

УДК [551.3453+547.211]:551.583(47+57)

## Эмиссия метана в криолитозоне России и оценка ее воздействия на глобальный климат

О. А. Анисимов\*, С. А. Зимов\*\*,  
Е. М. Володин\*\*\*, С. А. Лавров\*

*Спутниковые данные о концентрации метана в тропосфере и расчеты по модели гидротермического режима многолетнемерзлых грунтов использованы для анализа эмиссии метана в криолитозоне. Изучены источники различной биохимической обусловленности и локализации в долинах крупных рек, термокарстовых озерах, болотах и низменностях. Установлены статистические связи их интенсивности с температурой воздуха, атмосферными осадками, мощностью сезонного слоя и температурой многолетнемерзлых грунтов. С использованием ансамблевого климатического сценария CMIP5 получен прогноз изменения эмиссии метана в криолитозоне на середину XXI в. При помощи модели земной системы INM-CM48 показано, что прогнозируемое увеличение эмиссии метана на 20 Тг/год приведет к повышению среднегодовой глобальной температуры не более чем на 0,05°C. Проведен анализ неопределенности полученных оценок и рассмотрена альтернативная концептуальная модель быстрых пороговых изменений эмиссии метана.*

**Ключевые слова:** метан, криолитозона, изменение климата, радиационное воздействие, прогноз.

### Введение

Многолетнемерзлые грунты (ММГ), по различным оценкам, содержат 1670—1850 Пг (1 Пг =  $10^{15}$  г, или миллиард тонн) углерода [14, 23, 25]. Это в 12 раз больше, чем во всех тропических лесах, вдвое больше, чем в атмосфере, и больше, чем во всех разведанных запасах нефти. Примерно такое же количество содержат все почвы планеты, но если в почвах богатый органикой слой составляет дециметры, а органика представлена в основном медленно разлагающимся гумусом, то в криолитозоне на половине территории мощность ММГ — метры и десятки метров, в которых органика — хорошо сохранившиеся остатки корней трав [30]. Большая ее часть, около 1024 Пг, находится в верхнем трехметровом слое [25], который в условиях изменения климата может растаять. В первые три года после оттаивания скорость декомпозиции органики может достигать 2—3% в год [14, 16, 24, 29]. При гипотетическом повсеместном таянии мерзлоты

\* Государственный гидрологический институт; e-mail: anisimov.travel@gmail.com (Анисимов Олег Александрович).

\*\*Северо-восточная научно-экспериментальная станция в п. Черский, Тихоокеанский институт географии Дальневосточного отделения Российской академии наук.

\*\*\* Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука Российской академии наук.

эмиссия углерода за год может составить порядка  $10 \text{ Пг}$ , что примерно равно всем антропогенным источникам.

Этот процесс может сдерживать нехватка кислорода. Микробы в оттаившей мерзлоте настолько активно его потребляют, что за счет диффузии кислород проникает в почву лишь на  $0,5\text{—}1 \text{ м}$ , ниже формируется анаэробная зона. Анаэробные условия имеют место также на всех обводненных территориях. На плоских территориях в просадках полигонального рельефа обычно скапливается вода. Просадки расширяются, объединяются и образуют термокарстовые озера. На равнинах севера они занимают  $10\text{—}30\%$  территории. Эродируя берега, они расширяются и мигрируют. У эрозионных берегов мерзлота тает, при этом до  $30\%$  высвобожденной органики превращается в метан ( $\text{CH}_4$ ) [8, 28]. В озерах вдоль эрозионных берегов в полосе шириной несколько десятков метров наблюдается круглогодичный выход пузырькового метана. Это самый мощный природный источник метана — сотни граммов на квадратный метр за год. Пузырьковые потоки настолько сильны, что над ними всю зиму во льду существуют незамерзающие колодцы, через которые метан поступает в атмосферу. В центральных частях озер, где мерзлота растаяла давно, поток метана уменьшается на  $2\text{—}3$  порядка, поскольку лабильная органика уже в основном переработана метаногенами.

Современная глобальная эмиссия метана из всех источников составляет около  $580 \text{ Тг/год}$  ( $1 \text{ Тг} = 10^{12} \text{ г}$ , или миллион тонн), а его содержание в атмосфере — более  $5000 \text{ Тг}$ . Это дает радиационный эффект около  $0,48 \text{ Вт/м}^2$ , притом что суммарный эффект всех атмосферных газов составляет  $2,83 \text{ Вт/м}^2$  [18]. Высказываются опасения, что расширение термокарстовых озер и таяние болот Западной Сибири могут быть причиной будущего роста эмиссии метана [10]. В качестве его дополнительного источника рассматривают также субаквальную мерзлоту на шельфе морей Восточной Арктики [26], ее площадь около  $2 \text{ млн. км}^2$ . На шельфе помимо биогенного в атмосферу может поступать метан, образующийся при диссоциации гидратов, находящихся в донных осадках на глубине более  $150 \text{ м}$  от уровня моря. Их запасы для всего Северного Ледовитого океана оцениваются в  $455\text{—}2500 \text{ Пг С}$  [21]. Газовая проницаемость реликтовой субаквальной мерзлоты близка к нулю, за исключением участков, содержащих талики. Талики существовали еще до затопления шельфа  $6\text{—}9$  тыс. лет назад вблизи геологических разломов, под руслами палеорек и под палеоозерами [22]. Анализ данных показывает, что повышенные концентрации метана на шельфе наблюдаются лишь вблизи таких зон [2]. За их пределами пути для высвобождения метана могут появиться, если оттаивание донных отложений достигнет верхней границы слоя устойчивого состояния гидратов, однако моделирование указывает на то, что в ближайшей перспективе это маловероятно [1, 15, 17].

