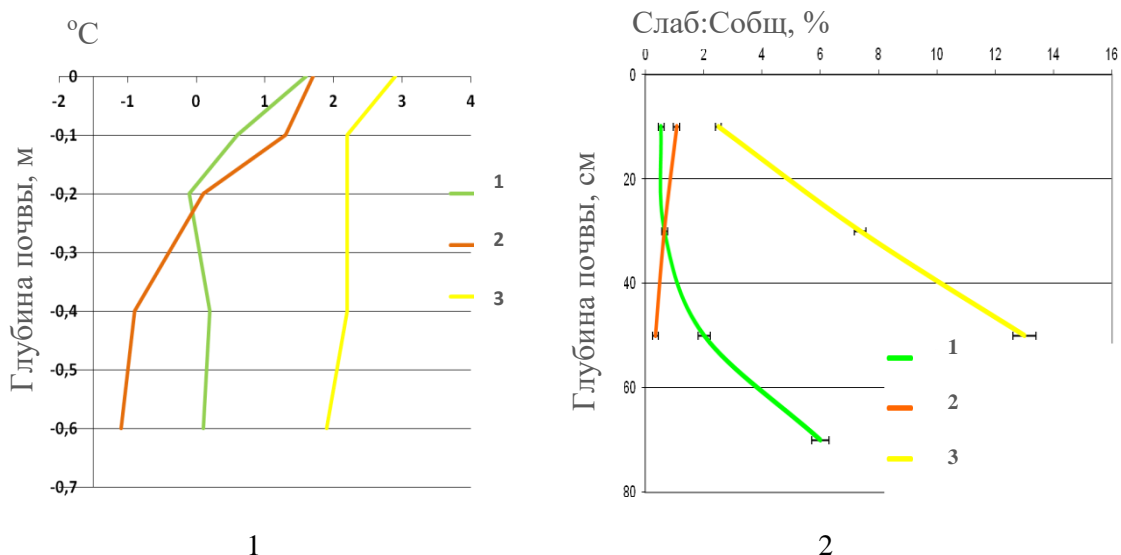


Рис. 4. Распределение среднегодовых температур почв по глубинам (2011-2012 г.) (1); распределение доли лабильного углерода от общего по глубинам почв (август 2011 г.) (2). 1-торфяно-криозем, 2- торфяная олиготрофная деструктивная мерзлотная почва, 3- подзол. *Примечание:* На рис. 4.2. приведены 95% доверительные интервалы средних.

Содержание органического углерода почв

Установлено, что почвы основных экосистем северной тайги статистически значимо отличаются по показателю содержания лабильного и микробного углерода (в верхнем 0-15 см слое почвы) (таб. 1) и выстраиваются в ряд по увеличению их значений: торфяная олиготрофная деструктивная мерзлотная почва < торфяно-криозем < подзол. Также почвы изученных экосистем статистически значимо отличаются по показателю доли микробного углерода от общего (Смик:Собщ, %) и доли лабильного углерода от общего (Слаб:Собщ, %) (рис. 4.2).

Почвы лесных экосистем – подзолы – характеризуются сравнительно малыми запасами органического углерода (таб.1), но их существенно большая теплообеспеченность и оптимальная влажность, связанные с отсутствием современных многолетнемерзлых пород, обеспечивают высокую биологическую активность.

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

Горизонт (мощность, см)	С общ, %	С лаб, мгС*кг ⁻¹ почвы	С мик, мгС*кг ⁻¹ почвы	Запасы С общ, т*га ⁻¹ (0- 40 см)	Запасы С лаб, т*га ⁻¹ (0- 40 см)	Запасы С мик, т*га ⁻¹ (0- 40 см)
подзол лесного участка						
O1 (0-5)	46,7	3400±190	10140±500	50,20	0,54	0,82
O2 (5-10)	41,2	1500±145	6180±310			
Eg (10-15)	0,3	100±10	80±35			
BFG, BCg (15-60)	0,1	80±5	30±10			
Cg (60-90)	0,4	50±5	20±5			
торфяно-криозем плоскобугристого торфяника						
O (0-5)	36,8	2400±200	8390±450	299,80	1,24	3,20
T1 (5-15)	42,9	4600±210	4530±600			
T2 (15-40)	38,1	1100±90	3910±230			
CR ₁ (40-80)	0,3	100±15	10±1			
торфяная олиготрофная деструктивная крупнобугристого торфяника						
TOmd (0-20)	51,2	1900±140	1590±100	589,50	2,15	1,27
TO (20-35)	52,1	1800±120	770±130			
TOte ₁ (35-50)	52,5	2100±100	280±75			

Примечание: Для содержания С лаб и С мик приведен 95% доверительный интервал среднего.

Почвы крупнобугристого торфяника характеризуются наибольшими запасами общего органического углерода в торфяной толще (таб. 1). Повышенное содержание общего углерода и азота, низкое содержание лабильных форм углерода и углерода микробной биомассы свидетельствуют о выраженной деградации торфа и дефиците свежего органического вещества.

Установлено, что запасы общего и лабильного углерода (0-40 см) возрастают в ряду: подзол лесной экосистемы < торфяно-криозем плоскобугристого торфяника < торфяная олиготрофная почва крупнобугристого торфяника; а запасы углерода микробной биомассы (0-40 см) возрастают в ряду: подзол < торфяная олиготрофная почва < торфяно-криозем (таб. 1).

В ходе настоящей работы проведено сравнение методов определения углерода микробной биомассы и установлено, что методы фумигации-

экстракции и субстрат-индуцированного дыхания, разработанные для почв умеренного пояса, могут быть успешно применены к почвам субарктического пояса. Полученные нами данные по содержанию углерода микробной биомассы почв сопоставимы с литературными данными для экосистем северной тайги и лесотундры [Маслов, 2014; Cheng, Virginia, 1993; Cheng et al., 1998; Fisk et al., 2003; Polita, Sarjala, 2004].

Эмиссия парниковых газов почвами

Эмиссия CO₂ почв

В ходе исследований установлено, что эмиссия диоксида углерода почвами исследованных экосистем невысокая и составляла в среднем 121±20, 139±12, 161±16 и 204±25 мгСО₂*м⁻²*час⁻¹ в августе 2010, 2011, 2013, 2015 гг. соответственно (коэф. вариации 70-85%, n=648 за 4 года измерений). В 2010 - 11 годах почвы изученных экосистем статистически значимо различались по этому показателю и образовали следующий ряд по возрастанию эмиссии СО₂: торфяная олиготрофная почва крупнобугристого торфяника < торфяно-криозем плоскобугристого торфяника < подзол лесного участка. В 2013 и 2015 гг. эмиссия СО₂ из почв плоско- и крупнобугристых торфяников характеризовалась близкими величинами (рис. 5).



