

МЕТАН В РОССИЙСКОЙ АРКТИКЕ: РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ И РАСЧЕТОВ

канд. физ.-мат. наук. А.А.КИСЕЛЕВ, канд. физ.-мат. наук. А.И.РЕШЕТНИКОВ

Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова (ГГО), Санкт-Петербург, e-mail: kismgo@rambler.ru, alexr35@mail.ru

Приведен краткий обзор российских публикаций за последние годы, посвященных атмосферному метану. Указаны основные физико-химические свойства метана, а также проблемы, связанные с его эмиссией в атмосферу в арктическом регионе и с влиянием потепления климата. Представлены измерения концентрации CH_4 на российских арктических станциях. Обсуждаются оценки эмиссии метана с российской территории и модельные оценки влияния эволюции содержания метана в атмосфере на климат.

Ключевые слова: Арктика, метан, концентрация, эмиссия, парниковый эффект, измерения, модельные оценки.

Метан и его роль в глобальном потеплении. Среди компонент атмосферного воздуха метан (CH_4) занимает очень важное место, обуславливающее пристальный интерес к нему исследователей. Такое повышенное внимание, как известно, вызвано тем, что вклад атмосферного метана в глобальное потепление – второй после вклада CO_2 (их радиационный форсинг равен 0,48 и 1,66 Вт/м² соответственно [МГЭИК, 2007]). В то же время молекула CH_4 «работает» на глобальное потепление значительно эффективнее молекулы углекислого газа: потенциал глобального потепления CH_4 в краткосрочной перспективе в 72, а среднесрочной в 25 раз выше, чем у CO_2 [МГЭИК, 2007]. Измерения показывают, что начиная с доиндустриального периода концентрация метана выросла примерно на 150 %, в то время как концентрация CO_2 лишь на 40 %. Поэтому роль CH_4 как парникового газа постоянно возрастает. Нелишне добавить, что увеличение содержания метана способствует росту концентрации другого парникового и жизнеобеспечивающего газа – озона как в тропосфере [Crutzen, Zimmermann, 1991], так и в стратосфере [Ozone Depletion, 2010].

Низкая эффективность Киотского Протокола, первый этап действия которого завершился в 2012 г., наряду с безуспешными попытками принятия международных, более действенных мер по ограничению эмиссии важнейших парниковых газов в атмосферу, породили поиски иных подходов, направленных на снижение темпов глобального потепления. Сегодня активно предлагается идея сокращения выбросов газов и аэрозолей, чье воздействие на радиационный режим и на климат значительно, но их время пребывания в атмосфере (недели, месяцы или годы) существенно короче, чем у CO_2 (~100 лет), а значит, и отклик климатической системы должен проявиться достаточно быстро (см., напр., [Molina et al., 2009]). В начале 2012 г. создана Коалиция (в составе Бангладеш, Ганы, Канады, Мексики, США и Швеции), объявившая своей целью реализацию этой идеи (<http://www.unep.org/ccac/Portals/24183/docs/CoalitionFramework.pdf>). В мае 2012 г. к инициативе Коалиции присоединились все

страны «Большой восьмерки», в том числе – Россия. Предполагается, что благодаря заявленным Коалицией мерам рост приземной температуры воздуха в период с настоящего времени до 2050 г. не превзойдет 0,5 °С. Главное место в перечне таких «короткоживущих климатических загрязнителей» (в оригинале: Short-Lived Climate Pollutants) занимают «черный углерод» (black carbon) и метан.

Большая часть атмосферного метана имеет биогенное бактериальное происхождение. Химическим путем в атмосфере он не образуется. Поэтому поступление природного метана в атмосферу полностью контролируется его потоками с земной поверхности. Общая среднегодовая глобальная эмиссия CH_4 в среднем составляет 582 Мт с разбросом оценок 503–610 Мт [МГЭИК, 2007], при этом чуть более 1/3 его эмиссии принадлежит естественным источникам и чуть менее 2/3 – антропогенным. Основные естественные источники связаны с потоками CH_4 с заболоченных территорий, пресноводных водоемов, поверхности океана, а также с метаном, образующимся в колониях термитов и выделяемым при сжигании биомассы в результате пожаров. Согласно оценкам [Ozone Depletion, 1994; Бажин, 2000], ежегодно благодаря естественным источникам в атмосферу попадает около 200 Мт CH_4 (с разбросом оценок от 101 до 355 Мт/год), основной вклад в которые вносят заболоченные земли. 50 % их площадей приходится на страны арктического региона, а доля этих стран в естественной эмиссии CH_4 оценивается в 30–50 %. С антропогенной деятельностью связаны потоки метана в атмосферу при добыче ископаемого топлива, с полигонов захоронения бытовых отходов и мусора на свалках, при очистке сточных вод, расширении сельскохозяйственных угодий (рисовых плантаций), разведении крупного рогатого скота и др. Разнородность источников метана – основная причина большой погрешности в оценках их интенсивности.

