

*На правах рукописи*



Денисов Сергей Николаевич

Модельные оценки региональных и глобальных естественных  
эмиссий метана  
в атмосферу при изменениях климата

25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук

Москва – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, профессор

**Мохов Игорь Иванович**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор

**Семенов Сергей Михайлович**

кандидат физико-математических наук

**Степаненко Виктор Михайлович**

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится «1» октября 2015 года в 11:00 на заседании диссертационного совета Д 002.096.01 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук по адресу: 119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук.

Автореферат разослан «\_\_» июля 2015 года.

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д 002.096.01

кандидат географических наук



Краснокутская Л.Д.

## Актуальность работы

В последние годы в глобальные трехмерные климатические модели, используемые для оценок естественных и антропогенных изменений климата, включаются интерактивные блоки углеродного цикла. При этом выявлена положительная обратная связь между климатом и углеродным циклом. В глобальных климатических моделях в блоке углеродного цикла наряду с обменом углекислого газа необходимо учитывать также метановый обмен.

Метан является одним из наиболее значимых по величине радиационного влияния на климатическую систему Земли парниковых газов. Его концентрация в атмосфере увеличилась с 0.4 ppm (во время последнего ледникового максимума) до 0.7 ppm к середине XIII века, а к настоящему времени возросла более чем в 2.5 раза. Метан существенно радиационно эффективнее углекислого газа при расчете на молекулу. Современное суммарное радиационное воздействие метана сравнимо с радиационным воздействием углекислого газа.

Средняя глобальная концентрация метана в атмосфере определяется балансом между его источниками и стоками. Эмиссии метана разнообразны и включают большое количество естественных (влажные экосистемы, термитники, океаны, залежи метангидратов и др.) и антропогенных (энергетика, добыча угля, сельское хозяйство, сжигание биомассы и др.) источников. В настоящее время природные эмиссии метана по оценкам могут составлять до половины от суммарных эмиссий. Есть опасения, что они могут значительно вырасти при потеплении климата с усилением положительных обратных связей между климатом и метановым циклом.

Основным природным источником метана являются влажные экосистемы. Межгодовые колебания климата считаются основной причиной межгодовых вариаций глобального потока метана в атмосферу вследствие изменения эмиссии метана влажными экосистемами.

В XXI веке потенциально также могут стать важными эмиссии метана при дестабилизации метангидратов в донных отложениях. Эти источники чувствительны к изменению температуры океана и изменению уровня моря. Выбросы метана при разложении метангидратов могли быть причиной быстрых климатических изменений в прошлом, в том числе палеоцен-эоценового температурного максимума 55 млн. лет назад.

### Цели и задачи исследования

Основной целью работы является изучение возможных изменений естественных эмиссий метана в атмосферу в XXI веке вследствие изменений глобального климата.

Основные задачи исследования:

1. Количественные оценки современных глобальных и региональных естественных эмиссий метана влажными экосистемами, их возможных изменений в XXI веке и влияния на климатическую систему.
2. Количественные оценки современных запасов метана в субаквальных газогидратных залежах, стабильности субаквальных метангидратов и эмиссий метана, связанных с разложением газогидратов при изменениях климата.

### Методы исследования

В Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН для оценки изменений естественных эмиссий метана в атмосферу из влажных экосистем при изменениях климата предложено использовать модель, позволяющую рассчитывать изменения потоков метана из почвы в атмосферу. С использованием этой модели была проведена серия численных экспериментов для отдельных регионов и Земли в целом с заданием атмосферных характеристик по данным наблюдений, реанализа и результатам расчетов с климатическими моделями для различных периодов XX и XXI вв., включая

численные эксперименты в соответствии с условиями международного проекта сравнения подобных моделей WETCHIMP.

Для оценки последствий разложения субаквальных метангидратов при потеплении климата и возможных выбросов метана в атмосферу предложено использовать модель расчета запасов метана в донных газогидратных залежах. Глубина залегания гидратов в осадочном слое и их пространственное распределение моделируются путем совместного решения уравнений равновесного стабильного существования гидратов и изменения температурного режима в слое донных отложений.

#### Основные положения, выносимые на защиту

1. Оценки современных глобальных и региональных естественных эмиссий метана влажными экосистемами, их возможных изменений в XXI веке и обратных связей с климатом.
2. Оценки современных запасов метана в субаквальных газогидратах и возможных выбросов метана при их диссоциации в XXI веке.
3. Оценки стабильности гидратов в озере Байкал.

#### Научная новизна

1. Получены количественные оценки увеличения эмиссии метана из влажных экосистем и его содержания в атмосфере для отдельных регионов и Земли в целом при глобальном потеплении в XXI веке в зависимости от сценария антропогенных воздействий на климатическую систему Земли.

2. Получены оценки положительной обратной связи между климатом и содержанием метана в атмосфере при учете изменений эмиссии метана болотными экосистемами в XXI веке.

3. Проанализировано влияние различных атмосферных воздействий на эмиссии метана в расчетах с ансамблем климатических моделей. В целом эмиссии метана в численных экспериментах наиболее зависимы от значений приповерхностной температуры атмосферы.

4. Получены количественные оценки выбросов метана при диссоциации океанических гидратов в XXI веке.

5. Получены модельные оценки стабильности современных запасов гидратов в системе озера Байкал и выбросов метана в результате диссоциации метангидратов при повышении температуры придонной воды.

### Научная и практическая значимость

Для оценки изменений естественных эмиссий метана в атмосферу из влажных экосистем при изменениях климата предложено использовать модель, позволяющую рассчитывать изменения потоков метана из почвы в атмосферу. Модель эмиссий достаточно универсальна и может быть использована в сочетании с различными схемами термогидрофизики почвы и данными атмосферного воздействия. Предложенная модель интерактивно включена в глобальную климатическую модель ИФА РАН, что позволяет оценивать обратные связи между климатом и эмиссиями метана из болот.

Для оценки возможных выбросов метана в атмосферу в связи с таянием многолетнемерзлых грунтов при потеплении климата предложено использовать модель расчета запасов метана в донных газогидратных залежах, позволяющую рассчитывать эмиссии при разложении субаквальных метангидратов в результате повышения придонной температуры воды. С использованием предложенной модели получены оценки стабильности метангидратов в том числе на арктическом шельфе и в озере Байкал.

### Апробация работы

Результаты работы докладывались на российских и международных конференциях, школах и семинарах, в том числе на семинарах Лаборатории теории климата и Отдела исследований климатических процессов ИФА им. А.М. Обухова РАН, на Ассамблее Европейского геофизического союза (2009-2012 гг.), Всероссийской конференции молодых ученых «Состав атмосферы.

Атмосферное электричество. Климатические процессы.» (2007-2013 гг.), III Международной конференции "Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии" (Пушино 2007 г.), на Международном симпозиуме "Физика атмосферы: наука и образование" (Санкт-Петербург 2007 г.). По теме диссертации опубликовано 27 работ, в том числе 11 – в отечественных и зарубежных рецензируемых журналах.

### Личный вклад автора

Автор принимал участие во всех этапах работы, включая постановку задач, анализ и интерпретацию полученных результатов. Все основные результаты, вынесенные на защиту, получены автором лично.

### Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 121 названия. В диссертации содержится 107 страниц, 2 таблицы, 23 рисунка.

### **Содержание диссертации**

Во **Введении** обоснована актуальность работы, сформулированы ее цели и задачи, перечислены основные результаты и этапы исследования.

**Первая глава** диссертации посвящена модельным оценкам глобальной эмиссии метана влажными экосистемами. В **разделе 1.1.1** описана модель естественных эмиссий метана из влажных экосистем, используемая в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН для оценки изменений потоков метана из почвы в атмосферу, связанных с изменением термического и гидрологического режима почвы в результате изменений климата. В предложенной модели полный поток метана  $F_{CH_4}$  зависит от температуры, влагосодержания и содержания углерода в почве и имеет вид:

$$F_{CH_4} = \sum_{i=1}^N C_i \cdot \Delta z_i \cdot V_i(T_i, W_i),$$

где  $C_i$  – содержание углерода в  $i$ -слое почвы толщиной  $\Delta z_i$ ,  $V_i$  – потенциальная скорость производства метана, зависящая от температуры ( $T_i$ ) и объемного влагосодержания ( $W_i$ ),  $N$  – полное число слоев почвы.

Производство метана в почве возможно при положительной температуре и характеризуется экспоненциальной зависимостью от температуры, выраженной с использованием фактора  $Q_{10}$ , показывающего во сколько раз увеличивается продуктивность при повышении температуры на  $10^\circ\text{C}$ . Производство метана линейно зависит от влагосодержания почвы и происходит только в анаэробных условиях (при относительном влагосодержании  $> 0.5$ ). Полное выражение для скорости производства метана имеет вид:

$$V_i = \Theta(T_i) \cdot \Theta\left(\frac{W_i}{W_{\max,i}} - 0.5\right) \cdot \left(\frac{W_i}{W_{\max,i}} - 0.5\right) \cdot Q_{10}^{0.1(T_i - T_0)} \cdot F_i.$$

Здесь  $W_{\max,i}$  – максимально возможное влагосодержание  $i$ -слоя почвы,  $\Theta$  – функция Хевисайда,  $T_0$  – базовая температура, для которой подбираются коэффициенты,  $F_i = \alpha + \beta T_{i\Sigma}$ ,  $T_{i\Sigma}$  – интеграл положительных значений температуры  $i$ -слоя в  $^\circ\text{C}$  (градусо-дней),  $\alpha$  и  $\beta$  – модельные параметры.

Нужно отметить, что данные по содержанию углерода в почве использовались только в численных экспериментах раздела 1.2, в остальных расчетах вместо этого задавались различные значения расчетной области для тропических и внетропических широт. В свою очередь данные по влагосодержанию почвы учитывались только в численных экспериментах раздела 2.2, в остальных расчетах в каждой модельной ячейке предписывалась доля влажных территорий и при расчете эмиссии метана почвенные слои считались насыщенными влагой.

Были проведены численные эксперименты по расчету эмиссии метана из влажных экосистем с использованием среднемесячных данных реанализа ERA-40 для приповерхностной температуры и осадков в 1958-2000 гг. Эмиссии метана считались только из областей залегания вечной мерзлоты и болот.

Модельные ячейки, соответствующие болотным экосистемам, задавались по фиксированной маске. Подобным образом с использованием различных фиксированных масок они задаются и во всех остальных численных экспериментах из первой и второй глав диссертации.

Средняя величина глобальной интенсивности эмиссии метана болотными экосистемами в используемой версии модели по данным реанализа для периода 1958-2000 гг. составляет 143 МтСН<sub>4</sub>/год. С середины 1970-х гг. отмечается общий рост эмиссий метана, тогда как до этого с конца 1950-х гг. диагностировано общее уменьшение потоков метана. Эти изменения глобальных потоков связаны главным образом с болотами тропических широт. Во внетропических широтах отмечена сильная межгодовая изменчивость потоков метана.

На основе линейной регрессии получена оценка 7%-ного увеличения глобальной эмиссии метана при глобальном потеплении на 1 К.

В разделе 1.1.2 описаны численные эксперименты с моделью эмиссий метана влажными экосистемами, в том числе базовый эксперимент (D) для 1901-2009 гг., в котором на вход модели подавались временные серии среднемесячных данных CRU TS3.1 для приповерхностной температуры, осадков и облачности. Для оценки чувствительности модели к осадкам и температуре были проведены дополнительные численные эксперименты. В первом из них (TS) на вход модели подавалась температура, увеличенная на 3.4 К, а остальные параметры атмосферного воздействия не менялись по сравнению с экспериментом D. Во втором (PS) аналогичным образом были увеличены осадки на 3.9%.

Средняя величина глобальной интенсивности эмиссий метана болотными экосистемами в базовом численном эксперименте D (рис. 1) составила около 170 МтСН<sub>4</sub>/год. Относительное увеличение эмиссий метана из внетропических широт в XX веке значительно превосходит увеличение глобальных эмиссий. Глобальные эмиссии увеличиваются в XX веке примерно на 5%, а эмиссии из внетропических широт возрастают более чем на 9%.

Рассчитанные эмиссии метана слабо чувствительны к изменению количества осадков. Замена осадков в численном эксперименте PS в среднем за XX век практически не меняет общие эмиссии и эмиссии из тропиков, а внетропические эмиссии уменьшаются в среднем на 3%.

Изменение температуры в численном эксперименте TS увеличивает общие эмиссии метана из почвы по сравнению с экспериментом D в среднем за расчетный период на 40% (67 МтСН<sub>4</sub>/год). При этом относительное увеличение внетропических эмиссий (84%) значительно сильнее, чем тропических (28%), что связано в первую очередь с удлинением теплого периода.

