На правах рукописи

Казанцев Владимир Сергеевич

ЭМИССИЯ МЕТАНА ИЗ БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Специальность 03.02.08 - Экология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата биологических наук

Москва 2013

Работа выполнена на кафедре физики и мелиорации почв факультета почвоведения Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова

Научный руководитель: доктор биологических наук, профессор
Карпачевский Лев Оскарович

Официальные оппоненты:

Курганова Ирина Николаевна, доктор биологических наук, старший научный сотрудник Института физико-химических и биологических проблем почвоведения Российской академии наук (г. Пущино)

Степанов Алексей Львович, доктор биологических наук, профессор кафедры биологии почв факультета почвоведения Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова

Ведущая организация:
Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» (г. Москва)

Защита состоится 12 ноября 2013 года в 15.30 на заседании диссертационного совета Д 501.001.57, созданного на базе федерального государственного бюджетного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», факультета почвоведения по адресу 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, д.1, стр.12, факультет Почвоведения, ауд. М-2.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан «11» октября 2013 года

Учёный секретарь
диссертационного совета
доктор биологических наук Алла Сергеевна Никифорова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Метан, относящийся к малым газовым составляющим современной атмосферы Земли, является одним из основных парниковых газов (Climate Change, 2007; Dlugokencky et al., 2011). Из результатов экспериментальных исследований и модельных расчетов следует, что болотные экосистемы являются основными природными источниками метана (Анисимов и др., 2005; Khalil, Shearer, 2000; Anderson et al., 2010). Основной проблемой при анализе взаимосвязи изменений климата с потоками метана из природных источников в атмосферу является отсутствие или недостаточное количество экспериментальных данных, что не позволяет адекватно оценить региональную эмиссию метана и вклад различных регионов в глобальный метановый бюджет атмосферы. Одним из таких регионов является северная часть Западной Сибири (зоны северной тайги, лесотундры и тундры). Имеющиеся оценки годовой эмиссии метана с территории этого региона требуют уточнения, т.к. являются либо чисто модельными, полученными при достаточно грубых предположениях, либо основываются на небольшом объёме данных полевых измерений.

Изучению влияния климатических факторов и характеристик внешней среды на эмиссию метана посвящено множество публикаций (Whiticar,1999; Pelletier et al, 2007; Worthy et al, 2000 и др.). Однако, для болотных экосистем северной части Западной Сибири подобных работ, основанных на обширных экспериментальных данных, не проводилось. Эти исследования позволяют установить параметры (климатические, почвенные и пр.), которые оказывают наиболее значимое влияние на эмиссию метана в регионе и определить зависимости динамики эмиссии метана от этих параметров. Подобные зависимости часто применяются в современных климатических моделях и биосферных моделях цикла углерода, т.е. являются востребованными в современных исследованиях.

Цель работы: провести систематическое исследование болот северной части Западной Сибири как источника метана.

Задачи:

1. Уточнить оценку актуальной годовой эмиссии метана из болотных экосистем северной части Западной Сибири.
2. Выявить и количественно описать влияние природных факторов, определяющих эмиссию метана в рассматриваемом регионе.
3. Оценить изменение эмиссии метана из болотных экосистем северной части Западной Сибири в XXI веке.

Научная новизна работы.

Впервые были проведены систематические исследования тундровых болот как источника метана, и существенно расширены исследования эмиссии метана из лесотундровых болот и болот северотаёжной природной подзоны. Уточнена оценка вклада северных болот Западной Сибири в глобальную эмиссию метана. Установлены зависимости поверхностной плотности потока метана от факторов окружающей среды в региональном и локальном масштабах. На основе фактического материала дан прогноз изменения эмиссии метана из болот изучаемой территории в XXI веке.

Практическая значимость работы.

Полученные результаты вносят вклад в инвентаризацию глобальных источников парниковых газов. Результаты проведённых исследований могут использоваться при моделировании климатических и биосферных процессов.

Личный вклад автора работы.

Автор принимал непосредственное участие в полевых исследованиях 2008-2010 годов (в 2009 году в качестве руководителя полевых работ), получении экспериментальных материалов, статистической обработке полученных данных и оценке актуальной региональной эмиссии метана. Автор принимал участие в постановке задачи, проведении численных экспериментов по расчету прогнозных значений эмиссии метана из болот

изучаемого региона в XXI веке, анализе и обобщении полученных результатов.

Апробация работы.

Материалы исследований по теме диссертации неоднократно докладывались и обсуждались на заседаниях кафедры физики и мелиорации почв факультета Почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова в 2008-2012 годах. Основные положения диссертационной работы докладывались на конференциях: Всероссийская научная конференция «Докучаевские молодёжные чтения» (Санкт-Петербург 2010, 2011) и Международная конференция EGU General Assembly (Вена 2010, 2011).

Структура и объём работы.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов, списка использованной литературы, включающего 101 источник, из них 51 иностранный, и приложений. Работа изложена на 137 страницах, содержит 34 таблицы и 57 рисунков.

Благодарности.

Автор выражает искреннюю благодарность всем, кто способствовал написанию диссертации, и особенно: Ольге Васильевной Барановой, Михаилу Владимировичу Глаголеву, Леониду Леонидовичу Голубятникову, Юлии Львовне Мешалкиной, Анатолию Ивановичу Позднякову, Александру Фаритовичу Сабрекову, Евгению Викторовичу Шеину, Николаю Андреевичу Шнырёву, а также безвременно покинувшему нас Льву Оскаровичу Карпачевскому.

Публикации.

По материалам диссертации опубликовано 14 работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК для публикации основных результатов диссертационных работ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Эколого-функциональная роль болот как источника метана

Метан, несмотря на малую концентрацию в атмосфере (1,77 миллионных долей по объёму), в силу своих физико-химических свойств, является одним из основных парниковых газов, наряду с водяным паром, углекислым газом и закисью азота [Кароль, 1996; Forster et al., 2007].

В глобальном масштабе выделяют различные природные и антропогенные источники парниковых газов, в том числе и метана. Оценки мощности выбросов метана из природных источников варьируют от 26 до 345 млн. тонн в год. При этом исследователи сходятся во мнении, что основным природным источником метана являются болотные экосистемы, их вклад в глобальную эмиссию оценивается в 25-300 млн. тонн в год, то есть разброс оценок составляет один порядок [Anderson et al, 2010; Chen, Prinn, 2006; Wuebbles, Hayhoe, 2002; Wang et al., 2004 и др.].

Образование метана в торфяных отложениях болотных экосистем происходит в результате ряда различных биологических процессов. Непосредственно за выделение метана в болотах отвечают особые микроорганизмы – археи (метаногены) [Заварзин, 1995]. Для развития метаногенов необходимы анаэробные условия и значение окислительно-восстановительного потенциала менее 200 мВ. В зависимости от состава сообщества микроорганизмов и температурного режима, существует три пути продуцирования метана: водородный, ацетатразложение и метилотрофный. [Kotsurbenko, 2005, 2007; Svensson, 1983]. В аэробных условиях болотных экосистем существуют метанотрофные микроорганизмы, которые могут поглощать до 90% метана, выделяемого метаногенами [Whiticar, 1999; Звягинцев и др., 2005].