Разрушение молекул метана происходит в результате его атмосферных химических реакций с гидроксидом (~90 %, см. [Kiselev, Karol, 2000; 2002]) и атомарным хлором (выше 35 км). Определяемое скоростями этих реакций «время жизни» метана в атмосфере оценивается в 8–10 лет [МГЭИК, 2007; Voulgarakis et al., 2013], согласно [Prather et al., 2012], на сегодняшний день оно составляет $9,1 \pm 0,9$ лет. Вследствие того, что указанное «время жизни» многократно превосходит характерное время глобального атмосферного переноса, поле средней концентрации CH_4 почти однородно по горизонтали (что, однако, не исключает повышенного содержания метана в окрестностях источников).

Измерения метана в Российской Арктике. Важной особенностью является то, что за последние сто лет потепление в арктическом регионе происходило примерно вдвое интенсивнее, чем в среднем по земному шару. В частности, рост температуры приземного арктического воздуха за период 1950–2010 гг. составил 0,4 °С в летние и 1,65 °С в зимние месяцы [МГЭИК, 2007]. Одновременно с увеличением температуры приземного слоя воздуха здесь отмечены изменение количества осадков, влагосодержания почвы и речного стока; уменьшение площади морских льдов; увеличение глубины протаивания вечной мерзлоты. При этом общее глобальное потепление не только не исключает экстремальных отрицательных температурных аномалий на региональном уровне (что, например, имело место зимой 2009 и 2010 гг.), но может даже способствовать их усилению. Вследствие сказанного, налаживание регулярного всестороннего мониторинга в Арктическом регионе (в том числе и в России), равно как и анализа и интерпретации получаемых данных, является одной из наиболее актуальных задач ближайшего времени.

Сегодня количество принадлежащих странам арктического региона станций, осуществляющих мониторинг метана, приближается к трем десяткам. Отметим, что некоторые из них начали действовать в 2012 г., т.е. они были оперативно организованы в соответствии с вышеупомянутой инициативой Коалиции (это шведские Kiruna-Stordalen (68° 35' с.ш., 19° 05' в.д.), Norunda (60° 09' с.ш., 17° 48' в.д.) и Svartberget (64° 18' с.ш., 19° 77' в.д.), а также канадская Inuvik (68° 30' с.ш., 133° 53' з.д.); кроме того в планах Канады открытие в 2013 г. еще одной станции Cambridge Bay (69° 07' с.ш., 105° 03' з.д.).

Россия располагает пятью постоянно действующими станциями: Черский (68° 51' с.ш., 161° 53' в.д.), Териберка (69° 12' с.ш., 35° 06' в.д.), Новый Порт (67° 41' с.ш., 72° 52' в.д.), Тикси (71° 05' с.ш., 128° 9' в.д.) и Воейково (59° 57' с.ш., 30° 6' в.д.). Систематические измерения на вышках проводятся также в последние годы в рамках японо-российского проекта (охватывают область 51–63° с.ш., 62–129° в.д.) [Sasakawa et al., 2010] и в Обнинске [Баранов и др., 2010]. Периодически мониторинг метана осуществляется над Западной Сибирью (самолетные измерения [Аршинов и др., 2009а; 2009б]), в акватории моря Лаптевых и прилегающей территории (наблюдения с судов и с борта вертолета в 2003–2009 гг. [Шахова и др., 2007, 2008; Shakhova et al., 2010а, 2010б, 2010в]), в районе сибирских газовых месторождений (см., напр., [Reshetnikov et al., 2000; Решетников и др., 2011; Яговкина и др., 2003]) и вдоль железнодорожных магистралей в ходе эксперимента «Тройка» [Беликов и др., 2006; Виноградова и др., 2007].

Местоположение вышеперечисленных российских станций позволяет выделить местные особенности поведения концентрации метана. Так, одну из них (Териберка, Кольский полуостров) можно рассматривать как фоновую, другую (Новый Порт, полуостров Ямал) – в качестве станции, данные измерений на которой позволяют контролировать техногенные выбросы парниковых газов на близко расположенных месторождениях природного газа и нефти, а третью (Воейково) как станцию в окрестности крупного мегаполиса. Важно также и то, что станции Новый Порт и Тикси находятся в зоне сплошной многолетней мерзлоты с множеством небольших термокарстовых озер, накладывающей отпечаток на формирование поля концентрации метана. Рис. 1–4 иллюстрируют сказанное.

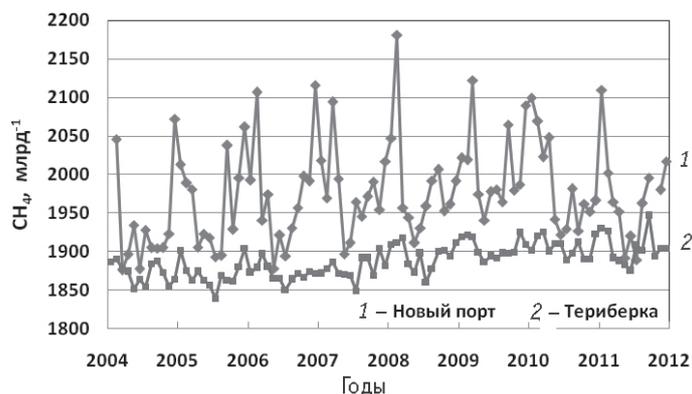


Рис. 1. Среднемесячные данные регулярных фляжечных измерений концентрации CH₄ за период 2004–2011 гг. на станциях Новый Порт (1) и Териберка (2).

