

Федеральное Бюджетное Государственное Учреждение  
«Государственный гидрологический институт»

На правах рукописи



Ренёва Светлана Александровна

ИЗМЕНЕНИЯ ЭМИССИИ МЕТАНА  
ИЗ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ БОЛОТ РОССИИ В УСЛОВИЯХ  
ПРОГНОЗИРУЕМОГО КЛИМАТА

Специальность 25.00.30  
"Метеорология, климатология, агрометеорология"

- 1 ДЕК 2011

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук



Санкт – Петербург

2011

Работа выполнена в Федеральном Бюджетном Государственном Учреждении  
«Государственный гидрологический институт»

Научный руководитель: доктор географических наук,  
заведующий Отделом исследования  
изменений климата ФБГУ «ГТИ»  
Анисимов Олег Александрович

Официальные оппоненты: доктор географических наук,  
профессор, заведующий Кафедрой  
физической географии и ландшафтного  
планирования СПбГУ  
Чистяков Кирилл Валентинович

доктор географических наук,  
главный научный сотрудник  
Института Криосферы Земли СО РАН  
Москаленко Наталия Георгиевна

Ведущая организация Главная Геофизическая Обсерватория  
им. А.И. Воейкова

Защита диссертации состоится «27» *зек* 2011 года в 15<sup>00</sup> часов на заседании совета  
ДМ212.232.21 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Санкт-  
Петербургском государственном университете по адресу:

199178, Санкт-Петербург, 10-я линия В.О., д. 33, центр дистанционного обучения  
«Феникс».

e-mail: spb.geograph@gmail.com

факс: (812) 328-41-59

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке им. А.М. Горького Санкт-  
Петербургского государственного университета по адресу:  
199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная 7/9

Автореферат разослан «19» *нояб* 20 11 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета, к.г.н.



Г.В. Пряхина

## Общая характеристика работы

### Актуальность

Значительные изменения климата в северной полярной области, имевшие место в 20 веке и продолжившиеся в первом десятилетии 21 века, вызвали широкий спектр последствий для природных систем. Их изучению посвящена многочисленная научная литература. Одним из вопросов, который в последние годы вышел за рамки чисто научного анализа и оказался в центре внимания широкой общественности и лиц, принимающих политические решения, является возможность усиления потепления за счет изменения углеродного цикла в Арктике. Этот вопрос приобретает особую актуальность в связи с продолжающимися международными переговорами об ограничении эмиссии парниковых газов и об экономических и политических мерах по достижению этой цели. Одной из практически важных задач является оценка вклада различных источников парниковых газов, расположенных на территории России, в глобальное радиационное воздействие, а также возможные изменения интенсивности этих источников в связи с климатическим потеплением.

**Предмет исследования** – углеродный цикл многолетнемерзлых болот криолитозоны России в условиях изменения климата.

**Цель работы** – оценить воздействие эмиссии метана из многолетнемерзлых болот криолитозоны России на глобальную температуру в условиях климата 21 века.

В ходе работы были решены следующие задачи:

1. Составлена цифровая карта многолетнемерзлых болот России.
2. Построена в электронном виде типологическая карта болот, основанная на растительной классификации Н.Я.Каца.
3. Оценена доля площади, занимаемая болотами в ячейках модельной сетки 0,5 градуса по широте и долготе для территории России.
4. Проведен анализ моделей вечной мерзлоты и углеродного газообмена и отобраны модели оптимального уровня детализации, обеспеченные всеми необходимыми для расчетов входными данными.
5. Проведена валидация отобранных моделей по данным наблюдений.
6. Отобраны пять гидродинамических моделей, наилучшим образом воспроизводящих изменения климата 20 века в криолитозоне России.
7. Рассчитаны изменения глубины сезонного оттаивания, температуры многолетнемерзлых пород (ММП) и эмиссии метана для пяти климатических проекций на середину 21 века.
8. Получена оценка увеличения глобальной температуры воздуха, обусловленного эмиссией метана из многолетнемерзлых болот России к середине 21 века.

### **Научная новизна:**

- впервые дается количественная оценка возможного увеличения эмиссии метана из многолетнемерзлых болот России для климатических проекций на середину 21 века;
- впервые оценивается влияние эмиссии метана, обусловленной таянием многолетнемерзлых болот криолитозоны России, на глобальный климат;
- составлена цифровая база болот России, содержащая данные по площадям болот, их типу, глубине торфяной залежи и характерным эмиссиям метана.