Различные факторы окружающей среды влияют на пространственную и временную изменчивость эмиссии метана в разных

регионах. По мнению ряда исследователей, основными факторами, влияющими на соотношение интенсивности процессов выделения и поглощения метана являются температура и влажность торфа, уровень болотных вод, ботанический состав растительности, кислотность и насыщенность солями болотных вод, глубина сезонного протаивания торфяной толщи, состав органического вещества торфа [Granberg et al,1997; Christinsen,1993; Bubier et al, 1995; Глаголев, 2010; Worthy et al, 2000; Moosavi et al, 1996; Nykanen et al, 1998; Torn and Chappin, 1993; Liblik et al, 1997 и др.].

Территория Западно-Сибирской равнины является самым большим заболоченным комплексом мира [Smith et al, 2004]. Площадь Западной Сибири составляет около $2{,}9*10^6$ км², из которых болотами заняты $68{,}5*10^4$ км² или 24,4% территории. При этом заболоченность территории разных природных зон изменяется от 9,2% в степи до 34,5% в средней тайге. Заболоченность северных территорий Западной Сибири оценивается в 22,7%, что соответствует $28{,}7*10^4$ км². Площадь болот этого региона составляет около 42% площади всех болот Западной Сибири. В северной тайге преобладают олиготрофные и олиго-мезотрофные болота, тогда как в тундре и лесотундре основные площади болот приходятся на эвтрофные топи [Peregon et al, 2008, 2009; Романова и др, 1977].

Задачу оценки эмиссии метана из болотных экосистем северной части Западной Сибири нельзя признать удовлетворительно решённой. Это объясняется отсутствием достаточного фактического материала исследований для северных территорий. Разброс оценок годовой эмиссии метана из болотных экосистем Западной Сибири составлял один порядок и варьировал по данным разных авторов от 1,6 до 22,7 Мт [Andronova, Karol, 1993; Паников с соавт., 1993; Наумов, 2003; Heyer et al., 2002; Bleuten, 2007; Глаголев, 2007, 2008].

Следует отметить, что предыдущие исследования по эмиссии метана из северных болот Западной Сибири не носили системного характера. Несколько исследовательских групп занимались изучением этого вопроса [Christensen et al, 1995, 1996; Matthew, Fung, 1987, 1992; Heyer et al., 2002; Naumov et al, 2007; Наумов, 2009]. Однако полученные ими оценки региональной эмиссии метана были достаточно приблизительными, т.к. эмиссии с ряда болотных ландшафтов не учитывались. Ситуация со сбором данных полевых наблюдений поменялась с появлением статистической математической модели региональной оценки эмиссии метана «Стандартная модель» [Глаголев, 2008], которая позволила систематизировать получение экспериментальных данных в приложении к задаче уточнения оценки региональной эмиссии метана из болот Западной Сибири.

Глава 2. Объекты и методы исследования

Территория исследования включает в себя природные зоны тундры, лесотундры и подзону северной тайги, расположенные в пределах Западно-Сибирской низменности [Гвоздецкий и др, 1973; Лисс и др, 2001]. В работе используются результаты 509 измерений (20 из них взяты из литературы), полученных в 61 точке на 14 ключевых участках (рис.1).

При выборе ключевых участков учитывались следующие аспекты: разнообразие типов болот на участках, возможно минимальное антропогенное влияние на болотные экосистемы, транспортная доступность. Точки измерений на ключевых участках выбирались по принципу максимального охвата разнообразия элементов болотного ландшафта, что было необходимо для получения наиболее корректной оценки актуальной региональной эмиссии метана.

Измерения поверхностной плотности потока метана (ППМ) проводились методом тёмных статических камер с водяным замком [Глаголев и др., 2010] в летние сезоны 2008–2010 годов. Объём камер

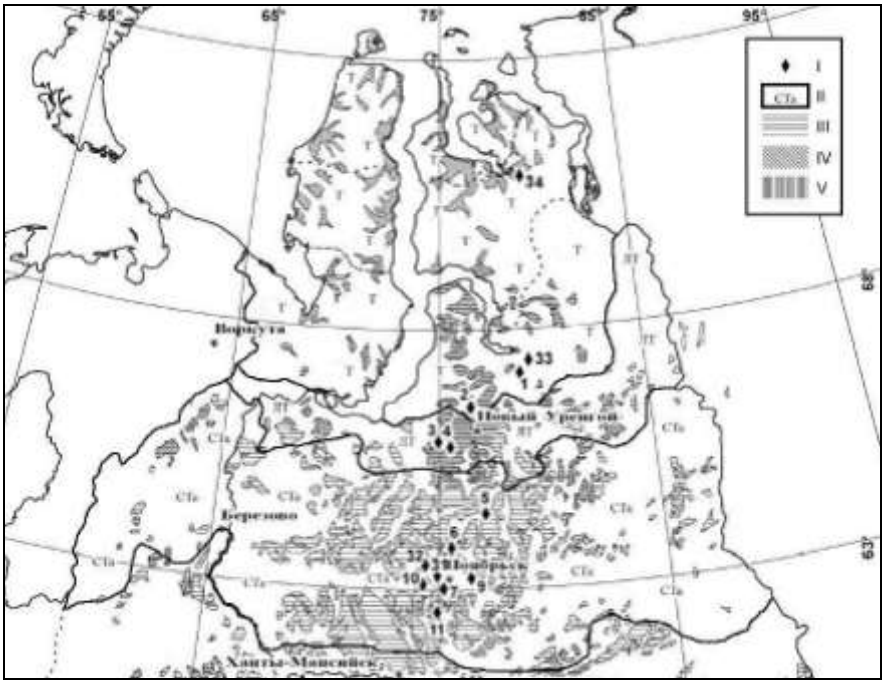


Рис. 1. Расположение ключевых участков. I Ключевые участки. II Границы ботанико-географических зон и подзон: Т – тундра, ЛТ – лесотундра, СТа – северная тайга. III Преобладает олиготрофный тип болот. IV Преобладает мезотрофный тип болот. V Преобладает эвтрофный тип болот.

составлял 40-60 литров, в зависимости от условий измерений. Интервал отбора проб варьировал от 8 до 20 минут, в зависимости от ожидаемого значения ПППМ, всего в ходе одного измерения отбирали 4 пробы.

Выбор параметров влияющих на эмиссию метана определялся на основе анализа литературных данных и доступностью их измерений в полевых условиях. Наряду с измерениями ПППМ проводились измерения таких характеристик окружающей среды, как температура приземного слоя воздуха, температура торфа на глубине 0, 5, 15, 45 см. Так же фиксировался профиль физико-химических свойств болотных вод: кислотность, электропроводность (как функция от содержания солей – питательных

веществ для метаногенных бактерий), а также содержание растворённого кислорода до глубины 50 см.

