

ЭМИССИЯ МЕТАНА В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА РЕГИОНАЛЬНОЕ ПОТЕПЛЕНИЕ

В.В. Адушкин, В.П. Кудрявцев, Т.В. Лосева

Приведен анализ источников эмиссии метана в арктическом регионе. Показано, что ранее не учитываемая мощность источников метана в атмосферу Земли, только на мелководном шельфе Тихоокеанского сектора Арктики составляет около 120 Тг/год. Проведены оценки изменения радиационного баланса тропосферы в инфракрасной области спектра при изменении концентрации метана для этого региона. Оценки соответствующего изменения температуры, связанного с лучистым энерговыделением, показали, что увеличение радиационного воздействия на тропосферу, вследствие увеличения концентрации метана в ней, может вызвать заметное возрастание температуры атмосферы.

Введение

Известно, что радиационные источники тепла в атмосфере формируются в результате взаимодействия солнечного и теплового излучения Земли с атмосферными газами, аэрозолями, облаками и подстилающей поверхностью. Температурный режим атмосферы в значительной степени регулируется распределением содержания малых газовых составляющих (МГС), интенсивно поглощающих и рассеивающих излучение. Такие газовые компоненты атмосферы как CO_2 , CH_4 , H_2O , O_3 и N_2O , имея сравнительно малые концентрации, могут существенно ее изменять в зависимости от естественных и антропогенных причин и этим влиять на потоки радиации и температуру в различных частях атмосферы. По степени влияния на радиационный баланс атмосферы и развитие парникового эффекта метан является третьим по значимости (после паров воды и двуокиси углерода) парниковым газом. Согласно современным представлениям, изменение средней глобальной температуры атмосферы обусловлено усилением парникового эффекта и, в частности, увеличением в ней концентрации метана.

Понимание причин изменения концентрации CH_4 в атмосфере Земли ограничивается значительной неопределенностью мощности и пространственно-временной

изменчивостью источников на региональном и глобальном уровнях, а также неопределенностью в распределении глобальной концентрации гидроксила, основного стока метана в атмосфере [Chen et al., 2006].

Для обоснования оценок возможных природных и антропогенных катастроф необходимо исследовать изменение системы «суша-гидросфера-атмосфера» в условиях значительного увеличения концентрации метана. Для того, чтобы понять природу процессов, приводящих к региональным и глобальным изменениям, корректно построить прогностические сценарии климатических изменений на региональном уровне и в Северном полушарии (СП) в целом, необходима количественная оценка мощности эмиссии парниковых газов в атмосферу. Для повышения точности подобных оценок необходимо включение в глобальный цикл метана шельфовых и наземных экосистем Арктики [Адушкин и др., 2010; Шахова и др., 2009а; Shakhova et al., 2008].

Вклад арктического региона в бюджет атмосферного метана

Решение указанной выше проблемы невозможно без ответа на целый ряд вопросов, среди них: каков вклад Арктического шельфа в глобальный поток метана; почему концентрация метана в СП с увеличением широты монотонно возрастает, а ее максимум находится не над средними широтами СП, на которые приходится основная антропогенная активность, а над Арктическим регионом; за счет каких источников наблюдается значительное увеличение массы метана в атмосфере СП в осенне-зимний период.

Выполненный в работах [Адушкин и др., 2007; Адушкин и др., 2010] анализ пространственно-временного поведения концентрации метана показал, что в СП действуют два сорта источников метана с различной сезонной вариацией их мощности. При этом максимальная скорость изменения массы метана в атмосфере и наибольшая мощность его выделения приходятся на осенний период. Для объяснения устойчивости осенне-зимнего максимума концентрации метана в атмосфере высоких широт СП необходима дополнительная ранее не учитываемая мощность источников (более 120 Тг в год).

Указанные выше выводы теоретических исследований нашли свое полное подтверждение в данных натурных наблюдений, полученных в последнее время. В работе [Yurganov, 2010] представлены спутниковые измерения (AIRS) концентрации метана в атмосфере СП на уровне 400 мбар (~7 км) за период май–август 2009 года. Увеличение концентрации метана в СП начинается с полярных широт летом и достигает своих максимальных значений в осеннее время.