### **Практическое значение работы**

Результатом проведенной работы является согласованная концепция взаимодействия углеродного цикла и климата, а также количественная модель влияния эмиссии парниковых газов из многолетнемерзлых болот на глобальный климат. Выводы, полученные в работе могут быть использованы для научного обоснования разрабатываемых сейчас пост-Киотских соглашений и служить научной основой для поддержки соответствующих политических решений. Результаты данной работы получили практическое применение в выполняемых с 2011 года: проекте РФФИ по программе ориентированных фундаментальных междисциплинарных исследований (ОФИ-м) и международном проекте европейской комиссии по изучению углеродного цикла в Арктике. Разработанные в работе методы и модели применяются в этих проектах для изучения гипотезы о возможности «метановой катастрофы» на шельфе морей Восточной Арктики.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

- Цифровая карта криолитозоны России, отражающая пространственное распределение болот различной типизации (в классификации Н.Я.Каца, основанной на растительности).
- Оценка изменения эмиссии метана из многолетнемерзлых болот криолитозоны России для климатических проекций на 21 век.
- Полученная расчетная оценка приращения глобальной температуры воздуха за счет изменения эмиссии метана при таянии многолетнемерзлых болот криолитозоны России.
- Вывод о незначительном влиянии возможного увеличения поступления метана в атмосферу из многолетнемерзлых болот России на глобальный климат.

### **Апробация работы**

Последовательные этапы и основные результаты исследований были представлены на семинарах Отдела климата ГГИ (СПб, 2004-2010), заседании Ученого совета ГГИ (СПб, 2006), а также школах-конференциях молодых ученых МАПАТЭ и САТЭП (2003, 2005, 2009, 2010), международной научной конференции,

проводимой в рамках ERCA (European Research Course on Atmospheres, Франция, 2003), 6-м Всероссийском гидрологическом съезде (СПб, 2004), семинаре в Университете Амстердама (Голландия, 2005), международной научной конференции «Вычислительно-информационные технологии для наук об окружающей среде» (Новосибирск, 2005), 4-м международном симпозиуме по не-CO<sub>2</sub> парниковым газам – NCGG-4 (Голландия, 2005), симпозиуме «Влияние изменения климата на субарктические талые болота и обратные связи парниковых газов» (Швеция, 2008), Европейской Генеральной Ассамблее наук о Земле – EGU (Австрия, 2009), научном Российско-Британском семинаре по региональному моделированию изменений климата и последствий таких изменений (СПб, 2009), Всероссийской научной конференции «Современные проблемы климатологии» (СПб, 2009), Международной научной конференции Европейского Метеорологического общества EMS&ECAS (Zürich, 2010).

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 17 работ, из них: 4 – статьи в изданиях, рекомендованных ВАК; 6 – статьи в сборниках; 7 – работы, опубликованные в материалах всероссийских и международных конференций и симпозиумов.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения с основными выводами. Она изложена на 116 страницах текста, сопровождается 29 иллюстрациями, 13 таблицами и 2 приложениями. Список использованных источников включает 158 наименований.

## **Содержание работы**

### **Глава 1. Углеродный газообмен природных систем и его влияние на глобальный климат**

По некоторым оценкам (Global monitoring division, 2009; Алексеев и др., 1999) количество углерода в атмосфере возросло с доиндустриального периода (до 1750 г.) по настоящее время с 578 Гт до 766 Гт. Современный вклад углекислого газа (CO<sub>2</sub>) в парниковый эффект составляет 7,2°C, метана (CH<sub>4</sub>) – 0,8°C (Монин, 2000). Анализ данных наблюдений, полученных от Программы Глобальной службы атмосферы ВМО, показывает, что глобальные осредненные уровни содержания в атмосфере двуокси углерода и метана достигли в 2009 г. новых максимумов, 386,8 млн<sup>-1</sup> и 1803 млрд<sup>-1</sup> соответственно. Эти значения превышают значения доиндустриального периода (280 млн<sup>-1</sup> и 715 млрд<sup>-1</sup>) на 38% и 158%. После почти десятилетнего отсутствия роста содержание метана в атмосфере увеличилось за последние три года. Причины возобновления роста содержания метана в атмосфере точно не установлены, но в их число могут входить эмиссии из природных источников (в северных широтах и тропиках). Годовой индекс содержания парниковых газов

показывает, что за период с 1990 по 2009 гг. радиационное воздействие на атмосферу, создаваемое всеми долгоживущими парниковыми газами, выросло на 27,5 % (ВМО, 2010).