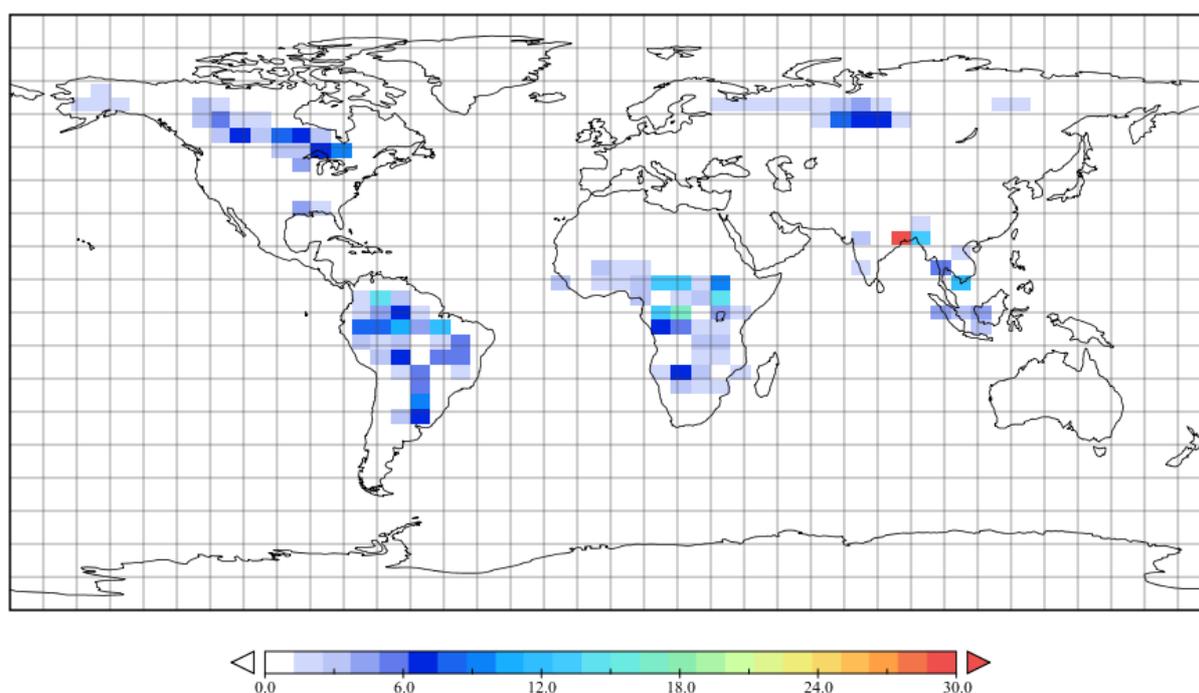


Рис. 1. Пространственное распределение среднегодовых потоков метана [г/м<sup>2</sup>/год] по модельным расчетам в базовом численном эксперименте для периода 1991-2000 гг.

В разделе 1.2 описаны эксперименты с климатической моделью Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (КМ ИФА РАН), в которую в качестве интерактивного блока была включена модель эмиссий метана из влажных экосистем.

Для метанового цикла атмосферы использовалось балансовое уравнение для концентрации метана  $q_{\text{СН}_4}$ :

$$\frac{dqCH_4}{dt} = \frac{E_{CH_4,ant} + E_{CH_4,nat}}{\beta_{CH_4}} - qCH_4 \left( \frac{1}{\tau_{CH_4,s}} + \frac{1}{\tau_{CH_4,a}} \right),$$

где  $E_{CH_4,ant}$  и  $E_{CH_4,nat}$  – антропогенные и естественные эмиссии метана соответственно,  $\beta_{CH_4} = 2.75 \text{ МтCH}_4/\text{млрд}^{-1}$ ,  $\tau_{CH_4,s} = 150$  лет – характерное время разложения метана в почве, а  $\tau_{CH_4,a}$  – в атмосфере.

Естественные эмиссии метана  $E_{CH_4,nat}$  представлялись в виде суммы эмиссий из почвы в атмосферу и других эмиссий естественного происхождения. Эмиссии из влажных наземных экосистем рассчитывались в модели интерактивно. В проведенных расчетах для природных эмиссий метана в атмосферу из других источников использовалось значение  $65 \text{ МтCH}_4/\text{год}$ .

Для характерного времени разложения метана в атмосфере  $\tau_{CH_4,a}$  использовалось три варианта. В варианте 1 величина  $\tau_{CH_4,a}$  была постоянной равной 10.5 годам. В варианте 2 время жизни метана в атмосфере зависело от глобальной приповерхностной температуры (Т) экспоненциально ( $\tau_{CH_4,a} \sim \exp(-E_a/kT)$ ) в соответствии с законом Аррениуса. В варианте 3 величина  $\tau_{CH_4,a}$  определялась, в соответствии с законом Вант-Гоффа, степенной зависимостью от Т ( $\tau_{CH_4,a} \sim Q_{10}^{0.1T}$ ) с основанием  $Q_{10} = 3$ .

С КМ ИФА РАН были проведены численные эксперименты для 1765-2100 гг. при задании сценариев антропогенных и естественных воздействий на климат за счёт парниковых газов, тропосферных и стратосферных вулканических сульфатных аэрозолей, изменения солнечной постоянной и изменения сельскохозяйственных площадей в соответствии с протоколом "Historical simulations" международного проекта CMIP5 (<http://www.iiasa.ac.at/web-apps/tnt/RcpDb> и <http://climate.uvic.ca/EMICAR5>) для XVIII-XX веков. Для XXI века антропогенные воздействия учитывались согласно сценариям семейства RCP 2.6, 4.5, 6.0 и 8.5.

Расчеты проводились с полной версией климатической модели при трех вариантах зависимости времени жизни метана в атмосфере от среднегодовой глобальной приповерхностной температуры – численные эксперименты F1, F2 и F3.

Общий рост глобальной приповерхностной температуры в XXI веке в экспериментах F1 составляет 0.9 К, 1.7 К, 2.2 К и 3.1 К при сценариях RCP 2.6, 4.5, 6.0 и 8.5, соответственно. Учет воздействия изменений климата на естественные эмиссии метана приводит к дополнительному потеплению примерно на 0.01 К в конце XX века и на 0.02-0.03 К к концу XXI столетия в зависимости от сценария. В свою очередь учет зависимости времени жизни метана в атмосфере от температуры в экспериментах F2 и F3 приводит к снижению глобального потепления в конце XX столетия на 0.01-0.02 К, а к концу XXI века на 0.01-0.1 К в зависимости от сценария, что составляет до 4% от величины потепления.

Различия в концентрации метана в атмосфере  $q_{\text{CH}_4}$  между численными экспериментами достаточно существенные. Для периода 1991-2000 гг.  $q_{\text{CH}_4}$  в эксперименте F2 на 10 ppb, а в эксперименте F3 на 60 ppb (~4%) меньше, чем в эксперименте F1. В эксперименте F3 при сценарии RCP 8.5 концентрация метана в конце XXI века составляет около 2810 ppb, что почти на 30% меньше соответствующей величины в эксперименте F1. Время жизни метана по расчетам сокращается на 1-6% на 1 °C потепления.

Влияние изменений климата на содержание метана в атмосфере можно оценить с использованием параметра обратной связи между климатом и метановым циклом  $f = \Delta q_{\text{CH}_4}(F_n) / \Delta q_{\text{CH}_4}(D1)$ , где  $n$  (1, 2 или 3) – вариант зависимости времени жизни метана в атмосфере от температуры. Взаимодействие климата и эмиссий метана (эксперимент F1) увеличивает рост содержания метана в атмосфере относительно доиндустриального периода на 2-10% к концу XX века (рис. 2). Для наиболее агрессивного сценария RCP 8.5 эта оценка остается справедливой вплоть до конца XXI века. При остальных сценариях антропогенного воздействия параметр обратной связи  $f$  возрастает в XXI веке до значений порядка 1.2.

Учет зависимости времени жизни метана в атмосфере от температуры (эксперименты F2, F3) снижает параметр обратной связи. В результате в эксперименте F2 при сценарии RCP 8.5 такой учет фактически полностью

компенсирует рост естественных эмиссий метана в XXI веке. В экспериментах F3 обратная связь между климатом и концентрацией метана в атмосфере оказывается отрицательной и параметр обратной связи  $f$  уменьшается до значений 0.7-0.8 к концу XXI века в зависимости от сценария.