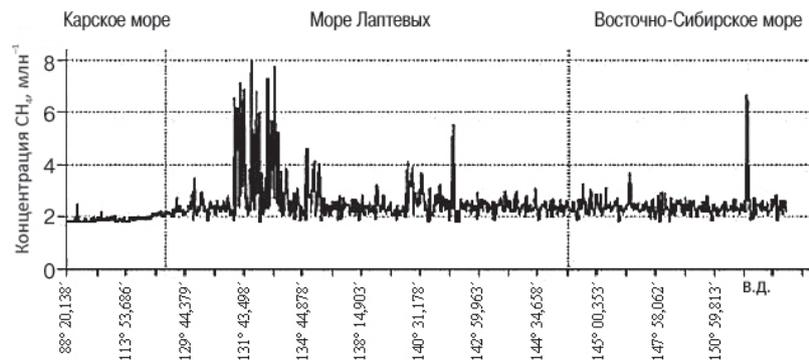


Рис. 2. Обобщенные результаты многолетних измерений концентраций CH_4 как функция долготы места (от побережья п-ова Таймыр до устья р. Индигирки) [Shakhova et al., 2010]. Максимальные значения концентраций близки к долготе расположения ст. Тикси.

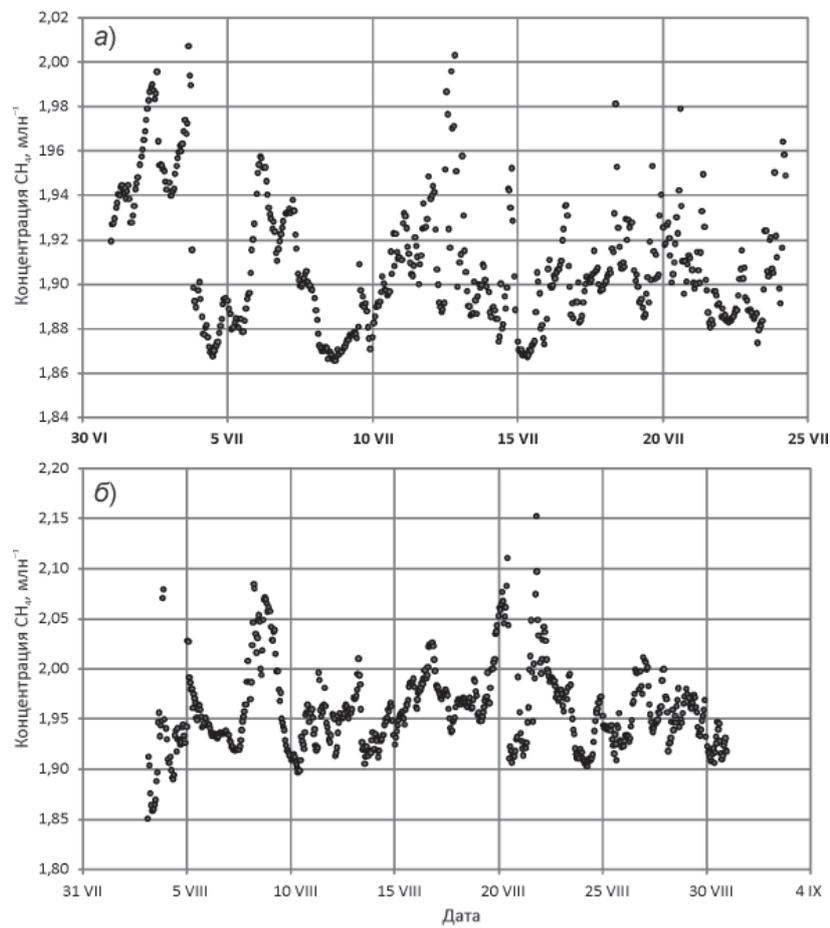


Рис. 3. Результаты непрерывных измерений (осредненных за 1 ч) концентраций CH_4 за июль (а) и август (б) 2011 г. на станции Тикси.

Данные измерений концентрации CH_4 на ст. Териберка близки к результатам мониторинга на других арктических фоновых станциях (как по амплитуде сезонных вариаций, так и по величинам межгодовых изменений), ср. рис. 1 и 3. В то же время концентрации метана, зафиксированные на ст. Новый Порт, существенно (в среднем на 100 млрд⁻¹) превышают аналогичные концентрации на ст. Териберка, поскольку на результатах измерений сказалось влияние техногенных источников. Существенная разница имела место и в амплитуде сезонных колебаний: 60 млрд⁻¹ на ст. Териберка против 200 и более млрд⁻¹ на ст. Новый Порт. При этом максимальные значения концентрации наблюдались в зимние месяцы (правда, это было обусловлено снижением верхней границы пограничного слоя).