Метан – второй после углекислого газа по значимости парниковый газ. Его способность поглощать инфракрасное излучение больше, чем у углекислого газа в 21 раз (на единицу массы). В атмосфере содержится около 5 Гт метана (Иващенко, 2005). Поступает метан в атмосферу как из естественных источников (например, болота, озера, термитники), так и антропогенных (например, сельское хозяйство, мусорные свалки). По данным (IPCC, 2001; Оценочный доклад, 2008) заболоченные земли формируют 34% общего поступления. Вклад естественных глобальных источников метана в общий баланс составляет 270 Мт  $\text{CH}_4$  в год (Prather, Ehhalt, 2001), из которых болота стоят на первом месте. Современная годовая эмиссия метана из болот России, по оценкам различных авторов, составляет 11-33 Мт. Поток метана из заболоченных территорий в значительной степени зависит от температуры почвы и уровня почвенно-грунтовых вод (Крылова и Крупчатников, 2002). Сток метана из атмосферы осуществляется в основном в результате фотохимических реакций, небольшое его количество поглощается почвенными бактериями, а также небольшая часть уходит в стратосферу (Бажин, 2006).

Содержащие органический углерод ММП представляют собой один из крупнейших северных резервуаров углерода, восприимчивых к воздействиям изменения климата. Быстро прогревающийся высокоширотный регион обладает потенциалом для выброса большого количества метана в атмосферу, что может вызвать сильную положительную обратную связь с климатом. Недавние исследования показали, что мерзлые арктические почвы содержат около 1672 Гт углерода, что составляет приблизительно половину глобального почвенного запаса, из которых 277 Гт содержится в болотах (Schuur et al., 2008). Содержание почвенного углерода по всей толще торфяников криолитозоны может достигать 32–70 кг  $\text{C}/\text{м}^2$  (Peter et al., 2009).

Образование углекислого газа и метана зависят, в основном, от активности почвенных бактерий, температуры почвы, структуры растительных сообществ, химических характеристик торфа и уровня грунтовых вод, с которым связаны окислительные реакции (Blodau and Moore, 2003). Соотношение метана и углекислого газа контролируется содержанием кислорода в торфе, которое зависит от уровня воды. Метан в торфяной залежи находится как в растворенном, так и в газообразном состоянии. При этом выпуклые верховые болота атмосферного питания характеризуются большими его концентрациями по сравнению с низинными болотами атмосферно-грунтового питания и запа-болотами (Сирин, 1999). Различие в уровне концентраций метана олиготрофных (сфагновых) и евтрофных (древесных, осоковых, травяных) болот связано с биогеохимическими условиями метаногенеза

этих сред. Наблюдаемая явная связь между характерным видом растительности различных типов болот и потоками метана дает возможность проводить оценки эмиссий метана с больших площадей, используя только данные о типе болота, что весьма существенно, т.к. полевые измерения эмиссии метана из почвы весьма немногочисленны и очень локальны.

## **Глава 2. Методика расчета эмиссии метана из многолетнемерзлых болот криолитозоны России.**

Общую картину воздействия изменения климата на ММП можно представить следующим образом. Более высокая температура воздуха приведет к сокращению площади распространения приповерхностной вечной мерзлоты, часть ее перейдет в реликтовую форму, а там, где она сохранится, увеличится глубина сезонного оттаивания. Локально сильное влияние может оказывать снежный покров, гидрологические и почвенные факторы, а также растительность. Существующие модели вечной мерзлоты упрощенно учитывают это влияние, что является одной из возможных причин значительных расхождений между результатами модельных расчетов. Другой причиной является отсутствие или низкое качество климатических данных по всей криолитозоне России, необходимых для модельных расчетов состояния вечной мерзлоты.