Рис. 5. Эмиссия диоксида углерода почвами экосистем северной тайги.

Примечание: Указан 95% доверительный интервал среднего.

Во все периоды наблюдений, несмотря на различия в количестве осадков и температурных показателях в разные годы, эмиссия СО₂ из подзола автоморфной лесной экосистемы была в 3-6 раз выше, чем в полугидроморфных экосистемах торфяников. В 2010-2011 годах эмиссия СО₂ из торфяно-криозема плоскобугристого торфяника была в 2,7 раза выше по сравнению с торфяной олиготрофной почвой крупнобугристого торфяника. В

2013 и 2015 годах различия между ними оказались статистически незначимыми. Гидроморфные экосистемы характеризуются большой вариабельностью показателя эмиссии CO_2 , что приводит к трудностям при сравнении с другими экосистемами.

Наибольшие величины эмиссии CO_2 характерны для почв лесных экосистем. Причиной этого является как отсутствие многолетнемерзлых пород в почвенном профиле, так и микроклиматические особенности, характерные для лесных сообществ – как показали наблюдения, теплообеспеченность лесных почв выше. Высокие значения эмиссии также обусловлены оптимальными условиями увлажнения, то есть отсутствием переувлажнения и значительным вкладом дыхания корней растений. Доля корневого дыхания в общем потоке CO_2 из почв северотаежных экосистем достигает 80% [Курганова, 2010].

В отличие от подзола лесной экосистемы торфяно-криозем плоскобугристого торфяника характеризуется меньшими значениями эмиссии, что связано с различиями в условиях увлажнения и крайне низкой теплообеспеченностью верхней деятельной толщи торфяно-криозема.

Наименьшие величины эмиссии характерны для почв крупнобугристого торфяника. Причиной этого является близкое залегание многолетнемерзлых пород, разреженная растительность и, как следствие, низкое корневое дыхание, а также качество субстрата – это древний, практически полностью переработанный торф.

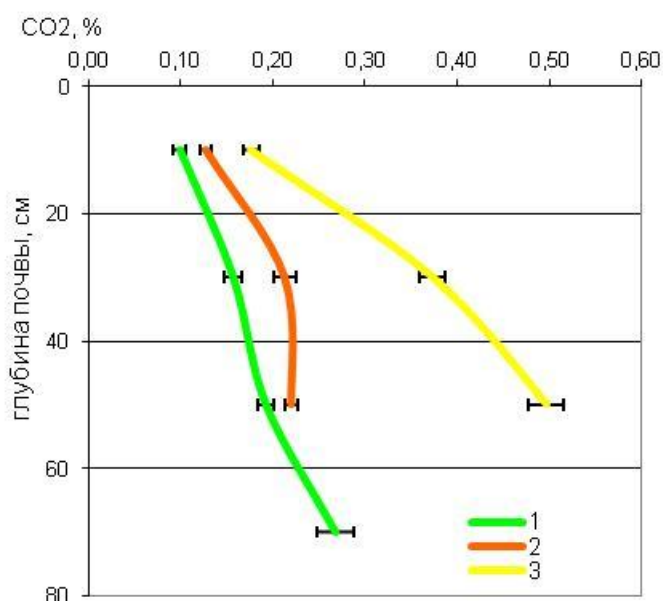
Установлено, что эмиссия CO_2 почв лесной экосистемы имеет статистически значимую связь с содержанием лабильного углерода почв ($r=0,54$, $p\text{-level}<0,05$). Не установлено статистически значимой связи эмиссии CO_2 почвами крупнобугристого торфяника с изученными параметрами и характеристиками почв. Анализ факторов, оказывающих влияние на эмиссию CO_2 почв плоскобугристых торфяников подробно описан в разделе 5.3.

Установлено, что для почвенной эмиссии CO_2 характерна ярко выраженная суточная динамика. Для всех исследованных экосистем характерно повторение характера температурных кривых эмиссии CO_2 . В дневные часы наблюдается увеличение температуры и величин эмиссии, к вечеру эти показатели снижаются. Установлено, что оптимальными для измерения эмиссии CO_2 являются дневные часы, что подтверждается в работах ведущих российских ученых [Головацкая, Дюкарев, 2011].

Проведенные исследования показали, что почвы изученных экосистем статистически значимо различаются по величинам эмиссии CO_2 и отношениям Смик:Собщ и Слаб:Собщ (в верхнем 0-15 см слое почвы). Следовательно, эти показатели могут служить индикаторами условий функционирования почв этого региона и использоваться для быстрого распознавания изменений условий окружающей среды.

Концентрация CO_2 в почвенном профиле

Среди исследованных почв максимальными усредненными величинами концентраций CO_2 в почвенном профиле (0,34%) характеризуется подзол лесной экосистемы, что связано, прежде всего, с благоприятными геокриологическими условиями и значительным вкладом корневого дыхания древесной и кустарниковой растительности (рис.6). Почвы крупнобугристого торфяника характеризуются низкими значениями концентрации CO_2 , для них не отмечено увеличение этого параметра с глубиной (рис. 6). Возможно, это связано с растворением CO_2 в холодном растворе, образующемся при таянии сезонномерзлого слоя почвы. Также на уровне кровли многолетнемерзлых пород деятельность аэробной микрофлоры сильно ингибирована за счет низких температур, приближающихся к 0°C и повышенной влажности. Общая тенденция изменения концентрации CO_2 в почвах северотаежных экосистем, так же, как и эмиссии, сохраняется. Установлено, что характер суточной динамики концентрации CO_2 в почвенном профиле не отличается во всех почвах изученных экосистем. Для них наблюдается незначительное изменение концентрации во времени. При этом характер динамики концентрации схож и на разных глубинах почв. В дневные часы отмечается



небольшое уменьшение концентрации диоксида углерода и небольшое увеличение по профилю в вечерние часы, что связано с “волнами запаздывания” изменения концентрации при изменении температуры.

