

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

На правах рукописи

УДК 551.511

Денисов Сергей Николаевич

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

Специальность 25.00.29 физика атмосферы и гидросферы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук

Научный руководитель
чл.-корр. РАН, профессор, д.ф.-м.н.
Мохов Игорь Иванович

Москва 2015

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1 Моделирование глобальной естественной эмиссии метана в атмосферу болотными экосистемами.....	14
1.1 Оценки эмиссии метана болотными экосистемами в XX веке	16
1.1.1 Эмиссия метана болотными экосистемами во второй половине XX века по расчетам с использованием данных реанализа.....	16
1.1.2 Изменения эмиссий метана болотными экосистемами в XX веке по расчетам с использованием данных CRU	24
1.2 Изменения естественной эмиссии метана в XXI веке и ее влияние на климат	333
Обсуждение результатов главы 1.....	49
Глава 2 Региональные расчеты эмиссии метана в атмосферу болотными экосистемами в XXI веке	52
2.1 Изменения эмиссии метана влажными экосистемами европейской и сибирской территорий России в XXI веке по расчетам с использованием данных региональной модели ГГО.....	53
2.2 Изменения эмиссии метана болотными экосистемами Западной Сибири в XXI веке по расчетам с данными ансамбля климатических моделей	61
Обсуждение результатов главы 2.....	68
Глава 3 Расчет возможных эмиссий метана, связанных с разложением метангидратов	70

3.1 Оценка эмиссии метана, связанной с разложением субаквальных метангидратов при увеличении придонной температуры воды.....	73
3.2 Оценка стабильности метангидратов в системе озера Байкал.....	78
Обсуждение результатов главы 3.....	84
Заключение	86
Литература	91

Введение

В последние годы в глобальные трехмерные климатические модели, используемые для оценок естественных и антропогенных изменений, включаются интерактивные блоки углеродного цикла [7, 21, 22, 37, 45, 70, 76]. При этом выявлена положительная обратная связь между климатом и углеродным циклом. По сравнению со случаем без учета влияния климатических изменений на потоки между атмосферой и подстилающей поверхностью такой учет приводит к дополнительному росту углекислого газа в атмосфере. 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 380 ppb во время последнего ледникового максимума [98] до 715 ppb в 1750 году [75]. К настоящему времени она возросла более чем в 2.5 раза до 1824 ppb в 2013 году [73] и продолжает расти со скоростью около 5 ppb/год [70]. Концентрация метана в атмосфере изменялась в пределах от 320 до 780 ppb в течение последних 800 тыс. лет [32, 90]. Данные, полученные из ледяных кернов Гренландии, показывают, что резкие изменения концентрации метана сопутствовали резким потеплениям последнего ледникового периода [62] с откликом, достигающим 16 ppb на 1 °C потепления в Гренландии [83], и ростом до 200 ppb за столетие [120].

Метан более чем в 20 раз радиационно эффективнее углекислого газа при расчете на единицу концентрации (соответственно 3.7×10^{-4} и 1.5×10^{-5} $W m^{-2} ppb^{-1}$ [68]). При этом эмиссии метана имеют существенно больший радиационный форсинг, чем изменения его концентрации, что связано с непрямими эффектами воздействия на другие атмосферные компоненты (такие как озон и водяной пар), имеющие свой радиационный форсинг, посредством химических процессов в атмосфере. Суммарный радиационный форсинг метана, составляющий в настоящее время около $1 W m^{-2}$, сравним с форсингом углекислого газа (около $1.7 W m^{-2}$) [42, 70, 103].

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, метангидраты и др.) и антропогенных (энергетика, добыча угля, сельское хозяйство, сжигание биомассы и др.) источников. В настоящее время природные эмиссии метана по оценкам составляют 35-50% от суммарных [70]. Существуют опасения, что они могут значительно вырасти при потеплении климата и включении обратных связей между климатом и метановым циклом. Основным природным источником метана являются влажные экосистемы. Эмиссии метана из влажных экосистем составляют по оценкам 177-284 МтСН₄/год [80, 107, 113] при суммарных природных эмиссиях в 238-484 МтСН₄/год [70]. Климатически обусловленные изменения эмиссии метана влажными экосистемами считаются основной причиной межгодовых вариаций глобального потока метана в атмосферу.

В XXI веке потенциально могут стать важными эмиссии метана при дестабилизации метангидратов в донных отложениях. По оценкам современный поток метана в атмосферу, связанный с разложением метангидратов сравнительно мал и оценивается в 2–9 МтСН₄/год [69, 110]. Однако суммарные запасы углерода в гидратах огромны и составляют по оценкам $(0.5–10) \cdot 10^3$ ГтС [87, 95]. Гидраты 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 [31, 72]. Возможно также существование больших запасов гидратов на мелководной части арктического шельфа (где в равновесных условиях существование гидратов невозможно), связанное с наличием реликтовой субмаринной вечной мерзлоты [2, 20, 43, 46, 74, 108]. Донные отложения в этих регионах находятся в неравновесном состоянии и постепенно прогреваются, что может привести к разложению гидратов и значительным выбросам метана в атмосферу.

Учет изменений естественных эмиссий метана из влажных экосистем и при дестабилизации метангидратов важен для оценки потоков метана в атмосферу. В диссертации предложены модели эмиссии метана из влажных экосистем и эмиссии метана при разложении субаквальных метангидратов, которые могут быть использованы, в частности, в климатической модели ИФА РАН. С этими моделями был проведен ряд численных экспериментов как в неинтерактивном режиме [14–16, 36, 94, 117], так и в интерактивном [17, 21]. В этих экспериментах был получен ряд значимых результатов, характеризующих взаимодействие климата и естественных эмиссий метана.

Цели и 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 на основе алгоритма [63], позволяющую рассчитывать изменения потоков метана из почвы в атмосферу, связанные с изменением термического и гидрологического режима почвы.

С использованием этой модели, ранняя версия которой описана в разделе 1.1.1, была проведена серия численных экспериментов [14-17, 21, 36], включая описанные в разделах 1.1.1, 1.1.2, 1.2, 2.1 и 2.2. С ее использованием были также проведены эксперименты в соответствии с условиями международного проекта сравнения подобных моделей WETCHIMP [18, 57, 94, 117], который был инициирован для международной координации исследований в области моделирования влажных экосистем и связанных с ними потоков метана.

Для расчета термофизических характеристик почвы в численных экспериментах, описанных в разделе 1.1.1, использовалась версия модели [28]. Эта модель является обобщением решения задачи Стефана с годовым ходом температуры на нижней границе атмосферы и учетом влияния снежного и мохового покровов. По сравнению со стандартным вариантом задачи Стефана, модель применима не только в регионах распространения вечной мерзлоты, но и в регионах с сезонным промерзанием почвы. В численных экспериментах, описанных в разделе 1.1.1, использовались среднемесячные данные реанализа ERA-40 [114] для приповерхностной температуры и осадков в 1958-2000 гг. с разрешением 2.5° по широте и долготе. Для выделения модельных ячеек, соответствующих болотным экосистемам, использовалась база данных CDIAC NDP-017 (<http://cdiac.esd.ornl.gov/ndps/ndp017.html>).

Для расчета термофизических характеристик почвы в численных экспериментах, описанных в разделах 1.1.2, 1.2 и 2.2 использовалась динамическая модель процессов тепло- и влагопереноса в почво-грунтах, разработанная в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН [4, 14, 17]. Температура на верхней границе почвы/снега, определяется из уравнения теплового баланса подстилающей поверхности. На нижней границе расчетного слоя почвы задается условие отсутствия потока тепла. В численных экспериментах, описанных в разделе 1.1.2, использовались временные серии среднемесячных данных CRU TS3.1 [96] для приповерхностной температуры, осадков и облачности в 1901-2009 гг. В численных экспериментах, описанных в разделе 1.2, модель естественных эмиссий метана из влажных экосистем и динамическая модель процессов тепло- и влагопереноса в почво-грунтах интерактивно

взаимодействовали с глобальной климатической моделью, разработанной в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (КМ ИФА РАН). В численных экспериментах, описанных в разделе 2.2, входные данные атмосферного воздействия для региона Западной Сибири (55-65 с.ш., 65-85 в.д.), включающего Большое Васюганское болото, задавались полями приповерхностной температуры воздуха, осадков, коротковолновой солнечной радиации, влажности воздуха и облачности по ансамблю климатических моделей: ECHAM5/MPI-OM, CCCMA-CGCM3, NCAR-CCSM3, INMCM3, КМ ИФА РАН.

В численных экспериментах, описанных в разделе 2.1, в качестве входных данных для оценок эмиссии метана из почвы использовались результаты расчетов с региональной моделью ГГО [50, 51] для температуры и влагосодержания почвенных слоев (толщиной 0.1, 0.25, 0.65 и 2 м) и влагоемкости почвы. Расчеты с региональной климатической моделью ГГО проводились при сценарии антропогенного воздействия SRES A2 [68].

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 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. Для расчета температуры в донных отложениях использовалась модель процессов тепло- и влагопереноса, разработанная в ИФА РАН [4],

позволяющая рассчитывать характеристики термического и гидрологического режимов пород при различных сценариях изменения климата и адаптированная для моделирования донных отложений.

В качестве граничных условий в численных экспериментах, описанных в разделе 3.1, задавалась температура придонной воды по расчетам с глобальными климатическими моделями общей циркуляции 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.

В численных экспериментах, описанных в разделе 3.2, в качестве начальных условий для модели донных отложений задавался градиент температуры, соответствующий равновесному состоянию при характерном для глубоководной части Байкала геотермальном потоке 0.09 Вт/м^2 [78], теплопроводности донных отложений согласно [78], и современной придонной температуре воды согласно профилю [49]. Были проведены расчеты толщины ЗСГ для периода 15000 лет при повышенной на 1°C и 3°C относительно современной придонной температуре в качестве верхнего граничного условия.

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.

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, представленные в работе, получены автором лично.

Глава 1 Моделирование глобальной естественной эмиссии метана в атмосферу болотными экосистемами

В глобальных климатических моделях в блоке углеродного цикла наряду с обменом углекислого газа необходимо учитывать также метановый обмен. Крупнейший природный источник метана – влажные экосистемы, в частности болота. Медленное разложение органической материи в болотах способствует накоплению углерода. Поэтому, хотя влажные экосистемы занимают всего 6-7% площади поверхности Земли, большая часть почвенного углерода находится в них. Около половины болот находится в высоких широтах Северного полушария. Во многом это связано с влиянием вечной мерзлоты на гидрологию почвы [4, 9]. Режим болот и в целом природный цикл метана зависят от изменений климата и в свою очередь влияют на них.

Изменения в цикле метана и режиме болот при климатических изменениях могут иметь значительные не только региональные, но и глобальные последствия. В частности, потенциально существенным представляется эффект так называемой “метановой бомбы”, связанный с выбросом в атмосферу в результате глобального потепления и деградации вечной мерзлоты значительной массы этого парникового газа [25, 44, 53, 85, 109]. В России площадь вечной мерзлоты составляет более 11 млн. км², она покрывает около 2/3 территории страны. Дополнительное увеличение эмиссии метана в атмосферу может быть связано также с интенсификацией газо- и нефтедобычи.

Метан является третьим по значимости интегрального радиационного влияния на современную земную климатическую систему парниковым газом после водяного пара и углекислого газа [70, 103]. При этом метан более чем в 20 раз радиационно эффективнее углекислого газа в расчете на одну молекулу. С учетом характерного времени жизни молекул парниковых газов в атмосфере так называемый потенциал глобального потепления для метана на временном интервале в 20 лет более чем в 60 раз превышает соответствующий потенциал для углекислого газа. При этом с увеличением временного горизонта это соотношение уменьшается: для 100-летнего интервала оно немного больше 20, а для 500-летнего – меньше 10 [68].

Необходимо отметить, что общий диапазон имеющихся оценок глобальной эмиссии метана, связанной с болотами, достаточно широк [3, 68, 82, 88]. В [6] на основе реконструкций сделаны оценки возможных изменений эмиссий метана бореальными экосистемами северной Евразии при увеличении глобальной приповерхностной температуры примерно на 1 К для климатического оптимума голоцена (около 6 тыс. лет назад) и примерно на 2 К для оптимума микулинского межледниковья (около 125 тыс. лет назад), а также при условии глобального потепления на 1 К в начале XXI века. В последнем случае получено увеличение эмиссии почти на четверть. При этом отмечено, что при дальнейшем потеплении следует ожидать сокращения эмиссии естественных экосистем северной Евразии. Для более теплых климатов 6 и 125 тыс. лет назад получено уменьшение эмиссии метана бореальными экосистемами северной Евразии из-за эффектов иссушения почвы.

1.1 Оценки эмиссии метана болотными экосистемами в XX веке

1.1.1 Эмиссия метана болотными экосистемами во второй половине XX века по расчетам с использованием данных реанализа

Для диагностики изменений эмиссий метана болотными экосистемами использовался модельный блок цикла метана, разработанный автором на основе алгоритма [63]. При определении потоков метана, связанных с экосистемами в условиях вечной мерзлоты, учитывалось, что, хотя эмиссия метана зависит, в частности в тундре, от многих взаимодействующих факторов, доминирующее влияние связано с температурой почвы, ее влажностью, глубиной протаивания и количеством органического субстрата, доступного для микробиологической декомпозиции [24, 64, 65]. В предложенной модели полный поток метана F_{CH_4} зависит от температуры, влагосодержания и содержания углерода в почве и имеет вид:

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

где C_i – содержание углерода в i -слое почвы толщиной Δz_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 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. 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:

$$V_i = \Theta(T_i) \cdot \Theta\left(\frac{W_i}{W_{\max,i}} - 0.5\right) \cdot \left(\frac{W_i}{W_{\max,i}} - 0.5\right) \cdot Q_{10}^{0.1(T_i - T_0)} \cdot F_i. \quad (2)$$

Здесь $W_{\max,i}$ – максимально возможное влагосодержание i -слоя почвы, Θ – 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), α и β – 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.

Поток метана с поверхности болот, образовавшихся в результате протаивания, зависит от максимальной глубины протаивания вечной мерзлоты. Для ее расчета в качестве базовой использовалась модель [28]. Используемая модель является

обобщением решения задачи Стефана с годовым ходом температуры на нижней границе атмосферы и учетом влияния снежного и мохового покровов. По сравнению со стандартным вариантом задачи Стефана, модель применима не только в регионах распространения вечной мерзлоты, но и в регионах с сезонным промерзанием почвы. Глубина слоя сезонного протаивания/промерзания зависит от годового хода приповерхностной температуры и осадков. Влияние эффектов метаморфизма снега не учитывалось. Эмиссии метана считались только из областей залегания вечной мерзлоты и болот. Для определения модельных ячеек, соответствующих болотным экосистемам, использовалась база данных CDIAC NDP-017 (<http://cdiac.esd.ornl.gov/ndps/ndp017.html>).

Были проведены численные эксперименты по расчету эмиссии метана из влажных экосистем с использованием среднемесячных данных реанализа ERA-40 [114] для приповерхностной температуры и осадков в 1958-2000 гг. с разрешением 2.5° по широте и долготе. В стандартном варианте модели при расчете потока метана использовались следующие значения параметров: $Q_{10} = 2$, $T_0 = 2^\circ\text{C}$, $\alpha = 42.5 \text{ мгCH}_4 \text{ м}^{-3} \text{ сут}^{-1}$ и $\beta = 0.0375 \text{ мгCH}_4 \text{ м}^{-3} \text{ сут}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Указанные значения Q_{10} и T_0 использовались во всех численных экспериментах глав 1 и 2. В расчеты включались только слои почвы до некоторой предельной глубины. Для нее в стандартном варианте модели использовались значения 15 см в тропиках и 60 см вне тропиков. Близкие значения глубин получаются по данным содержания органического углерода в почве (http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/geo/?cid=nrcs142p2_054018) при характерной плотности торфа 200 кг/м^3 . Более глубокие слои в расчетах эмиссий метана болотными экосистемами не учитывались.

При использовавшихся параметрах предлагаемая модель в целом достаточно реалистично воспроизводит значения потока метана по имеющимся данным. На рис. 1а,б представлены пространственные распределения рассчитанных глубин сезонного протаивания (а) и среднегодовых потоков метана (б) в Северном полушарии для периода 1958-2000 гг. Следует при этом отметить, что определяющий вклад в глобальные эмиссии метана из влажных экосистем получен из болот относительно небольшой протяженности в низких (тропических) широтах.

Средняя величина глобальной интенсивности эмиссии метана болотными экосистемами в используемой версии модели по данным реанализа для периода 1958-2000 гг. составляет 143 МтСН₄/год. Близкие оценки получены в [88] и [82] – 145 ± 30 МтСН₄/год и 145 ± 41 МтСН₄/год, соответственно. При этом полученные в данных численных экспериментах оценки потоков метана во внетропических широтах (28 МтСН₄/год) меньше, а в тропических широтах (115 МтСН₄/год) больше, чем по оценкам [82] (соответственно в диапазонах 29-69 и 65-117 МтСН₄/год). Аналогичные численные эксперименты проводились в ИФА РАН в рамках проекта WETCHIMP [94] с использованием временных серий среднемесячных данных CRU TS3.1 [96]. При этом были получены близкие результаты: средняя величина глобальной интенсивности эмиссии метана в 1993–2004 гг. – 163 МтСН₄/год (115 МтСН₄/год из тропических и 48 МтСН₄/год из внетропических широт). Эти результаты хорошо согласуются с другими современными оценками [94].

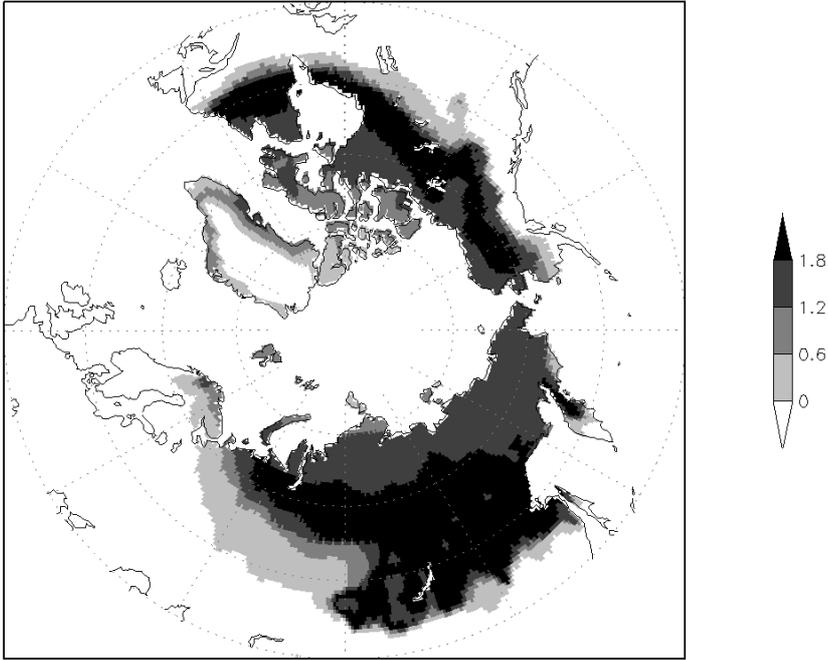


Рис.1а.

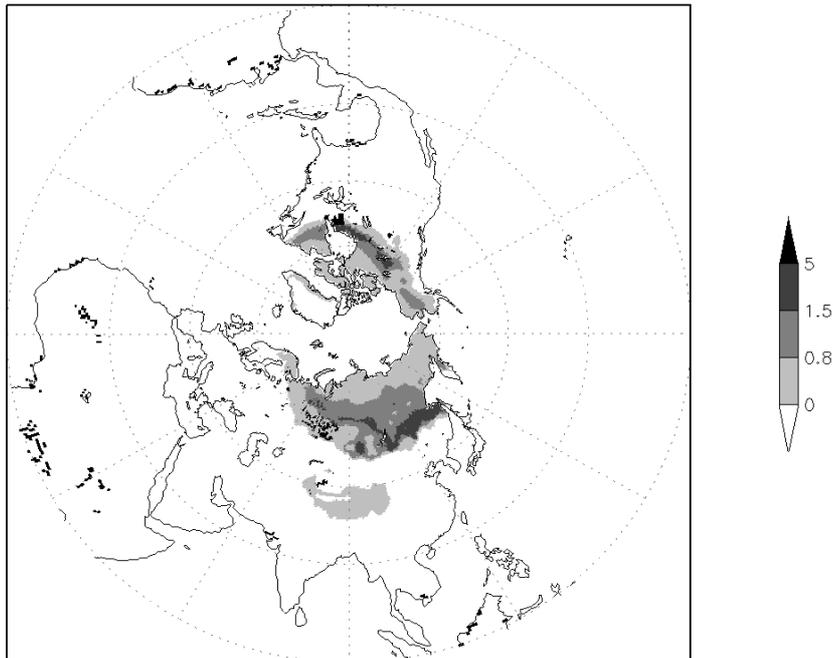


Рис.1б.

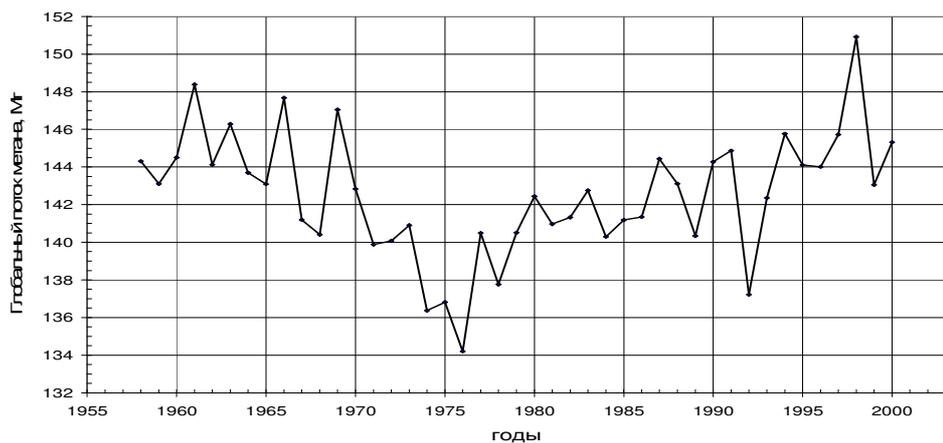
Рис.1. Распределения рассчитанных глубин сезонного протаивания [м] (а) и среднегодовых потоков метана [$г \cdot м^{-2} \cdot год^{-1}$] (б) в Северном полушарии для периода 1958-2000 гг.

На рис. 2а представлены рассчитанные межгодовые изменения глобальной эмиссии метана болотными экосистемами в 1958-2000 гг., а на рис.2б - зависимость изменений глобальных потоков метана от соответствующих изменений глобальной приповерхностной температуры атмосферы. Согласно рис. 2а 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 отмечен общий рост эмиссии метана в 1958-2000 гг. На рис. 2в представлены вариации потоков метана, нормированных на соответствующие средние значения для периода 1958-2000 гг., для Земли в целом, для тропических и внетропических широт. Согласно рис. 2в глобальный поток метана менялся год от года во второй половине XX века не более, чем на 6%. При этом относительные аномалии потока метана во внетропических широтах заметно сильнее – до значений около 10% и даже более.