Единого мнения о том, какое количество метана может поступить в атмосферу при таянии ММГ и насколько это может увеличить глобальную температуру воздуха, пока нет. Приблизительно оценить эмиссию метана можно, изучая его концентрацию в атмосфере, измеряемую со спутника: чем больше потоки, тем больше над этим регионом концентрация метана [9]. Наземные наблюдения фиксируют высокие концентрации  $\text{CH}_4$  в Тик-

си, меньшие — на м. Барроу на Аляске и еще меньшие — на станции Алерт в Канаде. На макроуровне это повторяет картину уменьшения содержания органики в ММГ, а следовательно, и эмиссии метана от сибирского сектора Арктики к аляскинскому и канадскому.

В данной работе результаты спутниковых наблюдений и модельных расчетов применены для прогноза эмиссии метана в криолитозоне и оценки обусловленного этим изменения глобально осредненной температуры воздуха к середине XXI в.

### Методика и данные

Были рассмотрены следующие величины: концентрация метана в нижней тропосфере в разных районах Арктики ( $C_{\text{CH}_4}$ , млрд<sup>-1</sup> объемных долей); для криолитозоны — мощность ( $Z_t$ , м) и температура ( $T_t$ , °C) сезонноталого слоя за теплый период, среднегодовая температура подстилающей мерзлой толщи ( $T_m$ , °C); среднемесячные значения температуры воздуха, суммы осадков, высота снежного покрова.

Был проведен анализ пространственно-временных закономерностей полей этих величин и выявлены причинно-следственные связи между ними. Акцент был сделан на установлении зависимости эмиссии метана в репрезентативных ландшафтах от влияющих биоклиматических, почвенных и топографических факторов и выборе наилучших предикторов. Для этого использовались данные наблюдений, модель гидротермического режима ММГ [6], а также методы статистического анализа. Были проведены расчеты по модели земной системы Института вычислительной математики им. Г. И. Марчука Российской академии наук (ИВМ РАН), в которых оценивалось радиационное воздействие и изменение глобально осредненной среднегодовой температуры воздуха, обусловленное эмиссией метана.

Использованы следующие данные:

- результаты длительных (более 40 лет) наблюдений всех изучаемых параметров на Северо-восточной научно-экспериментальной станции в п. Черский и на прилегающей территории Колымской низменности и акватории Колымского залива;

- данные спутниковых измерений концентрации метана в нижней тропосфере ( $C_{\text{CH}_4}$ ) на уровне 850 гПа (около 1,5 км над уровнем моря), полученные с помощью ИК-спектрометра AIRS в период с сентября 2002 г. по декабрь 2019 г. (достоинства и ограничения этих данных рассмотрены в работах [3, 9]);

- данные сети наземных наблюдений за приземной концентрацией метана NOAA на станциях м. Барроу, Алерт и в Тикси;

- данные измерений мощности сезонноталого слоя ( $Z_t$ ) на 68 площадках проекта CALM [5], анализ которых дан в ежегодных Докладах Росгидромета, а также данные измерений температуры ( $T_m$ ) ММГ в 152 скважинах [13] и данные о температуре почвы ( $T_m$ ) на глубине до 3,2 м, получаемые на сети метеостанций Росгидромета (в криолитозоне расположены около 140 станций, ведущих такие наблюдения, данные доступны на сайте ВНИИГМИ-МЦД).

Модель гидротермического режима ММГ применялась в режиме реанализа для пространственно-временного обобщения результатов точечных

наблюдений мощности сезонноталого слоя и температуры ММГ за исторический период. Расчеты проводили с использованием среднемесячных значений температуры воздуха и сумм осадков из сеточного архива данных Университета Восточной Англии CRU TS v4.03. В прогностических расчетах использован ансамблевый климатический сценарий на основе выборки моделей земной системы поколения CMIP5. Метод его построения и прогнозируемые приращения температуры и осадков для климатически однородных регионов криолитозоны описаны в работе [4].

Расчеты проводились в узлах регулярной сетки с шагом  $0,5^\circ$  по широте и  $1^\circ$  по долготе, охватывающей всю криолитозону, для типичных почв криолитозоны, супесей и суглинков, перекрываемых органическим слоем мощностью от 5 до 10 см разной влажности. Учитывалась доля площади, занимаемая болотами в каждой ячейке сетки. Необходимая для этого цифровая “маска” болот была построена нами ранее [11, 12]. Для обработки цифровых карт и спутниковых данных использовалась растровая ГИС Idrisi Selva v.17.00. С учетом того, что ряды спутниковых данных относительно непродолжительны (начало наблюдений — сентябрь 2002 г.), при расчете цифровых карт трендов и оценки их статистической значимости использовалась непараметрическая статистика Кэнделла, дающая наилучшие результаты для небольших выборок данных. При анализе использовали только значимые тренды.

### Результаты

На рис. 1а—в приведены тренды температуры воздуха и осадков холодного периода (с ноября по апрель) за 2003—2018 гг. В Западной Сибири происходит интенсивное повышение температуры воздуха во все месяцы летнего сезона. Количество осадков в зимний период, определяющее высоту снежного покрова и его утепляющий эффект, изменяется незначительно. В Восточной Сибири картина противоположная. В отсутствие повышения температуры в летние месяцы, а в ряде районов и при ее понижении количество осадков зимой значительно увеличилось. В результате среднегодовая температура ММГ на большей части Восточной Сибири также увеличилась.