Рис. 6. Концентрация CO_2 в почвенном профиле (август, 2011) ($n=20$ для каждой глубины почвы каждой экосистемы). 1-торфяно-криозем, 2- торфяная олиготрофная деструктивная мерзлотная почва, 3- подзол. *Примечание:* Указан 95% доверительный интервал среднего.

Эмиссия CH_4

Исследование эмиссии метана включало в себя единичные измерения, проведенные на заболоченных участках, в мочажинах, термокарстовых понижениях и микропонижениях торфяника в августе 2011, 2014, 2015 гг. ($n=44$). Эмиссия CH_4 характеризуется низкими значениями ($0,94 \pm 0,10$ $\text{мгCH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$, коэф. вариации 85%) и высокой пространственной вариабельностью. Термокарстовые понижения характеризуются наибольшим средним значением эмиссии метана ($5,87 \pm 3,09$ $\text{мгCH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$), при значительном варьировании от 0,70 до 25,70 $\text{мгCH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$. Причиной этого является сложный характер функционирования болотных экосистем в криолитозоне и, как следствие, специфические условия формирования

эмиссионного потока в болотных водах, характеризующихся низкими температурами и значительной насыщенностью кислородом. Также это связано с тем, что болота верхового типа только в начале теплого периода являются источниками метана слабой интенсивности и большую часть времени функционируют как места стока для атмосферного метана [Наумов, 2009].

5.2. ОСОБЕННОСТИ ЭМИССИИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА ПОЧВАМИ ЭКОСИСТЕМ ЛЕСОТУНДРЫ

В лесотундре на уровне основных типов экосистем исследование свойств почв проводилось на площади 0,01 км² (мониторинговая площадка CALM R50, 66°10' с.ш., 76°55' в.д.). Площадь исследуемой территории, по нашему мнению, является оптимальной, так как на ней представлены все основные экосистемы подзоны лесотундры.

Взаимосвязь факторов среды

Установлено, что все изученные абиотические параметры (мощность сезонноталого слоя, влажность почвы, температура почвы) основных экосистем лесотундровой зоны характеризуются высокой пространственной неоднородностью (коэф. вариации 44, 48 и 38% соответственно) (измерения проведены в дневные часы 11 августа 2015 г.) (рис. 7, таб. 2).

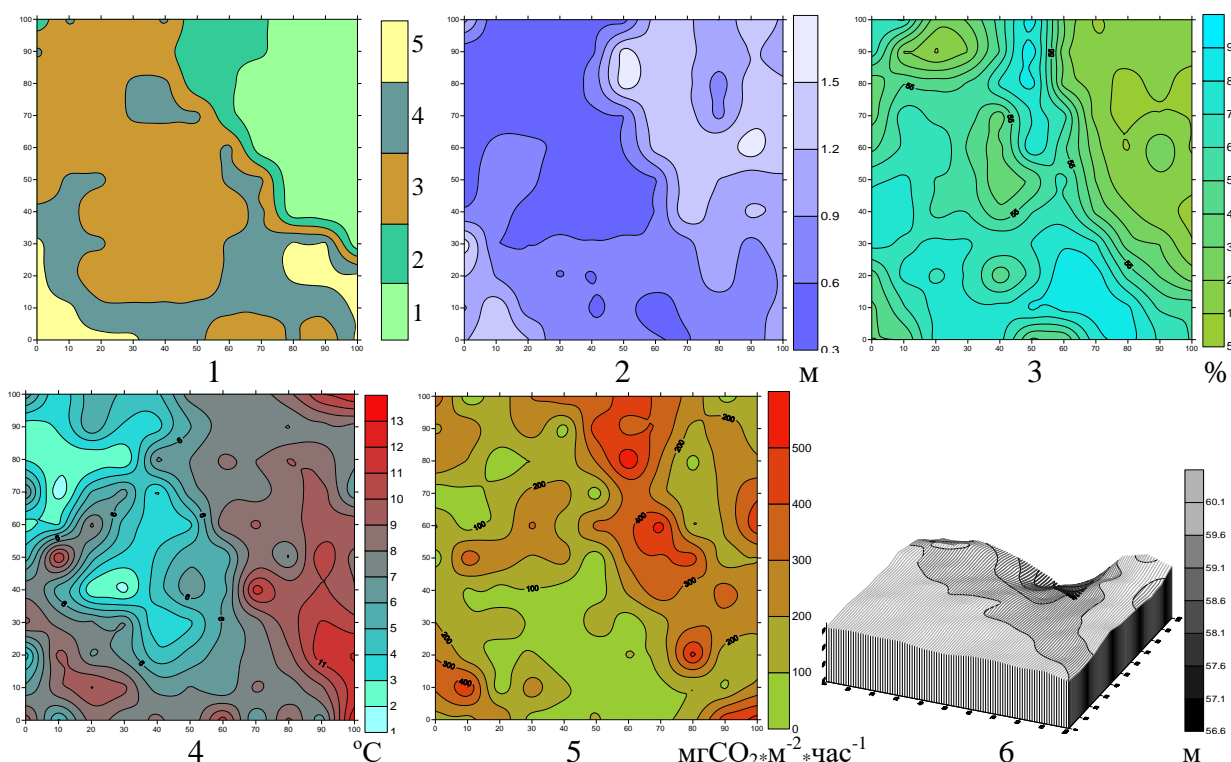


Рис. 7. Ландшафтная схема мониторингового участка (1): 1 –редины, 2 –ерники, 3 – багульничково-лишайниковые плоскобугристые торфяники, 4 – морошково-сфагновые плоскобугристые торфяники; 5 – кустарничко-моховые безлесные мелкобугристые торфяники; пространственное распределение мощности сезонноталого слоя (2), объемной влажности почв (0-15 см слой) (3), температуры почв (0-15 см слой) (4), эмиссии диоксида углерода (5), гипсометрической характеристики(6) на мониторинговой площадке CALM в лесотундре (август 2015).

Наибольшие средние значения объемной влажности почвы характерны для ерников и морошково-сфагновых плоскобугристых торфяников, что можно объяснить пониженным положением в рельефе первой экосистемы и особенностями торфяного горизонта второй (таб.2). Багульниково-лишайниковые плоскобугристые торфяники характеризуются наименьшим значением температуры почвы и статистически значимо отличаются от других экосистем по этому показателю (таб.2), что связано с близким залеганием кровли многолетнемерзлых пород на данном участке. Методом корреляционного анализа установлено, что мощность СТС основных экосистем в лесотундровой зоне (август, 2015) имеет статистически значимую связь с объемной влажностью почвы ($r=-0,38$, $p\text{-level}<0,05$), температурой почвы ($r=0,65$, $p\text{-level}<0,05$), со значением абсолютных высот местности ($r=-0,18$, $p\text{-level}<0,05$). Установлено, что в бóльшей мере варьирование температуры почвы связано с варьированием мощности СТС, и слабее - с варьированием объемной влажности почвы.