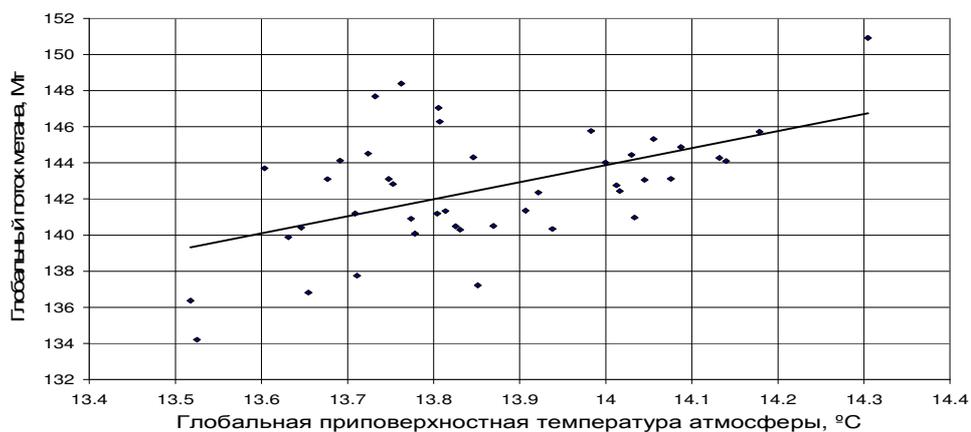
На основе линейной регрессии (прямая на рис. 2б) оценен коэффициент чувствительности глобальной эмиссии метана к изменению глобальной приповерхностной температуры – $9.9(\pm 2.5)$ MtCH_4/K или $7\%/K$ при коэффициенте корреляции $r=0.53$ (в скобках указано среднеквадратическое отклонение коэффициента регрессии). Коэффициент чувствительности эмиссии метана к изменению приповерхностной температуры для пояса низких широт ($30^\circ\text{с.ш.} - 30^\circ\text{ю.ш.}$) несколько больше – $10.3(\pm 2.3)$ MtCH_4/K или $9\%/K$ при $r=0.58$. Менее значимая тенденция получена для роста эмиссии метана с ростом приповерхностной температуры во внетропических широтах

– $1.5(\pm 0.7)$ МтСН₄/К или 5.5%/К при $r=0.32$ для пояса широт 30–90° с.ш. в северном полушарии.

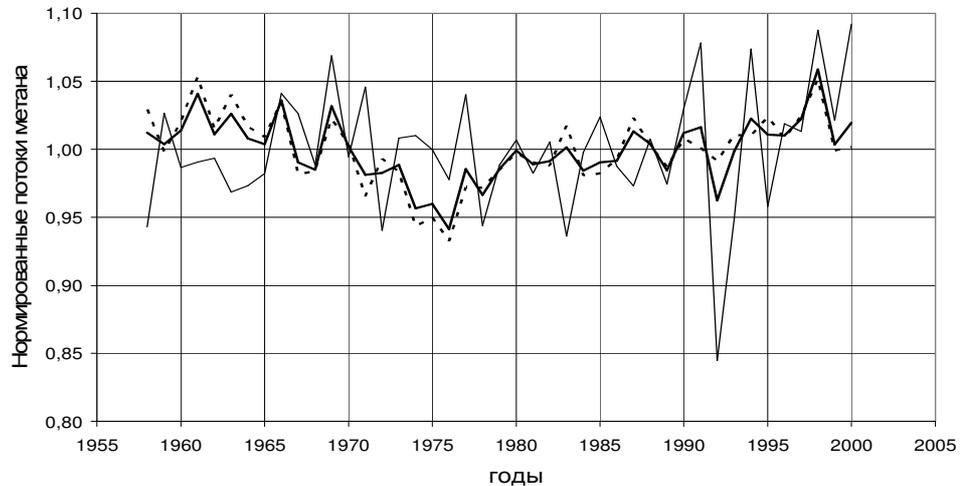
Сделаны оценки чувствительности потоков метана к изменению различных модельных параметров. В частности, при полученной близкой к линейной зависимости эмиссии метана от эффективной глубины болот увеличение последней вдвое приводит к удвоению потоков. Анализ пространственного распределения разности средних потоков метана в 1990-х гг. и 1960-х гг. выявил региональные изменения до 20% и даже более, в частности для Западной Сибири. При этом наряду с областями с положительными изменениями отмечены и регионы с отрицательными изменениями. Уменьшение потоков метана связано, в частности, с соответствующими изменениями глубин сезонного протаивания.



а)



б)



в)

Рис.2. Глобальный поток метана [Мт] в зависимости от времени (а) и от глобальной приповерхностной температуры атмосферы [°С] (б), а также нормированные (на соответствующие средние значения для всего периода) величины потоков метана для Земли в целом (жирная кривая), для тропических (пунктир) и внетропических широт (тонкая кривая) (в) по расчетам для второй половины XX века с использованием данных реанализа.

1.1.2 Изменения эмиссий метана болотными экосистемами в XX веке по расчетам с использованием данных CRU

Использованная в данных экспериментах версия модели эмиссий метана влажными экосистемами состоит из двух блоков. В блоке эмиссии метана рассчитывается поток метана из почвы в атмосферу. Необходимые для этого физические характеристики почвы в свою очередь рассчитываются в блоке тепло- и влагопереноса.

Блок термодинамики почвы (см. раздел 1.1.1), использовавшийся в [21, 36, 94, 117] был заменен на разработанную для КМ ИФА РАН динамическую модель термо- и гидрофизических процессов в почвогрунтах [4, 14, 17].

Использовался блок эмиссии метана (см. раздел 1.1.1), позволяющий учитывать влияние количества углеродного субстрата почвы на производство метана согласно [67, 119]. Значения параметров α ($42.5 \text{ мгСН}_4 \text{ м}^{-3} \text{ сут}^{-1}$) и β ($0.0375 \text{ мгСН}_4 \text{ м}^{-3} \text{ сут}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) не менялись по сравнению с экспериментами, описанными в разделе 1.1.1. Полный поток метана из почвы в атмосферу рассчитывался с использованием параметризации (1) аналогично численным экспериментам из раздела 1.1.1.

В данных экспериментах использовалась схема расчета запасов углерода в почве согласно [5]. Вертикальное распределение углерода в почве задавалось на основе результатов измерений [84] с максимальной концентрацией углерода в верхних 20 см почвы и последующим экспоненциальным убыванием содержания углерода с

глубиной, суммарное содержание углерода в почве задавалось согласно данным [89]. Учет содержания углерода в почве позволил задавать предельную глубину расчета одинаковую для всех модельных ячеек (в численных экспериментах раздела 1.1.1 для тропических и внетропических широт ее значения различались [21, 36]). В проведенных расчетах для предельной глубины использовалось значение 1 м.

Для расчета температуры и влажности почвы использовалась динамическая модель процессов тепло- и влагопереноса в почвогрунтах [4, 14, 17]. Болота характеризуются ограниченным подповерхностным стоком воды, связанным с наличием водоупорного слоя в грунте. Нужно учитывать, что почвенный блок одномерный, не позволяющий рассчитывать боковой сток с соседних модельных ячеек или внутри ячейки. В связи с этим в каждой модельной ячейке доля влажных территорий предписывалась в соответствии с данными [55]. При расчете эмиссии метана для влажных территорий почвенные слои считались насыщенными влагой.

На верхней границе расчетной области в модели термо- и гидрофизики почвы атмосферное воздействие задавалось полями приповерхностной температуры, осадков, коротковолновой солнечной радиации, влажности и облачности. При модельных расчетах потоков метана и их изменений использовались временные серии среднемесячных данных CRU TS3.1 [96] для приповерхностной температуры, осадков и облачности в 1901-2009 гг. Их пространственное разрешение составляет $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. Остальные характеристики атмосферного воздействия задавались по расчетам с полной версией климатической модели ИФА РАН.

С моделью эмиссий метана был проведен ряд численных экспериментов, в том числе базовый эксперимент (D) для 1901-2009 гг., в котором на вход модели подавались данные CRU. 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. Эта величина соответствует среднему межмодельному повышению глобальной приповерхностной температуры за период 2080-2099 гг. относительно периода 1980-1999 гг. по расчетам при антропогенном сценарии SRES A2 [93]. Во втором (PS) были увеличены осадки на 3.9% (изменение глобальной средней величины для периода 2071-2100 гг. относительно периода 1961-1990 гг. по расчетам при антропогенном сценарии SRES A2 [102]), а остальные параметры атмосферного воздействия, включая температуру, не менялись по сравнению с экспериментом D. Повышение температуры и осадков в экспериментах TS и PS применялось однородно по пространству и месяцам года аналогично экспериментам 5 и 6 проекта WETCHIMP [117].

При использовавшихся параметрах предлагаемая модель в целом достаточно реалистично воспроизводит значения потока метана по имеющимся данным. На рис. 3 представлено пространственное распределение рассчитанных среднегодовых потоков метана для численного эксперимента D для периода 1991-2009 гг. Наибольший вклад в глобальные эмиссии метана вносят влажные экосистемы Западной Сибири, низменности Гудзонова залива, Юго-Восточной Азии, Центральной Африки и бассейна Амазонки. Для сравнения представлены распределения по расчетам с

предыдущей версией модели эмиссий метана ИФА РАН (в рамках проекта WETCHIMP [94]) и по данным наблюдений [92]. Различия в распределении потоков метана связаны в первую очередь с использованием различных распределений болот. В отличие от используемой версии модели эмиссий метана в КМ ИФА РАН, в которой распределение увлажненных территорий задается согласно [55], в предыдущей версии модели использовалась база данных CDIAC NDP-017 (<http://cdiac.esd.ornl.gov/ndps/ndp017.html>). Влажными экосистемами считались болота и тундра. В таблице 1 приведены площади болот по разным данным.

Средняя величина глобальной интенсивности эмиссий метана болотными экосистемами в новой версии модели в базовом численном эксперименте D по расчетам с использованием данных CRU для периода 1901-2009 гг. около 170 МтСН₄/год. Близкие оценки получены в [88] и [82] – 145±30 МтСН₄/год и 145±41 МтСН₄/год, соответственно. При этом полученные в данной работе оценки потоков метана во внетропических широтах (36 МтСН₄/год) находятся в пределах, а в тропических (134 МтСН₄/год) несколько выше оценок [82] (соответственно в диапазонах 29–69 и 65–117 МтСН₄/год). В таблице 2 представлено сравнение результатов расчета эмиссии метана в эксперименте D с результатами расчетов с ранней версией модели эмиссий метана, с данными WETCHIMP, с оценками различных моделей [56, 58, 61, 88] и с данными наблюдений [92].

В эксперименте D в течение XX века глобальные эмиссии возрастают примерно на 9 МтСН₄/год. Межгодовая изменчивость эмиссий может превышать в отдельных случаях это значение, но в основном - менее 6 МтСН₄/год. При этом можно отметить два периода спада эмиссий в 1910-х и 1960-х годах. Согласно рис. 4 они связаны

главным образом со снижением эмиссий из влажных экосистем внетропических широт. 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%. Анализ пространственного распределения разности средних потоков метана в последнем и первом десятилетиях XX века выявил также регионы с небольшими отрицательными изменениями эмиссии метана - в основном в Африке и Южной Америке.

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 МтСН₄/год). При этом относительное увеличение внетропических эмиссий (84%) значительно сильнее, чем тропических (28%), что связано в первую очередь с удлинением теплого периода.

На основе линейной регрессии (прямая на рис.5) оценен коэффициент чувствительности глобальной эмиссии метана к изменению глобальной приповерхностной температуры атмосферы над сушей – 16 МтСН₄/год/К или 10%/К (при коэффициенте корреляции $r = 0.7$). Коэффициент чувствительности эмиссии метана к изменению приповерхностной температуры для пояса низких широт (30° с.ш. – 30° ю.ш.) значительно меньше – 9 МтСН₄/год/К или 6%/К (при $r = 0.76$). Рост эмиссий метана с ростом приповерхностной

температуры во внетропических широтах составляет 7 МтСН₄/К или 20%/К (при $r=0.32$) для пояса широт 30 – 90° с.ш. в северном полушарии.

Таблица 1. Площадь влажных экосистем [10^6 км²] по различным массивам данных. В данной работе использовались данные [55], в ранних версиях модели (в том числе в экспериментах из раздела 1.1.1) – данные CDIAC NDP-017.

Данные	Глобально	Тропические широты (30°S-30°N)	Внетропические широты (>35°N)
[55]	6.2	2.9	2.9
CDIAC NDP-017	20.3	1.3	18.9
[92]	5.3		

Таблица 2. Эмиссии метана [МтСН₄/год] по расчетам в эксперименте D (за период 1994-2003 гг.). Для сравнения приведены результаты расчетов с предыдущей версией модели и межмодельное среднее проекта WETCHIMP (в аналогичных экспериментах), а также модельные оценки и данные наблюдений.

Данные	Глобально	Тропические широты (30°S-30°N)	Внетропические широты (>35°N)
Эксперимент D	178 ± 3	139 ± 2	36 ± 3
Версия модели [17]	164 ± 3	115 ± 2	43 ± 2
WETCHIMP [94]	190 ± 39	126 ± 31	51 ± 15
[92]	181	67	106
[88]	145 ± 30		
[61]	92	55	30
[56]	165 ± 50	91 ± 28	69 ± 20
[58]	145 ± 10	91 ± 11	43 ± 4

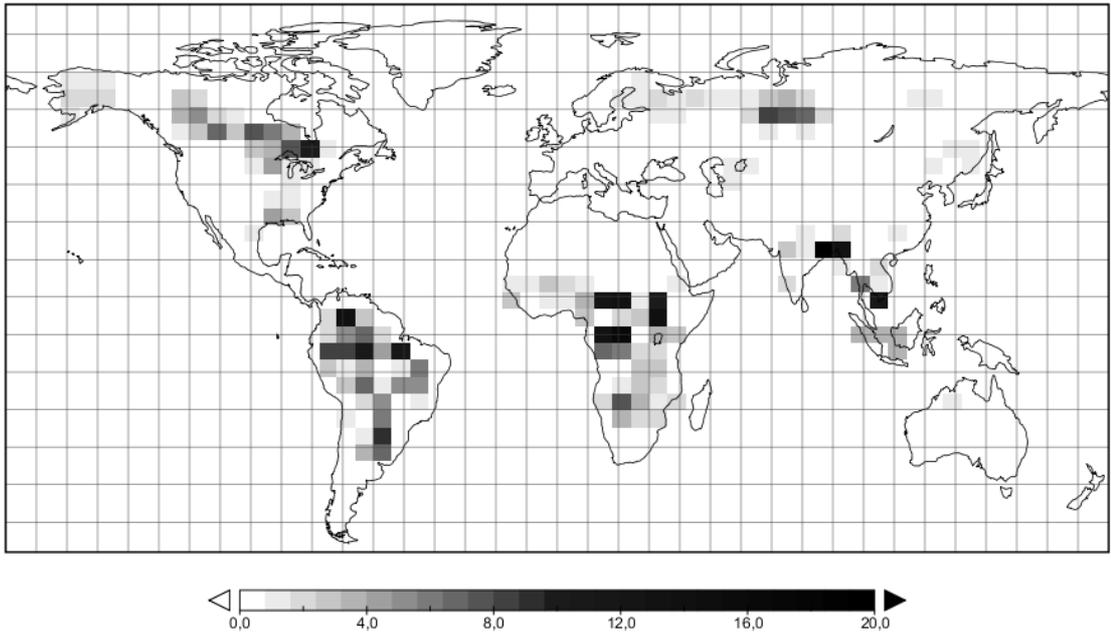


Рис. 3а.

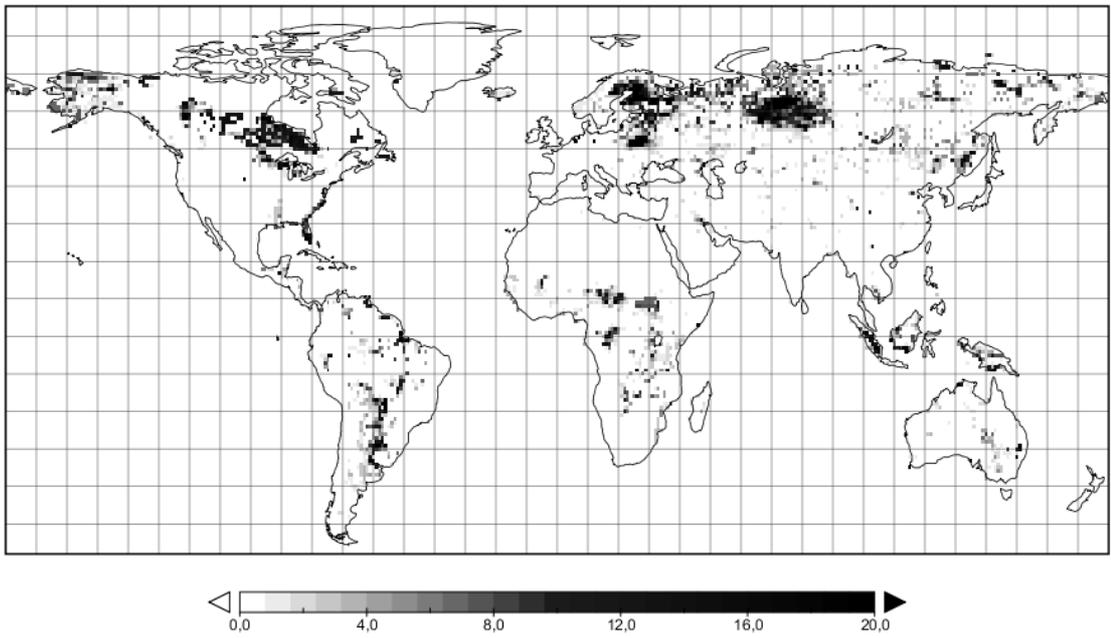


Рис. 3б.

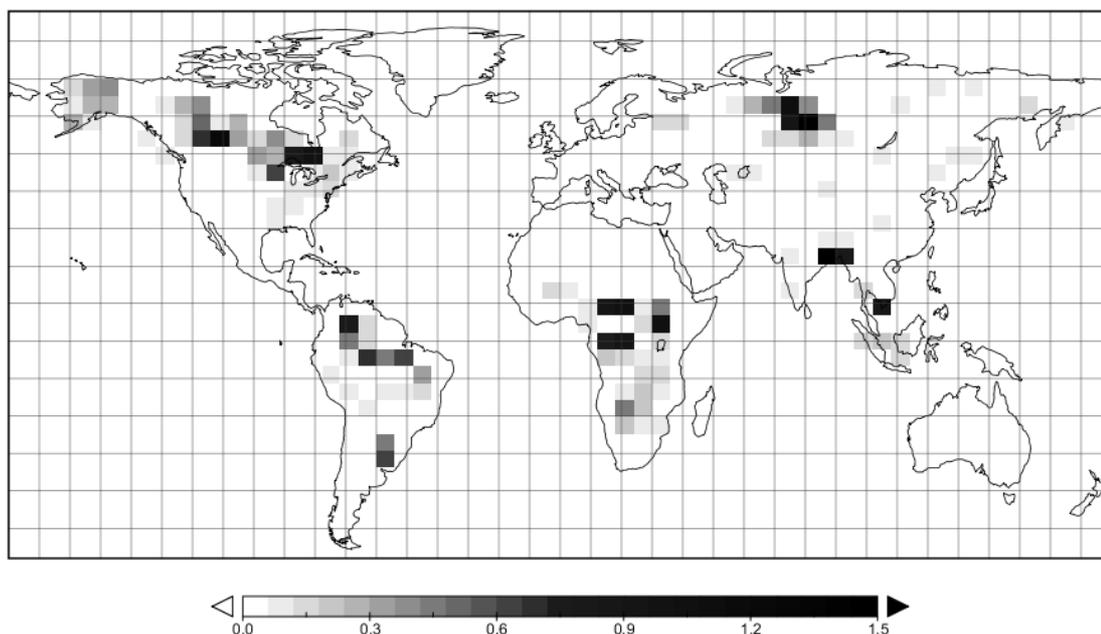


Рис. 3в.

Рис. 3. Пространственное распределение среднегодовых потоков метана [$\text{г}/\text{м}^2/\text{год}$] по модельным расчетам в численном эксперименте D для периода 1991-2000 гг. (а), распределение эмиссий по данным [92] (б) и изменение рассчитанных среднегодовых потоков метана (в) в численном эксперименте D для периода 1991-2000 гг. по сравнению с периодом 1901-1910 гг.

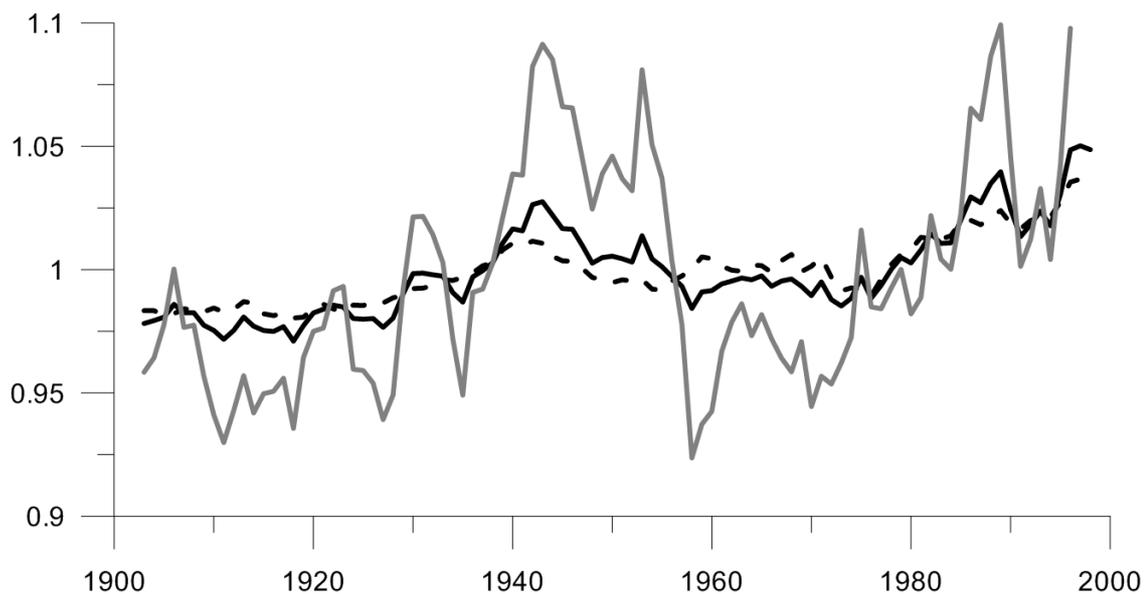


Рис. 4. Нормированные (на соответствующие средние значения для всего периода) 5-летние скользящие средние величины потоков метана для Земли в целом (черная кривая), для тропических (пунктир) и внетропических широт (серая кривая) по расчетам для XX века в численном эксперименте D.