Представленные на рис. 2 измеренные концентрации CH_4 (~2500–2600 млрд⁻¹) на 25–30 % выше фоновых значений. Но в диапазоне от 130 до 135° в.д. амплитуды концентрации CH_4 (осредненные за 5 лет наблюдений) превышают фоновые значения концентрации CH_4 даже в 3–4 раза. Проведенные в этом районе в конце августа 2008 г. с борта НЭС «Академик Федоров» измерения содержания CH_4 дали значения: 1905,6, 1876,7 и 1887,5 млрд⁻¹ для 105,25°, 116,12°, 132,42° в.д. соответственно. Регулярные наблюдения за метаном на ст. Тикси, расположенной на берегу моря Лаптевых, начаты летом 2010 г. совместно Финским Метеорологическим институтом, ГГО и NOAA/ESRL (США). На рис. 3 представлены результаты двухмесячных непрерывных наблюдений на этой станции в 2011 г.: среднемесячная концентрация CH_4 составила 1909 ± 30 млрд⁻¹ в июле и 1959 ± 42 млрд⁻¹ в августе; максимальная амплитуда колебаний концентрации CH_4 достигала 140 млрд⁻¹ при максимальном значении концентрации 2008 млрд⁻¹ в июле и около 300 млрд⁻¹ при максимальном значении 2150 млрд⁻¹ в августе. Отметим, что максимальное значение приходилось на вторую половину августа, характеризующуюся и максимальными дневными температурами приземного слоя воздуха. Анализ возможных причин столь значительных расхождений результатов мониторинга в этом регионе содержится в [Решетников, Ивахов, 2012].

Рис. 4 свидетельствует о превышении фоновых концентраций CH_4 в районе станции в период интенсивного таяния вечной мерзлоты (июль, август, сентябрь) на 5–10 %. Отметим, что по данным фляжечных наблюдений такое превышение в летние

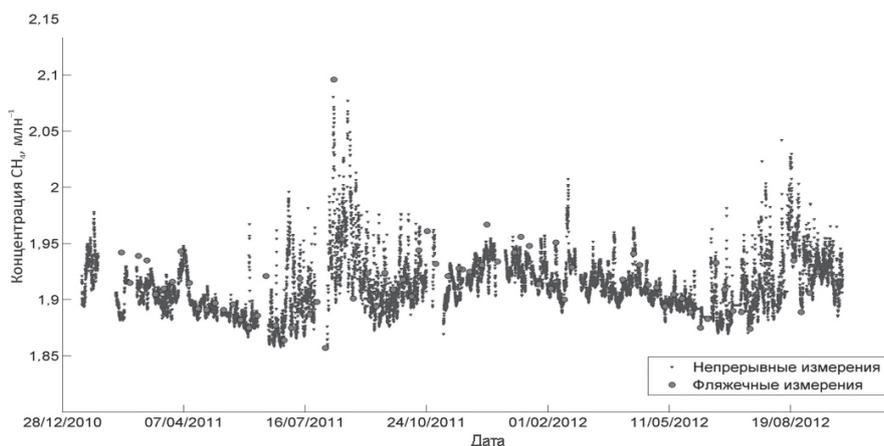


Рис. 4. Результаты непрерывных и фляжечных измерений CH_4 из павильона «Чистый воздух» ст. Тикси.

месяцы было меньше: оно не превышало 2,08 млрд⁻¹ в 2011 г. и 1,93 млрд⁻¹ в 2012 г. Таким образом, комплекс измерений содержания метана на российских станциях дает основу для проведения оценок объемов его эмиссии от антропогенных и природных источников с территории РФ.

Оценки эмиссии метана с российской территории. Величину потока метана в атмосферу с поверхности переувлажненных территорий определяют как экспериментально, так и модельными методами. И.Л.Калужный и др. [2009] произвели измерения эмиссии CH₄ на олиготрофном болотном массиве Ламмин-Суо, расположенном в 1 км к юго-востоку от поселка Ильичево Ленинградской области. По результатам этого мониторинга авторы разработали модель эмиссии метана на болотных массивах. Установлена зависимость величины потока CH₄ от уровня болотных вод и температуры активного торфяного слоя. Большой объем информации получен по данным измерений в Западно-Сибирском регионе, в частности в районе Васюганских болот [Васюганское болото..., 2000]. Измерения естественных потоков CH₄ в тундре (район дельты р. Лены – устья Колымы) представлены в работе [Ривкина и др., 2006].

Иногда при решении локальных задач используются параметризации потока метана (см. напр., [Zimov et al., 2006; Надежина и др., 2011]). Влияние болотных экосистем Северной Евразии на эмиссию метана обсуждается в [Денисов и др., 2010]. Авторы работы [Глаголев и др., 2009] для внутриболотных озер лесотундры, северной тайги и подтайги Западной Сибири получили значения эмиссии CH₄ 17,6, 44,8 и 169,7 мг/м² сутки соответственно. Все приведенные значения сравнимы по порядку величины с оценками потоков метана от заболоченных земель. Общий выброс CH₄ с переувлажненных территорий России оценивается величиной ~ 21 Мт/г [Киселев, Кароль, 2003, 2005].