Таблица 2. Средние значения исследованных параметров, характеризующих почвы основных экосистем лесотундры (август, 2015)

Показатель	Лиственничные лишайниковые редины (подзолы/n=25)	Кустарничково-травяно-моховые ерники (торфянокриоземы/n=10)	Багульниково-лишайниковые плоскобугристые торфяники (торфянокриоземы /n=37)	Морошково-сфагновые плоскобугристые торфяники (торфянокриоземы /n=34)	Безлесные мелкобугристые торфяники (торфяноглееземы /n=15)
Абсолютные высоты местности, м	59,61±0,12	<u>58,25±0,44</u>	59,63±0,09	59,56±0,14	59,77±0,15
Мощность СТС, м	1,20±0,09	1,29±0,22	<u>0,52±0,04</u>	<u>0,71±0,07</u>	1,17±0,14
Объемная влажность почвы, %	<u>18,4±2,4</u>	63,5±19,4	56,3±5,8	72,1±5,2	54,3±8,8
Температура почвы, °С	8,8±0,6	7,3±0,4	<u>4,4±0,5</u>	7,6±0,6	9,8±1,1
Мощность торфа, см	<u>3,9±1,3</u>	29,7±7,5	39,5±1,1	40,3±1,5	37,6±5,8
С лаб, мгС*кг ⁻¹ почвы	<u>56±9</u>	1508±278	1267±106	1549±83	1158±277
Смик, мгС*кг ⁻¹ почвы	<u>156±45</u>	2989±623	3198±500	3381±600	<u>671±256</u>

Примечание: Указан 95% доверительный интервал среднего. Подчеркиванием выделены значения, которые статистически значимо отличаются от остальных по критерию Вилкоксона ($\alpha=0,05$). Значения объемной влажности, температуры, содержания С лаб и С мик приведены для верхнего 15 см слоя почвы.

Содержание органического углерода почв

Анализ данных по содержанию лабильного и микробного углерода почв свидетельствует об их высокой пространственной вариабельности (коэф. вариации 68% и 83% соответственно) (таб. 2). Наименьшее содержание лабильного углерода и углерода микробной биомассы характерно для подзола листовенничных лишайниковых редин, оно статистически значимо отличается от средних значений этого параметра почв других экосистем (таб.2). Это связано с тем, что верхний 15-см слой подзолов характеризуется органоминеральным составом. Пространственное распределение содержания лабильного и микробного углерода в почвах изученных экосистем в большей мере определяется влажностью почвы ($r=0,80$, $p\text{-level}<0,05$ и $r=0,64$, $p\text{-level}<0,05$ соответственно).

Эмиссия диоксида углерода почв

Почвы основных экосистем лесотундры в пик вегетационного сезона характеризуются низкими значениями эмиссии CO_2 и ее высокой пространственной вариабельностью ($202\pm 37 \text{ мгCO}_2\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$, коэф. вариации 73%, август 2015). Выявлены статистические значимые различия сравниваемых экосистем по этому показателю. В отличие от северной тайги, где максимальной эмиссией характеризовались подзолы автоморфной лесной экосистемы, в лесотундре максимальная эмиссия наблюдалась в полугидроморфной экосистеме ерника на торфяно-криоземе. Минимальные величины отмечены в полугидроморфных экосистемах багульниково-лишайниковых и морошково-сфагновых плоскобугристых торфяников (рис. 8).

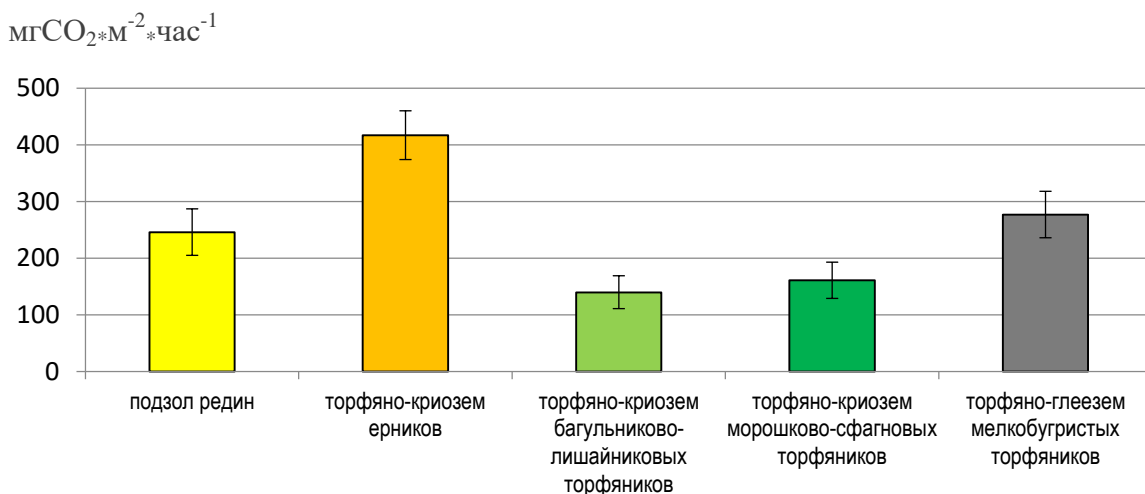


Рис. 8. Эмиссия диоксида углерода почвами экосистем лесотундры (август, 2015). *Примечание:* Указан 95% доверительный интервал среднего.

Повышенные средние значения эмиссии CO_2 ($417\pm 43 \text{ мгCO}_2\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{час}^{-1}$) в торфяно-криоземах ерников по сравнению с другими экосистемами лесотундры объясняются, как большей мощностью СТС, следовательно, благоприятными гидротермическими условиями для микробной деятельности, так и значительным вкладом корневого дыхания густых

зарослей кустарников, которые характерны для данной экосистемы. Наименьшие величины эмиссии CO_2 из торфяно-криоземов багульниково-лишайниковых и морошково-сфагновых плоскобугристых торфяников, предположительно, обусловлены близким залеганием многолетнемерзлых пород (СТС $0,62 \pm 0,05$ м).