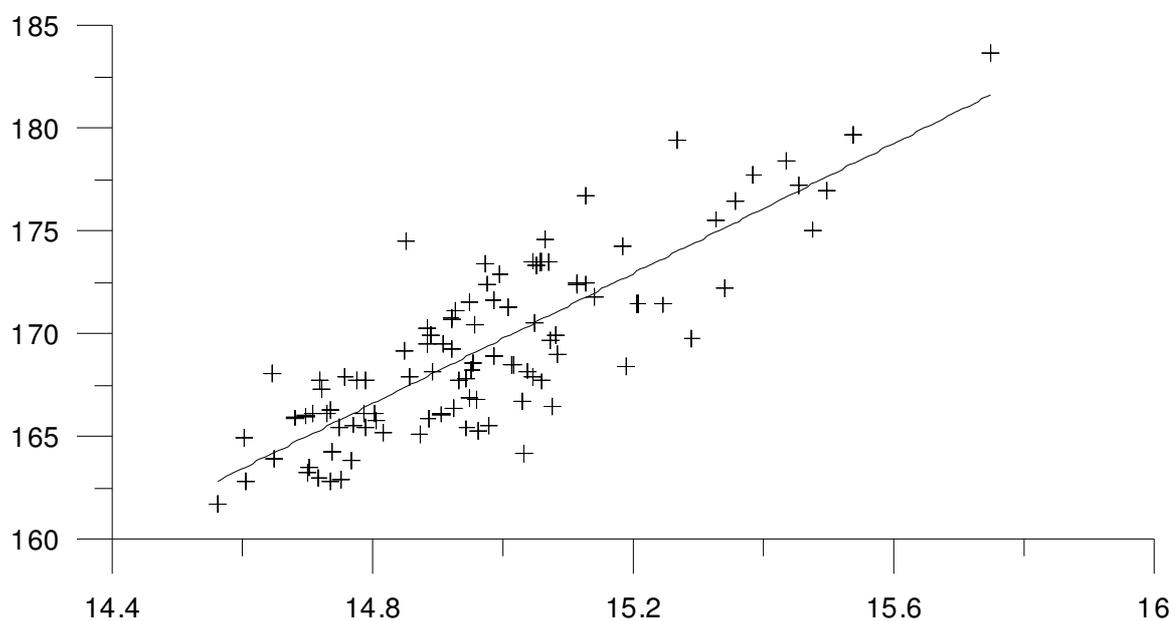


Рис. 5. Глобальные эмиссии метана в зависимости от глобальной приповерхностной температуры атмосферы T_{gl} над сушей для численного эксперимента D.

1.2 Изменения естественной эмиссии метана в XXI веке и ее влияние на климат

В [21] были представлены результаты интерактивного включения ранней версии блока метанового цикла (аналогичного использованному в разделе 1.1.1) в глобальную климатическую модель, разработанную в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (КМ ИФА РАН). Подобные блоки в настоящее время используются в ряде климатических моделей [8, 77, 107]. Представленные эксперименты развивают результаты [21] с учетом в КМ ИФА РАН динамической модели тепло- и влагопереноса (взамен предыдущей версии блока термодинамики почвы) и уточненного блока эмиссий метана из почвы в атмосферу.

Предыдущие версии КМ ИФА РАН описаны в [21, 31, 33-35, 37, 101]. В данных экспериментах в КМ ИФА РАН включены интерактивные блоки тепло- и влагопереноса в почвогрунтах, естественных эмиссий метана влажными экосистемами и баланса метана в атмосфере. Обмен между блоками атмосферы и почвогрунта осуществляется раз в 5 суток (т.е. на каждом временном шаге атмосферного блока КМ ИФА РАН). Рассчитанные теплофизические характеристики почвы далее используются при расчете эмиссии метана. Вычисленные эмиссии накапливаются в течение календарного года. В начале каждого календарного года эмиссии метана из почвы за предыдущий год используются для расчета концентрации метана в атмосфере.

Распределение температуры и влажности почвы по глубине рассчитывается с использованием динамической модели процессов тепло- и влагопереноса, разработанной в ИФА РАН [4, 14] (аналогичной использованной в экспериментах из раздела 1.1.2). Температура на верхней границе почвы/снега, определяется из уравнения теплового баланса подстилающей поверхности. На нижней границе расчетного слоя почвы задается условие отсутствия потока тепла.

Используемая версия КМ ИФА РАН имеет пространственное разрешение 4.5° по широте и 6° по долготе и не может явно разрешать болотные экосистемы меньшего размера. В каждой модельной ячейке доля, занятая влажными экосистемами, характеризовалась согласно данным [55] (аналогично экспериментам раздела 1.1.2). Для каждой модельной ячейки на каждом временном шаге проводились дополнительные расчеты с блоком термо- и гидрофизики почвы, где почвенные слои глубже 0.5 м задавались насыщенными влагой.

В представленных экспериментах использовалась версия блока расчета эмиссий метана, аналогичная использованной в разделе 1.1.2. Полный поток метана из почвы в атмосферу рассчитывался согласно формуле (1). Использовались те же значения модельных параметров, что и в разделе 1.1.2.

Для метанового цикла атмосферы аналогично [21] использовалось балансовое уравнение для концентрации метана q_{CH_4} :

$$\frac{dq_{CH_4}}{dt} = \frac{E_{CH_4,ant} + E_{CH_4,nat}}{\beta_{CH_4}} - q_{CH_4} \left(\frac{1}{\tau_{CH_4,s}} + \frac{1}{\tau_{CH_4,a}} \right), \quad (3)$$

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

Естественные эмиссии метана $E_{\text{CH}_4,\text{nat}}$ представляются в виде суммы эмиссий из почвы в атмосферу и других эмиссий естественного происхождения. Эмиссии из влажных наземных экосистем рассчитываются в модели интерактивно. По сравнению с ними, природные эмиссии метана в атмосферу из других источников (в том числе термитников, метангидратов, океана и диких животных) малы и в их значениях существует большая неопределенность [82]. В проведенных расчетах для них использовалось значение $65 \text{ МтCH}_4/\text{год}$ (что согласуется с величиной $45 \pm 40 \text{ МтCH}_4/\text{год}$, приведенной в [88]).

Более 90% метана, содержащегося в тропосфере, удаляется в результате химических реакций (главным образом окислением радикалом ОН). Скорость химической реакции окисления метана зависит от температуры среды. Чтобы учесть этот эффект, для характерного времени разложения метана в атмосфере $\tau_{\text{CH}_4,\text{a}}$, оказывающего существенное влияние на результаты расчетов использовалось три варианта. В варианте 1 $\tau_{\text{CH}_4,\text{a}}$ было постоянным равным 10.5 годам [115]. В варианте 2 время жизни в атмосфере зависело от температуры T (среднегодовой глобальной приповерхностной температуры атмосферы) экспоненциально ($\tau_{\text{CH}_4,\text{a}} \sim \exp(-E_a/kT)$) в соответствии с законом Аррениуса (E_a - энергия активации, k – постоянная Больцмана). В варианте 3 величина $\tau_{\text{CH}_4,\text{a}}$ в соответствии с законом Вант-Гоффа определялась степенной зависимостью с основанием $Q_{10} = 3$. Закон Аррениуса и эмпирическое правило Вант-Гоффа часто используются для оценки влияния

температуры на скорость химических реакций в современных глобальных геохимических моделях. Варианты модели 2 и 3 использовались, аналогично [19], для учета эффектов химических процессов в атмосфере, влияющих на разрушение в ней метана.

Основной путь вывода метана из атмосферы - его окисление радикалами ОН [82, 100]. Сокращение времени жизни метана в атмосфере при повышении температуры в вариантах модели 2 и 3 в данной работе связано с ускорением этой реакции. Время жизни метана связано со скоростью генерации и вывода из атмосферы радикалов ОН. Основные атмосферные компоненты, влияющие на эти процессы, кроме метана, - NO_x , СО, летучие органические соединения и водяной пар. Изменение их содержания в атмосфере может способствовать как увеличению, так и уменьшению времени жизни метана. В настоящее время в оценках отмеченных эффектов существует большая неопределенность. Согласно [100] эти эффекты имеют близкие значения и могут компенсировать друг друга.

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 сравнения климатических моделей 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 (Representative Concentration Pathways) [99]. При этом в

отличие от [34] использовались сценарии RCP не для концентрации метана в атмосфере, а для его антропогенных эмиссий.

Расчеты проводились с полной версией климатической модели при трех вариантах зависимости времени жизни метана в атмосфере от среднегодовой глобальной приповерхностной температуры (в дальнейшем эти варианты численных экспериментов обозначаются F1, F2, F3 с указанием сценария антропогенных воздействий). Были проведены также расчеты без учета воздействия изменений климата на естественные эмиссии метана (на вход атмосферного блока метанового цикла подавались не текущие рассчитанные значения эмиссий из почвы, а постоянные значения - средние для первых 10 модельных лет) при постоянном времени жизни метана в атмосфере (в дальнейшем эти численные эксперименты обозначаются D1 с указанием сценария антропогенных воздействий).

В проведенных численных экспериментах с КМ ИФА РАН реалистично воспроизводились изменения концентрации метана в атмосфере и изменения глобальной среднегодовой приповерхностной температуры (рис. 6, 7).

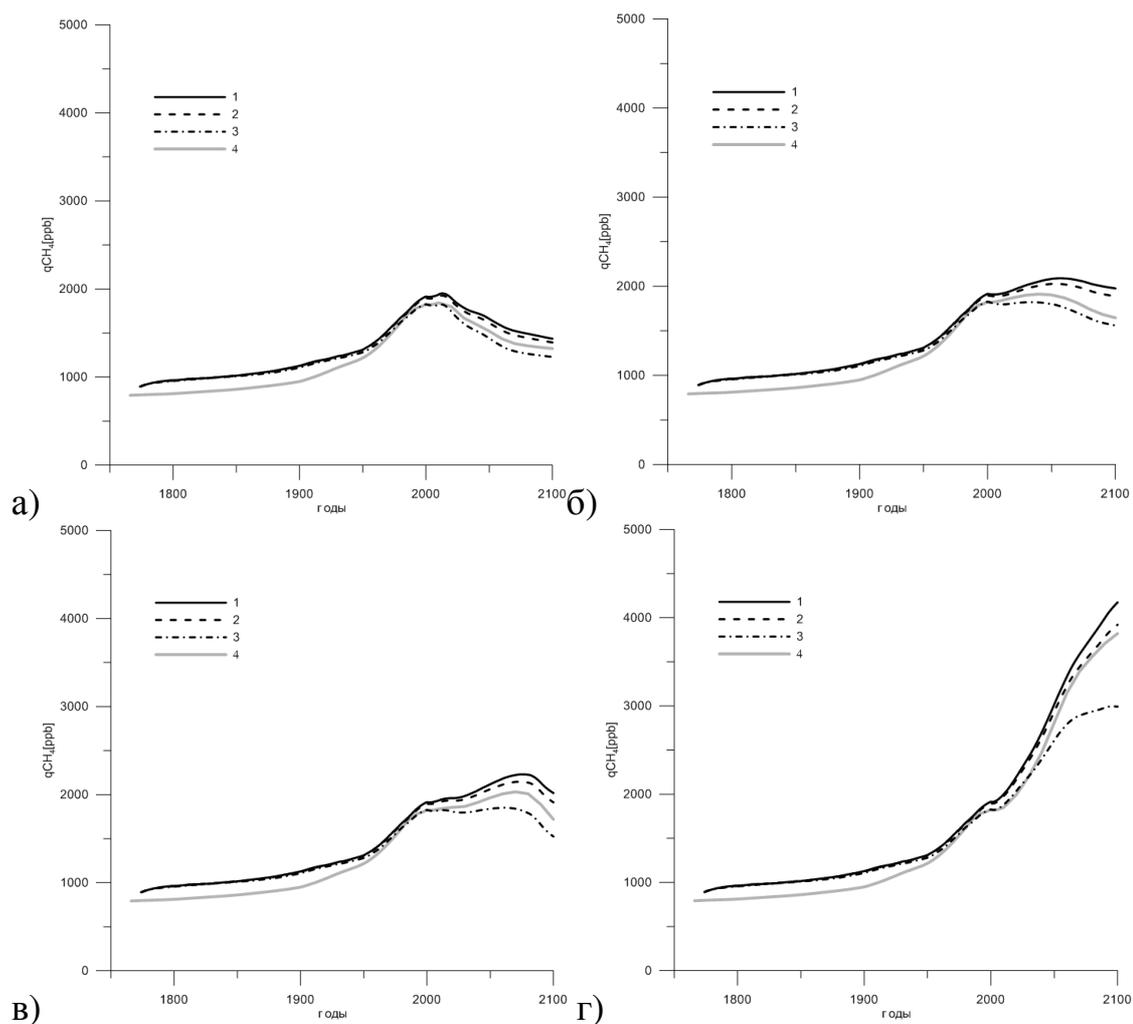


Рис.6 Изменения концентрации метана в атмосфере по модельным оценкам при сценариях антропогенного воздействия RCP 2.6 (а), 4.5 (б), 6.0 (в), 8.5 (г) для экспериментов F1 (1), F2 (2), F3 (3) и концентрации метана в атмосфере по соответствующим сценариям [99] (4).

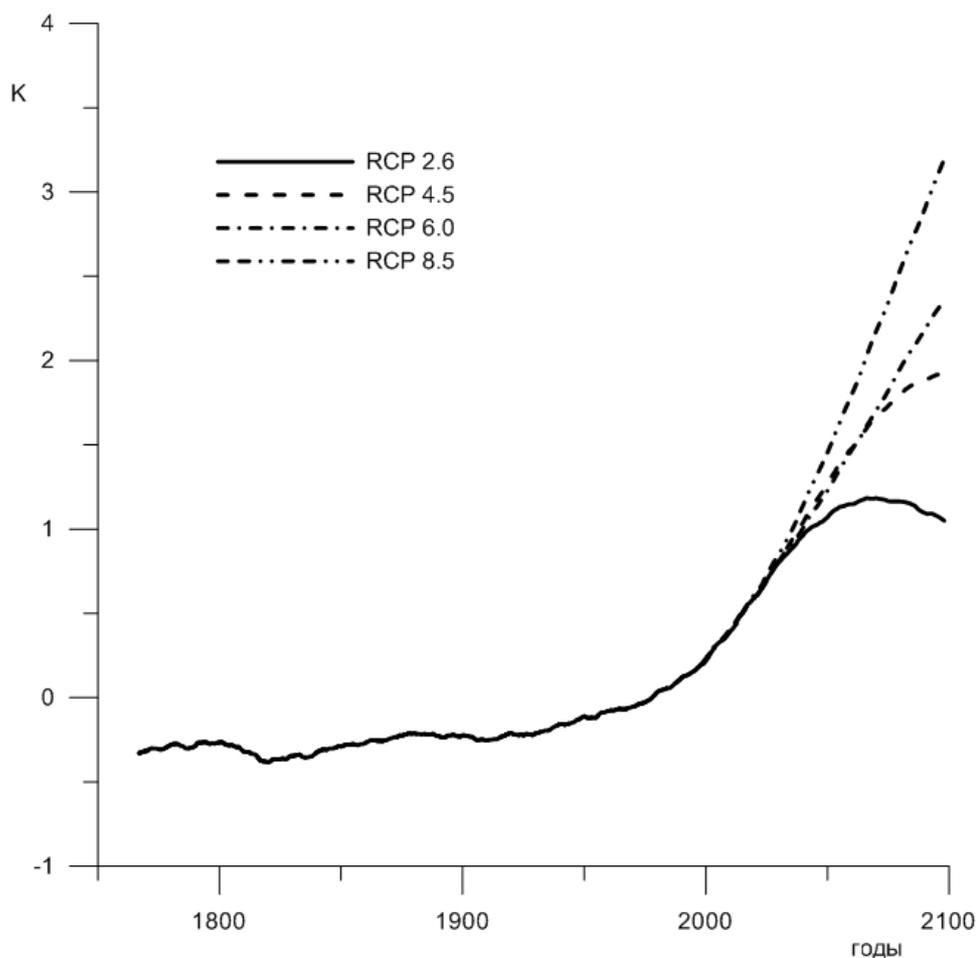


Рис.7 Аномалии глобальной приповерхностной температуры относительно периода 1961-1990 гг. для численных экспериментов F1 (при 5-летнем скользящем осреднении).

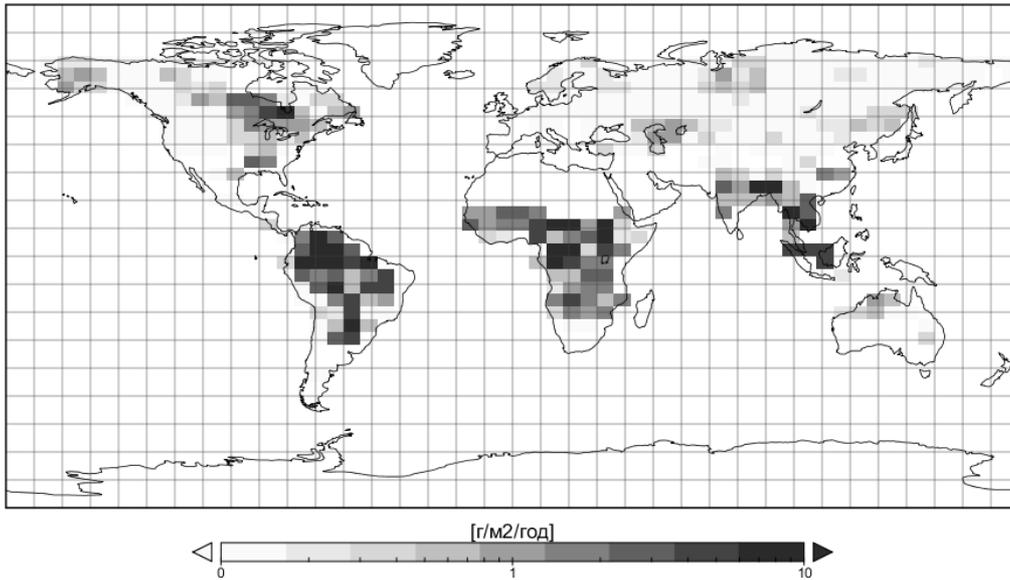
Общий рост глобальной приповерхностной температуры в XXI веке в экспериментах F1 составляет 0.9 К, 1.7 К, 2.2 К и 3.1 К при сценариях RCP 2.6, 4.5, 6.0 и 8.5, соответственно (рис. 7). Учет зависимости времени жизни метана в атмосфере от температуры в экспериментах F2 и F3 приводит к снижению глобального 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. В свою очередь неучет воздействия изменений климата на естественные эмиссии метана (эксперименты D1) приводит к

снижению потепления примерно на 0.01 К в конце XX века и на 0.02-0.03 К к концу XXI столетия в зависимости от сценария.

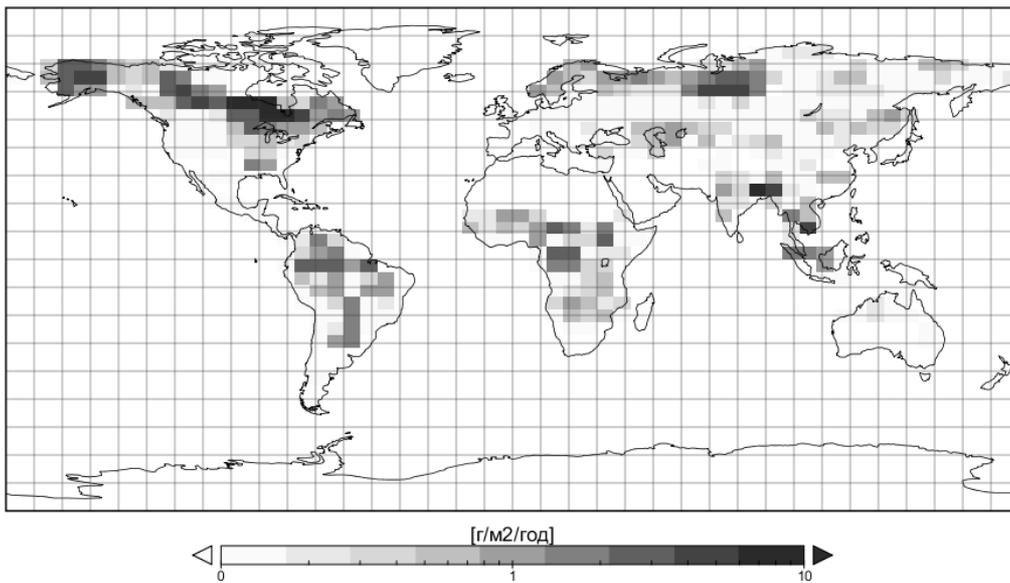
На рис. 8а представлено пространственное распределение эмиссий метана из почвы в атмосферу по модельным расчетам (численный эксперимент F1) для 2000 г. Основное выделение метана влажными экосистемами сосредоточено в центральной Африке и Южной Америке, в меньшей степени в Сибири, северной части Европы, на Аляске и в северо-восточной части Северной Америки. В целом это согласуется с данными наблюдений [92]. На рис. 9 приведены общие изменения эмиссий метана из почвы в атмосферу. По модельным расчетам для базового периода 1961-1990 гг. величина общей эмиссии ($153 \text{ MtCH}_4/\text{год}$) согласуется с оценками [82, 88] (соответственно, $145 \pm 41 \text{ MtCH}_4/\text{год}$ и $145 \pm 30 \text{ MtCH}_4/\text{год}$). Эта величина согласуется также с оценкой по спутниковым данным ($171 \pm 52 \text{ MtCH}_4/\text{год}$ для периода 2003-2007 гг. [56]) и с оценками, полученными в рамках международного проекта WETCHIMP ($190 \pm 39 \text{ MtCH}_4/\text{год}$ для периода 1993-2004 гг. [94]). Различия общей эмиссии между численными экспериментами F1, F2 и F3 составляют для базового периода 1961-1990 гг. менее $0.2 \text{ MtCH}_4/\text{год}$. Для XVIII-XX веков отмечены слабые вариации естественных эмиссий метана.