В данной работе для расчета глубины сезонного оттаивания и температуры талого слоя многолетнемерзлых болот была выбрана стационарная модель вечной мерзлоты (Анисимов и Белолуцкая, 2003). Расчет проводился последовательно в узлах регулярной сетки с пространственным шагом 0.5 градуса по широте и долготе. Изменения мощности сезонно-талого слоя мерзлого органического вещества по всей криолитозоне России были рассчитаны для пяти климатических проекций (ECHAM-4, GFDL, CCC, HadCM-3 и NCAR), рекомендованных оценочным отчетом Арктического Совета (ACIA, 2005) для циркумполярного региона, и трех временных срезов (2025, 2050 и 2075).

Объем талого торфа в каждой из ячеек расчетной сетки был получен путем умножения рассчитанных глубин сезонного оттаивания на долю площади, которую занимают мерзлые болота. Для определения этих долей были использованы топографические карты России масштаба 1:1 000 000, на которых были выделены и оцифрованы контуры болот и с применением ГИС технологий определены доли площади, занимаемые ими в ячейках расчетной сетки (рис 1).

Эмиссия метана с поверхности болот рассчитывалась по модели, учитывающей изменения температуры и глубины сезонного оттаивания многолетнемерзлых грунтов и обусловленные этим изменения почвенного углеродного газообмена (Анисимов и др., 2005).

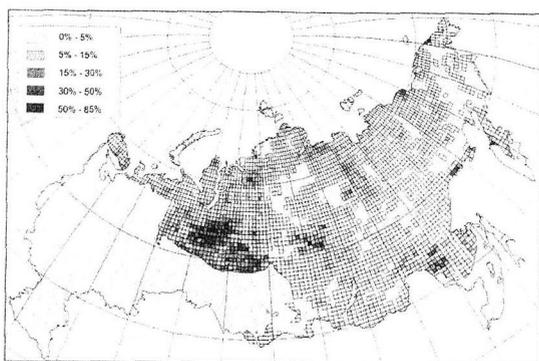


Рисунок 1. Доля площади, занимаемой многолетнемерзлыми болотами в ячейках пространственной сетки с шагом  $0.5^\circ$  по широте и долготе в криолитозоне России.

В результате обобщения множественных расчетов по физически полной модели для разных условий газообмена удалось сформулировать зависимость относительного изменения потока метана от глубины оттаивания и температуры поверхности почвы в следующем виде:

$$J_2/J_1 = \exp 0.1 (T_2 - T_1) \sqrt{H_2/H_1}, \quad (1)$$

где  $J_1$  и  $J_2$  – потоки метана за два различных периода времени,

$H_1$  и  $H_2$  – соответствующие глубины оттаивания,

$T_1$  и  $T_2$  – температуры поверхности почвы.

Уравнение (1) позволяет прогнозировать относительные изменения потока метана в атмосферу, обусловленные увеличением температуры органического субстрата и мощности сезонно-талого слоя. Важно при этом понимать, что, несмотря на наличие углерода в различных слоях криогенных почв, наибольший вклад будут давать болота, поскольку сезонно-талый слой в них находится полностью в пределах органического горизонта. При общем понимании этого механизма, до настоящего времени оценки потенциального вклада многолетнемерзлых болот при изменении климата в глобальный парниковый эффект оставались большей частью качественными. В данной работе получена количественная оценка для криолитозоны России.

### Глава 3. Прогноз эмиссии метана из многолетнемерзлых болот криолитозоны России при изменении климата.

Большая доля неопределенности оценки того, насколько велик будет вклад многолетнемерзлых болот криолитозоны России в баланс парниковых газов в атмосфере, связана со значительными различиями климатических проекций для 21 века. Результаты расчетов с использованием сценария эмиссии парниковых газов В2 показали, что все пять климатических проекций дают достаточно сложную

региональную картину изменения глубины сезонного оттаивания. Среди выбранных моделей проекцию GFDL можно назвать "средней", а NCAR и ECHAM-4, соответственно, наиболее консервативной и экстремальной в плане воздействия на многолетнемерзлые грунты. На рисунке 2 представлен результат расчетов относительного изменения глубины сезонного оттаивания по «средней» климатической проекции GFDL на середину 21 века.