Методом корреляционного анализа установлено, что эмиссия CO_2 почв лесотундровых экосистем имеет статистически значимую связь с мощностью СТС ($r=0,54$, $p\text{-level}<0,05$), с объемной влажностью почвы ($r=-0,27$, $p\text{-level}<0,05$), температурой почвы ($r=0,23$, $p\text{-level}<0,05$) и абсолютными высотами местности ($r=-0,43$, $p\text{-level}<0,05$). Результаты множественного регрессионного анализа представляет следующее уравнение (1):

$$(1) Y = 4326.58 + 2.62x_1 - 0.74x_2 - 0.10x_3 + 109.96x_4,$$

Где Y- эмиссия, [$\text{мгCO}_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$]; x_1 - мощность СТС, [м]; x_2 – абс. высота, [м]; x_3 - объемная влажность верхнего слоя почвы (0-15 см) почвы, %; x_4 - содержание лабильного углерода в почве, [$\text{мгC} \cdot \text{кг}^{-1}$ почвы].

О вкладе каждого из факторов в оценку эмиссии CO_2 можно судить по регрессионному уравнению в стандартизованном виде (2):

$$(2) Y = 0.63x_1 - 0.26x_2 - 0.35x_3 + 0.49x_4$$

Наибольшее значение имеют мощность СТС и содержание лабильного органического вещества в почве. Множественный коэффициент корреляции, характеризующий связь эмиссии CO_2 с рассмотренным набором факторов среды равен 0.72, коэффициент детерминации, характеризующий качество рассмотренной линейной регрессионной модели равен 0.52.

Не установлено статистически значимой связи эмиссии CO_2 почвами **ерников** с изученными параметрами и характеристиками почв, что может быть обусловлено определяющей ролью корневого дыхания.

Наибольшее влияние на эмиссию CO_2 почв торфяников лесотундровой зоны оказывает мощность СТС и содержание лабильного углерода, а меньшее – влажность почвы и абсолютные высоты местности. О вкладе каждого из факторов в оценку эмиссии CO_2 можно судить по регрессионному уравнению в стандартизованном виде (3):

$$(3) Y = 0.66x_1 - 0.32x_2 - 0.39x_3 + 0.52x_4$$

Где Y- эмиссия, [$\text{мгCO}_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$]; x_1 - мощность СТС, [м]; x_2 – абс. высота, [м]; x_3 - объемная влажность верхнего слоя почвы (0-15 см) почвы, [%]; x_4 - содержание лабильного углерода в почве, [$\text{мгC} \cdot \text{кг}^{-1}$ почвы].

Множественный коэффициент корреляции, характеризующий связь эмиссии CO_2 с рассмотренным набором факторов среды равен 0.71.

Сравнение величин эмиссии CO_2 почв экосистем северной тайги и лесотундры

Почвы типичных экосистем северной тайги и лесотундры в пик вегетационного сезона характеризуются низкими значениями эмиссии диоксида углерода и статистически значимо не отличаются по этому показателю ($204 \pm 25 \text{ мгCO}_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ и $202 \pm 37 \text{ мгCO}_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ соответственно, август 2015). Следовательно, различия в биологической активности почв

сравниваемых регионов выражены чрезвычайно слабо. Установлено, что наибольшее влияние на эмиссию CO₂ почвами северной тайги и лесотундры Западной Сибири среди изученных факторов оказывает мощность сезонноталого слоя, содержание лабильного углерода в почве и ее влажность.

5.3. ОСОБЕННОСТИ ЭМИССИИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА ПОЧВАМИ НА УРОВНЕ МИКРОРЕЛЬЕФА В ПОДЗОНЕ СЕВЕРНОЙ ТАЙГИ

В подзоне северной тайги исследования пространственного варьирования свойств почв на уровне микро рельефа проводилось на площади 0,01 км² в двух типах экосистем (мониторинговая площадка CALM R1, 65°20' с.ш., 72°55' в.д.): 1) типичный участок плоскобугристого торфяника; 2) заболоченный участок, представляющий собой олиготрофное сфагновое болото.

Взаимосвязь факторов среды

На плоскобугристом торфянике наблюдается высокая контрастность почвенного и растительного покровов, обусловленная сочетанием ряда факторов, среди которых основное место занимает микро рельеф. Микро рельеф торфяника представлен комплексом форм: ровные основные поверхности, микроповышения в виде кочек и микропонижения в виде крупных мочажин. Заболоченные участки представлены ровной поверхностью и микроповышениями в виде болотных кочек.

Все изученные параметры (влажность и температура почвы, мощность СТС, мощность торфа) плоскобугристых торфяников северной тайги характеризуются высокой пространственной вариабельностью (коэф. вариации 30-56%) (рис.9). Варьирование влажности почвы связано с гипсометрическим уровнем ($r=-0,70$, $p\text{-level}<0,05$) и с особенностями микро рельефа. Распределение растительных сообществ значительно связано с варьированием влажности почвы.

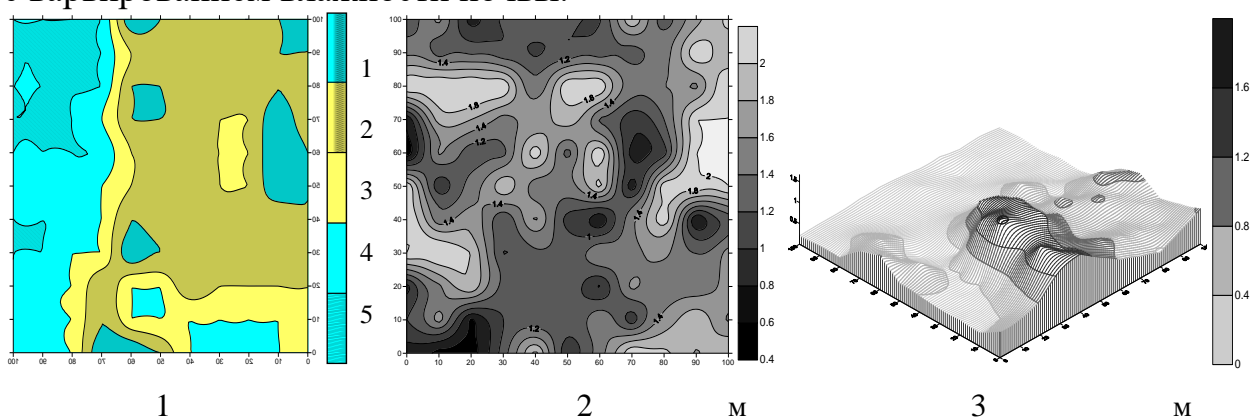


Рис. 9. Распределение растительных сообществ (1): 1 - Sphagnum, с примесью кустарничков и трав, 2 - Cladonia, с примесью мхов и кустарничков, 3- Cladonia, 4 - Sphagnum, 5 - Sphagnum, с примесью осоки; пространственное распределение мощности сезонноталого слоя (2), гипсометрической характеристики (3) на мониторинговой площадке CALM в северной тайге (август 2013 г).