По модельным расчетам в XXI веке отмечается заметный рост эмиссий метана из почвы в атмосферу. Наибольший рост отмечен в низменности Гудзонова залива, на Аляске, в Западной Сибири и Юго-Восточной Азии (рис. 8б). К концу XXI века значения эмиссий метана достигают $170\text{-}230 \text{ MtCH}_4/\text{год}$ в численных экспериментах F1, F2 и F3 в зависимости от сценария. Различие между экспериментами при одном и том же сценарии антропогенного воздействия достигает $5 \text{ MtCH}_4/\text{год}$. Для сценария RCP 2.6 максимум эмиссий (как и

максимум глобальной приповерхностной температуры атмосферы) достигается в 70-х годах XXI века с последующим снижением. Рост эмиссий отмечен для всех регионов, где метан выделяется при современном климате. При этом по сравнению с базовым периодом возрастает относительный вклад внетропических болотных экосистем (рис. 8б). Для базового периода 1961-1990 гг. вклад внетропических болотных экосистем составляет порядка 11% от суммарных эмиссий, а к последнему десятилетию XXI века их вклад увеличивается при сценариях RCP 2.6, 4.5, 6.0 и 8.5 в численном эксперименте F1 до 16% (26 МтСН₄/год), 19% (36 МтСН₄/год), 20% (41 МтСН₄/год) и 24% (55 МтСН₄/год), соответственно.



а)



б)

Рис.8 Эмиссии метана из почвы в атмосферу в 2000 г. в численном эксперименте F1 (а), и их изменения к 2100 г. при сценарии антропогенного воздействия RCP 8.5 (б).

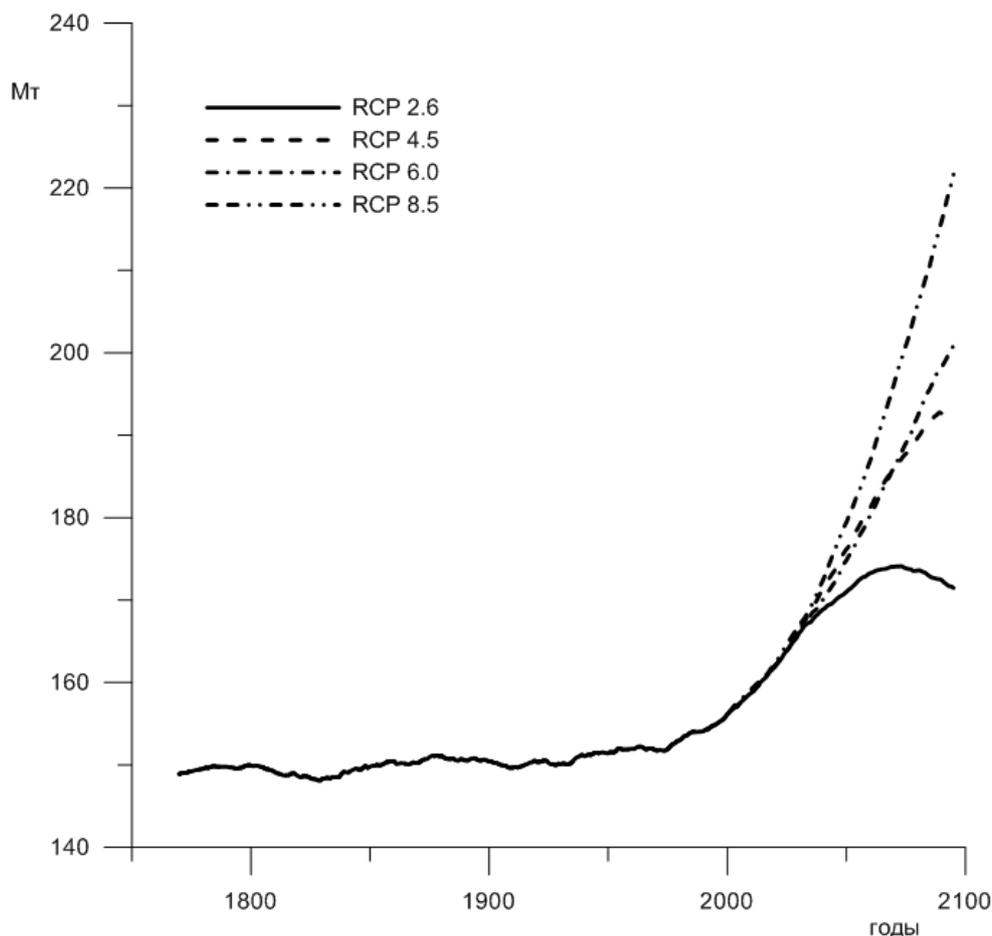


Рис.9 Глобальные эмиссии метана из почвы в атмосферу в численных экспериментах F1 (с 11-летним скользящим осреднением).

Рост эмиссий метана влажными экосистемами в значительной степени определяется температурной зависимостью производства метана. При этом на относительный вклад тропических и внетропических влажных экосистем в суммарные эмиссии из почвы в атмосферу существенно влияет увеличение глубины протаивания и длительности сезона таяния почвы во внетропических широтах северного полушария.

Модель неплохо воспроизводит изменения концентрации метана в атмосфере q_{CH_4} для XVIII-XX веков (рис. 6). По результатам численных экспериментов F1 для 1991-2000 гг. ее величина находится

в диапазоне 1600-1700 ppb в согласии с данными наблюдений [91]. В XXI веке при наиболее агрессивном антропогенном сценарии RCP 8.5 концентрация метана в атмосфере монотонно возрастает до 3900 ppb. При сценариях RCP 4.5 и 6.0 величина q_{CH_4} достигает 1850 ppb и 1980 ppb во второй половине XXI века и далее снижается к его концу до 1720 ppb и 1750 ppb, соответственно. При сценарии RCP 2.6 максимум q_{CH_4} в 1730 ppb достигается во втором десятилетии XXI века, а далее концентрации снижаются до 1200 ppb.

Различия в концентрации метана в атмосфере q_{CH_4} между численными экспериментами F1, F2 и F3 достаточно существенные. Для периода 1991-2000 гг. q_{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. Меняется и характер изменения концентрации - в эксперименте F3 при сценарии RCP 8.5 рост q_{CH_4} фактически прекращается к концу XXI века, а при сценариях RCP 2.6 и 4.5 q_{CH_4} уже в 2000 г. достигает максимума. Время жизни метана по расчетам сокращается на 1-6% на 1 °C потепления, что согласуется с оценкой [100] ($2.3\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$).

Неучет изменений естественных эмиссий метана при изменении климата в численном эксперименте D1 приводит к снижению концентрации метана в атмосфере примерно на 15 ppb по сравнению с экспериментом F1 к концу XX века и на 80-330 ppb к концу XXI века в зависимости от сценария. Сценарии изменения концентрации метана в атмосфере RCP [99] очень близки к концентрациям, полученным в эксперименте D1 и в XXI веке находятся в диапазоне между рассчитанными в экспериментах F2 и F3 (рис.6).

Влияние изменений климата на содержание метана в атмосфере можно оценить согласно [21, 107] 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. 10). 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.

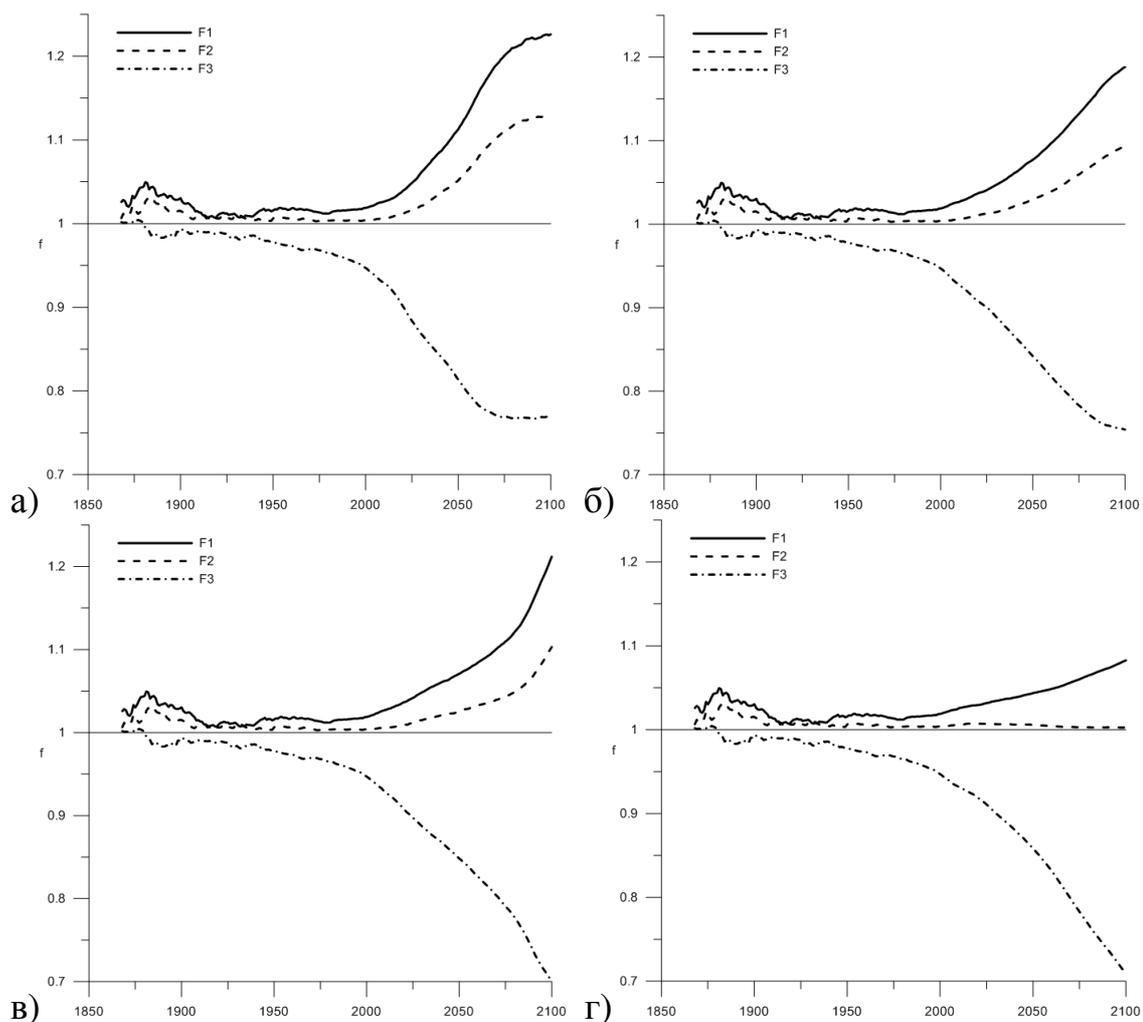


Рис.10 Параметр обратной связи f между метановым циклом и климатом по расчетам с КМ ИФА РАН при сценариях антропогенного воздействия RCP 2.6 (а), 4.5 (б), 6.0 (в), 8.5 (г).

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.

Аналогично можно оценить вклад учета изменений естественных эмиссий метана в изменения глобальной приповерхностной температуры. В этом случае $f_T = \Delta T(F_n) / \Delta T(D1)$. Взаимодействие климата и эмиссий метана (эксперимент F1) увеличивает потепление в XXI веке в среднем на 1-2% в зависимости от сценария (рис. 11). Такое незначительное влияние изменений эмиссии метана на глобальную температуру хорошо согласуется с результатами подобных расчетов [8, 21]. При учете зависимости времени жизни метана в атмосфере от температуры (численные эксперименты F2, F3) параметр обратной связи f_T , как и f , уменьшается. В эксперименте F2 учет роста естественных эмиссий метана в среднем менее чем на 0.5% корректирует изменение глобальной приповерхностной температуры в XXI веке, а в эксперименте F3 потепление уменьшается в среднем на 3-4% в зависимости от сценария.

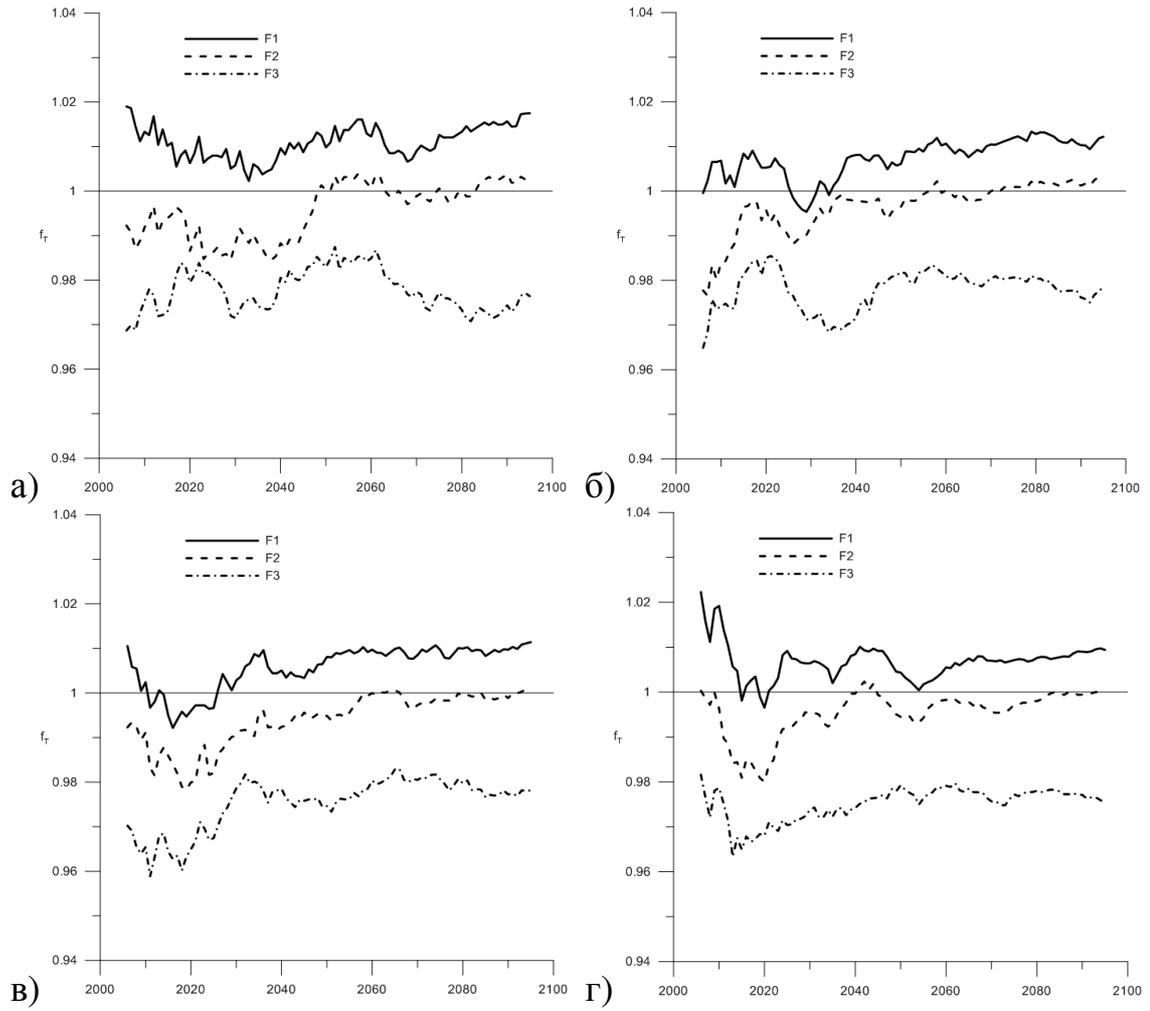


Рис.11 Параметр обратной связи f_T между метановым циклом и климатом по расчетам с КМ ИФА РАН при сценариях антропогенного воздействия RCP 2.6 (а), 4.5 (б), 6.0 (в), 8.5 (г).

Обсуждение результатов главы 1

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.

С использованием этой модели была проведена серия численных экспериментов [14, 16, 17, 21, 36], включая описанные в разделах 1.1.1, 1.1.2 и 1.2. С ней были также проведены эксперименты в соответствии с условиями международного проекта сравнения подобных моделей WETCHIMP [18, 94, 117], который был инициирован для координации исследований в области моделирования влажных экосистем и связанных с ними потоков метана.

При продолжении глобального потепления можно ожидать общего роста потоков метана в атмосферу из наземных экосистем вследствие зависимости потоков метана от температуры и удлинения безморозного периода. При этом региональные тенденции изменения потоков метана зависят от региональных изменений гидрологического режима. Усиление осадков с увеличением увлажнения почвы должно

усиливать температурный эффект, тогда как тенденция иссушения почвы и уменьшения заболоченности должна способствовать ослаблению эмиссии в атмосферу метана болотными экосистемами. Полученная в разделе 1.1.1 оценка 7%-ного глобального увеличения эмиссии метана при глобальном потеплении на 1 °С находится в диапазоне оценок, сделанных в [6].

Полученные в разделе 1.1.2 для конца XX века глобальные эмиссии метана из болотных экосистем по расчетам составляют около 175 МтСН₄/год, а в эксперименте с повышенной температурой, где величина повышения выбиралась в соответствии с оценками возможных изменений температуры в XXI веке, они составляют уже около 240 МтСН₄/год.

В разделе 1.2 приведены результаты расчетов с КМ ИФА РАН с интерактивным метановым циклом, учитывающим отклик эмиссий метана из почвы в атмосферу и эффектов химических процессов в атмосфере на изменения климата при новых сценариях антропогенного воздействия семейства RCP [99] (см. также [34]).

В 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 МтСН₄/год. Преобладающий вклад в эмиссии вносят тропические болота. Концентрация метана в атмосфере возрастает по расчетам более чем в 2 раза по сравнению с доиндустриальным периодом и составляет в конце XX века 1600-1700 ppb. Полученные модельные оценки в целом согласуются с данными наблюдений и другими модельными оценками.

При общем потеплении в XXI веке увеличиваются эмиссии метана влажными экосистемами и к концу века они достигают 170-230 МтСН₄/год в зависимости от сценария антропогенных воздействий. Концентрация метана в атмосфере при наиболее агрессивном антропогенном сценарии RCP 8.5 увеличивается к концу XXI века более чем вдвое до 3900 ppb. При более умеренных антропогенных сценариях в XXI веке достигается ее максимум со снижением к концу века до 1200-1750 ppb.

Учет изменений эмиссии метана болотными экосистемами, связанных с потеплением существенно (до 25% в зависимости от сценария антропогенного воздействия) дополнительно увеличивает прирост содержания метана в атмосфере относительно его доиндустриального значения (положительная обратная связь). Это приводит к относительно слабому усилению потепления на 1-2% (менее 0.05 К) в XXI веке.

Сокращение времени жизни метана в атмосфере при потеплении формирует отрицательную обратную связь между метановым циклом и климатом. Согласно полученным результатам радиационный эффект этой климатической обратной связи сопоставим по величине с климатическим форсингом роста естественных эмиссий метана при постоянном времени жизни метана в атмосфере, но обратного знака. В результате учет этого эффекта может скомпенсировать воздействие роста эмиссий метана на климат или даже привести к уменьшению потепления. Необходим дальнейший анализ сравнительной роли различных механизмов и климатических обратных связей разного знака, влияющих на содержание метана в атмосфере.

Глава 2 Региональные расчеты эмиссии метана в атмосферу болотными экосистемами в XXI веке

В настоящее время одним из основных источников метана являются влажные экосистемы в условиях повышенной влажности с общей эмиссией в диапазоне 90–234 МтСН₄/год (интегральная интенсивность эмиссий метана 600±80 МтСН₄/год [88, 115]). Величина потока может составлять до 250 мг м⁻² сут⁻¹ и зависит от многих факторов: температуры и влажности почвы, типа растительности и др. [39, 116, 118]. Один из механизмов изменения эмиссий метана болотными экосистемами, связан с зависимостью производства метана бактериями почвы от температуры и изменением уровня грунтовых вод [69]. Изменение режима болот и связанные с ним изменения в цикле метана могут иметь значительные региональные и глобальные последствия.

Важным представляется эффект увеличения эмиссии метана из высоких широт северного полушария, связанный с ростом мощности сезонного талого слоя и температуры грунта в районах распространения вечной мерзлоты. Вечная мерзлота занимает 25% площади суши Северного полушария, в России область ее распространения составляет более 11 млн. км², она покрывает около 2/3 территории страны [3].

2.1 Изменения эмиссии метана влажными экосистемами европейской и сибирской территорий России в XXI веке по расчетам с использованием данных региональной модели ГГО

В представленных экспериментах сделаны модельные оценки возможных изменений в XXI веке эмиссии метана в атмосферу наземными экосистемами для европейского и азиатского регионов России с использованием модельного блока метанового цикла [21, 36] и численных расчетов с региональной климатической моделью с детальным пространственным разрешением.

Для диагностики изменений эмиссий метана использовался модельный блок эмиссии метана, аналогичный использованному в разделе 1.1.1.

Для нахождения потоков метана с помощью данного блока необходимы поля температуры и влагосодержания почвы. В представленных экспериментах с этой целью использовались результаты расчетов с региональной моделью ГГО [50, 51] для температуры и влагосодержания почвенных слоев (толщиной 0.1, 0.25, 0.65 и 2 м) и влагоемкости почвы. Расчеты с региональной моделью ГГО проводились при сценарии антропогенного воздействия SRES A2 [68]. Выбор наиболее агрессивного антропогенного сценария позволяет сделать оценку сверху для возможных изменений эмиссий метана болотами при изменениях климата.

Следует отметить, что характерная площадь отдельных болотных экосистем составляет порядка 5 км² [30]. В расчетах с аналогичным блоком эмиссии метана [21, 36] использовались данные

сравнительно грубого пространственного разрешения, в связи с чем возникала необходимость предписывать долю болотных экосистем каждой модельной ячейке. При использовании региональных модельных расчетов с высоким пространственным разрешением доля болот в ячейке не предписывается, а диагностируется по влагоемкости почвы. В расчет включались только ячейки с влагоемкостью (средней по площади ячейки пористостью) более 0.4, что указывает на присутствие торфа в составе почвы [47]. При расчетах эмиссии метана аналогично экспериментам из раздела 1.1.1 учитывались только слои почвы до предельной глубины 0.6 м.

Максимальная глубина протаивания/промерзания почвы принималась равной максимальной глубине залегания нулевой изотермы. Нулевая изотерма рассчитывается линейной интерполяцией по глубине между температурами центров слоев почвы. Таким образом, минимальное значение ее глубины составляет 0.05 м, максимальное – 2 м.

Средняя температура и влагосодержание почвы рассчитывались для слоев почвы до предельной глубины 0.6 м. В расчет включались только слои почвы с температурой более 0°C. Таким образом, учитывались только те слои почвы, из которых, согласно модели, возможна эмиссия метана.

На рис. 12 отмечены европейский и азиатский регионы России, для которых 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. Следует отметить, что анализируемые регионы имеют существенное перекрытие.

На рис. 13а,б представлены пространственные распределения рассчитанных максимальных глубин протаивания/промерзания для европейского и азиатского регионов России. Для этого периода наибольшие глубины (>2 м) характерны для большей части Сибири и севера европейской части России. Во втором случае распределение глубин имеет выраженный зональный характер. В связи с ограничением максимальной возможной глубины залегания нулевой изотермы разрешить зональные изменения максимальных глубин протаивания/промерзания в полярных частях регионов не представляется возможным.