Объем выбросов метана при добыче природного газа и подземной добыче угля, как правило, определяется решением обратной задачи. Именно этот метод был использован при оценке эмиссии метана из района крупнейших газовых месторождений Западной Сибири (Уренгойского, Ямбургского, Медвежьего и др.), которая составила 2–3 Мт/г [Jagovkina et al., 2000; Яговкина и др., 2003]. Суммарные потери метана при его добыче на газовых и нефтяных месторождениях России, согласно [Гинзбург и др., 2011], достигают 14±4,5 Мт/г. Суммарная оценка объемов эмиссии метана с российской территории складывается в основном из эмиссии с поверхности переувлажненных территорий (около 50 %), потерь при добыче и транспорте природного газа (технология и потери за счет фугитивных утечек), нефти и угля (около 30–40 %), а также с полигонов захоронения твердых бытовых отходов (около 5 %). Метан выбрасывается в атмосферу и в качестве продуктов жизнедеятельности крупных жвачных животных, в российских условиях вклад этих выбросов составляет примерно 2–5 %. Таким образом, общий выброс CH₄ с территории России можно оценить в 40–45 Мт/г [Киселев, Кароль, 2003, 2005; Гинзбург и др., 2011].

Криозона – «бомба замедленного действия»? В последние годы в РФ и за рубежом широко дискутируется вопрос о возможном вкладе криолитозоны Восточной Сибири в формирование полей концентрации метана в арктическом регионе. При этом рассматриваются несколько возможных версий эмиссии метана, а именно: а) выделение газообразного метана из газогидратов, большие залежи которых обнаружены на шельфах морей Лаптевых, Новосибирского и Чукотского; б) выделение метана, захороненного в слое многолетней мерзлоты, при увеличении периода и глубины ее

протаивания (к этой версии примыкает и версия, связанная с ролью небольших и относительно неглубоких карстовых озер, образованных в местах интенсивного таяния многолетней мерзлоты); в) вклад одной из крупнейших рек Восточной Сибири – Лены в перенос растворенного метана в моря Северного Ледовитого океана. Гидраты метана представляют собой похожую на лед субстанцию – смесь воды и метана, существующую при температурах не выше 20 °С и давлениях не ниже 3–5 МПа в покрытых водой осадочных породах на глубине 300–500 м. 99 % гидратов в глобальном масштабе сконцентрировано на континентальном шельфе [Collett et al., 2009]. Оставшийся один процент приходится на осадочные породы над слоем многолетней мерзлоты на больших морских глубинах. Плотность CH_4 в гидратах более чем в 160 раз превосходит плотность чистого метана при стандартных давлении и температуре. До сих пор существует большая неопределенность в том, насколько чувствительны газогидраты, находящиеся в осадочных породах под слоем воды в 300–500 м, к потеплению климата. Масса метана в арктических газовых гидратах оценивается как 10^4 – 10^7 Мт, а его залежи под ледяным покровом как $2,7 \times 10^6$ Мт (с десятикратной (!) ошибкой) [Yakushev, Chuvilin, 2000]. По оценкам геологов, содержание гидратов только на континентальном шельфе морей Восточной Сибири составляет более чем $3,5 \times 10^5$ Мт С [Shakhova et al., 2010]. Согласно более консервативной оценке [Boswell, Collett, 2011], глобальное содержание углерода в гидратах составляет $1,8 \times 10^6$ Мт.

Ряд работ посвящен исследованию деградации зоны вечной мерзлоты в условиях современного потепления [Малевский-Малевиц и др., 2005, 2007], а также количественным оценкам отклика эмиссии метана на эту деградацию [Anisimov, 2007; Anisimov et al., 2012]. Авторы работы [Аржанов и др., 2007], используя данные мониторинга, с помощью разработанной ими модели многолетней мерзлоты, позволяющей рассчитывать характеристики термического и гидрологического режимов почвы, провели численные эксперименты по оценке глубины слоя сезонного протаивания пород в Северном полушарии для периода 1960–2000 гг. В то же время в некоторых работах (см., напр., [Petrenko et al., 2010]) подчеркивается высокая степень неопределенности этого источника эмиссии CH_4 , в частности, на шельфе моря Лаптевых он оценивается в 1–12 Мт С/год [McGuire et al., 2009]. Здесь также нельзя не отметить, что модельные расчеты [Dmitrenko et al., 2011], а также наблюдения температуры на разных глубинах на шельфе показывают: текущего потепления недостаточно, чтобы вызвать дестабилизацию вечной мерзлоты на шельфе моря Лаптевых.