Указанный эффект находит свое объяснение в работе [Mastepanov et al., 2008], где приводятся результаты наземных измерений потока метана в течение года в тундре, в которых было зафиксировано значительное увеличение потока метана в момент начала промерзания почвы (сентябрь). Эти результаты представлены на рис. 1. При замерзании грунта на глубине 15 см (середина октября) наблюдалось увеличение потока метана в атмосферу более чем на порядок по сравнению с потоком в летнее время. Выбросы метана в осенне-зимние периоды в зоне вечной мерзлоты до последнего времени оставались мало изученными. Это связано с трудностями систематической работы в условиях зимней Арктики. В комментариях к работе [Mastepanov et al., 2008] отмечается, что увеличения потоков метана в сентябре–октябре наблюдалось и ранее во многих районах Арктики.

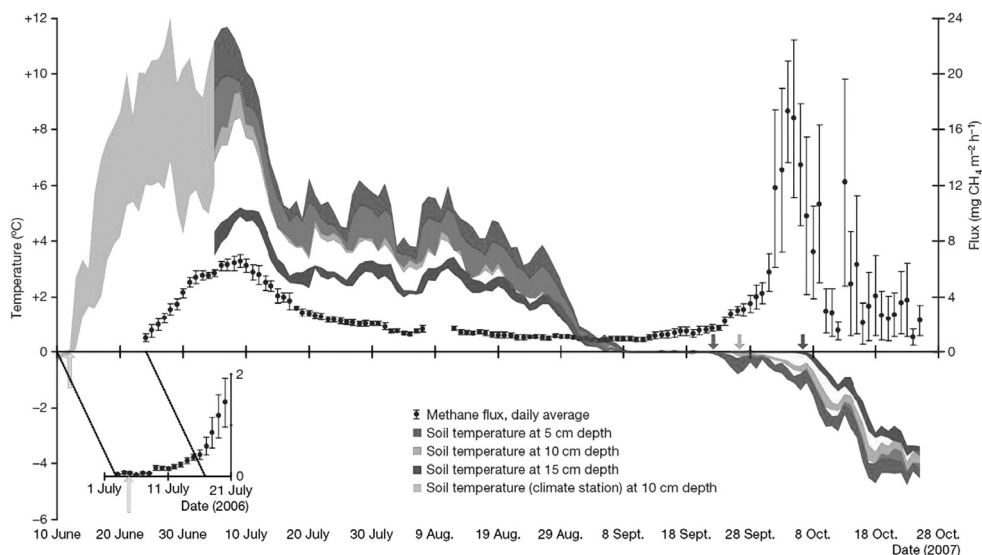


Рис. 1. Сезонная зависимость температуры и эмиссии метана в тундре на различной глубине

До недавнего времени в научной литературе практически отсутствовали данные о вкладе арктического шельфового региона в формирование глобального потока метана. Считалось, что основным поставщиком метана в Арктическую атмосферу являются водно-болотные угодья тундры. Однако в последние годы появились данные, указывающие на то, что в арктическом регионе в результате деградации вечной мерзлоты существенный вклад в бюджет метана в атмосфере может вносить эмиссия CH_4 из термокарстовых озер [Zhuang et al., 2009; Mastepanov et al., 2008; Walter et al., 2008; Walter et al., 2007a,b]. Области талых осадков (талики) могут являться круглогодичными источниками метана. В работе [Walter et al., 2007b] представлены результаты экстраполяции измеренных потоков метана из 16 озер Сибири и Аляски на площадь всех северных озер. Суммарный поток метана из озер Сибири и Аляски оценивается в $24,2 \pm 10,5$ Тг/год. В работе [Bastviken, 2004] эмиссия метана из озер Швеции и США определяется как 8–48 Тг/год. Однако анализ пространственно-временного распределения концентрации метана показывает, что водно-болотных и озерных источников явно недостаточно для объяснения устойчивости зимнего максимума концентрации метана в атмосфере высоких широт [Адушкин и др., 2010; Шахова и др., 2009a], хотя они и вносят заметный вклад в бюджет атмосферного метана.