На рис. 14а,б представлены пространственные распределения рассчитанных среднегодовых потоков метана для периода 1991-2000 гг. для регионов европейской и азиатской части России соответственно. Предлагаемая модель в целом достаточно реалистично воспроизводит значения потока метана. Наибольшие потоки метана отмечены для болот Западной Сибири, Карелии и Восточной Европы. Средняя величина полной интенсивности эмиссии метана для этого периода составляет 8 МтСН₄/год для европейской и 10 МтСН₄/год для азиатской части. Аналогичные величины эмиссий по данным наблюдений [92] составляют соответственно 5 МтСН₄/год для европейской и 4 МтСН₄/год для азиатской части. В КМ ИФА РАН они составляют 7 МтСН₄/год для европейской и 10 МтСН₄/год для азиатской части [21]. Отличие от данных наблюдений скорее всего связано с достаточно резким ростом рассчитанного потока метана в конце XX века. Рассчитанные суммарные эмиссии метана для обоих регионов увеличиваются с 13 МтСН₄ в 1991 году до 21 МтСН₄ в 2000 году, в то время как данные наблюдений представлены для более

раннего периода. Пространственное распределение естественных источников метана во всех трех случаях имеет сходный характер.

На рис. 15а,б и 15в,г представлены пространственные распределения изменений глубин протаивания/промерзания к середине (2041-2050 гг. (а, б)) и концу (2091-2100 гг. (в, г)) XXI века относительно конца XX века. При антропогенном потеплении заметно уменьшается глубина сезонного промерзания в южных частях регионов, что связано с уменьшением продолжительности холодного периода. В приполярных частях регионов должно происходить увеличение глубины сезонного протаивания, однако, как уже было сказано выше, его учет невозможен из-за недостаточного вертикального разрешения модельных данных.

На рис. 16а,б и 16в,г представлены пространственные распределения изменений потоков метана к середине (а, б) и концу (в, г) XXI века относительно конца XX века. Наряду с областями с увеличением эмиссии метана отмечены и участки с ее уменьшением. Уменьшение потоков метана связано, в частности, с иссушением почвы. Рассчитанная средняя величина полной интенсивности эмиссии метана для периода 2041-2050 гг. составляет 11 МтСН₄/год для европейского и 13 МтСН₄/год для азиатского региона. К концу XXI века (2091-2100 гг.) эмиссии увеличиваются приблизительно на 70% по сравнению с концом XX века и составляют соответственно 14 МтСН₄/год и 17 МтСН₄/год для европейского и азиатского региона. Рост эмиссий метана связан в первую очередь с ростом температуры почвы. Средняя температура почвы в течение теплого периода составляет в конце XX века 11.7°C для европейской и 10.5°C для азиатской части. К середине XXI века при сценарии SRES A2 она увеличивается соответственно до 12.4°C и 11.3°C, а к концу до 13.0°C

и 12.1°C . Пространственные распределения изменений средней температуры почвы к концу XXI века представлены на рис. 17а,б. В то же время среднее влагосодержание почвы практически не изменяется. Для европейской части России оно возрастает с 0.48 в конце XX века до 0.49 в конце XXI. Для азиатской части оно возрастает с 0.62 в конце XX века до 0.63 в середине XXI и далее падает до 0.61 к концу XXI века. В КМ ИФА РАН средняя величина полной интенсивности метана в середине XXI века составляет $8 \text{ MtCH}_4/\text{год}$ для европейской и $11 \text{ MtCH}_4/\text{год}$ для азиатской части. В конце XXI века она составляет соответственно $19 \text{ MtCH}_4/\text{год}$ и $24 \text{ MtCH}_4/\text{год}$. Таким образом, к середине XXI века в данной модели эмиссия метана вырастает сильнее, а к концу XXI века слабее, чем в КМ ИФА РАН.

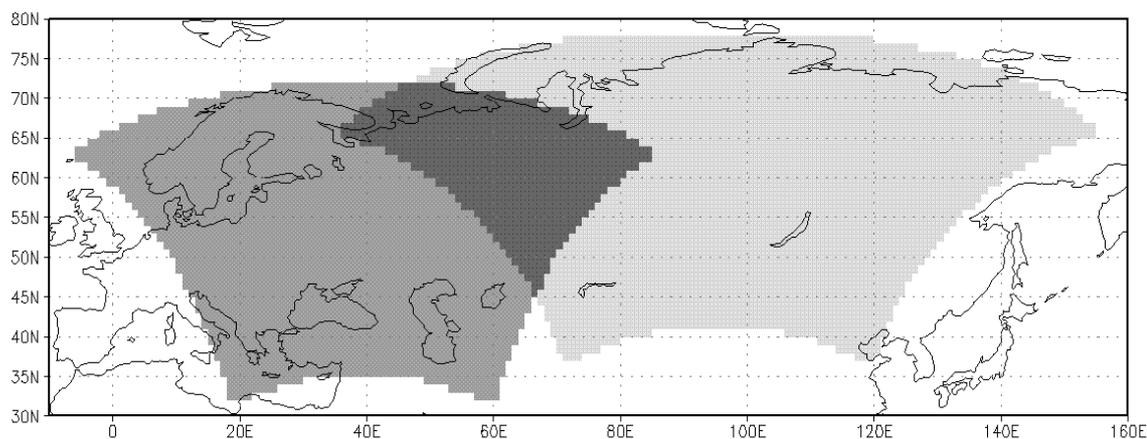
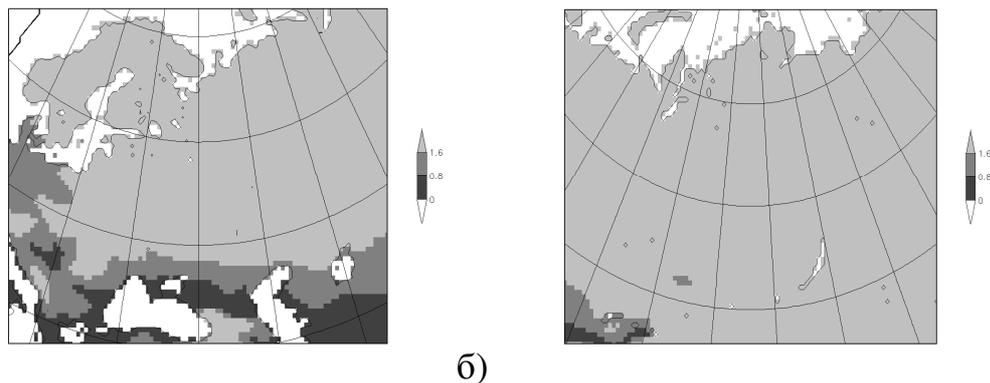


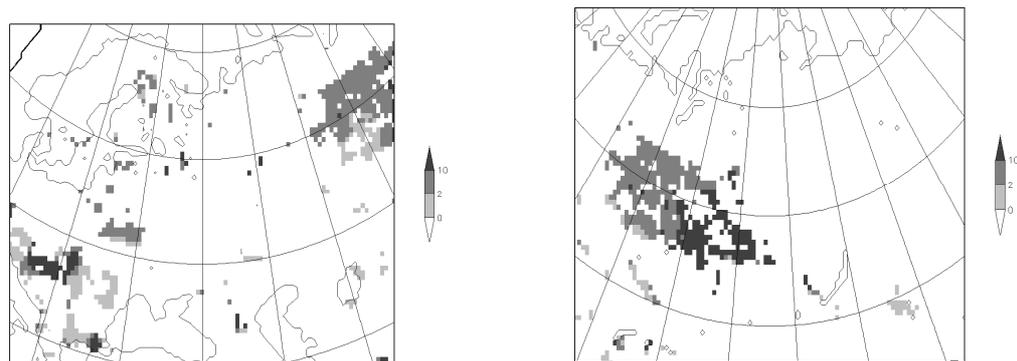
Рис. 12. Границы европейской и азиатской частей России в региональной модели.



а)

б)

Рис. 13. Максимальные глубины протаивания/промерзания (в метрах) для европейского (а) и азиатского (б) регионов России по расчетам для конца XX века.



а)

б)

Рис. 14. Среднегодовые потоки метана ($\text{г м}^{-2} \text{ год}^{-1}$) для конца XX века по расчетам для регионов европейской (а) и азиатской (б) частей России.

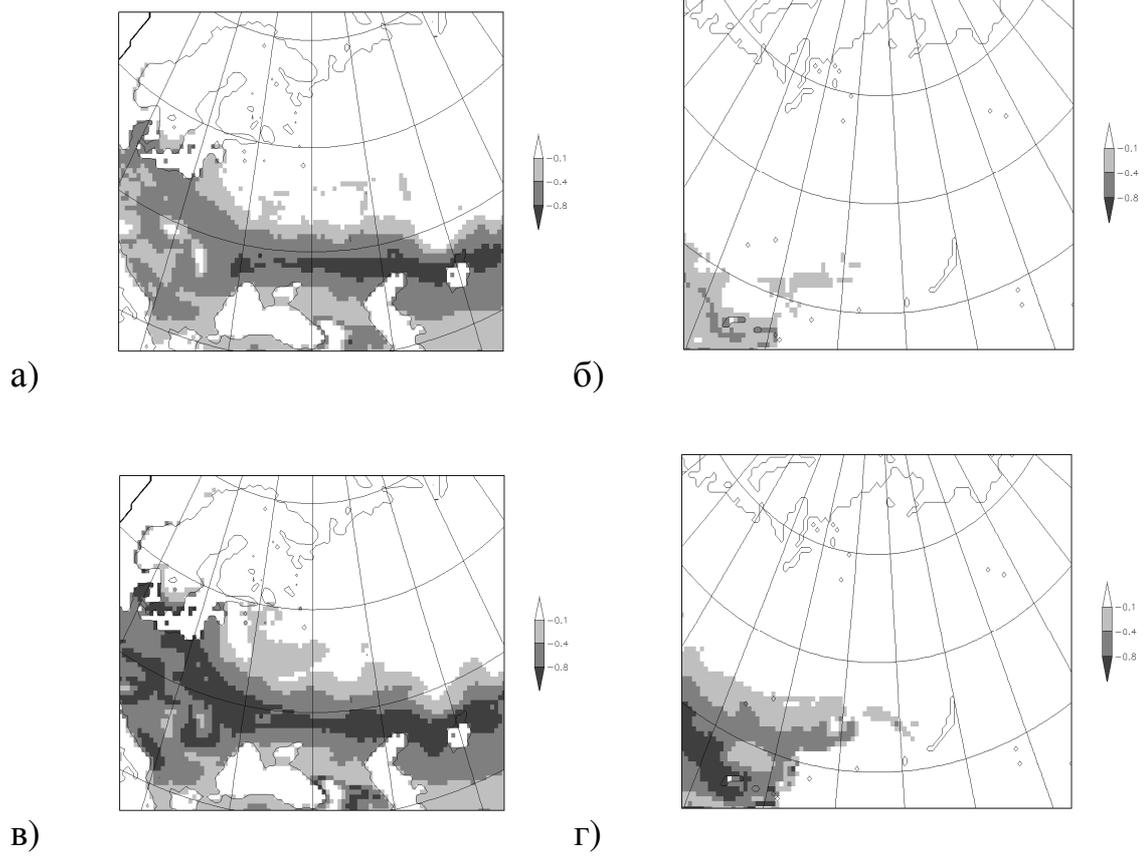


Рис. 15. Изменения глубин протаивания (в метрах) к середине (а, б) и концу (в, г) XXI века относительно конца XX века.

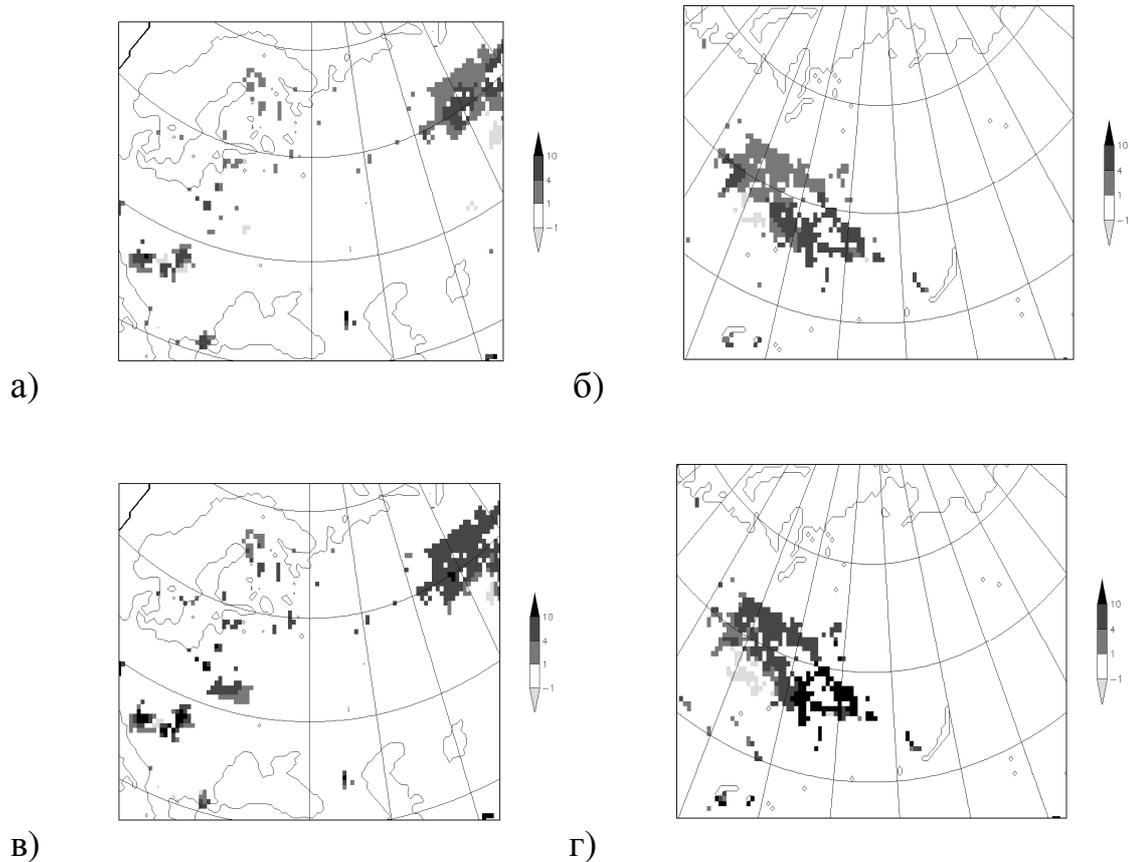


Рис. 16. Изменения потоков метана ($\text{г м}^{-2} \text{год}^{-1}$) к середине (а, б) и концу (в, г) XXI века относительно конца XX века.

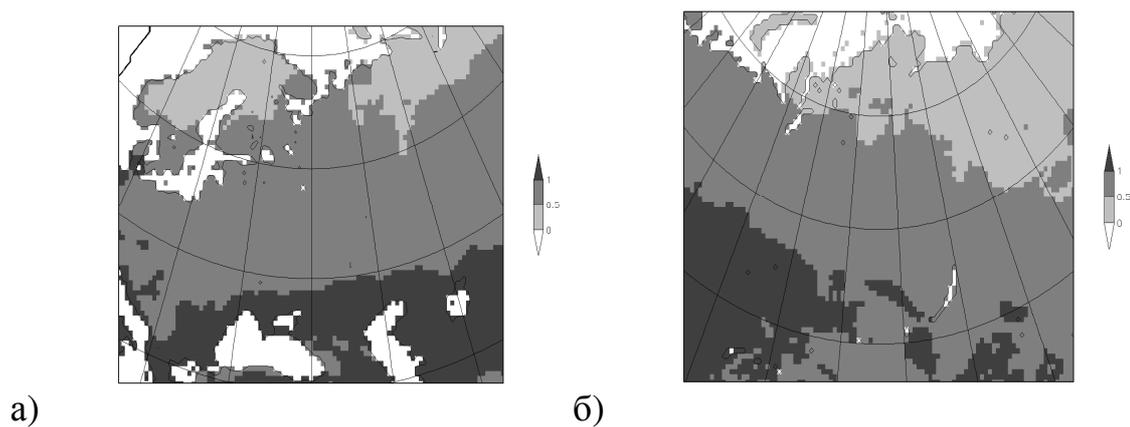


Рис. 17. Изменения средней температуры расчетного слоя почвы ($^{\circ}\text{C}$) к концу XXI века относительно конца XX века по расчетам для регионов европейской (а) и азиатской (б) частей России.

2.2 Изменения эмиссии метана болотными экосистемами Западной Сибири в XXI веке по расчетам с данными ансамбля климатических моделей

В настоящее время в мировых научных центрах развиваются климатические модели, включающие интерактивный метановый цикл наряду с углеродным. По модельным расчетам к концу XXI века концентрация метана в атмосфере может увеличиться в 1,5-2 раза в зависимости от выбранного сценария антропогенного воздействия [21, 69]. Данные инструментальных наблюдений и результаты численных экспериментов с различными моделями показывают значительный разброс оценок эмиссий метана болотными экосистемами субполярных широт от 10 МтСН₄/год до 51 МтСН₄/год [63, 66, 121] и не позволяют достоверно оценить вклад болотных экосистем в глобальный углеродный цикл.

Значительная часть эмиссий метана связана с богатыми торфом болотами, находящимися в относительно узкой полосе от 50 до 70 с.ш. [92]. Особенно велика при этом роль России, где торфяные болота составляют более 8% площади. Для болот Западной Сибири запас углерода в почве оценивается величиной 70 ГтС [111], а суммарные эмиссии метана по различным оценкам составляют от 1 до 20 МтСН₄/год [10, 26, 27, 40, 52].

В представленных экспериментах получены оценки эмиссии метана в XXI веке для болот Западной Сибири при задании внешнего атмосферного воздействия на основе расчетов с ансамблем климатических моделей.

В расчетах использовалась версия модели эмиссий метана, аналогичная использованной в разделах 1.1.1 и 2.1 и работе [21], учитывающая отклик эмиссий метана на вариации климата. Для расчета температуры и влажности почвы использовалась динамическая модель процессов тепло- и влагопереноса в почве (аналогичная использованной в разделах 1.1.2 и 1.2). Для простоты все болотные экосистемы считались насыщенными влагой. Это предположение несколько завышает значение потоков метана, однако следует отметить, что характерная площадь отдельных болотных экосистем не превышает 5 км^2 [30] и применение среднего для модельной ячейки показателя влажности почвы приведет к значительному занижению потоков. Кроме того, используемая почвенная схема не воспроизводит уровень грунтовых вод, что также способствует применению данного предположения.

Расчет эмиссии метана проводился только для болот, доля которых в модельной ячейке задавалась по данным CDIAC NDP-017 (<http://cdiac.ornl.gov/epubs/ndp/ndp017/ndp017.html>), при этом зависимость потоков метана от количества субстрата не учитывалась. Для мерзлых слоев почвы эмиссии метана отсутствуют. В расчет эмиссии включены только слои почвы до предельной глубины 1 м.

Распределение температуры и влажности почвы по глубине рассчитывается динамической моделью процессов тепло- и влагопереноса [4]. В рассматриваемой задаче тепло- и влагопереноса все процессы предполагаются одномерными, поскольку вертикальные градиенты значительно превосходят горизонтальные (см. напр. [9]). При отрицательной температуре слоя почвы предполагается, что вся влага в нем находится в твердой фазе. На верхней границе почвы/снега задается температура, определяемая из уравнения

теплового баланса подстилающей поверхности. На нижней границе задается геотермальный поток тепла. Глубина расчетной области составляет 14.5 м.

Расчеты проводились для региона Западной Сибири (55–65 с.ш., 65–85 в.д.), включающего Большое Васюганское болото. Тип почвы задавался соответствующими значениями плотности и коэффициентов теплопроводности и теплоемкости. В качестве начальных условий задавался профиль температуры и влажности/льдистости почвы. Входные данные атмосферного воздействия задавались полями приповерхностной температуры воздуха, осадков, коротковолновой солнечной радиации, влажности воздуха и облачности. С совместной моделью были проведены численные эксперименты для XXI века при задании атмосферного воздействия (сценарий SRES A1B) по ансамблю климатических моделей: ECHAM5/MPI-OM, CCCMA-CGCM3, NCAR-CCSM3, INMCM3, КМ ИФА РАН.

Результаты расчетов эмиссий метана болотными экосистемами представлены на рис. 18. По модельным оценкам для выбранного региона к концу XXI века эмиссии метана болотными экосистемами увеличиваются в среднем более чем в 2 раза с 9 МтСН₄/год до 21 МтСН₄/год. Стоит отметить, что оценки разных авторов для Западной Сибири отличаются в разы. По данным наблюдений для второй половины XX века [92] эмиссии метана для этого региона составляют около 1.7 МтСН₄/год. По оценкам на основе данных наблюдений [11] суммарные эмиссии метана с болот зон средней и южной тайги Западной Сибири составляют для расчетного региона порядка 3 МтСН₄/год. В рамках международного проекта WETCHIMP для болот Западной Сибири была получена оценка около 5 МтСН₄/год [57]. По расчетам [54] современные эмиссии метана болотами Западной

Сибири составляют 22 МтСН₄/год. По расчетам с КМ ИФА РАН [21] эмиссии метана изменяются при сценарии SRES A1B для данного региона с 10 МтСН₄/год в начале XXI века до 22 МтСН₄/год к его концу. При этом в связи с недостаточно высоким пространственным разрешением модели источники метана из болот в этих расчетах были существенно более локализованы, чем по данным наблюдений, с завышением их интенсивности. По оценкам с использованием аналогичной схемы эмиссии метана и результатов расчетов параметров почвы с региональной моделью ГГО при сценарии SRES A2 (описанным в разделе 2.1) эмиссии метана для данного региона меняются с 6 МтСН₄/год в конце XX века до 10 МтСН₄/год в конце XXI века.

Разброс в значениях эмиссии метана, полученный при расчете с входными параметрами различных моделей, достигает 15 МтСН₄/год и более в отдельные годы XXI века. В связи с этим целесообразно оценить, какие входные параметры оказывают наибольшее влияние на значения эмиссии метана и на изменение эмиссии в XXI веке.

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. В анализируемой версии модели поток метана зависит только от температуры почвы, которая в свою очередь наиболее сильно зависит от приповерхностной температуры атмосферы.

Результаты расчетов эмиссии метана при сохранении приповерхностной температуры атмосферы на уровне 2001 г. представлены на рис. 19. Для анализируемого региона к концу XXI

века происходит относительно небольшое увеличение эмиссий метана болотными экосистемами в среднем с 8 МтСН₄/год до 11 МтСН₄/год. 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. Разброс значений эмиссии метана при расчете с входными параметрами различных моделей в свою очередь связан с разбросом в значениях приповерхностной температуры атмосферы. Он для различных моделей может составлять до нескольких градусов в отдельные месяцы. Одной из возможных причин такой разницы в температуре может являться различие в пространственном разрешении моделей.