Показательны данные для Колымской низменности, полученные на научно-экспериментальной станции в п. Черский (рис. 1е). Увеличение высоты снежного покрова за 2012—2016 гг. в сочетании с продолжающимся ростом среднегодовой температуры воздуха вызвали беспрецедентное увеличение мощности сезонноталого слоя и таяние ММГ. До недавнего времени температура ММГ здесь была от  $-6$  до  $-9^\circ\text{C}$  при среднегодовой температуре воздуха около  $-11^\circ\text{C}$ . Снежный покров высотой 35—40 см повышал температуру почв примерно на  $5^\circ\text{C}$ . За два десятилетия среднегодовая температура воздуха (и почвы) повысилась на  $3^\circ\text{C}$ , а в последние годы вдвое увеличилась высота снежного покрова. В результате температура почвы возросла еще на  $5^\circ\text{C}$ . Верхние горизонты ММГ прогрелись до  $0^\circ\text{C}$ , и в местах, где отсутствовала моховая дернина, началось их таяние. В прошлом почва в низовьях Колымы за лето оттаивала на 35—160 см, а в ноябре — январе полностью промерзала. В 2017 г. в местах, где отсутствовала моховая дернина, мощность сезонноталого слоя резко увеличи-

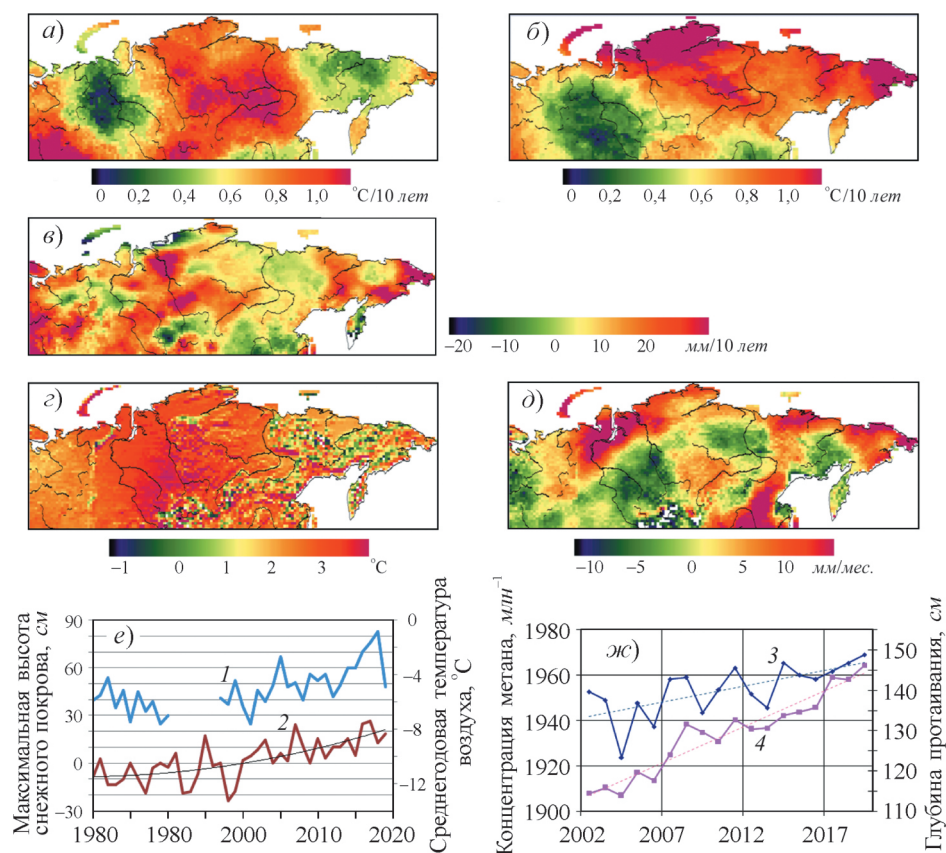


Рис. 1. Тренды летней (а) и среднегодовой (б) температуры воздуха, осадков за ноябрь — апрель (в), прогнозируемое на середину XXI в. изменение осредненных за июль и август значений температуры (г) и осадков (д) по отношению к среднему показателю за период 2003—2018 гг., а также изменение максимальной высоты снежного покрова (1) и среднегодовой температуры воздуха (2) на Колымской низменности по данным наблюдений в п. Черский и временной ход рассчитанной по модели ММГ мощности сезонноталого слоя (3) и концентрации метана (4), осредненных по азиатской части криолитозоны (жс).

лась: на обводненных пушицевых болотах — до 0,8 м, а на едомах (сухих водоразделах, подстилаемых плейстоценовыми высокольдистыми суглинками) — до 2,2 м. За последующую зиму из-за обилия снега почва промерзла лишь на 0,4—1,0 м, причем уже к началу июня мерзлый слой растаял и таяние кровли мерзлоты продолжилось. Осенью 2018 г. на сухих едомах мощность талого слоя достигала 3 м, а в местах, пройденных пожаром 70 лет назад, — 5 м. Близкие значения глубины оттаивания были зафиксированы и южнее, в районе г. Среднеколымск.

Осенью 2018 г. станция мониторинга атмосферного  $\text{CO}_2$  в бухте Амбарчик зафиксировала резкий рост его концентрации. Это свидетельствует о том, что отмеченное таяние ММГ представляет собой не локальное, а региональное явление.

Зима 2018/19 г. была относительно холодной и малоснежной (рис. 2е), и, казалось бы, талый слой должен был вновь промерзнуть. Однако таяние



ММГ продолжилось, и осенью 2019 г. кровля мерзлоты опустилась на 4,12 м. Произошло это потому, что при декомпозиции в аэробных условиях экзотермическое окисление углерода до диоксида углерода создает положительную обратную связь. Данные наблюдений и расчетов показывают, что если мощность богатого лабильной органикой талого слоя превышает 1 м, то микробного разогрева достаточно для таяния ММГ и без потепления климата [8, 19].