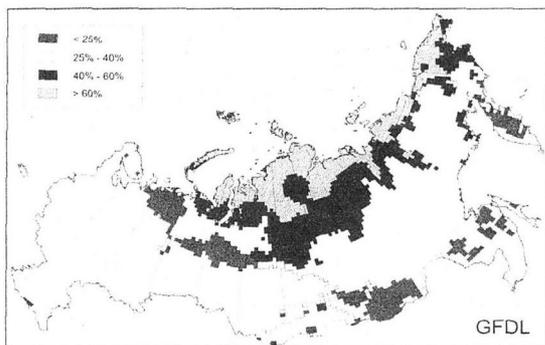


Рисунок 2. Относительное изменение глубины сезонного оттаивания мерзлых болот криолитозоны России на середину 21 века (климатическая проекция GFDL).

Для "средней" климатической проекции GFDL в первой четверти столетия, изменения глубины сезонного оттаивания мерзлых болот на большей части криолитозоны не будут превышать 15%, лишь в отдельных изолированных районах достигая 20%. В дальнейшем изменения усиливаются, подчиняясь в значительной степени широтной зональности. К середине столетия в южной периферийной области возможно увеличение мощности СТС мерзлых болот на 15%-20%; на большей части криолитозоны в зоне прерывистого распространения мерзлых пород, где в настоящее время СТС на мерзлых болотах составляет от 0.5 до 1 м – до 50%. На всем арктическом побережье глубина сезонного оттаивания болот может вырасти более чем на 50%. К концу столетия такие же сильные изменения возможны на большей части криолитозоны от арктического побережья приблизительно до 70 градуса северной широты, в то время как на оставшейся части глубина оттаивания может увеличиться, согласно прогнозу, на 25%-50%.

Комбинируя данные о прогнозируемом изменении мощности СТС и о доли площади, занимаемой многолетнемерзлыми болотами в каждой ячейке модельной сетки, можно оценить приращение талого органического субстрата, доступного для микробиологической активности и производства метана (таб.1).

Таблица 1. Расчетное увеличение объема сезонно талого слоя торфа многолетнемерзлых болот криолитозоны России ( $\text{км}^3$ ) для условий будущего климата. Расчеты мощности СТС проводились для влагосодержания торфа 600 мм/м (числитель) и 800 мм/м (знаменатель).

	2025	2050	2080
NCAR	–	80,61/88,59	–
GFDL	80,88/90,87	137,82/150,40	153,94/173,02
ECHAM – 4	–	228,92/249,04	–

Имеющиеся в настоящее время измерения потоков метана из многолетнемерзлых болот крайне немногочисленны и не дают представления об их пространственной и временной изменчивости в пределах криолитозоны России. По этой причине было возможно рассчитать лишь отношение прогнозируемой для условий будущего климата эмиссии многолетнемерзлых болот к ее современной величине. Для этого была использована обобщенная зависимость (1), причем изменение уровня болотных вод при потеплении из-за отсутствия достоверных данных не учитывалось.

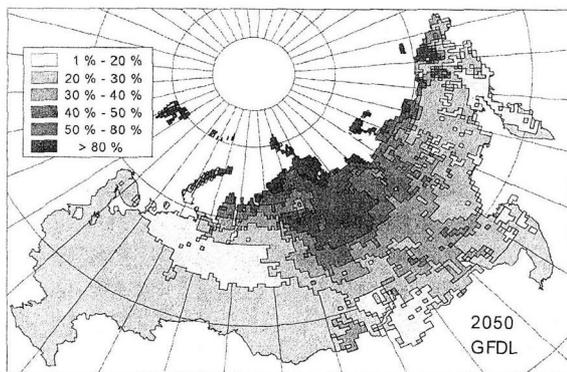


Рисунок 3. Прогнозируемое относительное изменение эмиссии метана из многолетнемерзлых болот криолитозоны России, % от современной нормы.

Результаты расчетов для прогнозируемых по модели GFDL климатических условий середины 21 века показаны на рисунке 3. Расчет указывает на то, что увеличение эмиссии метана из многолетнемерзлых болот будет достигать наибольших значений в наиболее холодной части сплошной криолитозоны. На отдельных участках, примыкающих к арктическому побережью, эмиссия может вырасти более чем на 80%. Необходимо при этом учитывать, что в этой области ее современная величина незначительна из-за короткого теплого периода и малой

глубины сезонного оттаивания. На большей части прерывистой криолитозоны прогнозируемое изменение эмиссии метана составит от 30% до 50%. В наименьшей степени изменения коснутся эмиссии метана в болотах восточной и юго-восточной частей криолитозоны, где, по данным расчета, она увеличится не более чем на 20%. Именно в этой области, как следует из карты на рисунке 1, сосредоточена большая часть многолетнемерзлых болот России.