Пространственное распределение мощности СТС на изученной территории определяется гипсометрическим уровнем ($r=-0,30$, $p\text{-level}<0,05$) и

зимним температурным режимом поверхности почв (среднемесячная температура февраля) ($r=0,38$, $p\text{-level}<0,05$), что связано с “отепляющим” действием снежного покрова в зимней период и воды в летней период, более выраженном в пониженных элементах рельефа торфяника.

Содержание органического углерода почв

Верхние горизонты почв торфяника и заболоченного участка статистически значимо отличаются по содержанию общего, лабильного углерода и углерода микробной биомассы. Эти показатели в почвах торфяника характеризуются высокой пространственной вариабельностью (коэф. вариации 42, 61 и 64% соответственно) (рис. 10).

Содержание общего углерода почв зависит от микрорельефа торфяника. Наибольшее содержание характерно для ровной поверхности торфяника ($37,45\pm 3,42\%$), а наименьшее – для микропонижений ($28,20\pm 2,34\%$). Это связано с тем, что большая часть микропонижений торфяника занята глееземами и криоземами, верхний 15-см слой которых характеризуется органоминеральным составом.

Содержание лабильного углерода почв зависит от микрорельефа торфяника. Наибольшее содержание Слаб характерно для микропонижений (2700 ± 500 мгС*кг⁻¹ почвы), а наименьшее – для микроповышений и ровной поверхности торфяника (1800 ± 550 мгС*кг⁻¹ почвы и 1400 ± 400 мгС*кг⁻¹ почвы соответственно). Это объясняется высокой подвижностью водорастворимых соединений углерода и аккумуляцией их в пониженных формах рельефа.

Содержание углерода микробной биомассы почв зависит от микрорельефа торфяника и типа растительности. Наибольшее среднее содержание Смик характерно для микроповышений и ровной поверхности (5660 ± 850 и 6460 ± 900 мгС*кг⁻¹ почвы соответственно), а наименьшее – для микропонижений (3280 ± 550 мгС*кг⁻¹ почвы). Участки с ягелевым и кустарничково-ягелевым покровом характеризуется бóльшим содержанием Смик (6160 ± 900 и 4290 ± 900 мг С*кг⁻¹ почвы соответственно), чем участки со сфагновым покровом (1600 ± 800 мг С*кг⁻¹ почвы). Одной из причин антимикробных свойств сфагнома является токсичность фенольных соединений, накапливающихся в нем в больших количествах [Функционирование..., 2013].

Пространственное распределение С общ, С лаб и С мик зависит от влажности почвы ($p\text{-level}<0,05$, $r=0,70$, $r=0,62$, $r=0,70$ соответственно) и выраженности микрорельефа. Статистически значимая связь с величиной гипсометрического уровня установлена только для содержания лабильного углерода ($r=-0,38$, $p\text{-level}<0,05$). В почвах торфяника мониторинговой площадки доля микробного углерода от общего в 3 раза выше доли лабильного углерода. При этом для заболоченного участка характерна обратная зависимость: доля лабильного углерода от общего в сотни раз превышает долю микробного углерода. Это может быть связано с высоким содержанием лабильных форм углерода и ингибированием микробной

микрофлоры в условиях повышенной влажности заболоченного участка. Для почв торфяника характерны более благоприятные условия для микробиологической активности, но при этом происходит вынос лабильных форм углерода почвенными растворами и аккумуляция их на заболоченном участке.

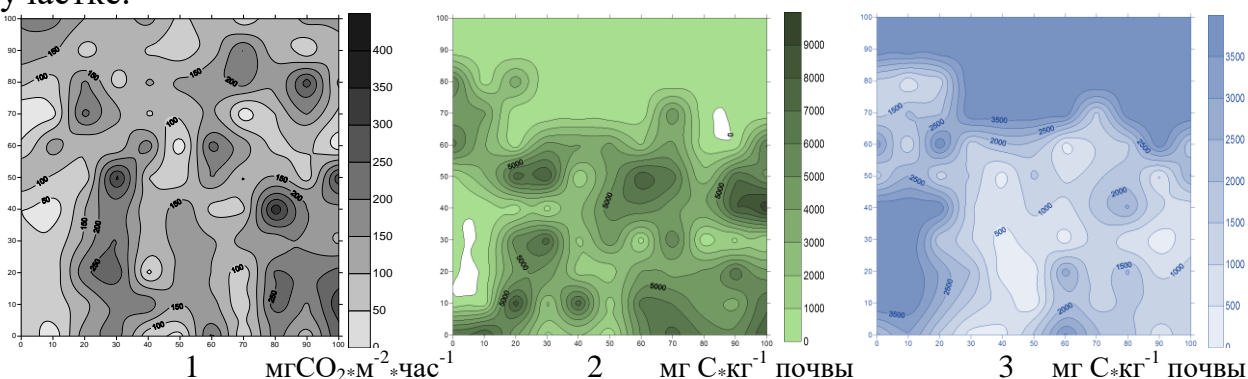


Рис. 10. Пространственное распределение эмиссии CO_2 (1), содержания углерода микробной биомассы (2) и лабильного углерода (3) почв (0-15 см слой) мониторинговой площадки CALM в северной тайге (август 2013 г.)