Модельные исследования роли метана в эволюции климатической системы. Количество российских работ, посвященных оценкам отклика климатической системы в региональном масштабе на изменения эмиссии атмосферного метана, очень невелико (см. напр., [Елисеев и др., 2008, 2011; Киселев, Кароль, 2003, 2005; Mokhov, Eliseev, 2008]). Так, согласно модельным оценкам [Киселев, Кароль, 2003], при гипотетическом десятикратном увеличении содержания CH_4 в тропосфере северных умеренных широт (вследствие его прорыва из недр Земли) температура воздуха в этом слое возрастет на 0,5 °С. Исследованию зависимости времени жизни метана и окиси углерода СО и окислительной способности атмосферы гидроксидом от величины эмиссии CH_4 , СО и азотных окислов посвящены работы [Kiselev, Karol, 2000, 2002]. В Институте физики атмосферы им. А.М.Обухова (РАН) разработана климатическая модель промежуточной сложности, с помощью которой проведен ряд оценок. Например, вычислено изменение приповерхностной температуры в

XXI в. вследствие роста содержания в атмосфере парниковых газов (в том числе метана). В зависимости от выбранного сценария выбросов парниковых газов, глобальное повышение приповерхностной температуры составило от 2,5 до 4,1 К. При этом повышение приповерхностной температуры наиболее значительно в высоких широтах, особенно в Северном полушарии, а также в целом больше над сушей, чем над океаном, а потепление у поверхности больше в зимний период, чем в летний. Максимальное потепление отмечается в Арктике и над сушей субполярных широт Северного полушария, достигая в этих регионах к концу XXI в. 6–10 К относительно конца XX в. [Елисеев и др., 2011].

Заключение. Из сказанного выше можно получить представление о том, в какой степени продвинулись исследования последних лет, посвященные различным аспектам проблемы метана в арктической области. Очевидно, полученные результаты должны стать стартовой площадкой для последующих исследований. Необходимы дальнейшее развитие сети станций для мониторинга CH_4 (и других парниковых газов), совершенствование средств обработки и анализа полученных данных. Отметим недостаточную изученность естественных механизмов эмиссии метана и, соответственно, их зависимости от множества факторов, таких, как температура активного слоя почвы, ее влажность, уровень болотных вод, мощность торфяных пластов на болотах, осадочные отложения на дне карстовых озер, содержание метана в многолетней мерзлоте, изменение рН в Северном Ледовитом океане, особенно в дельтах крупных рек и др. Нуждаются в уточнении и антропогенные составляющие эмиссии метана в атмосферу, в частности в результате потерь и утечек при добыче и транспорте природного газа и пр. Наконец, очень важно расширение и углубление теоретических (в первую очередь модельных) исследований для изучения и оценки роли и характера взаимодействия атмосферного метана с климатической системой и экосистемой Земли.

Работа выполнена в рамках темы ЦНТП 1.3.2 и частично при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 11-05-00750а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аржанов М.М., Елисеев А.В., Демченко П.Ф., Мохов И.И. Моделирование изменений температурного и гидрологического режимов приповерхностной мерзлоты с использованием климатических данных (реанализа) // Криосфера Земли. 2007. Т. XI. № 4. С. 65–69.
- Аришинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Иноуёе Г. Пространственная и временная изменчивость концентрации CO_2 и CH_4 в приземном слое воздуха на территории Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2009а. Т. 22. № 2. С. 183–192.
- Аришинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Иноуёе Г., Максюттов Ш., Мачида Т., Фофонов А.В. Вертикальное распределение парниковых газов над Западной Сибирью по данным многолетних измерений // Оптика атмосферы и океана. 2009б. Т. 22. № 5. С. 457–464.
- Баранов Ю.И., Бугрим Г.И., Вишератин К.Н., Гончаров Н.В., Кашин Ф.В. Комплексный мониторинг содержания метана, закиси азота, окиси и двуокиси углерода в приземном воздухе атмосферы города // Труды регионального конкурса научных проектов в области естественных наук. 2010. Вып. 2. Калужский научный центр. С. 552–557.
- Беликов И.Б., Бренникмайер К.А.М., Еланский Н.Ф., Ралько А.А. Приповерхностная концентрация метана и оксидов углерода над континентальной территорией России по результатам экспериментов TROICA // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 1. С. 50–63.

Васюганское болото: Природные условия, структура и функционирование / Под ред. Н.И.Инишевой. Томск: ЦНТИ, 2000. 136 с.

Виноградова А.А., Федорова Е.И., Беликов И.Б., Гинзбург А.С., Еланский Н.Ф., Скороход А.И. Временные изменения концентраций углекислого газа и метана в городских условиях // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 5. С. 651–663.

Бажин Н.М. Метан в атмосфере // Соросовский образовательный журнал. 2000. Т. 6. № 3. С. 52–57.

Гинзбург А.С., Виноградова А.А., Федорова Е.И. Некоторые особенности сезонного хода содержания метана в атмосфере Северной Евразии // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 1. С. 50–63.

Глаголев М.В., Клепцова И.Е., Казанцев В.С., Максюттов Ш.Ш. Эмиссия CH_4 из болотных ландшафтов подтайги Западной Сибири: к «стандартной модели» Ab4 // Восьмое сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу: Материалы Российской конференции / Под ред. М.В. Кабанова. Томск: Аграф-Пресс, 2009. С. 240–242.

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.

Елисеев А.В., Мохов И.И., Аржанов М.М., Демченко П.Ф., Денисов С.Н. Оценки изменений климата с помощью модели промежуточной сложности, включающей углеродный и метановый цикл // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 2. С. 139–152.