Для сравнения на рис.20 представлены результаты расчетов эмиссии метана при сохранении осадков на уровне 2001 г. Для анализируемого региона к концу XXI века эмиссии метана болотными экосистемами увеличиваются в среднем более чем вдвое с 9 МтСН₄/год до 21 МтСН₄/год. В этом случае не только средние эмиссии, но и эмиссии для отдельных моделей мало отличаются от рассчитанных с измененными осадками. Отличия связаны с зависимостью температуры почвы от осадков. При этом на температуру почвы существенное влияние оказывает изменение коэффициента теплопроводности почвы в зависимости от ее влажности.

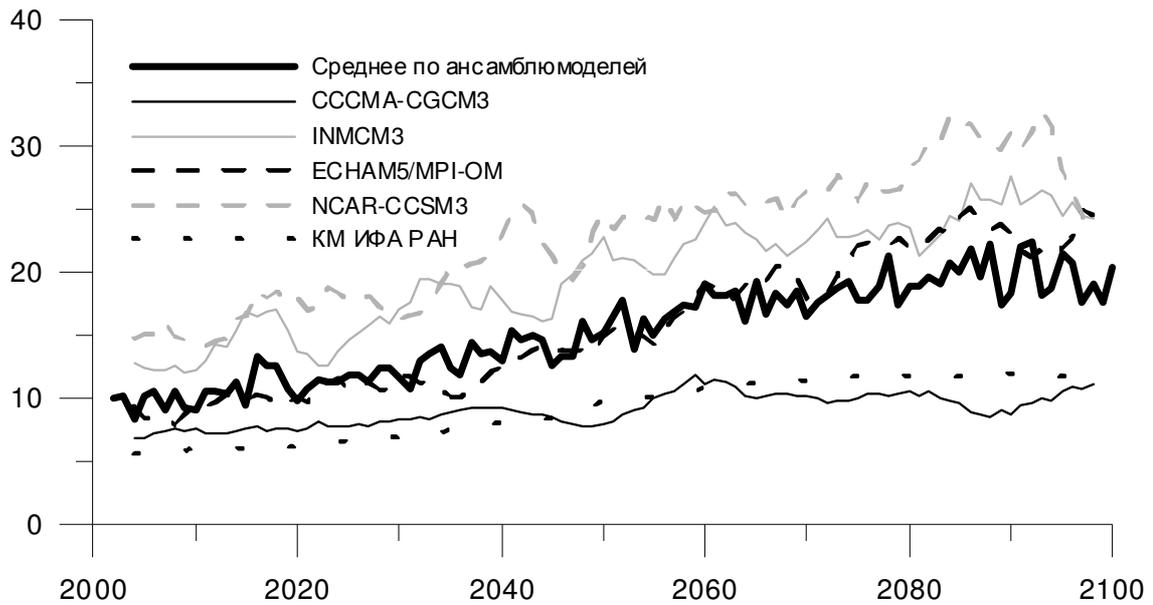


Рис. 18 Средние по ансамблю моделей эмиссии метана [MtCH₄/год] для региона Западной Сибири (55-65° с.ш., 65-85° в.д.) за период 2001-2100 гг. (жирная линия) и пятилетние скользящие средние эмиссий для каждой из моделей.

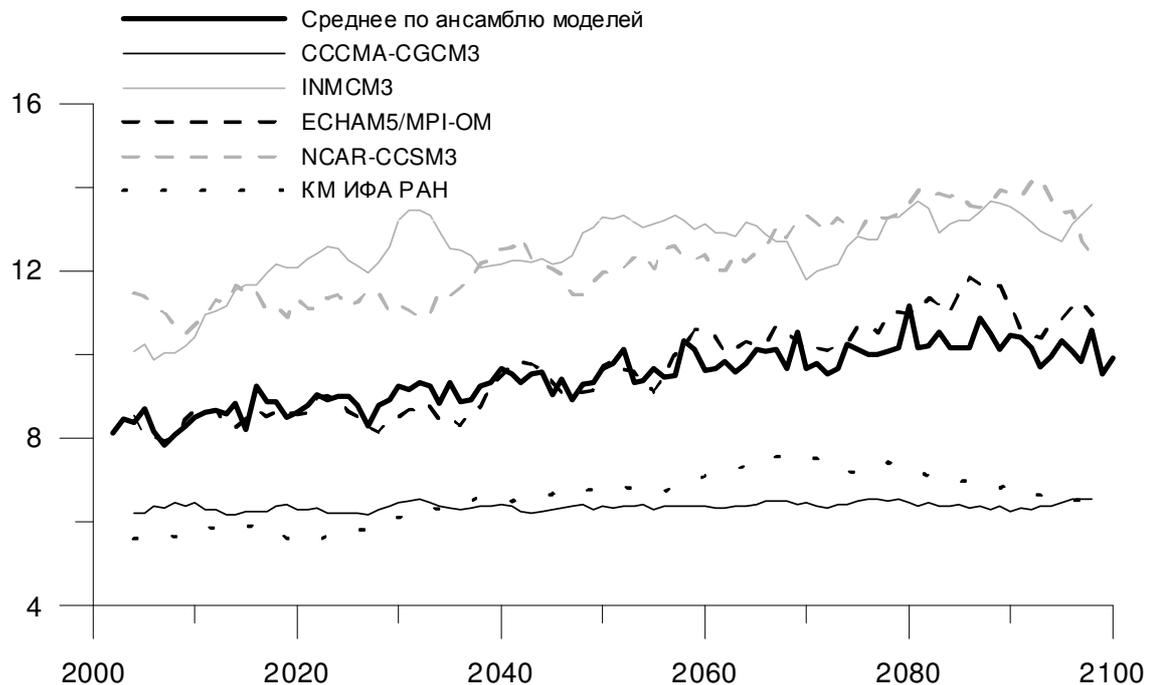


Рис. 19 Средние по ансамблю моделей эмиссии метана [MtCH₄/год] для региона Западной Сибири (55-65° с.ш., 65-85° в.д.) за период 2001-2100 гг. при сохранении приповерхностной температуры на уровне 2001 г. (жирная линия) и пятилетние скользящие средние эмиссий для каждой из моделей.

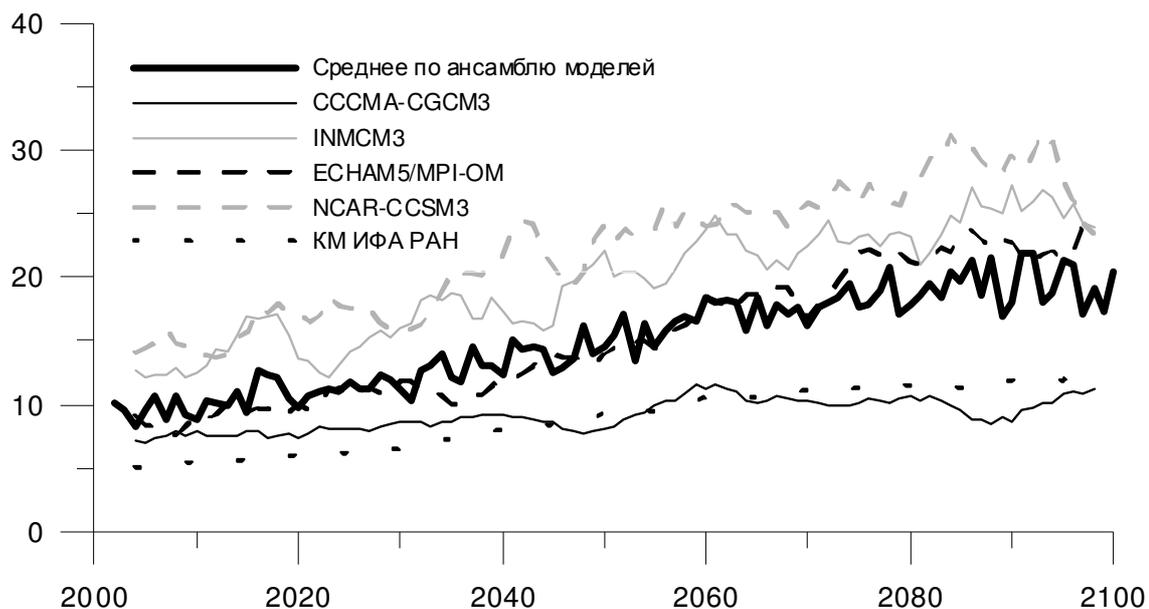


Рис. 20 Средние по ансамблю моделей эмиссии метана [MtCH₄/год] для региона Западной Сибири (55-65° с.ш., 65-85° в.д.) за период 2001-2100 гг. при сохранении осадков на уровне 2001 г. (жирная линия) и пятилетние скользящие средние эмиссий для каждой из моделей.

Обсуждение результатов главы 2

В разделе 2.1 сделаны оценки возможных изменений эмиссии метана болотными экосистемами в XXI веке для европейской и азиатской частей России. Для диагностики изменений эмиссии метана использовалась версия модели эмиссии метана, аналогичная использованной в разделе 1.1.1. Глубина протаивания/промерзания почвы определялась линейной интерполяцией температуры почвы по глубине между слоями. Современные эмиссии метана болотными экосистемами составляют 8 МтСН₄/год для европейской и 10 МтСН₄/год для азиатской части России. Эти величины в целом согласуются с наблюдениями и модельными оценками. В XXI веке при общем антропогенном потеплении максимальная глубина промерзания почвы в южных областях регионов сокращается. Эмиссии метана болотными экосистемами к концу XXI века возрастают до 14 МтСН₄/год для европейской и 17 МтСН₄/год для азиатской части России, что в целом согласуется с данными аналогичных исследований. Анализ пространственного распределения изменений средних потоков метана в конце XXI века относительно конца XX века при общем увеличении эмиссии выявил области с уменьшением потоков метана. Уменьшение потоков метана связано с иссушением почвы.

Следует отметить, что оценки изменений эмиссии метана получены по расчетам без учета обратного влияния этих изменений на климатическую систему. В частности, на потоки метана в атмосферу и их изменения для анализировавшихся регионов в Северной Евразии должны влиять эффекты пожаров [38, 97].

В разделе 2.2 сделаны оценки изменений эмиссии метана болотными экосистемами для региона Западной Сибири (55-65° с.ш., 65-85° в.д.) в XXI веке с использованием схемы эмиссий метана, совмещенной с динамической моделью тепло- и влагопереноса в почве при задании атмосферного воздействия по расчетам с ансамблем климатических моделей. В среднем для ансамбля моделей эмиссии метана возрастают на 12 МтСН₄/год. При этом отмечен значительный разброс в значениях потоков метана для разных моделей.

Проанализировано влияние основных параметров атмосферного воздействия на эмиссии метана в расчетах с ансамблем климатических моделей. В целом эмиссии метана при расчете с использованием совместной схемы наиболее зависимы от значений приповерхностной температуры атмосферы. С разницей в приповерхностной температуре в анализируемом регионе (достигающей нескольких градусов) по расчетам с различными моделями в наибольшей степени связана разница в значениях эмиссий.

Глава 3 Расчет возможных эмиссий метана, связанных с разложением метангидратов

Значительные запасы метана находятся в океанических залежах гидратов. Рост температуры океанов способствует диссоциации скоплений океанических гидратов и выбросу потенциально большого количества метана в атмосферу. Подобные выбросы в атмосферу усиливают парниковый эффект и могут иметь серьезные климатические последствия и еще более ускорить диссоциацию гидратов. В данной работе оцениваются стабильность современных запасов субаквальных (подводных) гидратов и возможные выбросы метана при диссоциации метангидратов в XXI веке [71].

Метангидраты – соединения, в которых молекулы метана находятся в ячейках, образованных молекулами воды. Они широко распространены в областях вечной мерзлоты и донных осадочных породах океана вдоль континентальных склонов, где они стабильны при современных значениях температуры и давления.

Метангидраты – потенциально огромный источник энергии по сравнению с другими известными источниками углеводородов. По оценкам суммарные запасы углерода в гидратах составляют до 10^4 ГтС [87, 95]. Это значительная величина в сравнении с $4 \cdot 10^4$ ГтС углерода растворенного в океане, $2 \cdot 10^3$ ГтС в почве и растениях и $7 \cdot 10^2$ ГтС в атмосфере [68]. Суммарные запасы ископаемого горючего, включая уголь, составляют около $5 \cdot 10^3$ ГтС [106], т.е. сопоставимы по запасам в одних только гидратах.

Метан – третий (после водяного пара и углекислого газа) по общему влиянию на радиационный баланс земной климатической системы парниковый газ, который может выбрасываться в атмосферу в результате добычи и использования гидратов как источника энергии. Резкие выбросы метана в атмосферу могут происходить из-за масштабных подводных сдвигов земной коры и из-за повышения температуры донных осадочных пород. По модельным оценкам при более теплом на несколько градусов океане запасы метана в гидратах должны быть существенно меньше [60]. Выбросы метана при разложении метангидратов могли быть причиной быстрых климатических изменений в прошлом [31, 72].

Палеоцен-эоценовый температурный максимум – широко известный пример периода с резким изменением климата, возможно связанным с масштабным высвобождением метана из гидратов 55 миллионов лет назад. В некоторых районах (включая Карибское море, Северную Атлантику, море Уэдделла, тропики Тихого океана) было обнаружено смещение в $-2.5-3\text{‰}$ $\delta^{13}\text{C}$ в биогенном карбонате и органике, которое можно связать с высвобождением 1500-2000 Гт метана за несколько тысяч лет [72]. Такой огромный выброс метана способен оказать сильное влияние на климат. Измерения композиции изотопов кислорода и отношения Mg/Ca фораминифер показывают, что температура поверхности океана резко увеличивалась на 1-8 °C (в зависимости от региона) [106]. Значительное выделение метана повлияло также на химический состав океана. Донные отложения во время палеоцен-эоценового температурного максимума во всех океанах выявляют выраженное растворение карбонатов.

Большие температурные скачки во время последнего ледникового периода можно также связать с резкими выбросами

метана из метангидратов [106]. Выбросы метана могли быть связаны с изменением уровня моря и нестабильностью метангидратов на континентальных склонах.

3.1 Оценка эмиссии метана, связанной с разложением субаквальных метангидратов при увеличении придонной температуры воды

Ожидаемое потепление климата в будущем может привести к дестабилизации гидратов, ускоренной эмиссии метана и усилению общего потепления с учетом формирования соответствующей положительной обратной связи. Оценки возможных выбросов метана из залежей метангидратов при потеплении и потенциала их воздействия на изменение климата становятся все более актуальными.

Термодинамическая стабильность гидратов в донных отложениях и, соответственно, зона их стабильности зависят от температуры, давления и солености воды. В регионах существования метангидратов, гидростатическое давление у дна превосходит давление, необходимое для стабильности гидратов при температуре, равной температуре придонной воды. Верхней границей зоны образования гидратов является дно, выше которого образования гидратов не происходит из-за недостаточной концентрации метана. С увеличением глубины ниже дна гидростатическое давление растет линейно, температура также растет линейно (в условиях равновесия) в связи с геотермальным потоком тепла. При этом давление, необходимое для стабильности метангидратов, экспоненциально зависит от температуры. В результате существует максимальная глубина, на которой могут образовываться метангидраты, где гидростатическое давление равно давлению стабильности.

Увеличение придонной температуры ведет к изменению профиля температуры в донных отложениях и соответствующему сдвигу границ зоны стабильности. В представленных экспериментах оцениваются возможные выбросы метана при дестабилизации залежей метангидратов в XXI веке при изменениях придонной температуры воды по расчетам с разными климатическими моделями при учете антропогенного воздействия (в частности, при антропогенном сценарии SRES A2 [68]).

Для расчета температуры в донных отложениях использовалась модель процессов тепло- и влагопереноса, разработанная в ИФА РАН [4], позволяющая рассчитывать характеристики термического и гидрологического режимов пород при различных сценариях изменения климата и адаптированная для моделирования донных отложений. 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 расчетной области была в пределах 830 м.

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. Уравнение зависимости

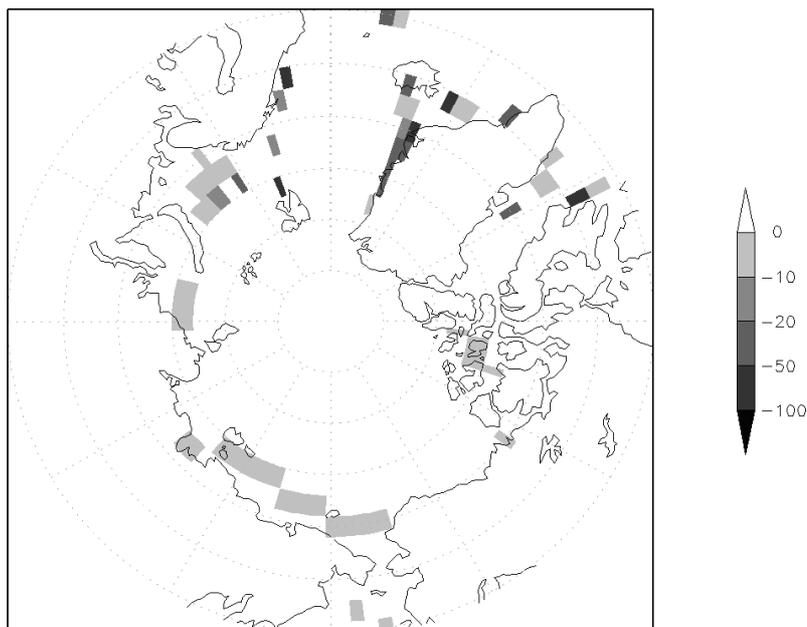
равновесного давления от температуры задавалось согласно [104]. Считалось, что гидраты занимают 5% порового пространства [81].

Для образования гидратов необходима достаточно высокая концентрация метана, поэтому гидраты существуют только в условиях значительного содержания органики в донных отложениях и высокой скорости седиментации. В связи с этим гидратоносные акватории в расчетах ограничивались глубиной моря до 3000 м [60]. Гидратоносные залежи могут существовать во внутренних и окраинных морях и при большей глубине (например, в Мексиканском заливе), однако глубоководные гидраты очень стабильны (не дестабилизируются при повышении температуры воды в пределах нескольких градусов).

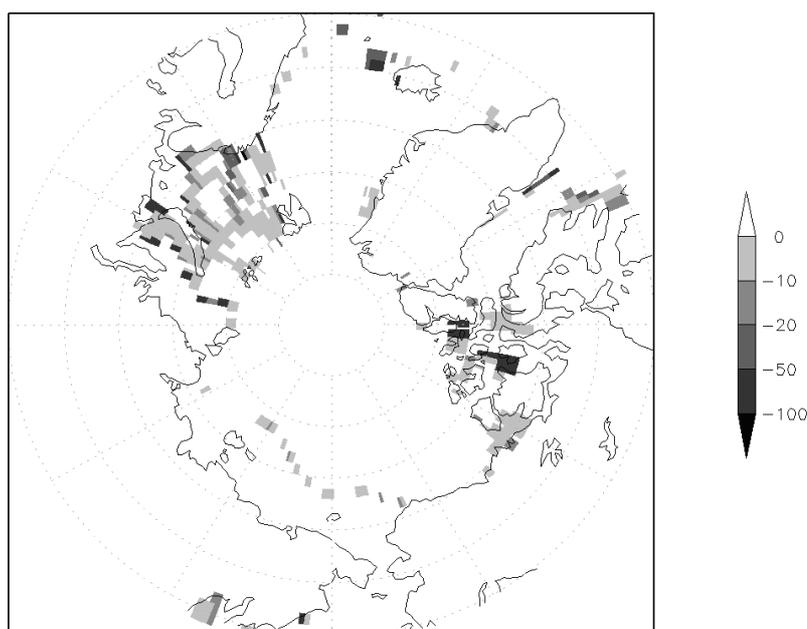
Общие запасы метана в газогидратных залежах с использованием модельных расчетов с климатическими моделями ИВМ РАН и GFDL можно оценить (по расчетам на 2001 г.) в $\sim(10-15) \cdot 10^{14} \text{ м}^3$ при стандартных условиях (600-870 ГтС). Это в пределах диапазона неопределенности соответствующих оценок от $2 \cdot 10^{14} \text{ м}^3$ [112] до $200 \cdot 10^{14} \text{ м}^3$ [87] и согласуется с современными оценками суммарных запасов метана $(10-50) \cdot 10^{14} \text{ м}^3$ [95] в гидратах. В связи с тем, что толщина зоны стабильности гидратов в отдельных регионах может превосходить 1500 м (в то время как толщина расчетного слоя в данной работе ограничивалась 830 м), и неучетом глубоководных залежей гидратов, полученная оценка возможно несколько занижена.

На рис. 21а,б приведены изменения толщины зоны стабильности океанических гидратов к 2100 г. по сравнению с 2001 г. с использованием модельных расчетов при антропогенном сценарии SRES-A2. Подобные изменения (с характерным уменьшением толщины зоны стабильности до 10 м) соответствуют разложению

порядка $4 \cdot 10^{11}$ м³ и $6 \cdot 10^{11}$ м³ гидратов с использованием расчетов с климатическими моделями ИВМ РАН и GFDL соответственно. При этом выбросы метана со дна океана в XXI веке составляют порядка $6 \cdot 10^{13}$ м³ (35 ГтС) и $10 \cdot 10^{13}$ м³ (60 ГтС) метана на основе расчетов изменений климата с моделями ИВМ РАН и GFDL соответственно (или в среднем 350 МтС/год и 600 МтС/год). Дестабилизация океанических гидратов происходит в основном в высоких широтах Северного полушария.



а)



б)

Рис.21 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.

3.2 Оценка стабильности метангидратов в системе озера Байкал

Стабильность гидратов в донных отложениях внутренних водоемов зависит от температуры и давления. В местах нахождения метангидратов, гидростатическое давление у дна превышает давление, необходимое для стабильности гидратов при температуре придонной воды. Выше дна образования гидратов обычно не происходит из-за недостаточной концентрации метана. С увеличением глубины ниже дна гидростатическое давление и температура растут линейно (в равновесных условиях), а давление, необходимое для стабильности метангидратов, экспоненциально зависит от температуры. В связи с этим существует и нижняя граница зоны стабильности. Рост придонной температуры воды приводит к изменению профиля температуры в донных отложениях и соответствующему сдвигу границ зоны стабильности.

Придонная температура воды в Байкале в настоящее время составляет около 3.5 °С при глубине более 200 м [49]. Принимая геотермальный градиент равным 0.08 °С/м (что находится в пределах 0.06-0.1 °С/м характерных для Байкала [79]) в донных отложениях в настоящее время должна существовать ЗСГ при глубине более ~380 м. При этом толщина зоны стабильности возрастает от ~20 м при глубине 400 м до 180 м при глубине 1600 м. Считая пористость донных отложений равной 0.4 [79] с использованием данных для площади изобат Байкала [48] можно аналогично экспериментам раздела 3.1 оценить современный объем запасов гидратов - около 52 км³, метана при стандартных условиях - 7×10^{12} м³ (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 6×10^{12} м³ (3.5 ГтС). Оценка количества выделяющегося при этом метана (~0.5 ГтС) соответствует суммарной эмиссии метана в атмосферу всеми антропогенными и природными источниками за год [88]. Однако разрушение гидратов соответствует распространению тепловой волны в донных осадках и происходит довольно медленно.