Биогеохимические исследования, проводимые в последние годы на шельфе Тихоокеанского сектора Арктики сотрудниками Тихоокеанского океанологического института ДВО РАН и Международного арктического научного центра Университета Аляски Фэрбэнкс, заставляют изменить наши представления о роли арктического шельфа в формировании глобального бюджета метана. В результате проведенных исследований были получены данные [Shakhova, Semiletov, 2009; Шахова и др., 2009a], которые свидетельствуют о возможной эмиссии метана из мощного глубинного источника на арктическом шельфе. Результаты систематических экспедиционных исследований на шельфе Тихоокеанского сектора Арктики выявили шлейфы высокого содержания растворенного метана, что может быть связано

с деградацией субаквальной мерзлоты, а также с разрушением газогидратов [Шахова и др., 2009а; Шахова и др., 2007а; Shakhova et al., 2007; Shakhova et al., 2008; Шахова и др., 2007б].

Экспериментально установлено, что придонный слой вод в отдельных исследованных районах перенасыщен CH_4 относительно его содержания в атмосфере высоких широт северного полушария на 2200–3000%, а поверхностные воды – до 700–2700%, что свидетельствует о существенном вкладе шельфовых вод в качестве источника метана в атмосферу. Из полученных данных следует, что в поверхностном и придонном слоях Восточно-Сибирского моря и моря Лаптевых выделяются районы аномально высоких концентраций растворенного метана (до 114 nM в поверхностном слое и до 154 nM в придонном), которые пространственно коррелированы с разломными структурами на дне [Шахова и др., 2009б; Дударев и др., 2008; Шахова и др., 2007а]. К настоящему моменту самая высокая концентрация, достигавшая 520 nM (эквивалентно 12000%-ному перенасыщению относительно атмосферных концентраций), обнаружена на шельфе моря Лаптевых [Шахова и др., 2009а]. При проведении экспедиционных работ в приповерхностном слое атмосферы в этих районах были зафиксированы и протяженные аномалии концентрации метана в воздухе (до 4–8 ppmv).

В море Лаптевых были зарегистрированы многочисленные метановые пузыри диаметром до 0,3 м, аккумулированные подо льдом. В районе полыней это ведет к его разгрузке в атмосферу, а во время разрушения ледового покрова возможен залповый выброс в атмосферу значительных масс метана. Эмиссия метана в форме огромных факелов обнаружена в Охотском море [Obzhirov et al., 2004], море Лаптевых и в Восточно-Сибирском море [Шахова и др., 2009а]. Имеющиеся данные, указывают на то, что в арктических морях, где субаквальная мерзлота уже деградировала или находится в заключительной стадии деградации, происходит катастрофический выброс метана (предположительно из газогидратов), что приводит к формированию множества кратерообразных структур на дне [Шахова и др., 2009а,б]. Полученные экспериментальные данные [Шахова и др., 2009а] свидетельствуют о том, что более 80% площади мелководного шельфа Арктики является источником эмиссии метана в атмосферу. Согласно морским исследованиям ДВО РАН, эмиссия метана в атмосферу только на мелководном шельфе Тихоокеанского сектора Арктики превышает 90 Тг (экстраполяция была проведена более чем по 5000 измерениям) [Шахова и др., 2009а], что составляет более 20% ежегодной эмиссии метана в атмосферу всего Северного полушария.

Таким образом, количество и мощность источников метана, вносящих вклад в его бюджет в атмосфере, продолжает пополняться. В настоящее время полученные в ходе проведения натурных наблюдений дополнительные мощности потоков метана в атмосферу СП (согласно данным [Walter et al., 2007b; Шахова и др., 2009а; Etiope, 2004; Bastviken, 2004]) оцениваются более чем в 150 Тг/год. Из них вклад шельфа Тихоокеанского сектора Арктики составляет 90 Тг/год [Шахова и др., 2009а]; выбросы из термокарстовых озер восточной Сибири и Аляски оцениваются в 24 Тг/год [Walter et al., 2007b], а на долю геологических источников приходится 35 Тг/год [Etiope, 2004]. В связи с этим в настоящее время представляется вполне обоснованным предложение авторов [Walter et al., 2007b; Шахова и др., 2009а; Etiope, 2004] включить указанные источники в официальные таблицы бюджета метана (IPCC).