На рис. 1ж приведены результаты модельного расчета мощности сезонноталого слоя и спутниковых измерений концентрации метана за июль и август, осредненные по азиатской части криолитозоны. Графики указывают на синфазность изменений этих величин в период 2003—2019 гг., а также на положительные тренды каждой из них. Их связь хорошо описывается линейной регрессией с высоким коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,57$ .

На рис. 1з, д показаны прогнозируемые на середину XXI в. изменения в летний период значений температуры и количества осадков по сравнению со средними значениями за 2003—2018 гг. Видно, что выявленные региональные контрасты изменений температуры будут сохраняться. Количество осадков в летний сезон, от которого зависят увлажненность почвы и условия для метаногенеза, значительно увеличится лишь на прибрежных низменностях Западной и Восточной Сибири.

Для оценки точности и ограничений спутниковых данных о концентрации  $\text{CH}_4$  было проведено их сравнение с результатами наземных наблюдений NOAA на станциях м. Барроу, Алерт и Тикси. Оно выявило большие различия  $C_{\text{CH}_4}$  на суше в холодное время года. В работе [9] было показано, что если температура в нижней тропосфере уменьшается с высотой менее чем на  $2,5^\circ\text{C}/\text{км}$ , спутник регистрирует излучение лишь высоких более теплых слоев и “не видит” приземного слоя. Такая ситуация возникает в холодный период в Восточной Сибири из-за устойчивой температурной инверсии. С учетом этого далее в работе использовались спутниковые данные лишь с июня по сентябрь.

Были выявлены артефакты на возвышенностях высотой более 1 км. Так, по спутниковым данным во все месяцы отмечается максимум  $C_{\text{CH}_4}$  над каменистым плато Путорана, высота которого местами превышает 1600 м, что выше уровня 850 гПа, использованного в работе в качестве границы нижней тропосферы.

Для устранения широтного градиента вместо абсолютных значений концентрации  $\text{CH}_4$  рассматривались их отклонения от среднеширотных значений для территории суши, осредненные за летние месяцы, рассчитанные для текущего года.

На рис. 2 приведены карты разности отклонений среднемесячных значений концентрации  $\text{CH}_4$  от среднеширотных показателей в периоды 2011—2019 и 2003—2010 гг. в июле и сентябре, а также близкие им карты для Восточной Сибири, показывающие линейный тренд этой величины за весь период наблюдений. Июль — время максимальной продукции метана болотами, а сентябрь — время активизации источников, связанных с таянием ММГ и термокарстовыми озерами. На рис. 2а видно, что в июле повышенные темпы роста  $C_{\text{CH}_4}$  характерны для севера Западной и Центральной Сибири к западу от дельты Лены, а области пониженных значений

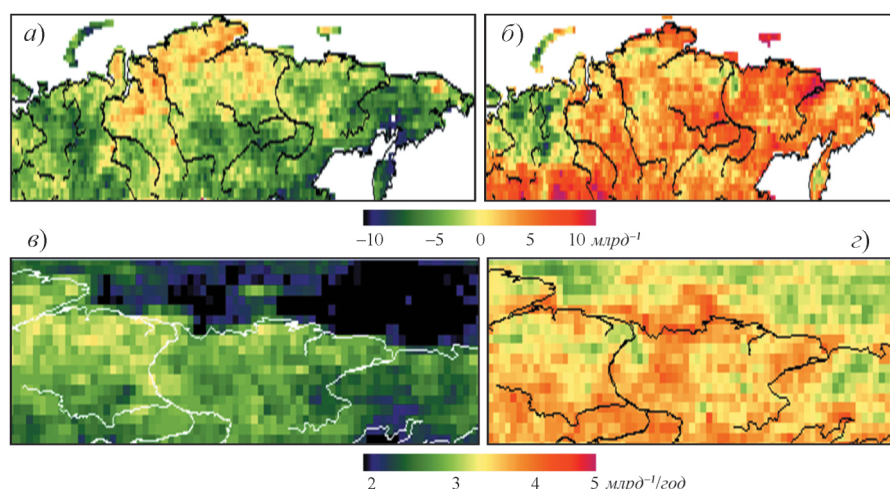


Рис. 2. Разности отклонений среднемесячных концентраций  $\text{CH}_4$  от среднеширотных между периодами 2011—2019 и 2003—2010 гг. в июле (а) и сентябре (б) и тренды этих величин (в, з) для прибрежной низменности Восточной Сибири и морского шельфа.

опоясывают эту территорию с запада, юга и востока (исключение — небольшая область на севере Чукотки). На рис. 2в тренд концентрации метана в июле нигде не превысил  $3,5 \text{ млрд}^{-1}/\text{год}$ , при этом везде на суше и на островах он значительно больше, чем тренд над шельфом морей Восточной Арктики.

Пространственное распределение изменений концентрации метана в атмосфере в июле в целом хорошо объясняется динамикой климата. В Западной и Центральной Сибири летом наблюдалось повышение температуры (рис. 1а). На севере этого региона, где тепла недостаточно, это усилило метаногенез в болотах, а на юге региона, в зоне недостаточного увлажнения, сильное потепление вызвало высыхание болот и мелководных водоемов. На северо-востоке Европы и в районе Колымы наблюдалось понижение температуры в летний сезон. Поэтому продукция метана в болотах здесь уменьшилась. На севере Чукотки температура летом повысилась и метаногенез увеличился. Таким образом, во всех регионах изменения  $C_{\text{CH}_4}$  в июле закономерны.