Для оценки интервалов времени, необходимых для разрушения гидратов были проведены численные эксперименты с использованием модели расчета запасов метана в донных газогидратных залежах аналогичной использованной в разделе 3.1. В качестве начальных условий для модели донных отложений задавался градиент температуры, соответствующий равновесному состоянию при характерном для глубоководной части Байкала геотермальном потоке 0.09 Вт/м² [78], теплопроводности донных отложений согласно [78], и современной придонной температуре воды согласно профилю [49]. Были проведены расчеты толщины ЗСГ для периода 15000 лет при повышенной на 1 °С (численный эксперимент E1) и 3 °С (эксперимент E2) относительно современной придонной температуры в качестве верхнего граничного условия. Значения кондуктивного теплового потока в Байкальской впадине изменяются в достаточно широких пределах от 0.05 до 0.12 Вт/м² [78]. В связи с этим для оценки чувствительности модели были проведены соответствующие расчеты с геотермальным потоком 0.07 Вт/м² (эксперименты E1_C и E2_C), характерным для центральной части Байкальской впадины [13].

По модельным расчетам запасы метана в газогидратных залежах

Байкала в экспериментах E1 и E2 составляют порядка 60 км³ гидратов или более 8 тыс. км³ метана при стандартных условиях (около 5 ГтС). Отличие этих оценок от полученных выше связано с учетом в модели градиента температуры в водной толще, небольшой разницей между рассчитанным и заданным значениями геотермального градиента и пространственным разрешением (модельные расчеты сделаны при широтно-долготном разрешении 0.25° × 0.125°). Для современных условий толщина ЗСГ по расчетам находится в диапазоне от 20 до 180 м в зависимости от глубины озера (рис. 22).

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 км³) и на 32% (до 40 км³) с выделением метана в количестве около 0.4 ГтС и 1.6 ГтС, соответственно.

Рис.23 характеризует динамику сокращения ЗСГ по модельным расчетам. 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 МтСН₄/год и 1.1 МтСН₄/год для экспериментов E1 и E2, соответственно. При этом соответствующие средние потоки, приходящиеся на единицу площади поверхности Байкала, около 10 и 32 гСН₄ м⁻² год⁻¹, что сопоставимо с потоками метана из болот Западной Сибири [16, 86] и более чем на порядок превосходит потоки метана из-за разрушения гидратов в результате седиментации в Байкале (0.2-0.9 гСН₄ м⁻² год⁻¹ [79]). Далее скорость деградации ЗСГ постепенно уменьшается, через 1.7 и 6 тысяч лет счета для экспериментов E1 и E2 достигается новое равновесное состояние.

В экспериментах E1_C и E2_C современные запасы метана составляют порядка 78 км^3 гидратов (на 30% больше, чем в экспериментах E1 и E2) или более 10 тыс. 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 км^3) и на 33% (до 52 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 $0.42 \text{ МтСН}_4/\text{год}$ и $1.26 \text{ МтСН}_4/\text{год}$ 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).

Следует отметить, что при сокращении зоны стабильности в основном снизу, значительная часть метана не может достичь дна, так как для этого он должен пройти через зону стабильности гидратов. Кроме того большая часть достигшего дна метана растворяется в воде и не попадает в атмосферу [29, 105]. Однако в Байкале обнаружено множество точек выброса метана в том числе и в глубоководных частях с высотой факела до 950 м от дна [68], что говорит о большом потоке метана с нижних слоев донных отложений и его высокой концентрации вблизи дна.

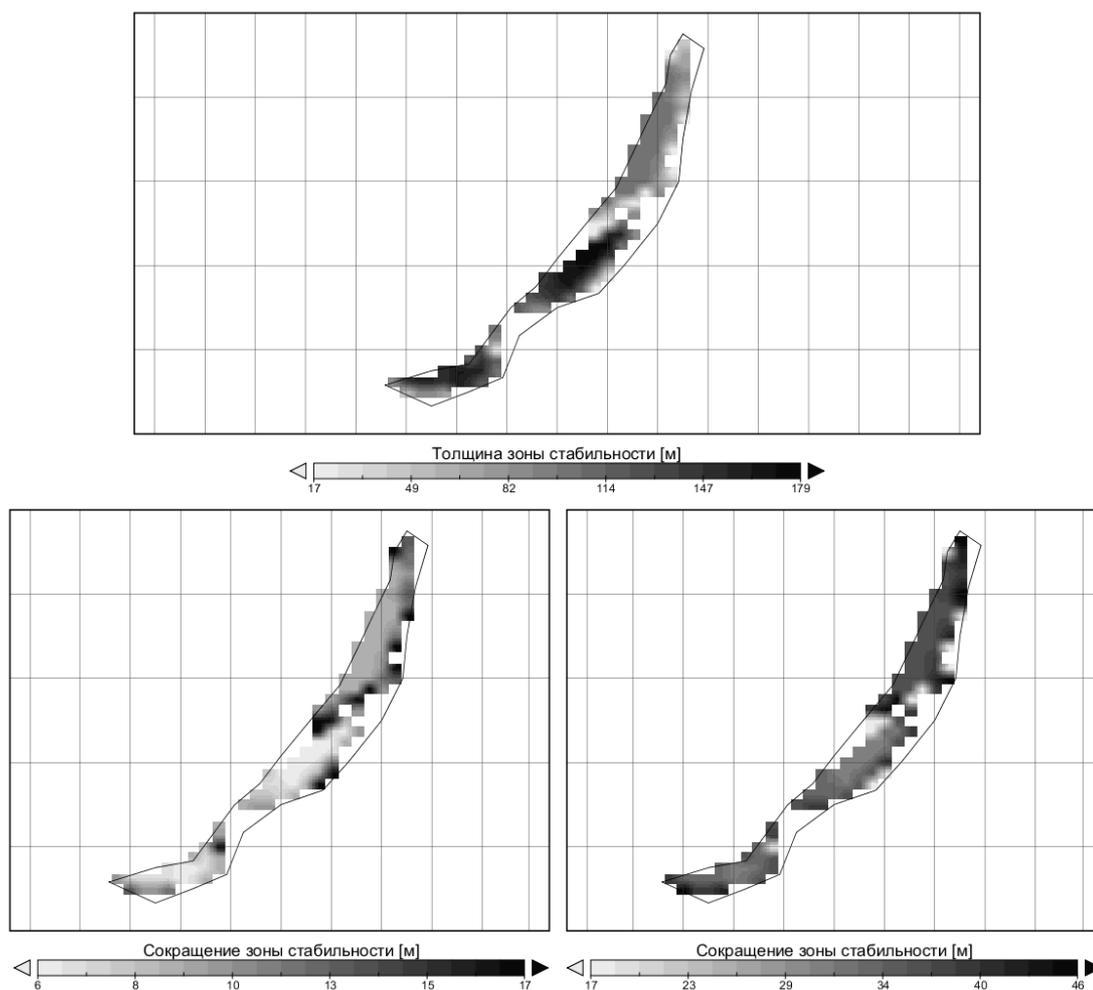


Рис.22. Рассчитанная толщина зоны стабильности гидратов озера Байкал в современных условиях (сверху) и ее возможно сокращение при увеличении придонной температуры на 1 °С (слева снизу) и на 3 °С (справа снизу)

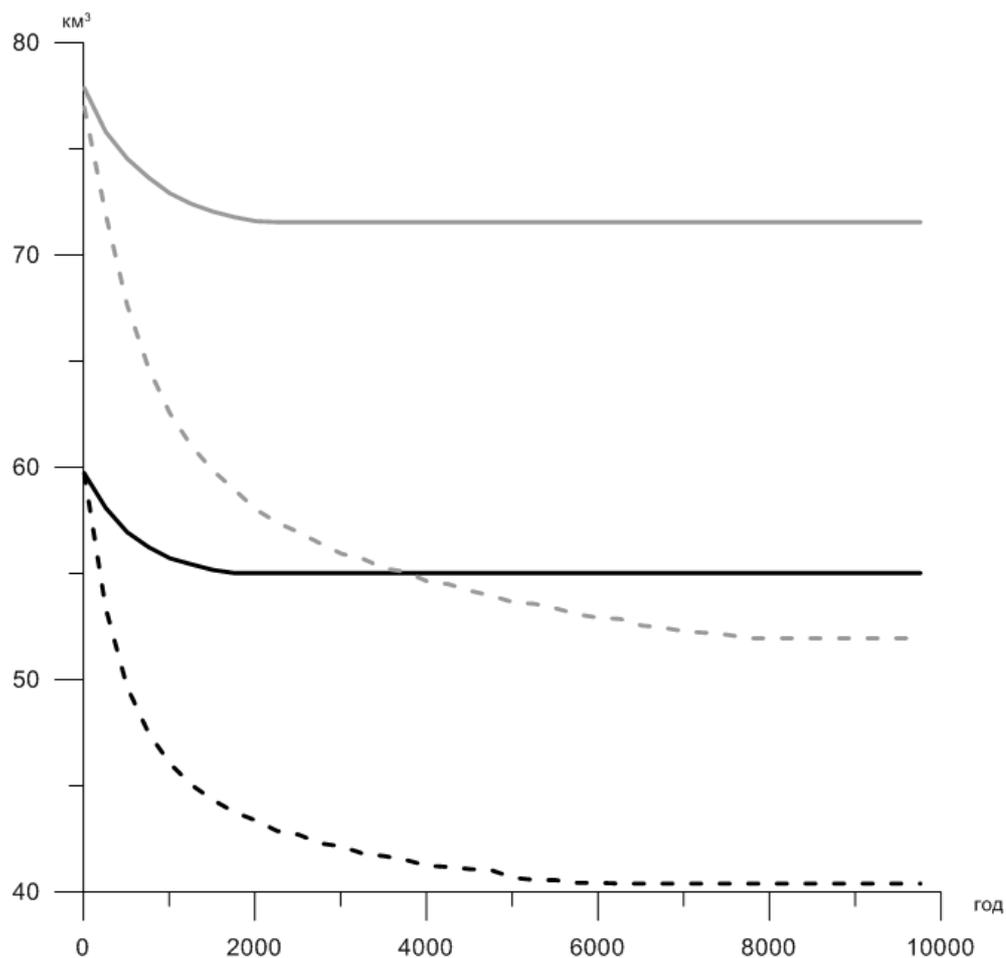


Рис.23. Изменение запасов метангидратов в системе озера Байкал по расчетам при увеличении придонной температуры на 1 °С (сплошная линия) и на 3 °С (пунктир) для численных экспериментов E1 и E2 (черные линии) и для экспериментов E1_C и E2_C (серые линии)

Обсуждение результатов главы 3

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.

Оценка [88] для суммы всех современных естественных и антропогенных потоков метана в атмосферу ~ 500 МтС/год находится в диапазоне полученных в разделе 3.1 оценок (в среднем 350-600 МтС/год). Следует при этом отметить, что рассчитанные выбросы метана относятся к нижней границе океана, и значительная часть этих выбросов метана может раствориться в воде или переработаться бактериями. Кроме того, следует отметить, что сокращение зоны стабильности происходит в связи со смещением ее верхней границы в регионах с глубиной моря от 200 до 1500 м (в зависимости от придонной температуры). В связи с миграцией метана, образованного в более глубоких слоях, гидраты максимально заполняют поровое пространство осадков вблизи нижней границы зоны стабильности, а вблизи дна обычно практически отсутствуют [59]. Недоучет подобных эффектов может привести к переоценке выбросов.

Следует отметить, что в расчетах не учитывались возможные выбросы метана, связанные с появлением выходов на поверхность для

пузырьков газа, запертых под слоем метангидратов, в связи с их диссоциацией. Кроме того не учитывались возможные залежи гидратов на мелководной части арктического шельфа, которые могут существовать при наличии субаквальной реликтовой криолитозоны, сохранившейся после последней трансгрессии. Наличие вечной мерзлоты мощностью от 200 м позволяет метангидратам существовать как на суше, так и на шельфе при глубине моря меньше 50 м [108]. Донные отложения в этом случае находятся в неравновесном состоянии с таянием вечной мерзлоты при постепенном повышении температуры в этих областях и сокращением зоны стабильности гидратов. К высвобождению газа может привести образование сквозных таликов. Стабильность гидратов связана также с изменениями уровня моря, которые при анализируемых в разделе 3.1 изменениях климата сравнительно малы [60].

В разделе 3.2 получены модельные оценки стабильности современных запасов гидратов в системе озера Байкал и выбросов метана в результате диссоциации метангидратов при повышении температуры придонной воды. По расчетам запасы метана в газогидратных залежах Байкала составляют более 8 тыс. км³ метана при стандартных условиях (около 5 ГтС). Средний поток метана для первой расчетной тысячи лет для всей системы озера Байкал около 0.35 МтСН₄/год и 1.1 МтСН₄/год при повышении температуры придонной воды соответственно на 1 и 3 °С.

Заключение

Для оценки изменений потоков метана из почвы в атмосферу при изменениях климата предложена модель естественных эмиссий метана из влажных экосистем. При продолжении глобального потепления ожидается общий рост потоков метана в атмосферу из наземных экосистем вследствие зависимости потоков метана от температуры и удлинения безморозного периода. При этом региональные тенденции изменения потоков метана зависят от региональных изменений гидрологического режима. Усиление осадков с увеличением увлажнения почвы должно усиливать температурный эффект, тогда как тенденция иссушения почвы и уменьшения заболоченности должна способствовать ослаблению эмиссии в атмосферу метана болотными экосистемами. Получена оценка 7%-ного глобального увеличения эмиссии метана влажными экосистемами при глобальном потеплении на 1 К.

Полученные для конца XX века глобальные эмиссии метана из болотных экосистем по расчетам составляют около 175 МтСН₄/год. В численных экспериментах с повышением температуры в соответствии с оценками возможных изменений температуры в XXI веке, получено увеличение глобальных эмиссий метана более чем на треть (примерно до 240 МтСН₄/год).

Результаты численных экспериментов свидетельствуют, что в расчетах 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 МтСН₄/год. Преобладающий вклад в эмиссии вносят тропические болота. Концентрация метана в атмосфере возрастает по расчетам более чем в 2 раза по сравнению с доиндустриальным периодом и составляет в конце XX века 1600-1700 ppb. При общем потеплении в XXI веке увеличиваются эмиссии метана влажными экосистемами и к концу века они достигают 170-230 МтСН₄/год в зависимости от сценария антропогенных воздействий. Концентрация метана в атмосфере при наиболее агрессивном антропогенном сценарии RCP 8.5 увеличивается к концу XXI века до 3900 ppb. При более умеренных антропогенных сценариях в XXI веке достигается ее максимум со снижением к концу века до 1200-1750 ppb.

Учет изменений эмиссии метана болотными экосистемами, связанных с потеплением существенно (до 25% в зависимости от сценария антропогенного воздействия) дополнительно увеличивает прирост содержания метана в атмосфере относительно его доиндустриального значения (положительная обратная связь). Это приводит к относительно слабому усилению потепления на 1-2% (менее 0.05 К) в XXI веке.

Получены оценки возможных изменений эмиссии метана болотными экосистемами в XXI веке для европейской и азиатской частей России. Современные рассчитанные эмиссии метана болотными экосистемами составляют 8 МтСН₄/год для европейской и 10 МтСН₄/год для азиатской части России. Эти величины в целом согласуются с наблюдениями и модельными оценками. В XXI веке при общем антропогенном потеплении максимальная глубина промерзания почвы в южных областях регионов сокращается. Эмиссии метана болотными экосистемами к концу XXI века возрастают до 14 МтСН₄/год для европейской и 17 МтСН₄/год для

азиатской части России. Анализ пространственного распределения изменений средних потоков метана в конце XXI века относительно конца XX века при общем увеличении эмиссии выявил области с уменьшением потоков метана. Уменьшение потоков метана связано с иссушением почвы.

Получены оценки изменений эмиссии метана болотными экосистемами для региона Западной Сибири ($55\text{--}65^\circ$ с.ш., $65\text{--}85^\circ$ в.д.) в XXI веке с использованием схемы эмиссий метана, совмещенной с динамической моделью тепло- и влагопереноса в почве при задании атмосферного воздействия по расчетам с ансамблем климатических моделей. В среднем для ансамбля моделей эмиссии метана возрастают на $12.2 \text{ МтСН}_4/\text{год}$. При этом отмечен значительный разброс в значениях потоков метана для разных моделей. Проанализировано влияние основных параметров атмосферного воздействия на эмиссии метана в расчетах с ансамблем климатических моделей. В целом эмиссии метана при расчете с использованием совместной схемы наиболее зависимы от значений приповерхностной температуры атмосферы. С разницей в приповерхностной температуре региона (достигающей нескольких градусов) по расчетам с различными моделями в наибольшей степени связана разница в значениях региональных эмиссий.

Получены оценки общих запасов метана в газогидратных залежах с использованием модельных расчетов с глобальными климатическими моделями в диапазоне $(10\text{--}15) \cdot 10^{14} \text{ м}^3$ при стандартных условиях ($600\text{--}870 \text{ ГтС}$). Получены оценки выбросов метана при диссоциации океанических гидратов в XXI веке (в среднем $350\text{--}600 \text{ МтС/год}$). Оценка для суммы всех современных естественных и антропогенных потоков метана в атмосферу ~ 500

МтС/год находится в диапазоне полученных оценок выбросов метана из субаквальных метангидратов. Следует отметить, что рассчитанные выбросы метана относятся к нижней границе океана, и значительная часть этих выбросов метана не попадает в атмосферу.

Получены модельные оценки стабильности современных запасов гидратов в системе озера Байкал и выбросов метана в результате диссоциации метангидратов при повышении температуры придонной воды. По расчетам запасы метана в газогидратных залежах Байкала составляют более 8 тыс. км³ метана при стандартных условиях (около 5 ГтС). Средний поток метана для первой расчетной тысячи лет для всей системы озера Байкал около 0.35 МтСН₄/год и 1.1 МтСН₄/год при повышении температуры придонной воды соответственно на 1 и 3 °С.

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 МтСН₄/год. При общем потеплении в XXI веке они увеличиваются до 170–230 МтСН₄/год в зависимости от сценария антропогенных воздействий. Концентрация метана в атмосфере при наиболее агрессивном антропогенном сценарии RCP 8.5 увеличивается к концу XXI века более чем в 2 раза (до 3.9 ppm). 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 МтСН₄/год для европейской и 10 МтСН₄/год для азиатской части

России. К концу 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 газогидратных залежах шельфа – 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 МтСН₄/год и 1.1 МтСН₄/год при повышении температуры придонной воды соответственно на 1 и 3 °С.

Литература

1. Александров Г.А., Голицын Г.С., Мохов И.И., Петухов В.К. Глобальные изменения климата и регулирующая роль болот // Известия РАН. Сер. геогр. 1994. № 2. С. 5-15.
2. Анисимов О. А., Забойкина Ю. Г., Кокорев В. А., Юрганов Л. Н. Возможные причины эмиссии метана на шельфе морей Восточной Арктики // Лед и снег. 2014. № 2. С. 69-81.
3. Анисимов О.А., Лавров С.А., Ренева С.А. Эмиссия метана из многолетнемерзлых болот России в условиях изменения климата // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Ю.А. Израэль (ред.). Гидрометеиздат: С.Петербург. 2005. С. 124-142.
4. Аржанов М.М., Елисеев А.В., Демченко П.Ф. и др. Моделирование температурного и гидрологического режима водосборов сибирских рек в условиях вечной мерзлоты с использованием данных реанализа // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 1. С. 86-93.
5. Аржанов М.М., Мохов И.И. Модельные оценки количества органического углерода, освобождаемого из многолетнемерзлых грунтов при сценариях глобального потепления в XXI веке // Доклады АН. 2014. Т. 499. № 1. С. 87-92.
6. Величко А.А., Борисова О.К., Зеликсон Э.М., Кременецкий К.В., Нечаев В.П. К оценке эмиссии метана [в бореальных экосистемах Северной Евразии] при глобальном потеплении // Доклады АН. 1997. Т. 356. № 3. С. 387-389.

7. Володин Е.М. Модель общей циркуляции атмосферы и океана с углеродным циклом // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 3. С. 298-313.
8. Володин Е.М. Цикл метана в модели климата ИВМ РАН // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 2. С. 163-170.
9. Володин Е.М., Лыкосов В.Н. Параметризация процессов тепло- и влагообмена в системе растительность-почва для моделирования общей циркуляции атмосферы. 1. Описание и расчеты с использованием локальных данных наблюдений // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1998. Т. 34. № 4. С. 453-465.
10. Глаголев М.В., Головацкая Е.А., Шнырев Н.А. Эмиссия парниковых газов на территории Западной Сибири // Сибирский экологический журнал. 2007. Т. 14. № 2. С. 197-210.
11. Глаголев М.В., Шнырев Н.А. Летне-осенняя эмиссия CH₄ естественными болотами Томской области и возможности ее пространственно-временной экстраполяции // Вестник МГУ. Сер. Почвоведение. 2008. Т. 2. С. 24-36.
12. Голицын Г.С., Гинзбург А.С. Оценки возможности «быстрого» метанового потепления 55 млн. лет назад // ДАН. 2007. Т. 413. № 6. С. 816-816.
13. Голубев В.А. Тепловое поле и глубины очагов землетрясений Байкальской рифтовой зоны // ДАН. 2010. Т. 433. № 5. С. 684-688.
14. 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. № 4. С. 319-322.

15. 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.
16. 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.
17. 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. 30-42.
18. 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.
19. Дзюба А.В., Елисеев А.В., Мохов И.И. Оценка изменений скорости стока метана из атмосферы при климатических изменениях // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 3. С. 372-382.
20. Елисеев А.В., Малахова В.В., Аржанов М.М., Голубева Е.Н., Денисов С.Н., Мохов И.И. Изменение границ многолетнемёрзлого слоя и зоны стабильности гидратов метана на арктическом шельфе Евразии в 1950-2100 гг. // ДАН. 2015. (В печати).
21. 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. № 2. С. 147-162.