Необходимо отметить, что повышение точности климатических моделей, обоснование вероятностных оценок возникновения экстремальных экологических ситуаций и природных катастроф, обусловленных изменениями окружающей среды,

невозможно без включения в них ранее не учитываемого фактора «арктической шельфовой метановой бомбы». Ранее Арктика не рассматривалась как источник существенного повышения потока метана при глобальном потеплении, но арктические регионы подвержены наибольшему влиянию глобальных климатических изменений. По данным, полученным Национальным агентством по атмосфере и океану США (National Ocean and Atmosphere Administration – NOAA) за последние 100 лет средняя глобальная температура атмосферы возросла на 0,74 градуса, но особенно существенно происходит рост региональной температуры в районе Сибирской Арктики. За последние десять лет по сравнению с климатическими данными двадцатого столетия над акваторией Восточно-Сибирского шельфа зафиксировано увеличение температуры более чем на 3 градуса. Повышение температуры в арктическом регионе приводит к деградации вечной мерзлоты и увеличению эмиссии в атмосферу метана, подводная мерзлота мелководной части шельфа уже не будет играть роль «запорного клапана».

Крупнейшим резервуаром органического углерода, потенциально доступным к вовлечению в современные геохимические процессы, являются метановые газогидраты, запасы которых на суше оцениваются в 32000 Гт, а на шельфе приблизительно в 6000 Гт [Makogon et al., 2007]. Если учесть, что в современной атмосфере содержится 5,2 Гт, то становится очевидным, что вовлечение в круговорот даже незначительной доли метана, аккумулированного в углеродном резервуаре мерзлоты и метановых газогидратах, может привести к существенному увеличению эмиссии в атмосферу одного из основных парниковых газов, определяющего глобальные изменения климата.

Радиационное воздействие метана на систему «Земля-атмосфера»

Известно [Kiehl, 1997], что среднее количество солнечной радиации, достигающей приземной слой атмосферы и ее поверхность в условиях идеально чистой атмосферы составляет 342 Вт/м², 30% солнечной радиации (альбеда системы $A = 0,3$) отражается атмосферой и земной поверхностью. Полная энергия солнечной радиации, поглощенная системой «Земля-атмосфера» (в основном в видимой части спектра ~0,3–1,0 мкм) составляет $W \approx 240$ Вт/м². Нагретая земля и атмосфера излучают соответствующую энергию в инфракрасном диапазоне спектра (~10 мкм).

Среднюю глобальную температуру Земли оценим из баланса потока энергии солнечного излучения и длинноволновой радиации Земли:

$$\varepsilon \sigma T^4 = W,$$

здесь $\varepsilon = 0,95$ – коэффициент «серости» для излучения поверхности Земли, σ – постоянная Стефана-Больцмана, T – температура поверхности Земли. Принимая $W \approx 240$ Вт/м², получим, $T = 258$ К. Однако в действительности средняя глобальная температура приземного слоя составляет 288 К, то есть на 30 градусов выше. Это обусловлено хорошо известным парниковым эффектом атмосферы. Такие газовые компоненты атмосферы как CO₂, CH₄, H₂O, O₃ и N₂O, имея сравнительно малые концентрации, обладают сильными полосами поглощения в ИК области спектра и могут влиять на потоки радиации и температуру Земли. Некоторое количество энергии ИК излучения Земли отражается и поглощается аэрозолями и парниковыми молекулами атмосферы и переизлучает ее на Землю, тем самым дополнительно нагревая ее на ~30°. Поглощение длинноволновой радиации Земли происходит при малых

оптических толщинах, поэтому увеличение концентраций указанных молекул будет приводить к линейному росту температуры земной поверхности и тропосферы.

Метан находится в ряду тех малых газовых составляющих атмосферы, которые благодаря своим радиационным и фотохимическим свойствам оказывает прямое и косвенное влияние на температурный режим атмосферы и поверхности Земли. Выше указывалось, что вовлечение в круговорот даже незначительной доли метана, аккумулированного в арктическом резервуаре мерзлоты и метановых газогидратах, может привести к существенному увеличению его эмиссии в атмосферу. В связи с этим представляет интерес рассчитать радиационное воздействие на атмосферу Земли со стороны ИК излучения метана и оценить изменения температуры в условиях значительного увеличения его концентраций.