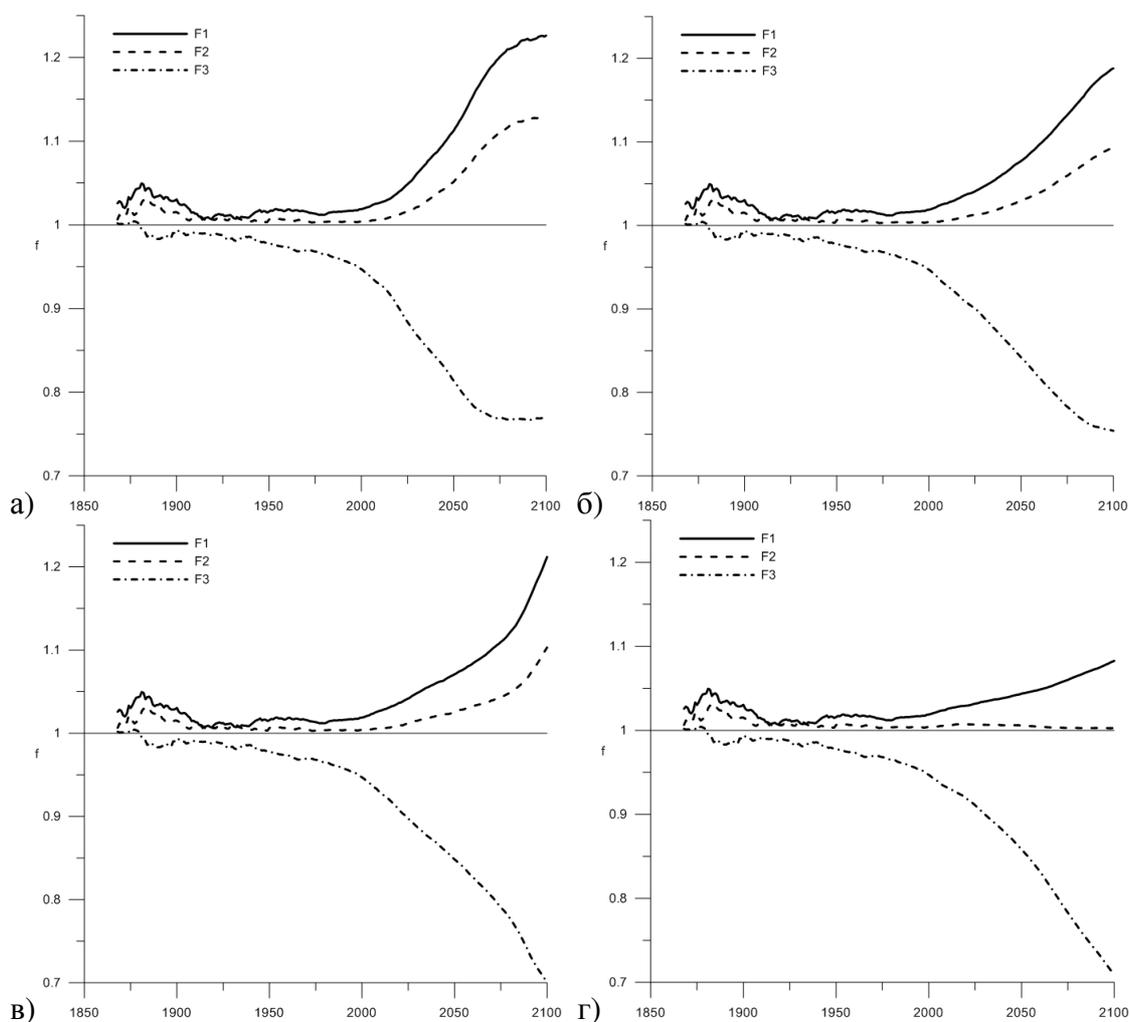


Рис.2 Параметр обратной связи  $f$  между метановым циклом и климатом по модельным расчетам при сценариях антропогенного воздействия RCP 2.6 (а), 4.5 (б), 6.0 (в), 8.5 (г).

**Вторая глава** диссертации посвящена модельным оценкам региональной эмиссии метана влажными экосистемами в XXI веке. В **разделе 2.1** описаны численные эксперименты с использованием результатов расчетов с региональной моделью ГГО для температуры и влагосодержания почвенных слоев. Были проведены численные эксперименты для базового периода 1991-2000 гг. и для середины (2041-2050 гг.) и конца (2091-2100 гг.) XXI века при антропогенном сценарии SRES A2 для европейского и азиатского регионов

России. В расчет включались только модельные ячейки с влагоемкостью (средней по площади ячейки пористостью) более 0.4, что указывает на присутствие торфа в составе почвы.

Наибольшие потоки метана отмечены для болот Западной Сибири и Восточной Европы. Средняя величина полной интенсивности эмиссии метана для этого периода составляет 8 МтСН<sub>4</sub>/год для европейской и 10 МтСН<sub>4</sub>/год для азиатской части. Интенсивность эмиссии метана в XXI веке увеличивается и составляет по расчетам для периода 2091-2100 гг. 14 МтСН<sub>4</sub>/год для европейского и 17 МтСН<sub>4</sub>/год для азиатского региона. Рост эмиссий метана связан в первую очередь с ростом температуры почвы.

В разделе 2.2 получены оценки эмиссии метана в XXI веке для болот Западной Сибири. Входные данные атмосферного воздействия задавались полями приповерхностной температуры воздуха, осадков, коротковолновой солнечной радиации, влажности воздуха и облачности для XXI века (сценарий SRES A1B) по ансамблю климатических моделей: ECHAM5/MPI-OM, CCCMA-CGCM3, NCAR-CCSM3, INMCM3, КМ ИФА РАН.

По модельным оценкам для выбранного региона (55-65° с.ш., 65-85° в.д.) к концу XXI века эмиссии метана болотными экосистемами увеличиваются в среднем с 9.1 МтСН<sub>4</sub>/год до 21.3 МтСН<sub>4</sub>/год. Разброс в значениях эмиссии метана, полученный при расчете с входными параметрами различных моделей, достигал 15 МтСН<sub>4</sub>/год и более в отдельные годы XXI века (рис. 4).

Для оценки влияния различных входных параметров атмосферного воздействия на эмиссии метана были произведены дополнительные расчеты эмиссии метана в XXI веке. В каждом из этих расчетов значения одного из параметров атмосферного воздействия задавались на уровне 2001 г.

Для анализируемого региона к концу XXI века происходит относительно небольшое увеличение эмиссий метана болотными экосистемами в среднем с 8.4 МтСН<sub>4</sub>/год до 10.5 МтСН<sub>4</sub>/год при сохранении температуры на уровне 2001 г. При этом для отдельных моделей рост эмиссий еще меньше. Таким

образом, рост эмиссий метана при расчетах с совместной моделью связан в основном с ростом приповерхностной температуры атмосферы.