Как видно на рис. 2а, б, динамика концентрации атмосферного метана в июле и сентябре сильно различается. В сентябре во всей криолитозоне потоки метана как минимум не уменьшились, а на половине ее территории — существенно увеличились (на рис. 2б лишь несколько маленьких зеленых пятен, и приурочены они к скалистым горам, где возможны артефакты). Такую картину можно объяснить увеличением во всем регионе среднегодовой температуры воздуха, от которой зависит температура мерзлоты. Мощность сезонного слоя также повсеместно увеличилась (рис. 1ж).

Высокими значениями роста концентрации метана выделяются покрытые чехлом едомных толщ равнины Центральной Якутии и приморских низменностей северо-востока. Это среднее течение р. Яна, район гранди-

озного Батагайского термоцирка, Яно-Индигирская и Обыйская низменности, Новосибирские острова и особенно большое пятно — Колымская низменность. (Для сравнения обратим внимание на большую зеленую область к западу от Урала на северо-востоке Европы: здесь практически нет мерзлоты, и заметный метановый сигнал отсутствует.)

На рис. 2г можно увидеть даже хорошо известные “горячие точки”, например, ярко-красное пятно вокруг п-ова Быковский на востоке дельты Лены. Этот массив едомы в настоящее время тает со всех сторон. Другая “горячая точка” — пролив Лаптевых, Ляховские острова и Ойягосский яр (этот район — главный мировой поставщик мамонтовых бивней). Значения тренда  $C_{CH_4}$  в этих регионах около  $4,5 \text{ млрд}^{-1}/\text{год}$ . Так же как и в июле, тренды на шельфе морей Восточной Арктики намного меньше, чем на суше и островах, за исключением прибрежных зон, где идет активная эрозия береговых едом.

Были построены многофакторные регрессии  $C_{CH_4}$  для каждого месяца теплого сезона (с июня по сентябрь) на следующие предикторы: температура воздуха и суммы осадков текущего и всех предшествующих летних месяцев; рассчитанные для текущего месяца по модели ММГ мощность и температура сезонноталого слоя. Рассчитывали множественный коэффициент корреляции  $R$  и частные коэффициенты корреляции  $r_i$  для каждого предиктора. Расчеты проводили как в отдельных узлах одноградусной сетки, так и с осреднением по маскам, объединяющим однородные по условиям метаногенеза территории. Для устранения артефактов спутниковых данных были исключены ячейки одноградусной сетки, высота которых над уровнем моря превышала 150 м.

На рис. 3а представлен прогноз приращения концентрации метана в атмосфере по отношению к среднему значению за период 2003—2019 гг., осредненного за два месяца максимального метаногенеза болот (июль и август). Расчет проводили по регрессионной модели с тремя предикторами (среднемесячные значения температуры июля, августа и сумма осадков за эти два месяца) с использованием ансамблевого климатического сценария CMIP5 для середины XXI в. Территории, над которыми прогнозируется увеличение концентрации метана, во многом совпадают с картой заболоченности (рис. 3б). К ним относятся мерзлые болота Западной Сибири вблизи Васюганской равнины, низменности среднего участка бассейна р. Виллюй и Яно-Индигирская низменность. На остальной территории, согласно регрессионной модели, различные факторы будут в значительной

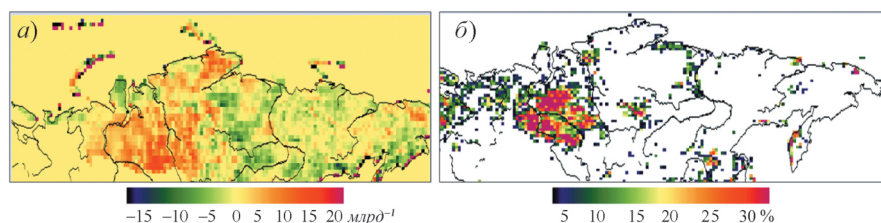


Рис. 3. Прогнозируемое к середине XXI в. приращение атмосферной концентрации метана над криолитозоной за июль — август по отношению к средней за 2003—2019 гг. (а), также доля территории, занятая болотами (б).



**Расчетные значения концентрации метана в атмосфере и его потоков  
из болот криолитозоны для современных и прогнозируемых на середину  
XXI в. климатических условий**

| $C_{\text{CH}_4}$ | $S$ , млн. км <sup>2</sup> | 2003—2019 гг.                          |                            | 2050 г.                                |                            |                                    |
|-------------------|----------------------------|----------------------------------------|----------------------------|----------------------------------------|----------------------------|------------------------------------|
|                   |                            | $C_{\text{CH}_4}$ , млрд <sup>-1</sup> | $F_{\text{CH}_4}$ , Тг/год | $C_{\text{CH}_4}$ , млрд <sup>-1</sup> | $F_{\text{CH}_4}$ , Тг/год | $k$ , Тг/(год млрд <sup>-1</sup> ) |
| >0                | 1,514                      | 5,73                                   | 22—28                      | 9,70                                   | 37,2—47,4                  | 3,84—4,89                          |
| <0                | 1,351                      | 2,68                                   | 2—5                        | 3,09                                   | 0—0,36                     | 0,75—1,87                          |

мере компенсировать взаимное влияние. Увеличение температуры и количества осадков будет сопровождаться увеличением мощности сезонноталого слоя, понижением уровня надмерзлотных вод и заглублением анаэробной зоны без существенного ее расширения. В результате при усилении потоков углерода в форме CO<sub>2</sub> эмиссия метана может остаться на прежнем уровне или уменьшиться.