Концентрация метана в каждой пробе определялась на газовых хроматографах ХПМ-4 и Кристалл 5000.1 с пламенно-ионизационном детектором в трёх-пятикратной повторности, значение ПППМ для каждой точки рассчитывали методом взвешенной линейной регрессии.

Региональный поток рассчитывался по алгоритму «Стандартной модели», включающей в себя три блока: 1 - набор распределения вероятностей поверхностных плотностей потока метана для каждого элемента болотного ландшафта в каждой природной зоне; 2 - продолжительность периода эмиссии метана в каждой природной зоне; 3 - площади различных типов болот и соотношения микроландшафтов в них.

Зависимости эмиссии метана от факторов внешней среды определялись при помощи методов линейной регрессии, дисперсионного анализа и расчёта рангового коэффициента Спирмена. Расчёты были сделаны в программе STATISTICA 7.

Прогноз изменения эмиссии метана в XXI веке сделан на основе зависимостей потока метана от чистой первичной продуктивности (ЧПП), определённых для рассматриваемых природных зон в результате выполнения этого исследования. На существование зависимости эмиссии метана от ЧПП указано в работе [Taylor et al., 1991]. Актуальные значения ЧПП и прогноз их изменений в XXI веке получен с использованием математической модели, разработанной в Лаборатории математической экологии ИФА РАН, и климатической модели ИФА РАН на основе сценариев изменения антропогенных выбросов парниковых газов SRES A2 и SRES B1 [Голубятников и др., 2005; Елисеев и др, 2008; МГЭИК, 2007].

Глава 3. Оценка актуальной годовой эмиссии метана из болотных экосистем северной части Западной Сибири

Статистические данные полученных результатов полевых измерений представлены в табл. 1. Медиана выбрана как наиболее устойчивый к колебаниям отдельных значений статистический показатель набора измеренных значений. Наиболее высокие значения медиан характерны для наиболее увлажнённых ландшафтов. В северной тайге это эвтрофные болота (ППММ - 8,64 мгCH_4*м$^{-2}$*час$^{-1}$), олиготрофные мочажины (ППММ - 3,5

Таблица 1. *Статистические показатели измеренных значений ППММ (мгCH_4*м$^{-2}$*час$^{-1}$) из болотных ландшафтов севера Западной Сибири (в числителе – медиана, в знаменателе – I и III квартили).*

Природная зона (подзона)	Тип болотного ландшафта							
	Сплавины	Мёрзлые бугры	Гряды	Олиготрофные мочажины	Мезотрофные болота	Эвтрофные Болота	Озёра*	Рямы
Тундра	3,17 1,50/4,26	0,05 -0,01**/0,4	-	1,95 1,31/2,77	1,26 0,52/2,00	0,48 0,02/1,17	0,34 0,19/0,60	-
Лесотундра	-	0,01 -0,05/0,09	-	1,31 0,84/9,61	1,66 1,02/3,18	-	-	-
Северная тайга	4,16 3,01/4,36	0,00 -0,03/0,00	0,00 -0,01/0,00	3,50 0,89/4,50	-	8,64 5,67/13,28	0,17 0,00/1,02	0,92 0,29/2,19

* Фактически измерения проводились на озёрах, но полученные значения ППММ экстраполировались на внутриболотные озёра.

** Отрицательные значения ППММ означают поглощение атмосферного метана в толще торфа.

мгCH_4*м$^{-2}$*час$^{-1}$) и сплавины (ППММ - 4,16 мгCH_4*м$^{-2}$*час$^{-1}$). Сопоставимы с этим и значениями ППММ из тундровых сплавин, медиана – 3,17 мгCH_4*м$^{-2}$*час$^{-1}$. Наименьшие значения характерны для наиболее сухих элементов болотного ландшафта, где метанотрофные бактерии развивают наибольшую активность. Это северотаёжные гряды, где ППММ – 0 мгCH_4*м$^{-2}$*час$^{-1}$, а так же мёрзлые бугры во всех исследуемых природных зонах (подзонах), где ППММ – 0,05; 0,01; 0 мгCH_4*м$^{-2}$*час$^{-1}$ для тундры, лесотундры и северной тайги соответственно.

Площадь всех болот севера Западной Сибири составляет 287 тыс.км^2: тундровые болотные экосистемы занимают 71 тыс.км^2,

лесотундровые - 38 тыс.км^2, северотаёжные - 178 тыс.км^2 [Peregon et al., 2008]. По литературным данным [Глаголев, 2010] определены площади, занимаемые каждым элементом ландшафта (табл. 2). Наибольшие площади занимают тундровые эвтрофные болота, северотаёжные рямы, олиготрофные

Таблица 2. *Площади элементов болотных ландшафтов, тыс. км^2.*

Природная зона (подзона)	Сплавины	Бугры пучения	Гряды	Олиго-трофные мочажины	Мезо-трофные болота	Эвтро-фные болота	Озера	Рямы
Тундра	0,0	19,3	0,0	05,9	0,0	44,0	1,9	0,0
Лесотундра	0,0	23,3	0,2	08,7	0,2	1,4	4,2	0,0
Северная тайга	4,5	38,2	26,1	38,7	2,1	0,0	29,7	38,7
Весь север	*4,5*	*80,8*	*26,3*	*53,2*	*2,3*	*45,4*	*35,7*	*38,7*

мочажины и бугры пучения – 44,0; 38,7; 38,7; 38,2 тыс. км^2 соответственно. Наименьшие площади приходятся на лесотундровые гряды, мезотрофные болота и эвтрофные болота – 0,2; 0,2; 1,4 тыс. км^2 соответственно. Сплавины в тундре, лесотундре, гряды, мезотрофные болота и рямы в тундре практически отсутствуют, так же как и рямы в лесотундре и эвтрофные болота в северной тайге.

В соответствии с методологией «Стандартной модели» и учётом годового периода времени эмиссии рассчитана годовая эмиссия метана с каждого элемента болотного ландшафта. Так как в «Стандартной модели» для расчетов используются медианы массивов полученных значений, то в данной работе приведены расчеты медианы с использованием границ 95% доверительного интервала медианы для оценки диапазона вычисления региональной эмиссии [ГОСТ Р ИСО 16269-7-2004]. Результаты расчётов показаны в табл. 3.