Сравнив эту величину с современным потоком метана из той же области, можно рассчитать приращение в абсолютных единицах. Так, по данным различных авторов, современный поток метана из болот криолитозоны России составляет приблизительно 24-33 Мт/год, наибольшую часть которого (около 22.2 Мт/год) дает Западная Сибирь. В результате расчётов было установлено, что в среднем по всем климатическим проекциям к середине 21 века эта величина может вырасти приблизительно на 25%, что составляет 6-8 Мт/год.

В контексте воздействия на глобальную климатическую систему важна не сама полученная величина увеличения ежегодного поступления метана в атмосферу, а результирующее изменение концентрации этого газа и связанное с этим изменение радиационного воздействия. Рассчитать его можно, приняв во внимание, что среднее время жизни молекулы метана в атмосфере составляет около 12 лет (Prather et al., 2001). Таким образом, ежегодное дополнительное поступление 6-8 Мт увеличит равновесную концентрацию в атмосфере максимум на 100 Мт, или же на 0.04 ppm (объемных миллионных единиц). При том, что чувствительность глобально осредненной среднегодовой температуры воздуха к увеличению атмосферного содержания метана на 1 ppm составляет около 0.3 °C (Ramaswamy, 2001), воздействие рассмотренного выше механизма эмиссии метана за счет таяния болот криолитозоны России к середине 21 века может привести к росту глобальной температуры на 0.01 °C.

### **Заключение и основные выводы**

Проведенные в данной работе расчеты предполагали неизменность многих параметров окружающей среды, таких как растительность и гидрологический режим. В действительности же многие из них меняются при изменении климата, что также оказывает воздействие на сезонное оттаивание многолетнемерзлых болот и газообмен. Немногочисленные данные и расчеты (Анисимов и Белолуцкая, 2004) указывают на то, что во многих случаях изменения этих неклиматических факторов могут частично компенсировать первоначальное воздействие потепления до тех пор, пока оно не превышает некоторого предельного значения.

Еще один вопрос связан с концептуальными ограничениями использованного нами подхода, в частности с тем, что в нем болота зафиксированы, и их площадь и пространственное распределение не меняются в процессе потепления. Достаточно хорошо известно, что в действительности имеют место динамические изменения

болот. Происходит дренирование и иссушение многих болот вблизи южной границы криолитозоны. Такие процессы наблюдаются в случае, когда увеличение глубины сезонного таяния достигает уровня, при котором болотные воды получают доступ к подземным дренирующим горизонтам. В северной части криолитозоны, напротив, может происходить формирование новых болот, первоначально образуемых небольшими термокарстовыми просадками при отсутствии подземного или же поверхностного дренажа. Ряд моделей рассматривают такие динамические изменения болот, в некоторых из них рассчитывается также и эмиссия метана, и целесообразно сравнить выводы, получаемые с их помощью, с нашими результатами. В таблице 2 приведены результаты модельных оценок чувствительности эмиссии метана к изменениям температуры воздуха, осадков, уровня грунтовых вод и мощности СТС по данным различных авторов, которые можно сравнить с полученным нами результатом.

Полученный нами результат можно кратко сформулировать следующим образом. Таяние многолетних болот криолитозоны России может привести к увеличению эмиссии метана в середине 21 века на 20%-30% от современной величины, или же на 6-8 Мт/год. Эта оценка была получена для климатических проекций по ряду моделей, которые предполагают, что к середине 21 века глобально осредненная среднегодовая температура увеличится на 0.8-1.2°C при том, что о широтной зоне 60°-90°N потепление составит 2.2°-3.2°C.

Таблица 2. Модельные оценки чувствительности эмиссии метана к изменениям температуры воздуха, осадков, уровня грунтовых вод и мощности СТС по данным различных авторов.