В таблице представлены оценки современной эмиссии метана из болот криолитозоны  $F_{\text{CH}_4}$  с использованием данных публикаций, обзор которых приведен в работе [20], а также параметры, полученные в результате обработки цифровой карты на рис. 3а. Были рассчитаны превышения концентрации метана над среднеширотным значением в среднем за период 2003—2019 гг., осредненные по территории, где прогнозируется увеличение концентрации метана (красная цветовая гамма на рис. 3а и строка “>0” в таблице, преимущественно в Западной Сибири) и ее уменьшение (зеленая цветовая гамма на рис. 3а и строка “<0” в таблице, преимущественно в Восточной Сибири). Кроме того, были рассчитаны площадь этих территорий  $S$  и прогнозируемые для них на середину XXI в. значения  $C_{\text{CH}_4}$ . Используя эти данные, по аналогии с работой [9], можно дать оценку изменения эмиссии метана, обусловленной таянием болот Западной Сибири (положительные аномалии на рис. 3а), предположив, что она пропорциональна изменению превышения его концентрации над этой территорией над среднеширотным значением.

Принято считать, что эмиссия метана на заболоченных территориях криолитозоны России в настоящее время составляет 24—33 Тг/год, из которых 22—28 Тг/год приходится на Западную Сибирь [11, 20]. Исходя из этого, можно рассчитать для современных условий коэффициент  $k = F_{\text{CH}_4} / C_{\text{CH}_4}$  и использовать его для прогноза  $F_{\text{CH}_4}$  по рассчитанным для середины XXI в. значениям  $C_{\text{CH}_4}$  (таблица). Согласно этим данным, к середине XXI в. приращение эмиссии составит 15,2—19,4 Тг/год. С учетом погрешности расчета эту величину можно принять равной 20 Тг/год.

Для оценки радиационного воздействия такого увеличения эмиссии метана и обусловленного этим изменения глобальной температуры воздуха были проведены расчеты по модели земной системы INM-CM48 [27]. Поскольку предполагаемое изменение глобальной температуры воздуха небольшое и может маскироваться естественными колебаниями климата, воздействие дополнительного источника метана на температуру оценивалось следующим образом. С учетом того, что среднее время жизни метана в атмосфере составляет 11 лет, дополнительная эмиссия 20 Тг/год увели-

чит  $C_{\text{CH}_4}$  примерно на  $80 \text{ млрд}^{-1}$ . Был проведен численный эксперимент продолжительностью один год, в котором задавались современное значение  $C_{\text{CH}_4} = 1850 \text{ млрд}^{-1}$  и увеличенное  $C_{\text{CH}_4} = 1930 \text{ млрд}^{-1}$ . Радиационное воздействие вычислялось как разность радиационных балансов на верхней границе атмосферы в первом и во втором случаях, его глобально осредненная величина составила  $0,05 \text{ Вт/м}^2$ .

Согласно данным [18], суммарное антропогенное радиационное воздействие в 2011 г. составило около  $2,8 \text{ Вт/м}^2$ , поток тепла в океан — около  $0,7 \text{ Вт/м}^2$ , а обусловленное этим изменение глобально осредненной приземной температуры — около  $1,0 \text{ С}$ . Это значит, что отношение изменения температуры и воздействия составляет около  $0,48^\circ\text{С} \text{ м}^2/\text{Вт}$ , и воздействию величиной  $0,05 \text{ Вт/м}^2$  соответствует равновесное глобальное потепление около  $0,025^\circ\text{С}$ . Согласно данным работы [7], при увеличении концентрации метана в атмосфере должна увеличиваться также и концентрация тропосферного озона, являющегося парниковым газом. Это должно привести к дополнительному повышению температуры на величину, сопоставимую с прямым воздействием увеличения концентрации метана. Даже в этом случае максимальная оценка влияния эмиссии метана при таянии болот криолитозоны на глобальную температуру будет меньше  $0,05^\circ\text{С}$ .

### Обсуждение

Представленные в статье результаты были получены в рамках традиционной научной парадигмы, которая предполагает, что таяние болот будет определять главное воздействие криолитозоны на глобальный климат через увеличение эмиссии метана. Между тем, результаты исследований последних лет свидетельствуют о том, что главным эмитентом метана могут быть не болота, а едома, т. е. богатые древней органикой мерзлые почвы, а также термокарстовые озера. При масштабном таянии ММГ древние почвы повсеместно окажутся в переувлажненных условиях. Верхние горизонты (байджерахи) лишь местами будут аэрированы, а все, что находится ниже их подножий, будет, скорее всего, водонасыщено, и здесь метаногенез будет протекать так же, как под озерами. Если предположить, что под термокарстовыми озерами и переувлажненными депрессиями оттает от 10 до 30% приповерхностных мерзлотных почв, то в оборот поступят 100—300  $\text{Пг}$  углерода. До 10% этого объема может высвободиться в форме метана, дав 10—30  $\text{Пг}$ . В настоящее время в атмосферу из всех источников ежегодно поступает 0,5—0,6  $\text{Пг}$  метана, почти столько же его окисляется в атмосфере в ходе фотохимических реакций.

При таком сценарии уже в ближайшие десятилетия эмиссия метана из ММГ может сравняться с современным суммарным поступлением его в атмосферу или даже превысить этот показатель. На примере Колымской низменности видно, что даже в наиболее холодной части криолитозоны изменение температуры воздуха и высоты снежного покрова в сочетании с эндотермическим саморазогревом, сопровождающим эмиссию  $\text{CO}_2$ , может вызвать быстрое таяние ММГ с последующим формированием анаэробной зоны на глубине более 1—2 м и биогенным образованием метана в этой

зоне. Поскольку фотохимическое окисление  $\text{CH}_4$  не может существенно увеличиться, большая часть высвобожденного из ММГ метана будет накапливаться в атмосфере.