Из полученных результатов следует, что наибольший вклад в региональную эмиссию вносят северотаёжные олиготрофные мочажины – 439 тыс. тонн метана в год, т.е. 57,3% годовой эмиссии метана из болот

рассматриваемой территории. Эта оценка объясняется значительной площадью мочажин и относительно большими значениями ППМ, характерными для этого типа болотного ландшафта. Весомый вклад в годовую эмиссию метана изучаемого региона вносят рямы и сплавины

Таблица 3. *Вклад элементов болотного ландшафта в эмиссию метана, $10^3 mCH_4 * год^{-1}$ (в числителе – значения, рассчитанные с использованием значения медианы, в знаменателе – границ доверительного интервала).*

Природная зона (подзона)	Сплавины	Бугры пучения	Гряды	Олиготрофные мочажины	Мезотрофные болота	Эвтрофные болота	Озера	Рямы	Всего
Тундра	0 0;0	2 0;13	0 0;0	28 22;35	0 0;0	51 9;112	2 1;2	0 0;0	**83** **32;162**
Лесотундра	0 0;0	1 -4;9	0 0;0	32 19;237	1 0;2	18 7;36	3 2;7	0 0;0	**55** **25;292**
Северная тайга	47 25;65	0 -6;0	0 -1;0	439 134;500	10* 4*;21*	0 0;0	16 -1;117	115 44;248	**628** **199;951**
Весь север	47 25;65	3 -10;22	0 -1;0	499 176;773	11 4;22	69 16;148	21 2;127	115 44;248	**766** **256;1405**

*Измерения на этом типе болотного ландшафта не проводились. Взяты средние значения между медианой, I и III квартилей значений ППМ с мезотрофных болот лесотундры и средней тайги, данные по средней тайге из [Клепцова, 2010].

северной тайги и эвтрофные болота тундры – 115; 47; 51 тыс. тонн метана в год, соответственно. Годовая эмиссия метана из болотных экосистем изучаемой территории оценена в пределах от 256 до 1405 тыс. тонн с наиболее вероятной оценкой в 766 тыс. тонн. Для сравнения в табл. 4 приведены величины эмиссии метана из других природных зон и подзон Западной Сибири согласно [Glagolev et al., 2010].

Из приведённых расчётов следует, что основной вклад в эмиссию метана из северных болот Западной Сибири вносят северотаёжные болота – 82% от эмиссии северных болот и 20,9% от региональной эмиссии. Вклад лесотундровых и тундровых болот в эмиссию метана из северных болот и всех болот Западной Сибири составляет – 7,2%/1,8% и 10,8%/2,8% соответственно. При этом суммарный вклад болотных экосистем севера Западной Сибири в региональную эмиссию составляет 25,5 %.

На основе выполненных экспериментальных работ, проведённых

расчётов потоков метана с различных типов болот рассматриваемого региона и типологической карты болот [Романова, 1977] составлена карта-схема эмиссии метана из болотных экосистем тундровой, лесотундровой и северотаёжной зон Западной Сибири (рис.6).

Таблица 4. *Вклад болотных экосистем различных природных зон и подзон в региональную эмиссию метана в Западной Сибири.*

Природная зона (подзона)	***Эмиссия $10^3 тCH_4 \cdot год^{-1}$***	***Вклад в региональную эмиссию, %***	***Вклад в эмиссию севера Западной Сибири, %***
Тундра	83	2,8	10,8
Лесотундра	55	1,8	7,2
Северная тайга	628	20,9	82,0
Север Западной Сибири	***766***	25,5	100,0
Средняя тайга	530	17,6	–––
Южная тайга	1 130	37,6	–––
Подтайга	380	12,7	–––
Лесостепь	190	6,3	–––
Степь	10	0,3	–––
Вся Западная Сибирь	***3 003***	100,0	–––

Глава 4. Определение природных факторов, влияющих на эмиссию метана

Определение факторов, влияющих на эмиссию метана, проводилось в 2-х масштабах: в масштабе элемента болотного ландшафта в пределах одной природной зоны и в масштабе болот всей территории исследования.

Для определения факторов окружающей среды, влияющих на эмиссию метана в масштабе элемента болотного ландшафта, применялся регрессионный анализ с использованием линейных и нелинейных множественных уравнений регрессии. Нелинейный регрессионный анализ выявил наличие зависимости значений ПППМ от квадрата значений факторов окружающей среды, но так оценки коэффициентов таких уравнений составляют порядок $1*10^{-1}$ - $1*10^{-4}$, то для расчётов можно использовать линейные зависимости. Таким образом, показано, что в диапазоне измеренных значений существует линейная зависимость значений

ППП М от показателей окружающей среды.

Ниже для ряда элементов болотного ландшафта приведены линейные уравнения регрессии, с коэффициентом детерминации $R^2>0,5$, вероятность уравнений по F-критерию составляет более 99%, все коэффициенты являются значимыми:

тундровые олиготрофные мочажины:

ППП М+1 = (3,43±2,17)Tpr – (0,86±0,33)Tox – (1,03±0,96)Lpr-

-(0,1±0,08) Lpr*Tpr, (R^2=0,89);

лесотундровые олиготрофные мочажины:

ППП М+1 = -(9,9±6,11)Tpr – (0,28±0,14)Lpr*Tpr, (R^2=0,89);

лесотундровые мезотрофные болота:

ППП М+1 = (55,77±32,35) – (9,49±5,59)pH, (R^2=0,89);

северотаёжные бугры пучения:

ППП М+1 = –(0,11±0,1)Lox*Tox, (R^2=0,63);

ППП М+1 = (2,36±1,43)Tox – (0,56±0,41)Lox -(0,1±0,06)Lox*Tox, (R^2=0,63);

северотаёжные гряды:

ППП М+1 = 1,24±0,9 – (0,002±0,001)Lpr, (R^2=0,62),

где Tpr - средняя температура метанпродуцирующего слоя (МПС), °С; Tox - средняя температура метанокисляющего слоя (МОС), °С; Lpr - мощность МПС, см; Lpr*Tpr - сантиметро-градусы МПС; Lox*Tox - сантиметро-градусы МОС; pH - среднее значение кислотности болотных вод на глубине до 45 см от поверхности болота.

Проведённое исследование показало, что наиболее значимыми по частоте встречаемости во всех полученных уравнениях факторами являются: - средние температуры и мощности метанпродуцирующего и метан-окисляющего слоёв; средняя кислотность верхнего слоя болотных вод и сантиметро-градус метанокисляющего слоя встречаются по 2 раза.

- средняя электропроводность верхнего слоя болотных вод и сантиметро-градус метанпродуцирующего слоя встречаются один раз.

Для решения задачи поиска зависимости значений ППППМ от условий окружающей среды в масштабе болот всей территории исследования, использовались дисперсионный анализ и ранговый коэффициент корреляции Спирмена. Учитывая ограничения, которые накладывает дисперсионный анализ, проанализировано различие средних значений логарифма значений ППППМ+1 по градациям следующих факторов: мощность МОС, средняя температура МОС, мощность МПС и средние значения кислотности и электропроводности болотных вод на глубине до 45 см от поверхности болота. Наиболее выраженный тренд был обнаружен для градаций мощности МПС (рис. 2), что указывает на влияние мощности МПС на значения ППППМ.

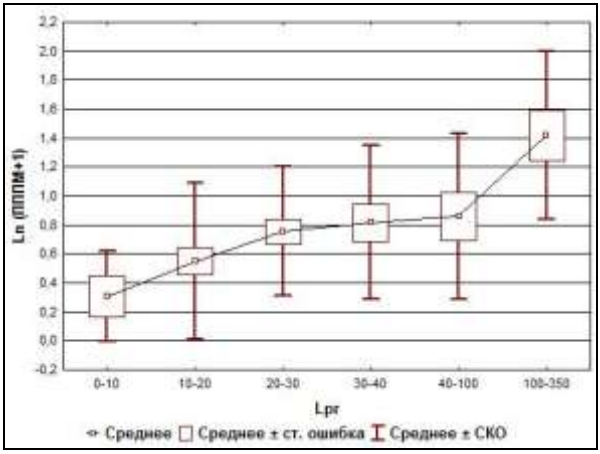


Рисунок 2. Диаграмма размаха логарифма (ППППМ+1) по градациям мощности МПС (Lpr).