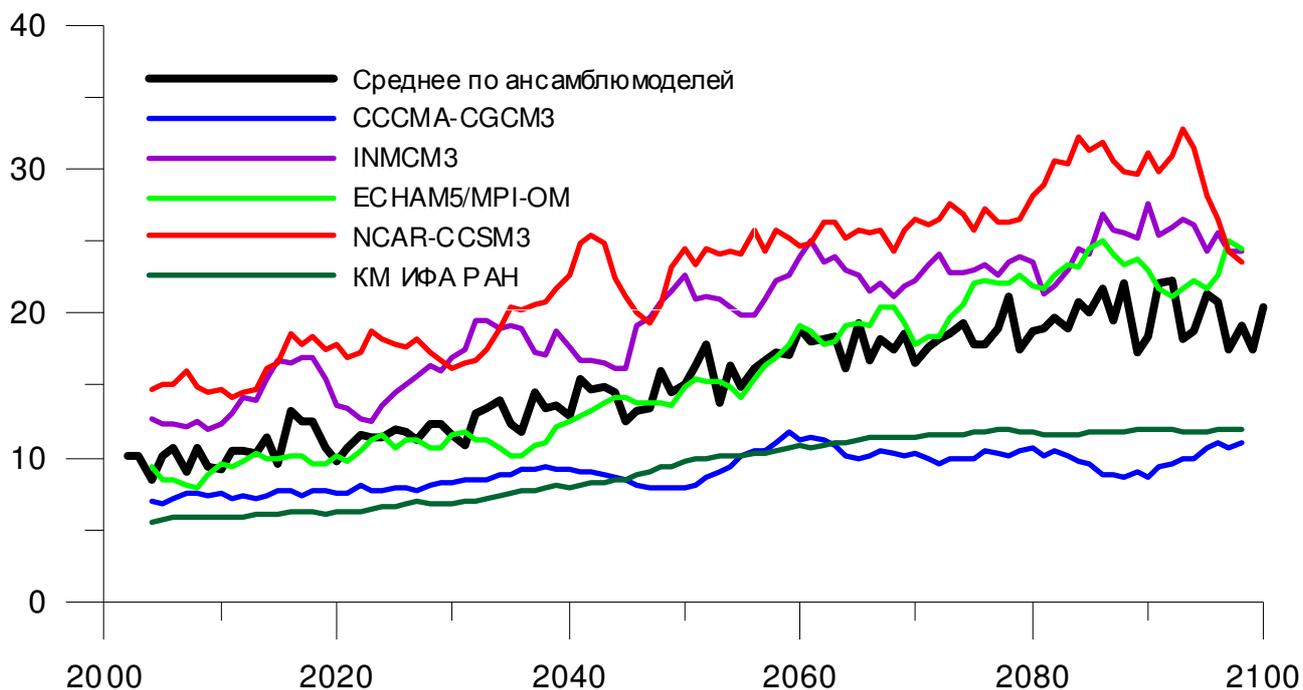


Рис. 4. Средние по ансамблю моделей эмиссии метана [MtCH<sub>4</sub>/год] для региона Западной Сибири (55-65° с.ш., 65-85° в.д.) за период 2001-2100 гг. (жирная линия) и пятилетние скользящие средние эмиссий для каждой из моделей.

Разброс значений эмиссии метана при расчете с входными параметрами различных моделей связан с разбросом в значениях приповерхностной температуры атмосферы. Он для различных моделей может составлять до нескольких градусов в отдельные месяцы.

**Третья глава** диссертации посвящена модельным оценкам эмиссий метана при дестабилизации субаквальных метангидратов. В **разделе 3.1** описаны численные эксперименты по оценке возможных выбросов метана при дестабилизации залежей метангидратов в XXI веке связанной с изменением придонной температуры воды по расчетам с разными климатическими моделями при учете антропогенного воздействия (в частности, при антропогенном сценарии SRES A2).

В качестве граничных условий задавалась температура придонной воды по расчетам с климатическими моделями ИВМ РАН и GFDL для верхней границы расчетной области и геотермический поток тепла на нижней границе.

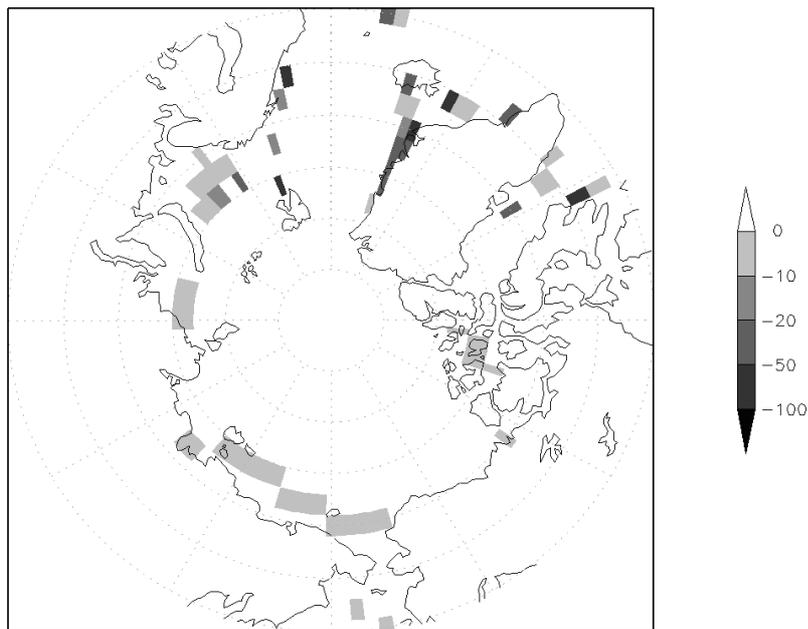
В качестве начальных условий задавался градиент температуры в донных отложениях, соответствующий равновесному состоянию донных отложений при придонной температуре в начале XXI века.

Глубина залегания гидратов в осадочном слое и их пространственное распределение моделировались путем совместного решения уравнений равновесного стабильного существования гидратов и изменения температурного режима в слое донных отложений. При этом считалось, что гидраты стабильны в донных отложениях всюду, где гидростатическое давление больше равновесного для расчетной температуры.

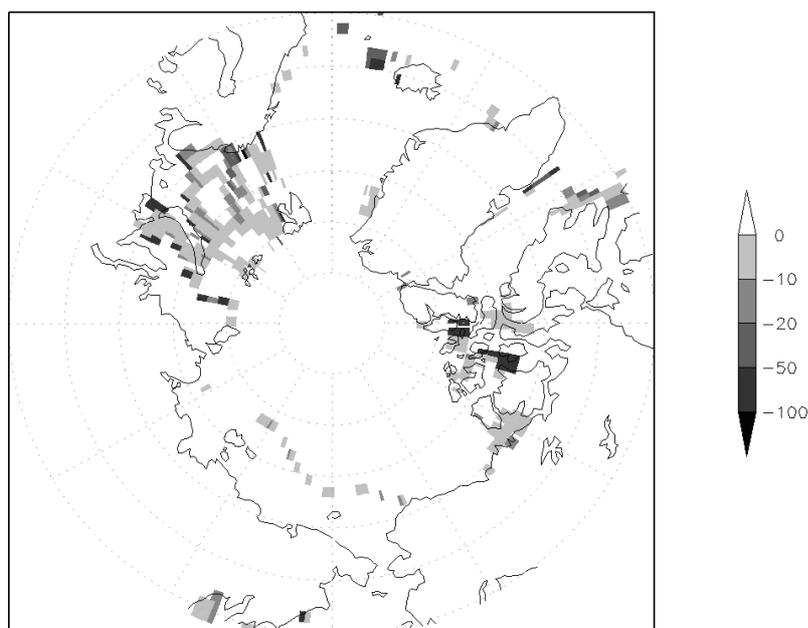
Общие запасы метана в газогидратных залежах с использованием модельных расчетов с климатическими моделями ИВМ РАН и GFDL можно оценить в  $\sim(10-14.5)\times 10^{14}$  м<sup>3</sup> при стандартных условиях (600-870 ГтС). Изменения толщины зоны стабильности газогидратов (ЗСГ) соответствуют разложению порядка  $3.9\times 10^{11}$  м<sup>3</sup> и  $6.4\times 10^{11}$  м<sup>3</sup> гидратов с использованием расчетов с климатическими моделями ИВМ РАН и GFDL соответственно (рис. 5). При этом выбросы метана со дна океана в XXI веке составляют порядка  $6.2\times 10^{13}$  м<sup>3</sup> (35 ГтС) и  $10.2\times 10^{13}$  м<sup>3</sup> (60 ГтС) метана (или в среднем 350 МтС/год и 600 МтС/год). Дестабилизация океанических гидратов происходит в основном в высоких широтах северного полушария.