Для оценки радиационного воздействия на систему «атмосфера-поверхность Земли», обусловленного молекулами метана было использован код SBDART [Ricchiazzi et al., 1998] для вычисления плоскопараллельного переноса излучения в атмосфере Земли. В модель включены все наиболее важные процессы и компоненты атмосферы, влияющие на распространение ультрафиолетового, видимого и инфракрасного спектра излучения.

При проведении оценок радиационного воздействия на атмосферу Земли в условиях увеличения концентрации метана был выполнен ряд численных экспериментов. Проведены расчеты потоков ИК излучения в спектральном диапазоне 1–100 мкм: потоки направленные вниз (F_D), потоки направленные вверх (F_U), а также суммарный поток (F_N), равный разности этих потоков. Вычислены отклонения указанных выше потоков от их невозмущенных значений при изменении химического состава и концентраций метана в атмосфере, что позволило оценить дополнительное радиационное воздействие на Землю. Все варианты расчетов проводились для 70° северной широты и 90° восточной долготы. Высотный профиль параметров атмосферы выбирался для летней (22 июня) полярной атмосферы, согласно [Anderson et al., 1986]. При этом использовались интегральные концентрации воды $4,2 \text{ г/см}^2$ и озона $0,3 \text{ атм-см}$. Когда рассчитывались радиационные потоки излучения в невозмущенных условиях, концентрации парниковых газов принимались равными средним глобальным значениям: $[\text{CO}_2] = 360 \text{ ppmv}$, $[\text{CH}_4] = 1,74 \text{ ppmv}$, $[\text{N}_2\text{O}] = 0,32 \text{ ppmv}$, альбедо поверхности принималось равным $A = 0,3$.

Результаты расчетов высотной зависимости потоков ИК излучения в невозмущенных условиях, при указанных выше параметрах атмосферы, представлены на рис. 2. Из расчетов следует, что потоки ИК излучения формируются, в основном, составляющими тропосферы Земли и в незначительной степени озоном стратосферы. Расчеты показали, что величина потока инфракрасной радиации, проходящей сквозь атмосферу и рассеивающаяся в космосе, в выбранных условиях расчета (время, место, состав), составляет $254,3 \text{ Вт/м}^2$ (средний глобальный поглощенный поток солнечной радиации $\sim 240 \text{ Вт/м}^2$).

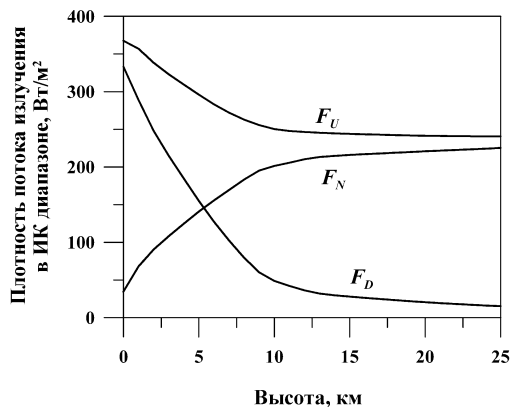


Рис. 2. Высотная зависимость потоков инфракрасного излучения в атмосфере Земли в летнее время в полярных широтах

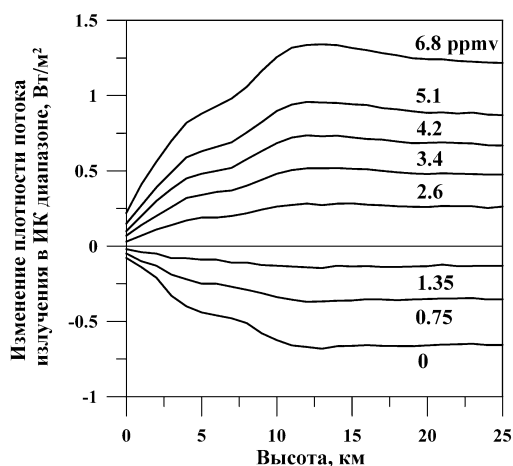


Рис. 3. Высотная зависимость изменения потоков инфракрасной радиации в летней полярной атмосфере при различных значениях $[CH_4]$