Не для всех факторов окружающей среды были получены чёткие тренды. По этой причине для анализа влияния факторов окружающей среды на эмиссию метана был использован ранговый коэффициент корреляции Спирмена. По результатам расчёта этого показателя обнаружена слабая корреляция между значениями логарифма значений ППППМ+1 и мощностью МПС и сантиметро-градусами МПС.

Глава 5. Прогноз эмиссии метана из болотных экосистем северной части Западной Сибири в XXI веке

В связи с ожидаемым изменением климата в XXI веке актуально связанное с этим прогнозирование различных изменений в биосфере, в том числе и изменение эмиссии метана из болотных экосистем Западной Сибири. В качестве основы для прогноза использован факт существования зависимости эмиссии метана от чистой первичной продуктивности (ЧПП) на ограниченных площадях [Taylor, 1991]. Для каждой природной зоны рассматриваемой территории были проанализированы зависимости между актуальным потоком метана из болот и ЧПП болот, используя пространственное разрешение 0,5ºx0,5º. Значение ЧПП болот рассчитывалось как пропорциональная доля от ЧПП, приходящаяся на всю ячейку 0,5ºx0,5º. За коэффициент пропорциональности принималась доля территории ячейки, занятая болотными экосистемами. ЧПП для каждой ячейки было получено из расчётов математической модели ЛМЭ ИФА РАН. На основе данных о значениях ЧПП болот и эмиссии метана в ячейках заданного пространственного разрешения в программе EXEL были получены искомые зависимости (рис. 3-5).

Таким образом, для северной тайги был получен коэффициент линейного тренда (пропорциональности) 7,2758 (R^2=0,8898), для лесотундры – 3,5528 (R^2=0,5378), и для тундр – 5,8958 (R^2=0,7893). Эти зависимости использованы для оценки отклика потока метана на климатические изменения. Были рассмотрены ожидаемые климатические изменения согласно прогнозу климатической модели ИФА РАН для умеренного сценария антропогенных воздействий SRES B1, который прогнозирует дальнейшую глобализацию и решение экономических и социальных проблем, а также поддержку окружающей среды в устойчивом состоянии и для жёсткого сценария антропогенных воздействий SRES A2, который предполагает регионализацию демографических и политических процессов

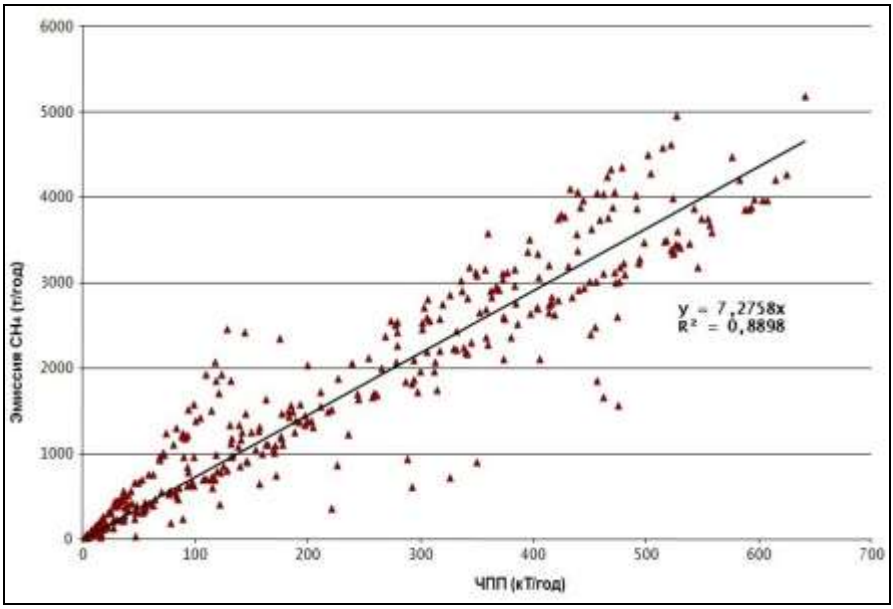


Рисунок 3. Зависимость эмиссии метана от ЧПП в северной тайге.

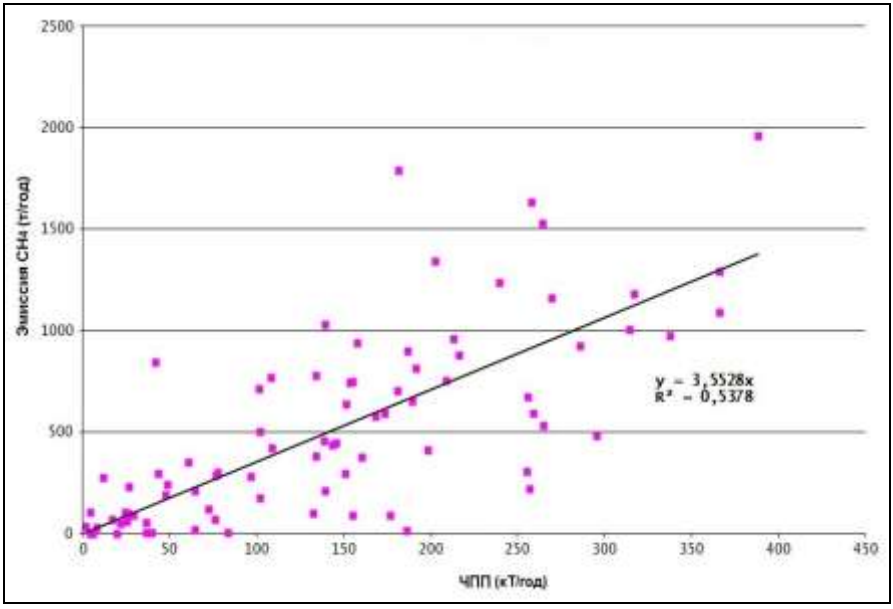


Рисунок 4. Зависимость эмиссии метана от ЧПП в лесотундре.