В **разделе 3.2** получены оценки стабильности метангидратов в озере Байкал. Придонная температура воды в Байкале в настоящее время составляет около 3.5 °С при глубине более 200 м. Принимая геотермальный градиент равным 0.08 °С/м в донных отложениях в настоящее время должна существовать ЗСГ при глубине более  $\sim 380$  м. Аналогично экспериментам раздела 3.1 можно оценить современный объем запасов гидратов в Байкале – около 52 км<sup>3</sup>, метана при стандартных условиях –  $7\times 10^{12}$  м<sup>3</sup> (4 ГтС).

При повышении придонной температуры на 1 °С следует ожидать сокращения толщины ЗСГ на всех глубинах в среднем примерно на 15 м, а площади ее распространения - примерно на 5%. Это приводит к сокращению запасов метана в гидратах на 14% - до  $6\times 10^{12}$  м<sup>3</sup> (3.5 ГтС).



а)



б)

Рис.5 Модельные оценки изменений толщины зоны стабильности океанических гидратов в метрах к концу XXI века в высоких широтах северного полушария с использованием расчетов с климатическими моделями ИВМ РАН (а) и GFDL (б) при антропогенном сценарии SRES-A2.

Для оценки интервалов времени, необходимых для разрушения гидратов были проведены численные эксперименты с использованием модели расчета запасов метана в донных газогидратных залежах. В качестве начальных условий для модели донных отложений задавался градиент температуры,

соответствующий равновесному состоянию при характерном для глубоководной части Байкала геотермальном потоке  $0.09 \text{ Вт/м}^2$ . Были проведены расчеты толщины ЗСГ для периода 15000 лет при повышенной на  $1 \text{ }^\circ\text{C}$  (численный эксперимент E1) и  $3 \text{ }^\circ\text{C}$  (эксперимент E2) относительно современной придонной температуры в качестве верхнего граничного условия. Для оценки чувствительности модели были также проведены расчеты с геотермальным потоком  $0.07 \text{ Вт/м}^2$  (эксперименты E1\_C и E2\_C), характерным для центральной части Байкальской впадины.

По модельным расчетам запасы метана в газогидратных залежах Байкала в экспериментах E1 и E2 составляют порядка  $60 \text{ км}^3$  гидратов или более  $8 \text{ тыс. км}^3$  метана при стандартных условиях (около  $5 \text{ ГтС}$ ). Для современных условий толщина ЗСГ по расчетам находится в диапазоне от 20 до 180 м в зависимости от глубины озера (рис. 6).

В численном эксперименте E1 толщина ЗСГ сокращается к концу расчетного периода в зависимости от глубины на 6 – 17 м, в эксперименте E2 – на 17-46 м. При этом запасы гидратов сокращаются соответственно на 8% (до  $55 \text{ км}^3$ ) и на 32% (до  $40 \text{ км}^3$ ) с выделением метана в количестве около  $0.4 \text{ ГтС}$  и  $1.6 \text{ ГтС}$ , соответственно.

Более половины выбросов метана в обоих экспериментах происходит в первую тысячу лет. Средний поток метана для первой расчетной тысячи лет для всей системы озера Байкал около  $0.35 \text{ МтСН}_4/\text{год}$  и  $1.1 \text{ МтСН}_4/\text{год}$  для экспериментов E1 и E2, соответственно. При этом соответствующие средние потоки, приходящиеся на единицу площади поверхности Байкала, около  $10$  и  $32 \text{ гСН}_4 \text{ м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ , что сопоставимо с потоками метана из болот Западной Сибири и более чем на порядок превосходит потоки метана из-за разрушения гидратов в результате седиментации в Байкале ( $0.2\text{-}0.9 \text{ гСН}_4 \text{ м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ ). Далее скорость деградации ЗСГ постепенно уменьшается, через 1.7 и 6 тысяч лет счета для экспериментов E1 и E2 достигается новое равновесное состояние.