F_{Ni} соответствующий поток F_N в возмущенных условиях, а F_{N0} — поток в стандартных условиях. Расчеты изменения потоков ИК излучения (ΔF_i) были проведены для концентраций метана равных: 0 (отсутствие метана в атмосфере); 0,75 ppmv (концентрация до индустриализации); 1,35 ppmv (концентрация в 60-е годы прошлого столетия); 2,6 ppmv (концентрация увеличена на 50% по сравнению с современным состоянием); 3,4 ppmv (концентрация удвоена); 4,2 ppmv; 5,1 ppmv; 6,8 ppmv. Увеличение радиационного воздействия, которое оказывает ИК излучение метана на изменение баланса поступающей и уходящей энергии в системе «Земля-атмосфера», при условиях увеличения $[CH_4]$ в два раза (3,5 ppmv) составляет 0,48 Вт/м², а в сравнении с доиндустриальным периодом — 0,34 Вт/м² ($[CH_4] = 0,75$ ppmv).

Следует отметить, что оценки увеличения глобального среднего совокупного радиационного воздействия вследствие повышения концентрации углекислого газа, метана и закиси азота за период с 1750 по 2005 годы, представленные в [РСС, 2007], дают величину $\Delta F_N \approx [+2,07 - +2,53]$ Вт/м². При этом полное увеличение радиационного воздействия на поверхность Земли со стороны парниковых газов составляет 2,72 Вт/м², из них 0,48 [0,43–0,53] Вт/м² приходится на долю CH_4 . За указанный период концентрация метана в атмосфере возросла с 750 ppbv до 1750 ppbv, то есть увеличилась на 1000 ppbv. В настоящей работе оценки увеличения глобального среднего радиационного воздействия были выполнены при условии повышения концентрации метана на 1750 ppbv, поэтому можно считать, что представленные оценки не противоречат друг другу.

Изменение радиационного воздействия на атмосферу и поверхность Земли, вызванного изменениями концентрации метана, вызовет возмущение температуры системы. Для оценок изменения температуры будем предполагать, что система «Земля-атмосфера» в инфракрасном диапазоне излучает как «черное тело», то есть $\epsilon \sigma T^4 = F_{N0}$. Тогда приращение температуры атмосферы за счет увеличения радиационного воздействия можно оценить из выражения: $\Delta T/T = \Delta F_i / 4F_{Ni}$. Используя рассчитанные значения параметров ΔF_i и F_{Ni} Вт/м² и считая, что на всех уровнях атмосферы инфракрасное излучение носит равновесный характер, для указан-

С целью оценки радиационного воздействия, которое оказывает ИК излучение метана на изменение баланса поступающей и уходящей энергии в системе «Земля-атмосфера», были проведены расчеты потоков инфракрасной радиации в условиях, когда концентрация CH_4 изменялась, при сохранении прочих параметров атмосферы. Затем, для оценки изменения радиационного воздействия на систему «Земля-атмосфера» в условиях увеличения концентрации CH_4 рассчитывались разности потоков в возмущенных и стандартных условиях, описанных выше. Результаты расчетов изменения потоков инфракрасной радиации ΔF_i представлены на рис. 3. Здесь $\Delta F_i = F_{Ni} - F_{N0}$, где

ных концентраций метана получим отклонения температуры от их невозмущенных значений (при $[\text{CH}_4] = 1,75 \text{ ppmv}$). Результаты расчетов ΔT , К для различных высот H , км представлены в таблице, там же приведены потоки F_{N0} , Вт/м² и их отклонения ΔF_i от невозмущенных значений. Из представленных в таблице величин ΔT видно, что при увеличении $[\text{CH}_4]$ от 0,75 до 1,75 ppmv температура возрастет на 0,12 К по сравнению с температурой в доиндустриальном периоде. Учитывая, что по данным NOAA за последние 100 лет средняя глобальная температура атмосферы возросла на 0,74 К и считая, что это вызвано совокупным увеличением концентраций всех парниковых газов, получим, что на долю CH_4 приходится порядка 16% (0,12 К) от всего парникового эффекта. При значительных увеличениях $[\text{CH}_4]$ (в отдельных районах зафиксированы концентрации метана в воздухе до 4–8 ppmv) возможно увеличение температуры на 0,5 К.