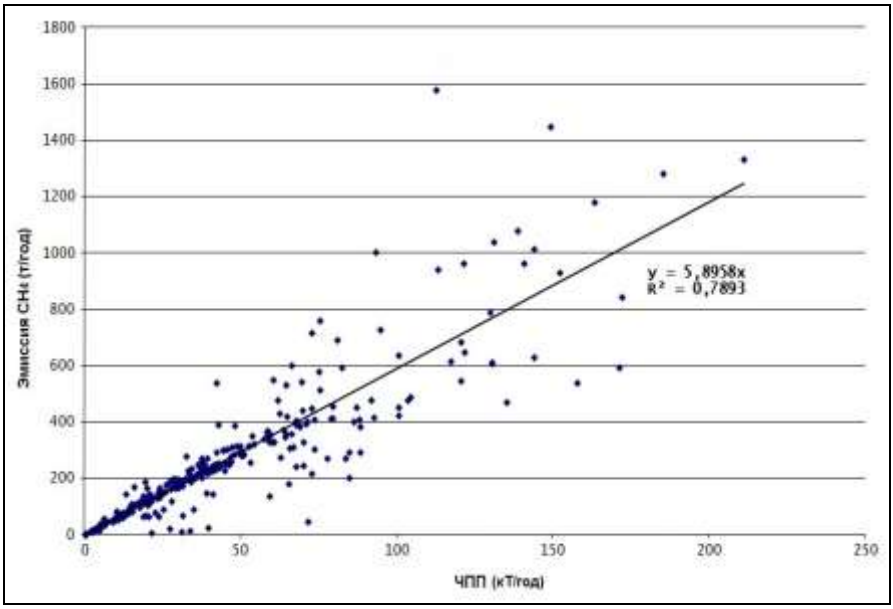


Рисунок 5. Зависимость эмиссии метана от ЧПП в тундре.

со значительной дифференциаций экономик регионов.

На рис. 6 и 7 представлены значения актуальной эмиссии метана из болотных экосистем северной части Западной Сибири и значения ЧПП болотных экосистем этой территории. На рис. 8-15 отражены пространственно распределённые прогнозные значения изменения ЧПП и рассчитанные на их основе значения эмиссии метана. Предполагалось, что до конца XXI века не произойдёт ни смещения природных зон, ни изменения площадей болот в каждой пространственной ячейке.

Результаты моделирования приведены в табл.5. Согласно выполненным расчётам, при реализации сценария SRES A2 эмиссия метана из болотных экосистем северной части Западной Сибири будет увеличиваться: к 2050 году вероятен рост эмиссии на 16,7 % до значения в 894 Кт в год, а к концу XXI века эмиссия может увеличиться до 1070 Кт в год, что превысит современное её значение на 39,7%. Другой тренд изменения

эмиссии метана из болотных экосистем рассматриваемого региона прогнозируется по умеренному сценарию антропогенного воздействия SRES B1: в середине XXI века эмиссия метана ожидается равной 919 Кт в год, что превышает современную эмиссию на 20 %, в конце XXI века эмиссия метана ожидается несколько меньше чем в середине – 918 Кт в год.

При сравнении изменений эмиссии метана из болотных экосистем природных зон северной части Западной Сибири можно выделить следующие закономерности: к концу XXI века наибольшее увеличение эмиссии прогнозируется для северной тайги и тундры в примерно равных пропорциях, так, по сценарию SRES A2 увеличение эмиссии из болот северной тайги прогнозируется на уровне 41,7 %, а тундры – 37,3 %.

Таблица 5. Актуальные и прогнозные значения эмиссии метана из болотных экосистем северной части Западной Сибири в XXI веке, Кт/год. В скобках указано увеличение в %.

Природная зона (подзона)	**Начало XXI в.**	**2050 год**		**2100 год**	
		SRES A2	**SRES B1**	**SRES A2**	**SRES B1**
Тундра	83	95 (14,5)	99 (19,3)	114 (37,3)	100 (20,5)
Лесотундра	55	58 (5,5)	59 (7,3)	64 (16,4)	60 (9,1)
Северная тайга	628	741 (18,0)	761 (21,2)	890 (41,7)	758 (20,7)
Весь север	*766*	*894 (16,7)*	*919 (20,0)*	*1070 (39,7)*	*918 (19,8)*

По сценарию SRES B1 эти значения для северной тайги и тундры составляют, соответственно, 20,7 % и 20,5 %. Прогнозное увеличение эмиссии метана в конце XXI века из болотных экосистем лесотундры не столь значительно: для сценариев SRES A2 и SRES B1 эмиссии метана увеличатся, соответственно, на 16,4 % и 9,1 %. При этом, в середине XXI века ожидается более сильная дифференциация прогнозов для северной тайги и тундры. Так, если для северной тайги по сценариям SRES A2 и SRES B1, соответственно, прогноз увеличения эмиссии метана составляет 18 % и 21,2 % и для тундры – 14,5% и 19,3%, то для лесотундры эти значения значительно меньше – 5,5% и 7,3%. Таким образом, можно сделать вывод о пространственной неравномерности прогнозируемых изменений эмиссии метана из болотных экосистем севера Западной Сибири в XXI веке.

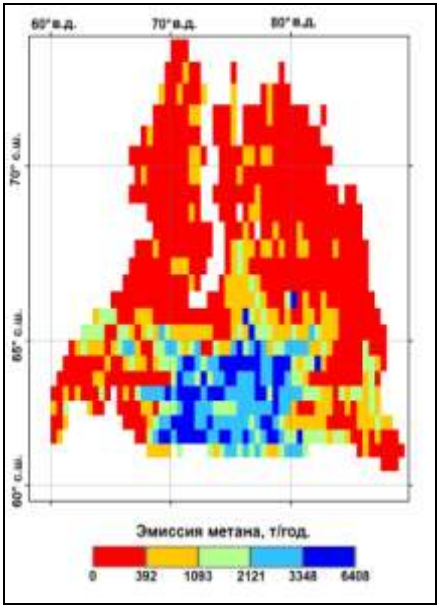


Рисунок 6. Актуальная эмиссия метана.