В подобных оценках много неопределенностей, в частности, связанных со временем начала и скоростью развития процессов на разных территориях. Для валидации этого нетрадиционного и не связанного с болотами сценария важно определить, каким метановым сигналом отреагировала мерзлота на современное потепление. Провести такую оценку достаточно сложно, поскольку сигнал от таяния едомы и термокарстовых озер пока слабее болотного. Однако его можно выделить по динамике концентрации атмосферного метана. В Северном полушарии наблюдаются его значительные сезонные вариации — летом из-за активности фотохимических реакций, особенно в низких широтах, концентрация метана уменьшается.

Эмиссия метана из болот происходит в основном в летний сезон, максимальное его продуцирование совпадает с максимумом температуры. В сентябре в болотах и мелководных озерах севера метаногенез почти прекращается. В глубоких термокарстовых озерах вода еще сохраняет накопленное за лето тепло, прогревая толщу донных осадков. В результате максимальные значения температуры почвы, максимальная мощность сезонноталого слоя и метаногенез из неболотных источников отмечаются в осенние месяцы. Самые высокие значения концентрации атмосферного метана наблюдаются на севере Восточной Сибири. Объяснить этот максимум дальним переносом невозможно, поскольку концентрация метана над другой территорией меньше. Осенне-зимним источником  $\text{CH}_4$  может быть тающая едома. Оценить местоположение и мощность этих источников можно с помощью карт пространственного распределения и динамики концентрации атмосферного метана. Летний рост концентрации  $\text{CH}_4$  в первую очередь связан с болотами, а осенний — с таянием ММГ. По спутниковым данным наибольшая скорость роста концентраций метана в XXI в. наблюдается именно в осенний период, что соответствует описанной выше концептуальной модели. Одной из важнейших задач дальнейших исследований являются надежное обоснование и валидация этой модели.

### Выводы

Таким образом, исследования показали пространственную однородность трендов атмосферных концентраций метана над криолитозоной в летний период. Их уменьшение свидетельствует о том, что метаногенез, происходящий в верхних горизонтах болотных толщ за счет анаэробной декомпозиции современной органики, замедляется. Можно сделать вывод, что приблизительно на половине территории криолитозоны изменение климата сопровождается иссушением болот.

В противоположность этому тренды концентрации метана в сентябре над криолитозой увеличились. Это свидетельствует о повсеместном усилении метаногенеза за счет древней органики, поступающей из тающей мерзлоты. Изменения концентрации  $\text{CH}_4$  над криолитозоной синфазны рассчитанным по модели изменениям мощности сезонноталого слоя. При этом мощные максимумы  $C_{\text{CH}_4}$  локализованы в районах, где началось активное таяние мерзлоты. Вклад древней органики в процесс метаногенеза,

судя по всему, превысил вклад органики, сформированной современной растительностью. Можно заключить, что наблюдаемый в последние годы значительный рост концентрации атмосферного метана на севере обусловлен, прежде всего, таянием ММГ, а не усилением его эмиссии из болот.

Свидетельств существенной эмиссии метана с акватории сибирских морей с июня по сентябрь не обнаружено. Наблюдаемые прибрежные максимумы концентрации  $\text{CH}_4$  связаны, вероятно, с активной эрозией и таянием береговых толщ ММГ, а не с субаквальной мерзлотой. Это не подтверждает гипотезу о возможном резком усилении эмиссии метана на шельфе морей Восточной Арктики, обусловленном современным таянием субаквальной мерзлоты.

Как показал анализ, данные спутниковых наблюдений за концентрацией метана над криолитозоной можно использовать в качестве оперативно-го инструмента для мониторинга состояния мерзлоты.

Авторы выражают признательность сотрудникам ГГИ Е. Л. Жильцовой, К. О. Шаповаловой, А. А. Ершовой за помощь в проведении расчетов и при подготовке рисунков.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 18-05-60005.

## Литература

1. Анисимов О. А., Борзенкова И. И., Лавров С. А. и др. Современная динамика подледной мерзлоты и эмиссия метана на шельфе морей Восточной Арктики в контексте прошлых и будущих изменений климата. — Лед и снег, 2012, № 2 (118), с. 97—105.
2. Анисимов О. А., Забойкина Ю. Г., Кокорев В. А. и др. Возможные причины эмиссии метана на шельфе морей Восточной Арктики. — Лед и снег, 2014, № 2 (54), с. 69—81.
3. Анисимов О. А., Кокорев В. А. Сравнительный анализ наземных, морских и спутниковых измерений метана в нижней атмосфере российской части Арктики в условиях изменения климата. — Исследования Земли из космоса, 2015, № 2, с. 20—33.
4. Анисимов О. А., Кокорев В. А. Климат в арктической зоне России: анализ современных изменений и модельные проекции на XXI век. — Вестник МГУ, 2016, № 1, с. 61—69.
5. Кокорев В. А., Ершова А. А., Анисимов О. А. Вэб-портал о вечной мерзлоте, 2018; <http://www.permafrost.su>.
6. Лавров С. А., Анисимов О. А. Моделирование гидротермического режима грунтов: описание физически полной динамической модели и сравнение расчетов с наблюдениями. /В кн.: Проблемы экологического моделирования и мониторинга экосистем. Под ред. Ю. А. Израэля. — М., НИЦ “Планета”, 2011, с. 241—255.
7. Смышляев С. П., Мареев Е. А., Галин В. Я. и др. Моделирование влияния выбросов метана из арктических газовых гидратов на региональные изменения состава нижней атмосферы. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2015, т. 51, № 4, с. 472—483.
8. Чупрынин В. И., Зимов С. А., Молчанова Л. А. Моделирование термического режима почвогрунтов с учетом биологического источника тепла. — Криосфера Земли, 2001, т. 5, № 1, с. 80—87.
9. Юрганов Л. Н., Лейфер А., Майр К. Л. Сезонная и межгодовая изменчивость атмосферного метана над морями Северного Ледовитого океана по спутниковым данным. — Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2016, № 2 (13), с. 107—119.
10. Ahmed N. Seven facts you need to know about the Arctic methane timebomb. /In: The Guardian, 2013; [www.theguardian.com/environment/earth-insight/2013/aug/05/7-facts-need-to-know-arctic-methane-time-bomb](http://www.theguardian.com/environment/earth-insight/2013/aug/05/7-facts-need-to-know-arctic-methane-time-bomb).
11. Anisimov O. Potential feedback of thawing permafrost to the global climate system through methane emission. — Environ. Res. Lett., 2007, No. 2; doi: 10.1088/1748-9326/2/4/045016.
12. Anisimov O. A. and Reneva S. A. Permafrost and changing climate: the Russian perspective. — Ambio, 2006, vol. 35, No. 4, pp. 169—175.