Таблица

H	CH ₄	0,75		2,6		3,4		4,2		5,1		6,8	
	F_{N0}	ΔF	ΔT	ΔF	ΔT	ΔF	ΔT	ΔF	ΔT	ΔF	ΔT	ΔF	ΔT
1	68,1	–0,1	–0,11	0,07	0,08	0,14	0,15	0,22	0,21	0,27	0,29	0,41	0,43
5	141	–0,25	–0,12	0,19	0,1	0,34	0,17	0,48	0,25	0,68	0,32	0,88	0,45
10	201	–0,34	–0,12	0,26	0,1	0,48	0,17	0,68	0,25	0,89	0,32	1,25	0,45

Заключение

Анализ источников эмиссии метана в арктической зоне показал, что данные, полученные в ходе проведения натурных наблюдений, подтверждают теоретические оценки количественных поступлений метана в атмосферу СП. Дополнительная ранее не учитываемая мощность источников метана в атмосферу Земли только на мелководном шельфе Тихоокеанского сектора Арктики и эмиссия CH_4 из термокарстовых озер составляет около 120 Тг в год. Суммарный поток метана в атмосферу СП должен составлять не менее 600 Тг в год. Деградации вечной мерзлоты в арктическом регионе приводит к увеличению эмиссии метана в атмосферу, подводная мерзлота мелководной части шельфа уже не играет роль «запорного клапана» залежей метана.

Изменение радиационного воздействия на атмосферу Земли вследствие увеличения концентрации метана вызовет заметное возрастание температуры системы «Земля-атмосфера».

Результаты, полученные в последние годы в ходе проведения натурных наблюдений, теоретических расчетов эмиссии метана в атмосферу и оценок радиационного воздействия метана на атмосферу, приводят к заключению о необходимости количественной оценки положительной обратной связи «потепление – таяние мерзлоты и разрушение газогидратов – эмиссия парниковых газов». Без этого невозможно корректно построить прогностические сценарии климатических изменений в Арктике (и в СП в целом) на ближайшее и отдаленное будущее, а также построение общей теории климата.

Работа выполнена в рамках программы № 16 Президиума РАН и программы № 7 ОНЗ РАН.

Литература

Адушкин В.В., Кудрявцев В.П. Поток метана в атмосферу и его сезонные вариации // Физические поля и динамика взаимодействующих геосфер: сб. науч. тр. ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2007. С. 13–23.

Адушкин В.В., Кудрявцев В.П. Глобальный поток метана в атмосферу и его сезонные вариации // Известия РАН. Физика Земли. 2100. Т. 46. № 4. С. 350–357.

Дударев О.В., Чаркин А.Н., Семилетов И.П. и др. О современном состоянии подводных островных реликтов на восточно-сибирском шельфе // ДАН. 2008. Т. 419. № 2. С. 255–261.

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

Шахова Н.Е., Никольский Д.Ю., Семилетов И.П. О современном состоянии подводной мерзлоты на Восточно-Сибирском шельфе: тестирование результатов моделирования данными натурных наблюдений // ДАН. 2009б. Т. 429. № 4. С. 541–544.

Шахова Н.Е., Семилетов И.П., Салюк А.Н. и др. Аномалии метана в приводном слое атмосферы на шельфе восточно-сибирской Арктики // ДАН. 2007а. Т. 414. № 6. С. 819–823.

Шахова Н.Е., Семилетов И.П., Бельчева Н.А. Великие сибирские реки как источники метана на Арктическом шельфе // ДАН. 2007б. Т. 414. С. 683.

Anderson G.P., Chetwynd J.H., Clough S.A. et al. AFGL Atmospheric Constituent Profiles (0–120km). AFGL-TR-86-0110. Environmental Research Papers, No. 954. 1986.