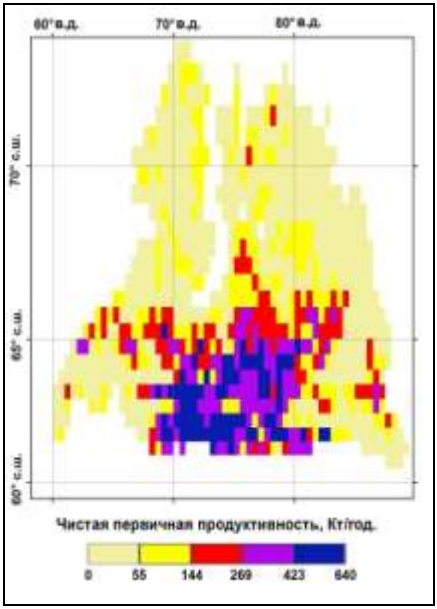
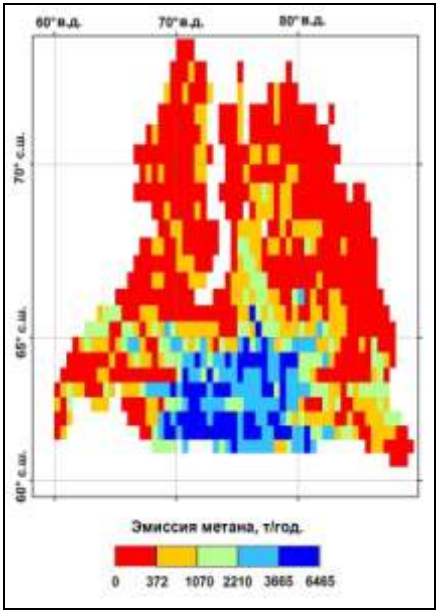
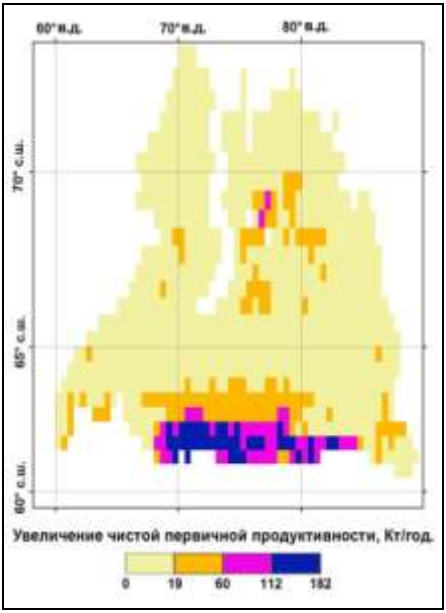
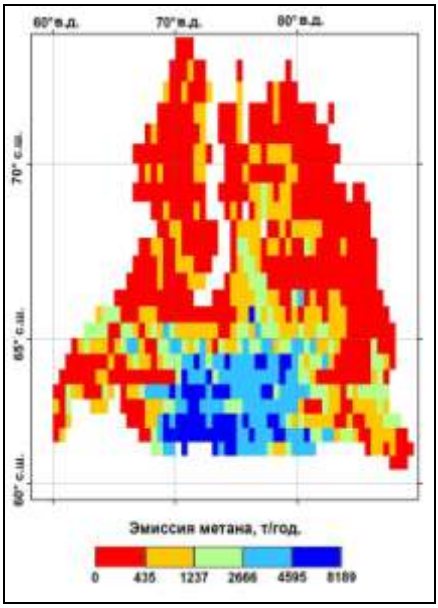


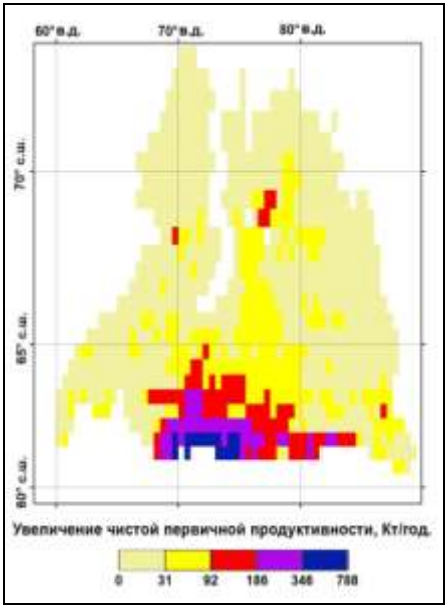
Рисунок 7. Актуальная ЧПП.



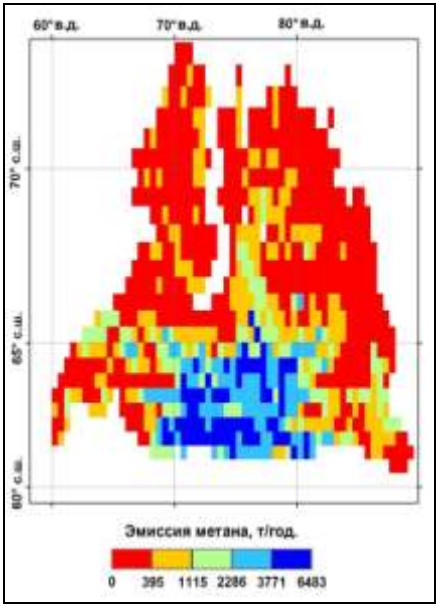


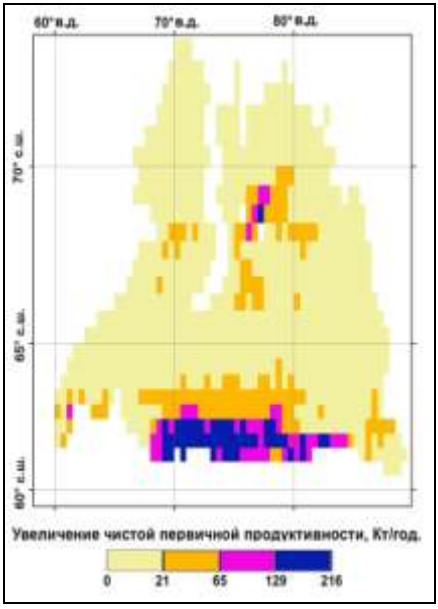
Рисунки 8 и 9. Прогноз эмиссии CH_4 и увеличения ЧПП в 2050 году по сценарию SRES A2.



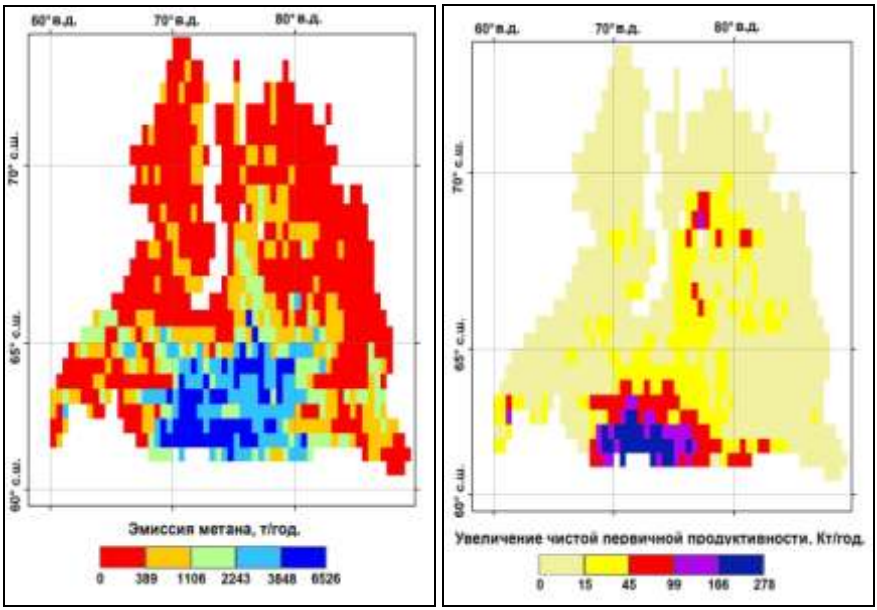


Рисунки 10 и 11. Прогноз эмиссии CH_4 и увеличения ЧПП в 2100 году по сценарию SRES A2.





Рисунки 12 и 13. Прогноз эмиссии CH_4 и увеличения ЧПП в 2050 году по сценарию SRES B1.