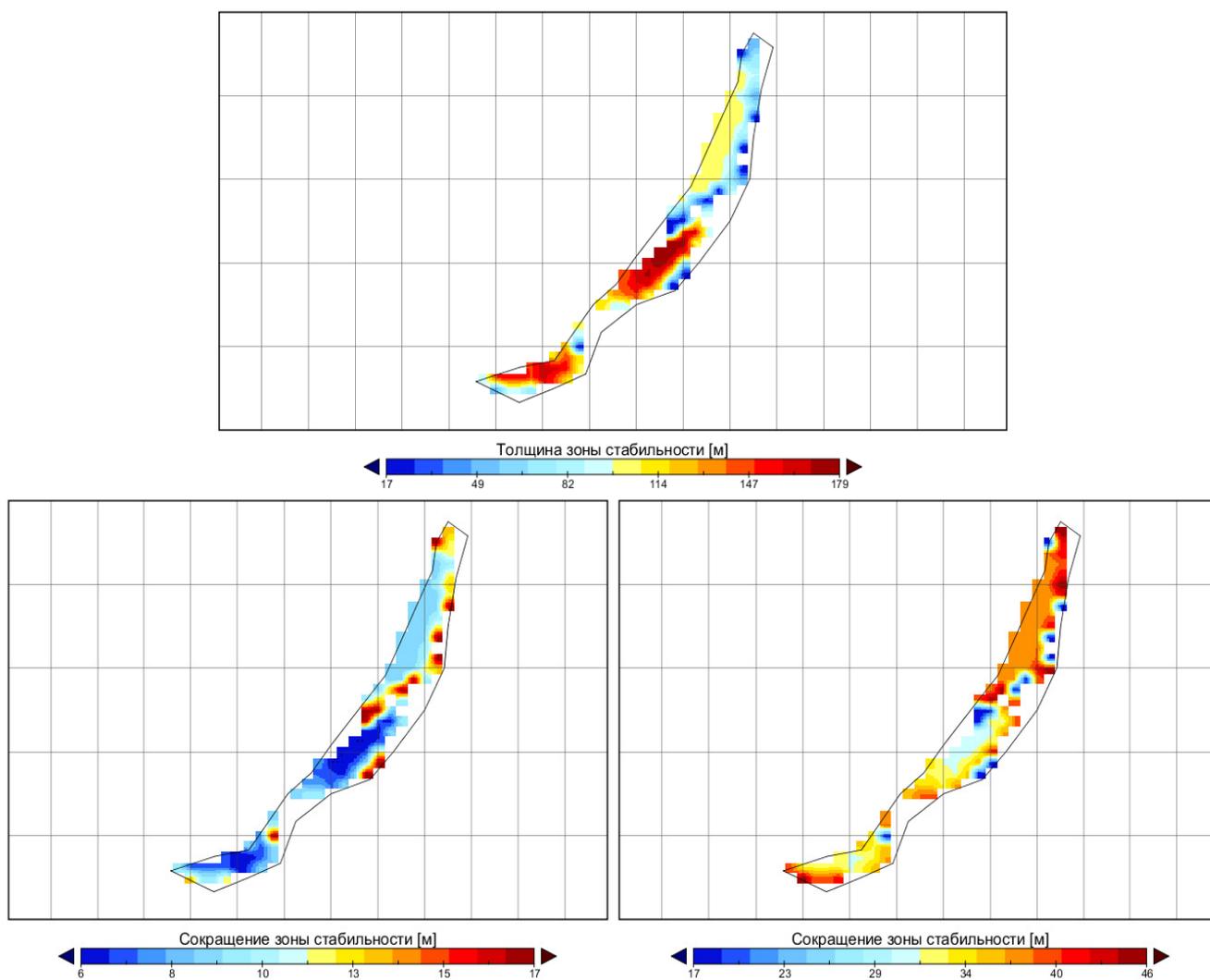


Рис.6. Рассчитанная толщина зоны стабильности гидратов озера Байкал в современных условиях (сверху) и ее возможно сокращение при увеличении придонной температуры на 1 °С (слева снизу) и на 3 °С (справа снизу)

В экспериментах E1\_C и E2\_C современные запасы метана составляют порядка  $78 \text{ км}^3$  гидратов (на 30% больше, чем в экспериментах E1 и E2) или более 10 тыс.  $\text{км}^3$  метана при стандартных условиях (около 6 ГтС). Запасы гидратов в экспериментах E1\_C и E2\_C к концу расчетного периода сокращаются (аналогично E1 и E2) соответственно на 8% (до  $72 \text{ км}^3$ ) и на 33% (до  $52 \text{ км}^3$ ). Средний поток метана для первой расчетной тысячи лет в этих экспериментах по сравнению с экспериментами E1 и E2 несколько выше и составляет около  $0.42 \text{ МтCH}_4/\text{год}$  и  $1.26 \text{ МтCH}_4/\text{год}$  для экспериментов E1\_C и E2\_C, соответственно. При этом новое равновесное состояние достигается

несколько позже – через 2 и 7.5 тысяч модельных лет. Полученные изменения соответствуют чувствительности объема запасов газогидратов в Байкале к геотермальному потоку тепла около  $-1 \text{ км}^3/(\text{МВт}/\text{м}^2)$  (1.5% уменьшения запасов на 1% увеличения геотермального потока).

**В Заключение** приведены основные результаты работы и выводы.

1. В интерактивных численных экспериментах с КМ ИФА РАН в целом воспроизводятся доиндустриальные и современные характеристики метанового цикла. Рассчитанные глобальные эмиссии метана из почвы в XVIII-XX веках составляют около 150 МтСН<sub>4</sub>/год. При общем потеплении в XXI веке они увеличиваются до 170–230 МтСН<sub>4</sub>/год в зависимости от сценария антропогенных воздействий на климатическую систему Земли. Концентрация метана в атмосфере при наиболее агрессивном антропогенном сценарии RCP 8.5 увеличивается в течение XXI века более чем в 2 раза до 3900 ppb. Это приводит к относительно слабому усилению потепления на 1-2% (менее 0.05 К) в XXI веке.

2. По расчетам с региональной климатической моделью ГГО современные эмиссии метана болотными экосистемами составляют 8 МтСН<sub>4</sub>/год для европейской и 10 МтСН<sub>4</sub>/год для азиатской части России. В течение XXI века при сценарии антропогенных воздействий SRES A2 эмиссии метана из этих регионов возрастают более чем на 50%.

3. Получены оценки изменений эмиссии метана болотными экосистемами в XXI веке для региона Западной Сибири (55–65° с.ш., 65–85° в.д.) при задании атмосферных воздействий по расчетам с ансамблем климатических моделей. В среднем для ансамбля моделей эмиссии метана возрастают в XXI веке более чем вдвое. Отмечен значительный разброс в значениях потоков метана для разных моделей, связанный в первую очередь с расхождением в значениях приповерхностной температуры.

4. С использованием модели для расчета выбросов метана, связанных с диссоциацией метангидратов, оценены общие запасы метана в шельфовых

газогидратных залежах – 600–870 ГтС. Получены оценки верхней границы выбросов метана из субаквальных метангидратов в XXI веке – до 600 МтС/год.

5. Получены модельные оценки современных запасов гидратов в системе озера Байкал – около 5 ГтС. По оценкам средний поток метана для всей системы озера Байкал может достигать 0.35 МтСН<sub>4</sub>/год и 1.1 МтСН<sub>4</sub>/год при повышении современной среднегодовой температуры придонной воды соответственно на 1 и 3 °С.

#### **Список публикаций в рецензируемых изданиях:**

1. Мохов И.И., Елисеев А.В., Денисов С.Н. Модельная диагностика изменений эмиссии метана болотными экосистемами во второй половине XX века с использованием данных реанализа // Доклады АН. 2007. Т.417. N.2. С. 258-262.
2. Елисеев А.В., Мохов И.И., Аржанов М.М., Демченко П.Ф., Денисов С.Н. Учет взаимодействия метанового цикла и процессов в болотных экосистемах в климатической модели промежуточной сложности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. N. 2. С. 147-162.
3. Денисов С. Н., Елисеев А. В., Мохов И. И. Оценка изменений эмиссии метана болотными экосистемами Северной Евразии в XXI веке с использованием результатов расчетов с региональной моделью климата // Метеорология и гидрология. 2010. №2. С. 55-62.
4. Денисов С.Н., Аржанов М.М., Елисеев А.В., Мохов И.И. Чувствительность эмиссий метана болотными экосистемами Западной Сибири к изменениям климата: мультимодельные оценки // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т.24. N.4. С.319-322.
5. Денисов С.Н., Аржанов М.М., Елисеев А.В., Мохов И.И. Оценка отклика субаквальных залежей метангидратов на возможные изменения климата в XXI веке // ДАН. 2011. Т. 441. №. 5. С. 685-688.
6. Денисов С.Н., Аржанов М.М., Елисеев А.В., Мохов И.И. Оценка стабильности метангидратов в системе озера Байкал // Доклады АН. 2013. Т.

449. № 2. С. 219-222.