Bastviken, D., Cole J., Pace M., Tranvik L. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate // Global Biogeochem. Cycles. 2004. V. 18. GB4009, doi:10.1029/2004GB002238.

Chen Y.H., Prinn R.G. Estimation of atmospheric methane emission between 1996 and 2001 using a three-dimensional global chemical transport model // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. D10307.

Davidson E.A., Janssens I.A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change // Nature. 2006. V. 440. P. 165–173.

Etioppe G. New Directions: GEM-Geologic Emission of Methane, the missing source in the atmospheric methane budget // Atmospheric Environment. 2004. № 38. P. 3099–3100.

Forster P. et al. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing, 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, ed. S. Solomon et al., pp. 131–234, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K., 2007.

IPCC 2007 // Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge Univ. Press, Cambridge UK and New York, NY USA.

Kiehl J.T., Trenberth K.E. Earth's Annual Global Mean Energy Budget // Bull. Amer. Meteorolog. Assoc. 1997. V. 78. P. 197–208.

Makogon Y.F., Holditch S.A., Makogon T.Y. Natural gas-hydrates – A potential energy source for the 21st Century // J. Petroleum Science and Engineering. 2007. V. 56. P. 14–31.

Mastepanov M., Sigsgaard C., Dlugokencky E.J. et al. Large tundra methane burst during onset of freezing // Nature. 2008. V. 456. P. 628–630 [Электронный ресурс]. <http://www.nature.com/news/2008/081203/full/news.2008.1275.html>.

Micaloff Fletcher S.E., Tans P.P., Bruhwiler J.B. et al. CH₄ sources estimated from atmospheric observations of CH₄ and its ¹³C/¹²C isotopic ratios: Inverse modeling of source processes. // Global Biogeochemical Cycles. 2004. V. 18. GB4004. P. 1–17.

Obzhairov A., Shakirov R., Salyuk A. et al. Relations between methane venting, geological structure and seismotectonics in the Okhotsk Sea // Geo – Mar. Lett. 2004. V. 24. P. 135–139.

Ricchiazzi P., Yang S., Gautier C., Sowle D. SBDART: A Research and Teaching Software Tool for Plane-Parallel Radiative Transfer in the Earth's Atmosphere // Bulletin of the American Meteorological Society. 1998. V. 79. No. 10. P. 2102–2114.

Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A. et al. Methane release on the Arctic East Siberian shelf // Geophys. Res. Abstracts. 2007. V. 9. P. 01071.

Shakhova, N., Semiletov I., Panteleev G. The distribution of methane on the Siberian Arctic shelves: Implications for the marine methane cycle // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. P. L09601.

Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Kosmach D. Anomalies of methane in the atmosphere over the East Siberian shelf: Is there any sign of methane leakage from shallow shelf hydrates? // EGU General Assembly 2008, Geophysical Research Abstracts. 2008. No.10. EGU2008-A-01526.

Shakhova N., Semiletov I. First results of monitoring of methane release from the East Siberian Arctic Shelf (ESAS): achievements and gaps // NIOZ Methane Workshop, 18–20 February, 2009. [Электронный ресурс]. URL: http://www.nioz.nl/public/symposia_workshops/arctic/17_semiletov.pdf

Walter K.M., Chanton J.P., Chapin F.S. III et al. Methane production and bubble emissions from arctic lakes: Isotopic implications for source pathways and ages // JGR. 2008. V. 113. G00A08. P. 1–16.

Walter K.M., Smith L.C., Chapin F.S. III. Methane bubbling from northern lakes: present and future contributions to the global methane budget // Phil. Trans. R. Soc. A. 2007a. V. 365. P. 1657–1676.

Walter K.M., Edwards M.E., Grosse G. et al. Thermokarst lakes as a source of atmospheric CH₄ during the last deglaciation // Science. 2007b. V. 318. P. 633–636.

Yurganov L. JCET/UMBC, Baltimore, MD. 2010. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.geocities.com/leonidyurganov/MMM.htm>

Zhuang Q., Melack J.M., Zimov S. et al. Global methane emissions from wetlands, rice paddies, and lakes // Eos. 2009. V. 90. No. 5. P. 37–38.