Рисунки 14 и 15. Прогноз эмиссии CH_4 и увеличения ЧПП в 2100 году по сценарию SRES B1.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Актуальная эмиссии метана из болотных экосистем севера Западной Сибири оценивается примерно в 766 Кт/год. Основная доля (82%) эмиссии приходится на болотные экосистемы северной тайги. Среди элементов болотного ландшафта самый большой вклад в эмиссию метана вносят олиготрофные мочажины северной тайги – 439 Кт/год (57,3% региональной эмиссии). Существенный вклад в региональную эмиссию вносят северотаёжные рямы, сплавины и тундровые эвтрофные болота – около 15, 6 и 7 процентов, соответственно.

2. На эмиссию метана в масштабе всей территории исследований влияет в наибольшей степени мощность метанпродуцирующего слоя, в меньшей степени влияние оказывают средняя температура и мощность метан-окисляющего слоя, значения сантиметро-градуса метанпродуцирующего слоя, средние значения кислотности и электропроводности

приповерхностного слоя болотных вод. Выявленные зависимости значений ПППМ в масштабе элемента ландшафта одной природной зоны севера Западной Сибири от условий окружающей среды носят линейный характер. Наиболее сильно влияющие на значения ПППМ в масштабе элемента ландшафта в границах одной природной зоны выделены средние температуры и мощности метанпродуцирующего и метанокисляющего слоёв, а так же средняя кислотность верхнего слоя болотных вод и сантиметро-градус метанокисляющего слоя.

3. К концу XXI века наибольшая эмиссия метана из болот севера Западной Сибири прогнозируется при сценарии SRES A2 – 1070 Кт/год, что превышает современную эмиссию на 39,7 %, при этом ожидается, что в течении XXI века эмиссия будет увеличиваться. Другой тренд изменения эмиссии метана прогнозируется при сценарии SRES B1: в середине XXI века эмиссия метана ожидается равной 919 Кт/год, что превышает современную эмиссию на 20 %, тогда как в конце XXI ожидается уменьшение эмиссии метана до 918 Кт/год. Прогнозируемые изменения эмиссии метана из болотных экосистем севера Западной Сибири в XXI веке пространственно неравномерны. К концу XXI века наибольшее увеличение эмиссии прогнозируется для северной тайги и тундры.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Статьи в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК для публикации основных результатов диссертационной работы.

1. Глаголев М.В., Клепцова И.Е., Казанцев В.В., Филиппов И.В., Мачида Т., Максютов Ш.Ш. 2009. Эмиссия метана из типичных болотных ландшафтов лесостепи Западной Сибири: к «стандартной модели» Bc5 // Вестник ТГПУ. Вып. 11(89). С. 198-206.

2. Глаголев М.В., Клепцова И.Е., Казанцев В.С., Филиппов И.В., Максютов Ш.Ш. 2010. Эмиссия метана из болотных ландшафтов тундры Западной

Сибири // Вестник ТГПУ. Вып. 3(93). С. 78-86.

3. Глаголев М.В., Клепцова И.Е., Филиппов И.В., Казанцев В.С., Мачида Т., Максютов Ш.Ш. 2010. Эмиссия CH_4 из болотных ландшафтов подтайги Западной Сибири: к «стандартной модели» Вс5 // Вестник МГУ, сер. 17: Почвоведение. №2. С. 43-50.

4. Сабреков А.Ф, Глаголев М.В., Филиппов И.В., Казанцев В.С., Лапшина Е.Д., Мачида Т., Максютов Ш.Ш. 2012. Эмиссия метана из типичных болотных ландшафтов северной и средней тайги Западной Сибири: к стандартной модели Вс8. //Вестник МГУ, сер.17: Почвоведение. №1. С. 50-59.

Прочие публикации

1. Казанцев В.С., Глаголев М.В. 2008. Эмиссия CH_4 в подзоне северной тайги: «стандартная модель» Аа3 // Динамика окружающий среды и глобальные изменения климата: Сборник научных трудов кафедры ЮНЕСКО Югорского государственного университета. Вып. 1 / Глаголев М.В., Лапшина Е.Д. (ред). – Новосибирск: НГУ. – С. 200-207.

2. Глаголев М.В., Клепцова И.Е., Казанцев В.С., Максютов Ш.Ш. 2009. Эмиссия CH_4 из болотных ландшафтов подтайги Западной Сибири: к «стандартной модели» Аа3 // Проблемы изучения и использования торфяных ресурсов Сибири: Материалы международной научно-практической конференции. – Томск: Ветер. - С. 141-144.

3. Глаголев М.В., Клепцова И.Е., Казанцев В.С., Максютов Ш.Ш. 2009. Эмиссия CH_4 из болотных ландшафтов подтайги Западной Сибири: к «стандартной модели» Аа3 // Проблемы изучения и использования торфяных ресурсов Сибири: Материалы международной научно-практической конференции. – Томск: Ветер. - С. 141-144.

4. Казанцев В.В., Глаголев М.В. 2010. Эмиссия метана из болотных экосистем средней тайги Западной Сибири // Материалы Всероссийской

научной конференции XIII Докучаевские молодежные чтения «Органо-минеральная матрица почв» / Под ред. Б.Ф. Апарина. – СПб.: Изд. дом СПбГУ. – С. 33-34.

5. Глаголев М.В., Сабреков А.Ф., Казанцев В.С. 2010. Физикохимия и биология торфа. Методы измерения газообмена на границе почва-атмосфера. – Томск: Изд-во ТГПУ. – 104 С.

6. Glagolev M., Kazantsev V., Sachs T., Maksyutov S. 2010. Methane Fluxes from Western Siberian Tundra Wetlands // Abstracts from the Third European Conference on Permafrost “Thermal State of Frozen Ground in a Changing Climate During the IPY” (13-17 June 2010, Svalbard, Norway). P. 274.

7. Kazantsev V.S., Glagolev M.V., Golubyatnikov L.L., Maksyutov S.S. 2010. Methane emissions from lakes in West Siberian wetlands // Geophysical Research Abstracts, Vol. 12, EGU2010. P. 358. EGU General Assembly 2010 (Vienna, Austria).

8. Казанцев В.С., Глаголев М.В. 2011. Эмиссия метана из болотных экосистем южной тундры Западной Сибири // Материалы Всероссийской научной конференции XIV Докучаевские молодежные чтения «Почвы в условиях природных и антропогенных стрессов» / Под ред. Б.Ф. Апарина. – СПб.: Изд. дом СПбГУ. – С. 321-322.

9. Kazantsev V., Glagolev M., Golubyatnikov L.L., Maksutov S. 2011. Methane emissions from tundra wetlands in West Siberia. Geophysical Research Abstracts, Vol. 13, EGU2011-277, EGU General Assembly 2011 (Vienna, Austria).

10. Казанцев В.С., Бердников С.В., Немцева Л.Д. 2011. Применение данных дистанционного зондирования и гис-технология для оценки эмиссии метана из болотных экосистем северной части Западной Сибири // Современные проблемы генезиса, географии и картографии почв : Сб. мат. V Всеросс. конф. с международным участием. (Томск, 1–5 октября 2011 г.). – Томск: ООО Копи-М. – С. 307-310.