22. Елисеев А.В., Мохов И.И., Карпенко А.А. Вариации климата и углеродного цикла в XX-XXI веках в модели промежуточной сложности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 1. С. 3-17.
23. Заварзин Г.А. (ред.) Круговорот углерода на территории России. М. Изд-во Миннауки РФ. 1999. 326 с.
24. Кароль И.Л., Киселев А.А. Атмосферный метан и глобальный климат // Природа. 2004. № 7. С. 47-52.
25. Киселев А.А., Кароль И.Л. Отклик газового состава тропосферы северных умеренных широт на возможный прорыв метана из недр Земли в атмосферу // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39. № 5. С. 579-588.
26. Крупчатников В.Н., Крылова А.И. Численное моделирование распределения метана по данным наблюдений на поверхности Земли // Оптика атмосферы и океана. 2000. № 6–7. С. 622–626.
27. Крылова А.И., Крупчатников В.Н. Глобальное моделирование потоков метана от болотных экосистем // Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития / Кабанов М.В. (ред.) Томск: Изд-во ИОА СО РАН. 2002. с. 98-103.
28. Кудрявцев В., Гарагуля Л., Кондратьева К., Меламед В. Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях. М.: Наука. 1974. 431 с.
29. Леин А.Ю., Иванов М.В. Биогеохимический цикл метана в океане М.: Наука. 2009. 567 с.
30. Лисс О.Л., Абрамова Л.И., Аветов Н.А., Березина Н.А., Инишева Л.И., Курнишкова Т.В., Слука З.А., Толпышева Т.Ю., Шведчикова Н.К. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение Тула: ИПП «Гриф К». 2001. С. 396-400.

31. Мохов И.И., Безверхний В.А., Елисеев А.В., Карпенко А.А. Модельные оценки глобальных климатических изменений в XXI веке с учетом различных сценариев вариаций солнечной активности // Доклады АН. 2006. Т.411. № 2. С. 250-253.
32. Мохов И.И., Безверхний В.А., Карпенко А.А. Диагностика взаимных изменений содержания парниковых газов в атмосфере и температурного режима по палеореконструкциям для антарктической станции Восток // Изв. РАН, Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 5. С. 579-592.
33. Мохов И.И., Демченко П.Ф., Елисеев А.В., Хон В.Ч., Хворостьянов Д.В. Оценки глобальных и региональных изменений климата в XIX-XXI веках на основе модели ИФА РАН с учетом антропогенных воздействий // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2002. Т.38. № 5. С.629-642.
34. Мохов И.И., Елисеев А.В. Моделирование глобальных климатических изменений в XX-XXIII веках при новых сценариях антропогенных воздействий RCP // Доклады АН. 2012. Т.443. № 6. С. 732-736.
35. Мохов И.И., Елисеев А.В., Демченко П.Ф., Хон В.Ч., Акперов М.Г., Аржанов М.М., Карпенко А.А., Тихонов В.А., Чернокульский А.В. Климатические изменения и их оценки с использованием глобальной модели ИФА РАН // Доклады АН. 2005. Т. 402. № 2. С. 243-247.
36. 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. № 2. С. 258-262.

37. Мохов И.И., Елисеев А.В., Карпенко А.А. Чувствительность к антропогенным воздействиям глобальной климатической модели ИФА РАН с интерактивным углеродным циклом // Доклады АН. 2006. Т. 407. № 3. С. 400-404.
38. Мохов И.И., Чернокульский А.В., Школьник И.М. Региональные модельные оценки пожароопасности при глобальных изменениях климата // Доклады АН. 2006. Т. 411. № 6. С. 808-811.
39. Надежина Е.Д., Молькентин Е.К., Киселев А.А., Семиошина А.А., Школьник И.М. Исследование влияния параметризации в задаче оценки потоков метана по данным региональной климатической модели ГГО для территории России // Метеорология и гидрология. 2011. № 6. С. 26-41.
40. Паников Н.С., Титлянова А.А., Палеева М.В., Семенов А.М., Миронычева-Токарева Н.П., Макаров В.И., Дубинин Е.В., Ефремов С.П. Эмиссия метана из болот юга Западной Сибири // Доклады АН. 1993. Т. 330(3). С. 388-390.
41. Решетников А.И., Зинченко А.В., Яговкина С.В., Кароль И.Л., Лагун В.Е., Парамонова Н.Н. Исследование эмиссии метана на севере Западной Сибири // Метеорология и гидрология. 2009. № 3. С. 52-64.
42. Семенов С.М. Парниковые газы и современный климат Земли. М.: Метеорология и гидрология. 2004. 175 с.
43. Сергиенко В.И., Лобковский Л.И., Семилетов И.П., Дударев О.В., Дмитриевский Н.Н., Шахова Н.Е., Романовский Н.Н., Космач Д.А., Никольский Д.Н., Никифоров С.Л., Саломатин А.С., Ананьев Р.А., Росляков А.Г., Салюк А.Н., Карнаух В.В., Черных Д.Б., Тумской В.Е., Юсупов В.И., Куриленко А.В., Чувилин Е.М., Буханов Б.А. Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей восточной Арктики как возможная причина “метановой

катастрофы”: некоторые результаты комплексных исследований // Доклады Академии наук. 2012. Т. 446. № 3. С. 330-335.

44. В.М. Степаненко, Е.Е. Мачульская, М.В. Глаголев, В.Н. Лыкосов. Моделирование эмиссии метана из озер зоны вечной мерзлоты // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 2. С. 275-288.

45. Тарко А.М. Антропогенные изменения глобальных биосферных процессов. М.: Физматлит. 2005. 231 с.

46. Шахова, Н. Е., Сергиенко В. И., Семилетов И.П. Вклад Восточно-Сибирского шельфа в современный цикл метана // Вестник РАН 2009. Т. 79. № 6. С. 507-518.

47. Шеин Е.В. Курс физики почв. М: Издательство МГУ. 2005. 432 с.

48. Шерстянкин П.П., Алексеев С.П., Абрамов А.М., Ставров К.Г., Де Батист М., Хус Р., Канальс М., Касамор Х.Л. Батиметрическая электронная карта озера Байкал // ДАН. 2006. Т. 408. № 1. С. 102-107.

49. Шимараев М.Н., Гнатовский М.Ю., Блинов В.В., Иванов В.Г. К вопросу об обновлении глубинных вод Байкала // ДАН. 2011. Т. 438. № 1. С. 121-124.

50. Школьник И.М., Мелешко В.П., Катцов В.М. Возможные изменения климата на европейской части России и сопредельных территориях к концу XXI века: расчет с региональной моделью ГГО // Метеорология и гидрология. 2006. № 3. С. 5-16.

51. Школьник И.М., Молькентин Е.К., Надежина Е.Д., Хлебникова Е.И., Саль И.А. Экстремальность термического режима в Сибири и динамика пожароопасной обстановки в 21 веке: оценки с помощью региональной климатической модели ГГО // Метеорология и гидрология. 2008. № 3. С. 5-15.

52. Andronova N.G., Karol I.L. The contribution of USSR sources to global methane emission // Chemosphere. 1993. V. 26. P. 111-126.

53. Anisimov O.A. Potential feedback of thawing permafrost to the global climate system through methane emission // *Env. Res. Letters*. 2007. T. 2. № 4. C. 045016.
54. Anisimov O.A., Reneva S.A. Permafrost and changing climate: The Russian perspective // *Ambio*. 2006. V. 35. N. 4. P. 169-175.
55. Bergamaschi P., Frankenberg C., Meirink J.F. et al. Satellite cartography of atmospheric methane from SCIAMACHY on board ENVISAT 2. Evaluation based on inverse model simulations // *J. Geophys. Res.: Atm.* 2007. V. 112. № D2. P. D02304.
56. Bloom A., Palmer P., Fraser A. et al. Large-scale controls of methanogenesis inferred from methane and gravity spaceborne data // *Science*. 2010. V. 327. № 5963. P. 322–325.
57. 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.
58. Bousquet P., Ciais P., Miller J.B. et al. Contribution of anthropogenic and natural sources to atmospheric methane variability // *Nature*. 2006. V. 443. P. 439–443.
59. Buffet B. Clathrate hydrates // *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 2000. 28:477-507.
60. Buffet B., Archer D. Global inventory of methane clathrate: sensitivity to changes in the deep ocean // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2004. V. 227. P. 185-199.

61. Cao M., Marshall S., Gregson K. Global carbon exchange and methane emissions from natural wetlands: Application of a process-based model // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. № D9. P. 14399–14414.
62. Chappellaz J., T. Blunier, D. Raynaud et al. Synchronous changes in atmospheric CH₄ and Greenland climate between 40 and 8 Kyr BP // *Nature*. 1993. V. 366. P. 443-445.
63. Christensen T.R., Cox P. Response of methane emissions from arctic tundra to climate changes: results from a model simulation // *Tellus*. 1995. V. 47B. P. 301-309.
64. Christensen, T.R., Ekberg A., Strom L., M. Mastepanov M., Panikov N., Mats O., Svensson B.H., Nykanen H., Martikainen P.J., Oskarsson H. Factors controlling large scale variations in methane emissions from wetlands // *Geophysical Research Letters* 2003. V. 30. № 7. doi: 10.1029/2002GL016848
65. Christensen, T.R., Panikov N., Mastepanov M., Joabsson A., Stewart A., Oquist M., Sommerkorn M., Reynaud S., Svensson B. Biotic controls on CO₂ and CH₄ exchange in wetlands - a closed environment study // *Biogeochem.* 2003. № 3. pp. 337-354.
66. Christensen T.R., Prentice I.C., Kaplan J. Et al. Methane flux from northern wetlands and tundra // *Tellus*. 1996. V. B48. № 5. P. 409-416.
67. Clark D.B., Mercado L.M., Sitch S. et al. The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description – Part 2: Carbon fluxes and vegetation dynamics // *Geosci. Model Dev.* 2011. № 4. P. 701–722.
68. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 3. Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J. et al. (eds.). Cambridge/New York: Cambridge University Press. 2001. 881 p.

69. Climate Change 2007: The Physical Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. S. Solomon, D. Qin, M. Manning et al. (eds.).- Cambridge/New York: Cambridge University Press. 2007. 996 p.
70. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner et al. (eds.) // Cambridge/New York: Cambridge University Press. 2013. 1535p.
71. 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: WCRP. 2011. WMO / TD – No. 1578. S. 7. P. 9-10.
72. Dickens G.R., O’Neil J.R., Rea D.K., Owen R.M. Dissociation of oceanic methane hydrate as a cause of the carbon isotope excursion at the end of the Paleocene // *Paleoceanography*. 1995. V. 10. P. 965-971.
73. Dlugokencky E. J., et al. Observational constraints on recent increases in the atmospheric CH₄ burden // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. P. L18803.
74. Dmitrenko I.A., Kirillov S.A., Tremblay B., Kassens H., Anisimov O.A., Lavrov S.A., Razumov S.O., Grigoriev M.N. Recent changes in shelf hydrography in the Siberian Arctic: Potential for subsea permafrost instability // *Journ. of Geophys. Research*. 2011. V. 116. P. C10027. doi: 10.1029/2011JC007218
75. Etheridge, D. M., L. P. Steele, R. J. Francey, and R. L. Langenfelds Atmospheric methane between 1000 A.D. and present: Evidence of

anthropogenic emissions and climatic variability // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103(D13). P. 15979–15993.

76. Friedlingstein P., Cox P., Betts R., Bopp L., von Bloh W., Brovkin V., Cadule P., Doney S., Eby M., Fung I., Bala G., John J., Jones C., Joos F., Kato T., Kawamiya M., Knorr W., Lindsay K., Matthews H., Raddatz T., Rayner P., Reick C., Roeckner E., Schnitzler K.-G., Schnur R., Strassmann K., Weaver A. J., Yoshikawa C., Zeng N. Climate-carbon cycle feedback analysis: Results from the C4MIP model intercomparison // *J. Climate.* 2006. V. 19. № 14. P. 3337-3353.

77. Gedney N., Cox P.M., Huntingford C. Climate feedback from wetland methane emissions // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. N. 20. P. L20503.

78. Golmshtok A.Y., Duchkov A.D., Hutchinson D.R., Khanukaev S.B. Heat flow and gas hydrates of the Baikal Rift Zone // *Int. J. Earth Sci.* 2000. V. 89. No. 2. P. 193-211.

79. Granin N.G., Muyakshin S.I., Makarov M.M., Kucher K.M., Aslamov I.A., Granina L., Mizandroutsev I.B. Estimation of methane fluxes from bottom sediments of Lake Baikal // *Geo-Mar. Lett.* 2012. doi: 10.1007/s00367-012-0299-6

80. Hodson E. L., B. Poulter, N. E. Zimmermann, Prigent C., Kaplan J.O. The El Nino-Southern Oscillation and wetland methane interannual variability // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38 P. L08810.

81. Holbrook W.S., Hoskins H., Wood W.T., Stephen R.A., Lizaralde D., and the Leg 164 Science Party. Methane hydrate and free gas on the Blake Ridge from vertical seismic profiling // *Science.* 1996. V. 273. P. 1840-1843.

82. Houweling S., Kaminski T., Dentener F., Lelieveld J., Heimann M. Inverse modeling of methane sources and sinks using the adjoint of a

global transport model // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. № D21. P. 26137-26160.

83. Huber C., Leuenberger M., Spahni R. Isotope calibrated Greenland temperature record over Marine Isotope Stage 3 and its relation to CH₄ // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2006. V. 243. P. 504–519.

84. Jobbagy E.N., Jackson R.B. The Vertical Distribution of Soil Organic Carbon and its Relation to Climate and Vegetation // *Ecol. Appl.* 2000. V. 10. № 2. P. 423-436.

85. Khvorostyanov D.V., Ciais P., Krinner G., Zimov S.A. Vulnerability of east Siberia's frozen carbon stores to future warming // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. № 10. P. L10703.

86. Kim H.-S., Maksyutov S., Glagolev M.V., Machida T., Patra P.K., Sudo K., Inoue G. Evaluation of methane emissions from West Siberian wetlands based on inverse modeling // *Environ. Res. Lett.* 2011. V. 6. № 3. 035201.

87. Kvenvolden K.A. Methane hydrate – a major reservoir of carbon in the shallow geosphere? // *Chem. Geol.* 1988. V. 71. P. 41-51.

88. Lelieveld J., Crutzen P., Dentener F. Changing concentration, lifetime and climate forcing of atmospheric methane // *Tellus.* 1998. V. 50B. № 2. P. 128-150.

89. Los S.O., Collatz G.J., Sellers P.J., Malmström C.M., Pollack N.H., DeFries R.S., Bounoua L., Parris M.T., Tucker C.J., Dazlich D.A. A global 9-year biophysical land-surface data set from NOAA AVHRR data // *J. Hydrometeor.* 2000. V. 1. № 2. P. 183-199.

90. Loulergue L., Schilt A., Spahni R., Masson-Delmotte V., Blunier T., Lemieux B., Barnola J.-M., Raynaud D., Stocker T.F., Chappellaz J. Orbital and millennial - scale features of atmospheric CH₄ over the past 800,000 years // *Nature.* 2008. V. 453. P.383–386.

91. MacFarling M. C., Etheridge D., Trudinger C., Steele P., Langenfelds R., van Ommen T., Smith A., Elkins J. Law Dome CO₂, CH₄ and N₂O ice core records extended to 2000 years BP // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33. № 14. P. L14810.
92. Matthews E., Fung I. Methane emission from natural wetlands: Global distribution, area and environmental characteristics of sources // *Glob. Biogeochem. Cycles.* 1987. V. 1. P. 61-86.
93. Meehl G.A., Stocker T.F., Collins W.D., Friedlingstein P., Gaye A.T., Gregory J.M., Kitoh A., Knutti R., Murphy J.M., Noda A., Raper S.C.B., Watterson I.G., Weaver A.J., Zhao Z.-C. Global climate projections, in: *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / eds. Solomon S., Qin D., Manning M. et al. Cambridge / New York: Cambridge University Press 2007. chap. 10. P. 747–846.
94. 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.
95. Milkov A.V. Global estimates of hydrate-bound gas in marine sediments: how much is really out there? // *Earth-Science Rev.* 2004. V. 66. P. 183-197.
96. Mitchell T.D., Jones P.D. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids // *Int. J. Climatology.* 2005. V. 25. № 6. P. 693-712.

97. Mokhov I.I., Chernokulsky A.V., Shkolnik I.M., Tikhonov V.A. Extreme dry and fire conditions for mid-latitude regions of Northern Eurasia: Analysis of observations, reanalyses and model simulations // The Intern. Symp. on Atmospheric Physics and Chemistry (May 15-19, 2007, Qufu, Shandong, China). IAP CAS. 2007. P.95-97.
98. Monnin, E., Indermühle A., Dällenbach A., Flückiger J., Stauffer B., Stocker T.F., Raynaud D., Barnola J.M. Atmospheric CO₂ concentrations over the last glacial termination // *Science*. 2001. V. 291. P. 112–114.
99. Moss R.H., Edmonds J.A., Hibbard K.A., Manning M.R., Rose S.K., van Vuuren D.P., Carter T.R., Emori S., Kainuma M., Kram T., Meehl G.A., Mitchell J.F.B., Nakicenovic N., Riahi K., Smith S.J., Stouffer R.J., Thomson A.M., Weyant J.P., Wilbanks T.J. The next generation of scenarios for climate change research and assessment // *Nature*. 2010. V. 463. № 7282. P. 747-756.
100. O'Connor F.M., Boucher O., Gedney N., Jones C.D., Folberth G.A., Coppel R., Friedlingstein P., Collins W.J., Chappellaz J., Ridley J., Johnson C.E. Possible role of wetlands, permafrost, and methane hydrates in the methane cycle under future climate change: A review // *Rev. Geophys.* 2010. V. 48. RG4005. doi:10.1029/2010RG000326.
101. Petoukhov V.K., Mokhov I.I., Eliseev A.V., Semenov V.A. The IAP RAS global climate model. M.: Dialogue-MSU. 1998. 110 pp.
102. Prentice I.C., Farquhar G.D., Fasham M.J.R., Goulden M.L., Heimann M., Jaramillo V.J., Khashgi H.S., Le Quéré C., Scholes R.J., Wallace D.W.R. The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide, in: *Climate Change 2001: The scientific basis, Contributions of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / Pitelka L.F. and Rojas A.R. eds. Cambridge: Cambridge University Press. 2001. P. 183–237.

103. Ramaswamy V. Radiative Forcing of Climate Change, in Climate Change 2001: The Scientific Basis, Contribution of Working group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Y.D. J.T. Houghton, Griggs D.J., Noguer M., van der Linden P.J., Dai X., Maskell K., Johnson C.A. eds. Cambridge: Cambridge University Press. 2001. p. 349-416.
104. Reagan M.T., Moridis G.J. Dynamic response of oceanic hydrate deposits to ocean temperature change // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. C12023.
105. Reeburgh W.S. Oceanic methane biogeochemistry // Chem. Rev. 2007. V. 107. pp. 486-513.
106. Renssen H., Beets C.J., Fichefet T., Goosse H., Kroon D. Modeling the climate response to a massive methane release from gas hydrates // Paleoceanography. 2004. V. 9. PA2010.
107. Ringeval B., Friedlingstein P., Koven C., Ciais P., de Noblet-Ducoudré N., Decharme B., Cadule P. Climate-CH₄ feedback from wetlands and its interaction with the climate-CO₂ feedback // Biogeosciences. 2011. V. 8. P. 2137–2157.
108. Romanovskii N.N., Hubberten H.-W. Results of Permafrost Modelling of the Lowlands and Shelf of the Laptev Sea Region, Russia // Permafrost Periglac. Process. 2001. V. 12. P. 191-202.
109. Schuur E.A.G., Lee H., Vogel J.G., Bockheim J., Canadell J.G., Euskirchen E., Romanovsky V.E., Field C.B., Goryachkin S.V., Mazhitova G., Zimov S.A., Hagemann S., Kuhry P., Lafleur P.M., Nelson F.E., Shiklomanov N., Rinke A., Tarnocai C., Venevsky S. Vulnerability of permafrost carbon to climate change: Implications for the global carbon cycle // Bioscience. 2008. V. 58. № 8. pp. 701-714.

110. Shakhova, N., Semiletov I., Salyuk A., Yusupov V., Kosmach D., Gustafsson Ö. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic shelf // *Science*. 2010. V. 327. P. 1246–1250.
111. Smith L.C., MacDonald G.M., Velichko A.A., Beilman D.W., Borisova O.K., Frey K.E., Kremenetski K.V., Sheng Y. Siberian peatlands a net carbon sink and global methane source since the early Holocene // *Science*. 2004. V.303. P. 353-356.
112. Soloviev V.A. Global estimation of gas content in submarine gas hydrate accumulations // *Russ. Geol. Geophys.* 2002. № 7. V. 43. P. 648-661.
113. Spahni R., Wania R., Neef L., van Weele M., Pison I., Bousquet P., Frankenberg C., Foster P. N., Joos F., Prentice I. C., van Velthoven P. Constraining global methane emissions and uptake by ecosystems // *Biogeosciences*. 2011. V. 8. P.1643–1665.
114. Uppala S.M., Kållberg P.W., Simmons A.J., Andrae U., Bechtold V.D.C., Fiorino M., Gibson J.K., Haseler J., Hernandez A., Kelly G.A., Li X., Onogi K., Saarinen S., Sokka N., Allan R.P., Andersson E., Arpe K., Balmaseda M.A., Beljaars A.C.M., Berg L.V.D., Bidlot J., Bormann N., Caires S., Chevallier F., Dethof A., Dragosavac M., Fisher M., Fuentes M., Hagemann S., Hólm E., Hoskins B.J., Isaksen L., Janssen P.A.E.M., Jenne R., McNally A.P., Mahfouf J.-F., Morcrette J.-J., Rayner N.A., Saunders R.W., Simon P., Sterl A., Trenberth K.E., Untch A., Vasiljevic D., Viterbo P., Woollen J. The ERA-40 re-analysis // *Quart. J. R. Meteorol. Soc.* 2005. V. 131. P. 2961-3012. doi:10.1256/qj.04.176
115. Wahlen M. The global methane cycle // *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 1993. V. 21. P. 407-426.

116. Wagner D., Kobabe S., Pfeiffer E.-M., Hubberten H.-W. Microbial controls on methane fluxes from a polygonal tundra of the Lena Delta, Siberia // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2003. V. 14. P. 173-185.
117. 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.
118. Whalen S., Reeburgh W. Composition of atmospheric methane by tundra soils // *Nature*. 1990. V. 346. P. 160-162.
119. Whiting G.J., Chanton J.P. Greenhouse carbon balance of wetlands: methane emission versus carbon sequestration // *Tellus*. 2001. V.53B. № 5. P. 521-528.
120. Wolff E.W., Chappellaz J., Blunier T., Rasmussen S.O., Svensson A. Millennial - scale variability during the last glacial: The ice core record // *Quat. Sci. Rev*. 2010. V. 29(21–22). P.2828–2838.
121. Zhuang Q., Melillo J.M., Kicklighter D.W., Prinn R.G., McGuire A.D., Steudler P.A., Felzer B.S., Hu S. Methane fluxes between terrestrial ecosystems and the atmosphere at northern high latitudes during the past century: A retrospective analysis with a process-based biogeochemistry model // *Glob. Biogeochem. Cycles*. 2004. V. 18. № 3. P. GB3010.