Изменения эмиссии CH <sub>4</sub>	Условия расчета	Автор
Глобальный охват, ±20%	Однородное потепление ±1°C	(Walter, Heimann et al. 2001)
Глобальный охват, ±8%	Увеличение осадков ±20%	
Пояс 60°–90° N, +19%	Однородное потепление +2°C	(Cao, Gregson et al. 1998)
Пояс 60°–90° N, +21%	Однородное потепление +2°C и увеличение осадков +10%	
Пояс 60°–90° N, +38%	Увеличение мощности СТС +10 см	(Zhuang, Melillo et al. 2004)
Пояс 60°–90° N, <+25%	Подъем грунтовых вод +10 см	(Walter, Heimann et al. 2001)
Глобальный охват, +63%	Фиксированное распределение болот, 2 x CO <sub>2</sub> GISS сценарий	(Shindell, Walter et al. 2004)
Глобальный охват, +78%	Динамическое распределение болот, 2 x CO <sub>2</sub> GISS сценарий	

Изменения эмиссии CH <sub>4</sub>	Условия расчета	Автор
Пояс 32°–90° N, +117%	Фиксированное распределение болот, 2 x CO <sub>2</sub> GISS сценарий	
Арктические болота, +56%	Однородное потепление +4°C и увеличение осадков +0.3мм/день	(Christensen and Cox 1995)

Прямое сравнение с оценками других авторов не всегда возможно, поскольку в работах используются различные предположения об изменениях климатических характеристик. Кроме того, они существенно различаются по географическому охвату. Тем не менее, аналогии все же можно провести, в некоторых случаях прибегнув к масштабированию по той или иной характеристике. Такой сопоставительный анализ с другими работами указывает на близость результатов. Это подтверждает, что, несмотря на указанные допущения, предложенный в работе метод и полученные на его основе результаты можно использовать для оценки того, как таяние многолетнемерзлых болот криолитозоны России повлияет на глобальный климат.

В заключение можно сделать следующие **выводы**:

1. Модельные расчеты показывают, что в результате таяния многолетнемерзлых болот криолитозоны России в условиях прогнозируемого на середину 21 века изменения климата, объем органического субстрата, вовлеченного в углеродный цикл, может увеличиться на 20%-30%.
2. Увеличение доступного органического субстрата при таянии многолетнемерзлых болот криолитозоны России и рост температуры грунтов может увеличить эмиссию метана на 6-8 Мт/год по сравнению с современной величиной.
3. При среднем времени жизни молекулы метана в атмосфере равном 12 годам, это увеличит количество атмосферного метана не более, чем на 100 Мт, или на 0,04 ppm. При чувствительности климата к увеличению атмосферного содержания метана на 1 ppm порядка 0.3°C, к середине 21 века за счет таяния болот криолитозоны России средняя глобальная температура воздуха может увеличиться приблизительно на 0.01°C, что не существенно по сравнению с воздействием, оказываемым другими климатообразующими факторами.
4. Полученные результаты не подтверждают гипотезы о возможности "метановой катастрофы" при таянии многолетнемерзлых болот криолитозоны России.

## Список основных работ по теме диссертации

*В изданиях, рекомендованных ВАК:*

1. 2011, Анисимов, О.А., Борзенкова И.И., Жильцова Е.Л., Захарова О.К., Кокорев В.А., Ренева С.А. и Стрельченко Ю.Г. Гидрометеорологические условия Волжского региона и современные изменения климата. Метеорология и гидрология, (5): с. 33-42.
2. 2007, Анисимов, О.А., Лобанов, В.А. и Ренева, С.А. Анализ изменений температуры воздуха на территории России и эмпирический прогноз на первую четверть 21 века, Метеорология и гидрология, (10): с. 20-30.
3. 2005, Ренева, С.А. Моделирование эмиссии метана из многолетнемерзлых болот криолитозоны России при изменении климата, Вычислительные технологии, 10 (Часть 1): с. 94-99.
4. 2005, Лобанов, В.А., Жильцова, Е.Л., Лемешко, Н.А., Горлова, С.А. и Ренева, С.А. Восстановление многолетних рядов температуры воздуха на территории России, Метеорология и гидрология, (2): с. 5-14.