Елисеев А.В., Мохов И.И., Мурышев К.Е. Оценки изменений климата XX–XXI веков с использованием версии климатической модели ИФА РАН, включающей модель общей циркуляции океана // Метеорология и гидрология. 2011. № 2. С. 5–16.

Калюжный И.Л., Лавров С.А., Решетников А.И., Парамонова Н.Н., Привалов В.И. Эмиссия метана на олиготрофном болотном массиве северо-запада России // Метеорология и гидрология. 2009. № 10. С. 20–30.

Киселев А.А., Кароль И.Л. Возможные последствия высвобождения метана из толщи вечной мерзлоты на территории России // Современные проблемы экологической метеорологии и климатологии / Под ред. Г.В. Менжулина. СПб.: Наука, 2005. С. 102–113.

Киселев А.А., Кароль И.Л. Отклик газового состава тропосферы северных умеренных широт на возможный прорыв метана из недр Земли в атмосферу // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39. № 5. С. 579–588.

Малевский-Малевич С.П., Молькентин Е.К., Надежина Е.Д., Павлова Т.В. Модельные оценки изменений температуры воздуха и эволюция теплового состояния многолетнемерзлых пород // Криосфера Земли. 2005. № 3. С. 36–44.

Малевский-Малевич С.П., Молькентин Е.К., Надежина Е.Д., Павлова Т.В., Семиошина А.А. Моделирование и анализ возможностей экспериментальной проверки эволюции термического состояния многолетнемерзлых грунтов // Криосфера Земли. 2007. № 1. С. 29–36.

МГЭИК, 2007: Отчет Межправительственной группы экспертов по изменениям климата, 2007. URL: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_ru.pdf [дата обращения 02.04.2013]

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.

Решетников А.И., Зинченко А.В., Парамонова Н.Н., Привалов В.И., Ивахов В.М., Казакова К.В. Результаты мониторинга основных парниковых газов на арктических станциях Росгидромета // Труды Главной геофизической обсерватории. 2011. Вып. 564. С. 223–240.

- Решетников А.И., Ивахов В.М.* Результаты непрерывных наблюдений за концентрацией метана на станции Тикси (сравнение с данными наблюдений на шельфе моря Лаптевых) // Труды Главной геофизической обсерватории. 2012. Вып. 566. С. 257–269.
- Ривкина Е.М., Краев Г.Н., Кривушин К.В., Лауринвичюс К.С., Федоров-Давыдов Д.Г., Холодов А.Л., Щербакова В.А., Гиличинский Д.А.* Метан в вечномёрзлых отложениях северо-восточного сектора Арктики // Криосфера Земли. 2006. №3. С. 23–41.
- Шахова Н.Е., Семилетов И.П., Салюк А.Н., Бельчева Н.А., Космач Д.А.* Аномалии метана в приповерхностном слое атмосферы на шельфе Восточно-Сибирской Арктики // Доклады АН. 2007. Т. 414. № 6. С. 819–823.
- Шахова Н.Е., Семилетов И.П., Сергиенко В.И., Салюк А.Н., Бельчева И.И., Космач Д.А.* Состояние вопроса о роли Восточно-Сибирского шельфа в современном цикле метана // Изменение окружающей среды и климата. Природные катастрофы / Под ред. В.М. Котлякова. М.: Изд-во «Пробел», 2008. С. 164–176.
- Яговкина С.В., Кароль И.Л., Zubov V.A., Лагун В.Е., Решетников А.И., Розанов Е.В.* Оценки потоков метана в атмосферу с территории газовых месторождений севера Западной Сибири с использованием трехмерной региональной модели переноса // Метеорология и гидрология. 2003. № 4. С. 49–62.
- Anisimov O.* Potential feedback of thawing permafrost to the global climate system through methane emission // Environmental Research Letters. 2007. № 2. doi:10.1088/1748-9326/2/4/045016.
- Anisimov O.A., Borzenkova I.I., Lavrov S.A., Strelchenko J.G.* The current dynamics of the submarine permafrost and methane emissions on the shelf of the Eastern Arctic seas // Ice and Snow. 2012. № 2. P. 97–105.
- Boswell R., Collett T.S.* Current perspectives on gas hydrate resources // Energy and Environmental Science. 2011. Vol. 4. P. 1206–1215.
- Collett T., Johnson A., Knapp C., Boswell R.* Natural gas hydrates: A review // Natural Gas Hydrates-Energy Resource Potential and Associated Geologic Hazards. Tulsa, OK: American Association of Petroleum Geologists, 2009. P. 146–219.
- Crutzen P.J., Zimmermann P.H.* The changing photochemistry of the troposphere // Tellus. 1991. Vol. AB43. P. 136–151.
- Dmitrenko I.A., Kirillov S.A., Tremblay L.B., Kassens H., Anisimov O., Lavrov S.A., Razumov S.O., Grigoriev M.N.* Recent changes in shelf hydrography in the Siberian Arctic: Potential for subsea permafrost instability // Journal of Geophysical Research – Oceans. 2011. Vol. 116. C10027. doi: 10.1029/2011JC007218.
- Jagovkina S.V., Karol I.L., Zubov V.A., Lagun V.E., Reshetnikov A.I., Rozanov E.V.* Reconstruction of the methane fluxes from the west Siberia gas fields by the 3D regional chemical transport model // Atmospheric Environment. 2000. Vol. 34. № 29–30. P. 5319–5328.
- Kiselev A.A., Karol I.L.* Modeling of the long term tropospheric trends of hydroxyl radical for the Northern Hemisphere // Atmospheric Environment. 2000. Vol. 34. № 29–30. P. 5271–5282.
- Kiselev A.A., Karol I.L.* The ratio between nitrogen oxides and carbon monoxide total emissions as precursors of tropospheric hydroxyl content evolution // Atmospheric Environment. 2002. Vol. 36. P. 5971–5981.
- McGuire D., Christensen T.R., Hayes D., Heroult A., Euskirchen E., Kimball J.S., Koven C., Lafleur P., Miller P.A., Oechel W., Peylin P., Williams M., Yi Y.* An assessment of the carbon balance of arctic tundra: comparisons among observations, process models, and atmospheric inversions // Biogeosciences. 2012. Vol. 9. P. 3185–3204. doi:10.5194/bg-9-3185-2012.
- Mokhov I.I., Eliseev A.V.* Explaining the eventual transient saturation of climate carbon cycle feedback // Carbon Balance and Management. 2008. Vol. 3–4. doi: 10.1186/1750-0680-3-4.