13. AWI Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P) database. — Potsdam, AWI, 2019; <https://gtnp.arcticportal.org/>.
14. Christensen T. R., Rysgaard S., Bendtsen J., et al. Arctic carbon cycling. /In: Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA) Report of Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), 2017, pp. 203—218.
15. Dmitrenko I. A., Kirillov S. A., Tremblay B., et al. Recent changes in shelf hydrography in the Siberian Arctic: Potential for subsea permafrost instability. — J. Geophys. Res., 2011, vol. 116, C10027; doi: 10.1029/2011JC007218.
16. Elberling B., Michelsen A., Schadel C., et al. Long-term CO<sub>2</sub> production following permafrost thaw. — Nature Climate Change, 2013, No. 3, pp. 890—894.
17. Frederick J. M. and Buffett B. A. Taliks in relict submarine permafrost and methane hydrate deposits: Pathways for gas escape under present and future conditions. — J. Geophys. Res.: Earth Surface, 2014, vol. 119, No. 2, pp. 106—122; doi: 10.1002/2013jef002987.
18. IPCC Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. — Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 2013, 1535 p.
19. Khvorostyanov D. V., Krinner G., Ciais P., et al. Vulnerability of permafrost carbon to global warming. Part I: Model description and role of heat generated by organic matter decomposition. — Tellus B, Chem. and Phys. Meteorol., 2008, vol. 60, No. 2, pp. 250—264.
20. Masyagina O. V., Menyailo O. V. The impact of permafrost on carbon dioxide and methane fluxes in Siberia: A meta-analysis. — Environ. Res., 2020, vol. 182, pp. 1—16; <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.109096/>.
21. Methane as an Arctic Climate Forcer: Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP).— Oslo, Norway, 2015, 139 p.
22. Overduin P. P., Liebner S., Knoblauch C., et al. Methane oxidation following submarine permafrost degradation: Measurements from a central Laptev Sea shelf borehole. — J. Geophys. Res.: Biogeosciences, 2015, vol. 120, No. 5; doi: 10.1002/2014jg002862.
23. Schuur E. A. G., McGuire A. D., Schaudel C., et al. Climate change and the permafrost carbon feedback. — Nature, 2015, vol. 520, No. 9, pp. 171—179; doi: 10.1038/nature14338.
24. Schaudel C. E., Schuur E. A. G., Bracho R., et al. Circumpolar assessment of permafrost C quality and its vulnerability over time using long-term incubation data. — Global Change Biology, 2014, vol. 20, pp. 641—652.
25. Tarnocai C., Canadell J. G., Schuur E. A. G., et al. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. — Global Biogeochem. Cycles, 2009, No. 23; GB2023.10.1029/2008GB003327.
26. Thornton B. F., Geibel M. C., Crill P. M., et al. Methane fluxes from the sea to the atmosphere across the Siberian shelf seas. — Geophys. Res. Lett., 2016, vol. 43, pp. 5869—5877; doi: 10.1002/2016GL068977.
27. Volodin E. M., Mortikov E., Kostykin S., et al. Simulation of the modern climate using INM-CM48 climate model. — Russ. J. Num. Anal. and Mathem. Model., 2018, vol. 33, No. 6, pp. 367—374.
28. Walter Anthony K. M., Zimov S. A., Grosse G., et al. A shift of thermokarst lakes from carbon sources to sinks during the Holocene epoch. — Nature, 2014, vol. 511, pp. 452—456.
29. Zimov S. A., Davydov S. P., Zimova G. M., et al. Permafrost carbon: Stock and decomposability of a globally significant carbon pool. — Geophys. Res. Lett., 2006, vol. 33, No. 20, pp. 4821—4836.
30. Zimov S. A., Schuur E. A. G., and Chapin F. S. Permafrost and the global carbon budget. — Science, 2006, vol. 312, No. 5780, pp. 1612—1613.

Поступила в редакцию 26 II 2020 г., после доработки 18 III 2020 г., принята к публикации 17 IV 2020 г.

**Примечание редакции.** Статьи, также посвященные исследованию изменения климата:

“Летний туризм в контексте будущих изменений климата России: оценки по большому ансамблю условных прогнозов высокого разрешения” (авторы — М. В. Ключева, И. М. Школьник, Ю. Л. Рудакова, Т. В. Павлова, В. М. Катцов) и

“Климатические изменения в Приволжском федеральном округе в XIX—XXI веках” (авторы — Ю. П. Переведенцев, Б. Г. Шерстюков, К. М. Шанталинский, В. В. Гурьянов, Т. Р. Аухадеев), будут опубликованы в журнале “Метеорология и гидрология”, 2020, № 6.