Эмиссия диоксида углерода почв

Эмиссия CO_2 почвами плоскобугристого торфяника и заболоченного участка варьировала в широких пределах (от 10 до $400 \text{ mgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$) и составляла в среднем 142 ± 21 и $127 \pm 17 \text{ mgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ (коэф. вариации 57% и 68%) в августе 2013 и 2014 гг. соответственно. Почвы торфяника ($n=74$) и заболоченного участка ($n=42$) статистически значимо отличались по эмиссии CO_2 как в августе 2013г, так и в августе 2014 г. Для показателя эмиссии CO_2 почв торфяника в августе 2014 г. характерно меньшее значение, чем в августе 2013 г. Это может быть связано с тем, что среднесуточная температура воздуха в течение 2 дней, включая день измерения, в 2013 существенно выше, чем в 2014 ($15,7^\circ\text{C}$ и $8,2^\circ\text{C}$ соответственно). Заболоченный участок оказался менее чувствителен к изменению погодных условий, что проявилось в одинаковых значениях эмиссии CO_2 в дни измерения в разные годы.

Установлена зависимость величин эмиссии CO_2 почвами от **микрорельефа торфяника**: микропонижения торфяника характеризуются наибольшими значениями эмиссии (187 ± 32 и $144 \pm 20 \text{ mgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ в 2013 и 2014 гг. соответственно), а микроповышения - наименьшими (148 ± 27 и $98 \pm 18 \text{ mgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ в 2013 и 2014 гг. соответственно).

Установлена статистически значимая связь величин эмиссии CO_2 почвами **торфяника с типом растительности**: под сфагновыми сообществами значения эмиссии ниже ($100 \pm 20 \text{ mgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$, август 2013), под ягелевыми сообществами - выше ($180 \pm 25 \text{ mgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$, август 2013). Болотные участки со сфагновым покровом и осоково-сфагновым покровом статистически значимо отличаются по показателю эмиссии CO_2 (82 ± 22 и $151 \pm 25 \text{ mgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ соответственно).

Установлено, что в лесотундровой зоне эмиссия CO_2 почвами плоскобугристых торфяников в бóльшей степени определяется мощностью СТС и содержанием лабильного углерода, а в меньшей – влажностью почвы. Для почв плоскобугристых торфяников северотаежной зоны характерна другая зависимость: наибольшее влияние на эмиссию CO_2 почв оказывает содержание углерода микробной биомассы и влажность почвы, а меньшее – мощность СТС и содержание лабильного углерода почв. О вкладе каждого из факторов в оценку эмиссии CO_2 можно судить по регрессионному уравнению в стандартизованном виде (4):

$$(4) Y=0.91x_1-0.81x_2+0.40x_3+0.39x_4$$

Где Y- эмиссия, [$\text{mgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$]; x_1 – содержание углерода микробной биомассы в почве, [$\text{mgC} \cdot \text{kg}^{-1}$ почвы]; x_2 - объемная влажность верхнего слоя почвы (0-15 см) почвы, [%]; x_3 - мощность СТС, [М]; x_4 - содержание лабильного углерода в почве, [$\text{mgC} \cdot \text{kg}^{-1}$ почвы].

Множественный коэффициент корреляции, характеризующий связь эмиссии CO_2 с рассмотренным набором факторов среды равен 0.53. Изучаемая зависимость эмиссии CO_2 из почв торфяников от рассматриваемых условий среды более четко проявляется в лесотундре, о чем свидетельствует лучшее качество регрессионной модели.

Методом множественного регрессионного анализа данных, полученных в результате изучения почв плоскобугристого торфяника и заболоченного участка (мониторинговая площадка CALM R1) в 2013 г., установлена зависимость эмиссии CO_2 почв от факторов среды (5):

$$(5) Y = 0.38x_1-0.32x_2+17.80x_3+117.94x_4,$$

Где Y- эмиссия, [$\text{mgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$]; x_1 - мощность СТС, [М]; x_2 – объемная влажность верхнего слоя почвы (0-15 см) почвы, [%]; x_3 – углерод микробной биомассы, [$\text{mgC} \cdot \text{kg}^{-1}$ почвы]; x_4 - содержание лабильного углерода в почве, [$\text{mgC} \cdot \text{kg}^{-1}$ почвы].

Вклад каждого из факторов в оценку эмиссии CO_2 характеризует регрессионное уравнение в стандартизованном виде (6):

$$(6) Y=0.20x_1-1.77x_2 + 0.83x_3 + 2.02x_4$$

Наибольшее значение имеют содержание лабильного органического вещества в почве и ее влажность. Множественный коэффициент корреляции, характеризующий связь эмиссии CO_2 с рассмотренным набором факторов среды равен 0.41, коэффициент детерминации, характеризующий качество рассмотренной линейной регрессионной модели равен 0.17.

Сравнение результатов множественного регрессионного анализа данных, характеризующих почвы основных экосистем северной тайги (мониторинговая площадка CALM R1) и лесотундры (мониторинговая площадка CALM R50), показало, что в обоих случаях ведущими факторами, определяющими эмиссию CO_2 из почв являются мощность СТС, содержание лабильного органического вещества в почве и ее влажность. Кроме этих факторов статистически значимое влияние на эмиссию CO_2 в почвах северной тайги оказывает содержание углерода микробной биомассы в почве, а в почвах лесотундры - гипсометрический фактор. Изучаемая

зависимость эмиссии CO_2 из почв от рассматриваемых условий среды более четко проявляется в лесотундре, о чем свидетельствует лучшее качество регрессионной модели. Это обусловлено в большей мере различным проявлением криогенеза. В зоне лесотундры многолетнемерзлые породы залегают ближе к поверхности, что обуславливает их более выраженное воздействие на почвы.

Установленная связь эмиссии CO_2 почв с мощностью СТС, которая является интегральным показателем теплообеспеченности территории, объясняет необходимость оценки ее пространственной неоднородности как значимого фактора, определяющего региональные выбросы CO_2 .

ВЫВОДЫ

1. Почвы северной тайги и лесотундры Западной Сибири характеризуются низкими значениями эмиссии диоксида углерода и метана ($204 \pm 25 \text{ мгCO}_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ и $0,94 \pm 0,10 \text{ мгCH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$, август 2015), что свидетельствует об их низкой биологической активности. Средние значения эмиссии CO_2 из почв сравниваемых регионов статистически значимо не различаются, что объясняется ее высокой пространственной вариабельностью (коэффициенты вариации равны 85% и 73% соответственно в северной тайге и лесотундре).