Molina M., Zaelke D., Madhava Sarma K., Andersen A.O., Ramanathan V., Kaniaru D. Reducing abrupt climate change risk using the Montreal Protocol and other regulatory actions to complement cuts in CO₂ emissions // Proceedings of National Academy of Sciences. 2009. Vol. 106. № 49. P. 20616–20621.

Ozone Depletion, 1994: Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1994. WMO Global Ozone Research and Monitoring Project. Report № 37. Geneva, 1994.

Ozone Depletion, 2010: WMO Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010. WMO Global Ozone Research and Monitoring Project. Report № 52. Geneva, 2010.

Petrenko V.V., Ethiridge D.M., Weiss R.F., Brook E.J., Shaefer H., Severinghaus J.P., Smith A.M., Lowe D., Hua Q., Riedel K. Methane from the East Siberian Arctic Shelf // Science. 2010. Vol. 329. (5996). P. 1146–1147.

Prather M.J., Holmes C.D., Hsu J. Reactive greenhouse gas scenarios: Systematic exploration of uncertainties and the role of atmospheric chemistry // Geophysical Research Letters. 2012. Vol. 39. L09803. doi:10.1029/2012GL051440.

Reshetnikov A.I., Paramonova N.N., Shashkov A.A. An evaluation of historical methane emissions from the Soviet gas industry // Journal of Geophysical Research. 2000. Vol. 105 (D3). P. 3517–3529.

Sasakawa M., Shimoyama K., Machida T., Tsuda N., Suto H., Arshinov M., Davydov D., Fofonov A., Krasnov O., Saeki T., Koyama Y., Maksyutov S. Continuous measurements of methane from a tower network over Siberia // Tellus. 2010. Vol. 62. Issue 5. P. 403–416.

Shakhova N., Semiletov I., Gustafsson O. Methane from the East Siberian Arctic Shelf-Response // Science. 2010a. Vol. 329 (5996). P. 1147–1148.

Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., Rekant P., Salyuk A., Kosmach D. Geochemical and geophysical evidence of methane release from the inner East Siberian Shelf // Journal of Geophysical Research. 2010b. Vol. 115. doi:10.1029/2009JC005602.

Shakhova, N., Semiletov I., Salyuk A., Joussupov V., Kosmach D., Gustafsson O. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf // Science. 2010. Vol. 327 (5970). P. 1246–1250.

Voulgarakis A., Naik V., Lamarque J.F., Shindell D.T., Young P., Prather M.J., Wild O., Field R., Sudo K., Szopa S., Zeng G. Analysis of present day and future OH and methane lifetime in the ACCMIP simulations // Atmospheric Chemistry and Physics. 2013. Vol. 13. P. 2563–2587. doi: 10.5194/acp-13-2563-2013.

Yakushev V.S., Chuvilin E.M. Natural gas and hydrate accumulation within permafrost in Russia // Cold regions Science and Technology. 2000. Vol. 31. P. 189–197.

Zimov S.A., Schuur E.A., Chapin F.S. Climate change: Permafrost and the global carbon budget // Science. 2006. Vol. 312. P. 1612–1613. doi: 10.1126/science.1128908.

A.A.KISELEV, A.I.RESHETNIKOV

METHANE IN THE RUSSIAN ARCTIC: MEASUREMENTS AND MODEL ESTIMATIONS

The short review of Russian recent publications devoted to atmospheric methane problem is shown. The basic physical and chemical features of methane are mentioned. Also the methane emission and climate warming effect problems are shown. The relevant CH₄ concentration measurements at the Russian Arctic stations are presented. The estimations of both methane emission from the Russian territory and climatic effect of atmospheric methane content are discussed.

Keywords: Arctic, methane, concentration, emission, greenhouse effect, measurements, model estimations.