*Прочие публикации:*

5. 2010, Ренева С.А. Влияние эмиссии метана из мерзлых болот криолитозоны России на глобальную температуру в условиях прогнозируемого изменения климата. «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты» Труды XIV Всероссийской школы–конференции молодых ученых. Н.Новгород 2010. Типография Института прикладной физики РАН, с. 147-150.
6. 2009, О. А. Анисимов, А. А. Величко, А. А. Ершова, В. П. Нечаев, С. А. Ренева и Ю. Г. Стрельченко. Многолетнемерзлые породы Северной Евразии в прошлом, настоящем и будущем: оценки, основанные на синтезе наблюдений и моделирования. В «Изменение окружающей среды и климата: природные катастрофы», том 3, В.М.Котляков (ред.), М., с. 134-145.
7. 2009, Reneva, S.A., Methane emission from Russian frozen wetlands under conditions of climate change, in "European Geosciences Union General Assembly", 19-24 April, Vienna, Austria, Geophysical Research Abstracts, 11, EGU2009-142.
8. 2009, Reneva, S.A., Methane emission from Russian frozen wetlands under conditions of climate change. Climate change impacts on sub-arctic palsa mires and greenhouse gas feedbacks. Proceedings of the PALSALARM symposium Abisko, Sweden 28–30 October 2008, M.J. Stefan Fronzek, Torben R. Christensen, Timothy R. Carter, Thomas Friberg and Miska Luoto (eds.), Finnish Environment Institute, 3, Helsinki, p. 44-45.
9. 2007, Anisimov, O.A., Lobanov, V.A., Reneva, S.A., Shiklomanov, N.I. and Zhang, T., Uncertainties in gridded air temperature fields and their effect on predictive active layer modeling, Journal of Geophysical Research, 112(F02S14): doi:10.1029/2006JF000593.
10. 2006, Anisimov, O.A. and Reneva, S.A., Permafrost and changing climate: the Russian perspective, Ambio, 35(4): p. 169-175.

11. 2006, Anisimov, O.A. and Reneva, S.A., Polar amplification of climate change through release of greenhouse gases from thawing permafrost в "Proceedings of the European Geophysical Union conference", 2-9 April, Vienna, Austria: Copernicus online.
12. 2005, Анисимов, О.А., Лавров, С.А. и Ренева, С.А., Эмиссия метана из многолетнемерзлых болот России в условиях изменения климата, в "Проблемы экологического моделирования и мониторинга экосистем", Ю.А. Израэль (ред.), Гидрометеоиздат: С.Петербург, с. 124-142.
13. 2005, Анисимов, О.А., Лавров, С.А. и Ренева, С.А., Оценка изменения эмиссия парниковых газов из многолетнемерзлых болот криолитозоны России в условиях глобального потепления, в "Современные проблемы экологической метеорологии и климатологии", Г.В. Менжулин (ред.), Гидрометеоиздат: С.Петербург, с. 114-138.
14. 2004, Ренева, С.А., Моделирование изменения углеродного газообмена при оттаивании мерзлых болот криолитозоны России в "Состав атмосферы и электрические процессы. Тезисы докладов VIII всероссийской конференции молодых ученых. Секция "Численное моделирование состава атмосферы", Москва, 16-18 сентября 2004 г., с. 41.
15. 2004, Лобанов, В.А., Лемешко, Н.А., Жильцова, Е.Л., Горлова, С.А. и Ренева, С.А., Методы восстановления многолетних рядов температуры воздуха, в "Сборник работ по гидрологии", В.С.Вуглинский (ред.), Гидрометеоиздат: СПб, с. 54-68.
16. 2003, Ренева, С.А., Моделирование и прогноз эмиссии метана в атмосферу из циркумполярных регионов в "Малые примеси, атмосферное электричество и динамические процессы в атмосфере: Труды 7-й всероссийской конференции молодых ученых. Секция «Малые примеси в нижней атмосфере»", Н.Новгород: Нижний Новгород: ИПФ РАН, с. 75-79.
17. 2003, Anisimov, O.A. and Reneva, S.A., Impacts of climate change at permafrost regions in "Booklet of abstracts of the participants ERCA", 6 January - 6 February 2003.

---

Подписано в печать 17.11.11. Формат 60\*84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 1,0.  
Тираж 100 экз. Заказ 126.

---

Отпечатано с готового оригинал-макета  
в типографии Издательства СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
197376, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5