2. Статистически значимые различия средних величин эмиссии диоксида углерода выявляются на экосистемном уровне. В северной тайге эмиссия CO_2 из подзолов автоморфных лесных экосистем выше, чем из почв полугидроморфных экосистем торфяников. В лесотундре максимальными величинами этого показателя характеризуются полугидроморфные экосистемы ерников на торфяно-криоземах. Минимальные значения отмечены в полугидроморфных экосистемах багульниково-лишайниковых и морошково-сфагновых плоскобугристых торфяников.

3. По результатам множественного регрессионного анализа наибольшее влияние среди изучаемых факторов на эмиссию CO_2 почвами северной тайги и лесотундры оказывает мощность сезонноталого слоя и содержание лабильного углерода в почве. В лесотундре эта зависимость выражена сильнее, о чем свидетельствует лучшее качество регрессионной модели. Это связано с меньшей глубиной залегания многолетнемерзлых пород в лесотундре, что обуславливает их более выраженное влияние на почвы.

4. Сравнительный анализ данных, характеризующих почвы плоскобугристых торфяников на мониторинговых площадках CALM в лесотундре и северной тайге, показал, что в обоих случаях ведущими факторами, определяющими эмиссию CO_2 почв, являются мощность сезонноталого слоя, содержание лабильного органического вещества в почве и ее влажность. Кроме этих факторов статистически значимое влияние на эмиссию CO_2 в северной тайге оказывает содержание углерода микробной биомассы в почве, а в южной лесотундре гипсометрический фактор.

5. Установлена зависимость эмиссии CO_2 почв плоскобугристых торфяников северной тайги от микрорельефа и характера растительности. В августе 2013 года она была в 1.3 раза выше на микропонижениях торфяников, чем на микроповышениях, а под сфагновыми сообществами в 1.8 раза ниже по сравнению с ягелевыми.
6. Фактором, оказывающим наибольшее влияние на разнообразие экосистем и биологическую активность почв северной тайги и лесотундры, является наличие и глубина залегания многолетнемерзлых пород, так как именно мерзлота определяет тип биогеоценоза, температурный режим и активность процессов трансформации органического вещества в экосистемах этого региона.
7. Недоучет пространственной неоднородности свойств почв и особенностей режимов их функционирования в районе прерывистого и сплошного распространения многолетнемерзлых пород может привести к существенным искажениям оценок суммарных потоков парниковых газов и созданных на их основе прогнозных моделей климатических изменений.

РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., **Бобрик А.А.**, Москаленко Н.Г. Продуцирование диоксида углерода почвами северной тайги Западной Сибири (Надымский стационар) // Криосфера Земли. 2014. № 2. С. 66-71.
2. **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. 19, № 4. С. 31–38.
3. Гончарова О. Ю., Матышак Г. В, **Бобрик А. А.**, Москаленко Н.Г., Пономарева О.Е. Температурные режимы северотаежных почв Западной Сибири в условиях островного распространения многолетнемерзлых пород // Почвоведение, 2015, №12, С. 1462-1473.
4. 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 // Сибирский экологический журнал, 2016, №1, С. 3-12.
5. **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, №10 (в печати)
6. **Бобрик А.А.**, Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Дроздов Д.С., Пономарева О.Е. Вклад биотических и абиотических факторов в пространственное варьирование эмиссии CO_2 почв лесотундровой зоны Западной Сибири (Новый Уренгой) // Криосфера Земли. 2017. № 1 (в печати)

Некоторые тезисы докладов в сборниках материалов конференций:

7. **Bobrik A. A.**, Goncharova O. Y. Carbon dioxide production and labile organic matter of cryogenic soils in north taiga ecosystems of western Siberia // Abstracts of International Conference on Permafrost: Resources and Risks of Permafrost Areas in a Changing World. Vol. 4. Fort Dialog-Iset Ekaterinburg, 2012. P. 57–58.
8. **Bobrik A.A.**, Goncharova O.Y., Matyshak G.V., Ryzhova I.M. Biological activity of soils in sporadic permafrost zone of Western Siberia // Proceeding book of 9th International Soil Science Congress on “The Soul of Soil and Civilization”. Side, Turkey, 2014, P. 1026–1033.
9. **Bobrik A.A.**, Goncharova O.Y. Carbon fluxes of soils in discontinuous permafrost zone of western siberia // Book of Abstracts of EUCOP4 – 4th European Conference on Permafrost, 18-21 June 2014 - Évora, Portugal. Vol. 1. Evora, Portugal, 2014. P. 134–134.
10. **Bobrik A.A.**, Goncharova O.Y., Matyshak G.V. Efflux of frozen peatland soils at fine scale: the relationship with permafrost conditions and the composition of soil organic matter (Russia, CALM site R1) // Arctic Change 2014 Oral Presentation Abstracts. ArcticNet Ottawa, Canada, 2014. P. 16–17.
11. **Bobrik A.A.**, Goncharova O.Y., Matyshak G.V. Active layer thickness and soil organic carbon of frozen peatlands: relationship and spatial variability (CALM R1, western Siberia, Russia) // Abstracts of The 45th International Arctic Workshop. — University of Bergen, Bergen, Norway, 2015. P. 27–28.
12. **Bobrik A.A.**, Goncharova O.Y., Matyshak G.V. Active layer thickness spatiotemporal variability and trend of climate change (north west Siberia, Russia) // Program and book of Abstracts of 2nd International Conference "Polar Climate and Environmental Change in the Last Millennium". Nicolaus Copernicus University Torun, Poland, 2015. P. 52–52.
13. **Bobrik A.A.**, Goncharova O.Y., Matyshak G.V. Effect of active layer thickness on CO₂ fluxes of frozen peatland soils (CALM R1, western Siberia, Russia) // Abstracts of International conference "Permafrost in XXI century: basic and applied researches". Pushchino, Russia, 2015. P. 44–45.
14. **Bobrik A.A.**, Goncharova O.Yu., Matyshak G.V., Ryzhova I.M. Active layer thickness and CO₂ efflux of frozen peatlands: relationship, spatial variability, trend of climate change (CALM R1, western Siberia, Russia) // Abstracts of Interdisciplinary Polar Studies in Svalbard (IPSiS) Meeting: Scientific Conference & Field Workshops, Svalbard, UNIS, 2015.
15. **Bobrik A.A.**, Goncharova O.Yu., Matyshak G.V., Drozdov D.S. Soil biological activity in the condition of permafrost degradation and climate change (north west Siberia, Russia) // Abstracts of International conference Arctic Frontiers. The Arctic University of Norway, Tromso, Norway, 2016.