7. Денисов С. Н., Елисеев А. В., Мохов И. И. Изменения климата в глобальной модели ИФА РАН с учетом взаимодействия с метановым циклом при антропогенных сценариях семейства RCP // Метеорология и гидрология. 2013. №11. С. 30-41.
8. Melton J.R., Wania R., Hodson E.L., Poulter B., Ringeval B., Spahni R., Bohn T., Avis C.A., Beerling D.J., Chen G., Eliseev A.V., Denisov S.N., Hopcroft P.O., Lettenmaier D.P., Riley W.J., Singarayer J.S., Subin Z.M., Tian H., Zürcher S., Brovkin V., Van Bodegom P.M., Kleinen T., Yu Z.C., Kaplan J.O. Present state of global wetland extent and wetland methane modelling: conclusions from a model inter-comparison project (WETCHIMP) // Biogeosciences. 2013. №. 10. pp. 753-788.
9. Wania R., Melton J.R., Hodson E.L., Poulter B., Ringeval B., Spahni R., Bohn T., Avis C.A., Chen G., Eliseev A.V., Hopcroft P.O., Riley W.J., Subin Z.M., Tian H., Van Bodegom P.M., Kleinen T., Yu Z.C., Singarayer J.S., Zürcher S., Lettenmaier D.P., Beerling D.J., Denisov S.N., Prigent C., Papa F., Kaplan J.O. Present state of global wetland extent and wetland methane modelling: methodology of a model inter-comparison project (WETCHIMP) // Geosci. Model Dev. 2013. №. 6. pp. 617-641.
10. Bohn T., Melton J.R., Ito A., Kleinen T., Spahni R., Stocker B.D., Zhang B., Zhu X., Schroeder R., Glagolev M.V., Maksyutov S., Brovkin V., Chen G., Denisov S.N., Eliseev A.V., Gallego-Sala A., McDonald K.C., Rawlins M.A., Riley W.J., Subin Z.M., Tian H., Zhuang Q., Kaplan J.O. WETCHIMP-WSL: intercomparison of wetland methane emissions models over West Siberia // Biogeosciences. 2015. №. 12. pp. 3321-3349.
11. Денисов С. Н., Елисеев А. В., Мохов И. И., Аржанов М.М. Модельные оценки глобальных и региональных эмиссий метана влажными экосистемами // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 5.

### **Список публикаций в нерецензируемых изданиях:**

1. Елисеев А.В., Мохов И.И., Аржанов М.М., Демченко П.Ф., Денисов С.Н. Отклик эмиссий метана болотными экосистемами на изменения климата и его влияние на эти изменения по расчетам с климатической моделью промежуточной сложности ИФА РАН // III Междунар. конф. "Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии". Тезисы докладов. 2007. Пушкино: ИФХБПП РАН. С.28-29.
2. Елисеев А.В., Мохов И.И., Аржанов М.М., Демченко П.Ф., Денисов С.Н. Оценки изменений климата с помощью модели промежуточной сложности, включающей углеродный и метановый цикл // Междунар. симп. "Физика атмосферы: наука и образование". 2007. СПб: СПбГУ. С.181-184.
3. Eliseev A.V., Mokhov I.I., Arzhanov M.M., Demchenko P.F., Denisov S.N. Coupled climate-methane cycle simulation with a climate model of intermediate complexity forced by SRES A2 scenario // Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. Cote J. (Ed.) Geneva: World Climate Research Programme. 2007. P.09.03-09.04.
4. Eliseev A.V., Arzhanov M.M., Demchenko P.F., Denisov S.N., Mokhov I.I. Permafrost response to SRES A2 greenhouse forcing in a climate model of intermediate complexity // Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. Cote J. (Ed.) Geneva: World Climate Research Programme. 2007. P.09.05-09.06.
5. Денисов С.Н., Мохов И.И., Школьник И.М. Оценка изменений эмиссии метана болотными экосистемами в XXI веке с использованием результатов расчетов изменений климата с региональной моделью // XII Междунар. конф. молодых ученых "Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы." Тезисы докладов. 2008. Борок: Геофизическая обсерватория "Борок". С.19.
6. Denisov S.N., Eliseev A.V., Mokhov I.I. Evaluation of changes in methane emissions by wetlands of the European and Asian parts of Russia in the 21th century based on regional climate model simulations // Research Activities in

- Atmospheric and Oceanic Modelling. Cote J. (Ed.) Geneva: World Climate Research Programme. 2008. P.07.11-07.12.
7. Denisov S.N., Arzhanov M.M., Eliseev A.V., Mokhov I.I. Sensitivity of methane emissions from wetlands to atmospheric impact in permafrost-covered regions // Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. J. Cote (Ed.) Geneva: World Climate Research Programme. 2009. Rep. 39. S.7. P.5-6.
  8. Denisov S.N., Arzhanov M.M., Eliseev A.V., Mokhov I.I. Methane emissions from Western Siberian wetlands: sensitivity to climate change from multi-model estimations // Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. J. Cote (Ed.) Geneva: World Climate Research Programme. 2010. Rep. 40. S.7. P.3-4.
  9. Denisov S.N., Arzhanov M.M., Eliseev A.V., Mokhov I.I. Assessment of methane release from hydrates in oceanic sediments due to possible climate changes in the 21st century // Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. A. Zadra (Ed.) Geneva: World Climate Research Programme. 2011. Rep. 41. S.7. P.9-10.
  10. Denisov S.N. Estimations of hydrate stability in Baikal // Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. A. Zadra (Ed.) Geneva: World Climate Research Programme. 2012. Rep. 42. P.07.05-07.06.
  11. Denisov S.N., Kazantsev V.S., Arzhanov M.M. Changes in wetland methane emissions in the IAP RAS global model under RCP anthropogenic scenarios // Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. A. Zadra (Ed.) Geneva: World Climate Research Programme. 2013. Rep. 43. P.07.09-07.10.
  12. Kazantsev V.S., Denisov S.N., Arzhanov M.M. Systematization of statement and carrying out of instrumental measurements of greenhouse gases in the tasks of forecasting with use of mathematical models // Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. A. Zadra (Ed.) Geneva: World Climate Research Programme. 2013. Rep. 43. P.07.11-07.12.
  13. Arzhanov M.M., Denisov S.N., Kazantsev V.S. Characteristics of permafrost, total organic carbon and nitrogen distribution in Northern Eurasia // Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. A. Zadra (Ed.) Geneva: World Climate

Research Programme. 2013. Rep. 43. P.07.03-07.04.

14. Казанцев В.С., Заров Е.А., Лойко С.В., Аржанов М.М., Голубятников Л.Л., Денисов С.Н., Завалишин Н.Н. Инструментальные измерения потоков метана и запасов органического вещества в тундровых экосистемах криолитозоны // XVII Всеросс. школа-конференция "Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы". Нижний Новгород. 2013. С. 36.
15. Денисов С.Н. Оценка стабильности гидратов Арктического шельфа // Школа-конф. «Изменения климата и окружающей среды Северной Евразии: анализ, прогноз, адаптация». Кисловодск. 2014. С. 82-83.
16. Аржанов М.М., Денисов С.Н. Оценки потерь углерода тундровыми экосистемами в результате природных пожаров // Материалы международной конференции «Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем». Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета. 2014. С. 17-19.
17. Аржанов М.М., Денисов С.Н. Потоки метана в тундровых экосистемах по модельным оценкам и данным наблюдений // XVIII Всеросс. школа-конф. "Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы". Борок. 2014. С. 12-13.