Сезонная и межгодовая изменчивость атмосферного метана над морями Северного Ледовитого океана по спутниковым данным

Л.Н. Юрганов¹, А. Лейфер², К. Лунд Майр³

¹ *University of Maryland, Baltimore County, Baltimore, 21250, USA*
E-mail: yurganov@umbc.edu

² *Bubbleology Research International, Santa Barbara, 93106, USA*
E-mail: ira.leifer@bubbleology.com

³ *Norwegian Institute for Air Research, Kjeller, 2007, Norway*
E-mail: cathrine.lund.myhre@nilu.no

Глобальное увеличение концентрации метана, начиная с 2007–2008 гг. после десятилетия ее стабильности, требует изучения и объяснения. Расположение и характер источников растущих выбросов метана по-прежнему дискуссионны. Потепление Арктики, ускорившееся также с 2007 г., стимулировало предположения относительно ускорения диссоциации гидратов метана в Арктике и появления новой климатической положительной обратной связи. К сожалению, систематические натурные измерения метана в атмосфере над поверхностью морей Северного Ледовитого океана (СЛО) отсутствуют. В этих условиях спутниковые измерения в среднем ИК диапазоне, где уходящее излучение Земли и атмосферы превалирует над отраженным солнечным, могут быть полезны для круглогодичного исследования метана в Арктике. Представлен анализ измерений метана в нижней тропосфере над СЛО по данным орбитальных спектрометров, работающих по полосе ν_4 около 1300 см^{-1} . В данной работе были определены районы и периоды в Арктике как благоприятные, так и неблагоприятные для спутниковых измерений. Чувствительность ИК приборов к нижней тропосфере зависит от вертикального температурного градиента. Нами был выбран параметр, который характеризует степень зависимости чувствительности спутникового прибора от температурного контраста (ТК) в атмосфере: разность между температурой поверхности и температурой на высоте 4 км. Измерения метана при величинах $\text{ТК} < 10^\circ\text{C}$ были отброшены как не отражающие концентрации в нижней тропосфере. Обширные районы СЛО показали достаточно большие значения ТК также и в холодный период года. Максимальные положительные аномалии концентрации метана наблюдаются в ноябре – декабре. В среднем за год максимальные аномалии метана наблюдаются вдоль побережий Норвегии, Новой Земли и Шпицбергена. По предварительной оценке моря Западной Арктики ответственны за ~ 68%, а моря Восточной Арктики за ~ 12% метана, выбрасываемого СЛО. В целом эмиссия метана от СЛО составляет ~ 68% выбросов континентальной Арктики к северу от 60° с.ш. Однако спутниковые измерения с 2002 г. не дают пока достаточных оснований говорить о решающем вкладе Арктики в наблюдаемый рост глобального метана.

Ключевые слова: AIRS, IASI, Арктика, Северный Ледовитый океан, атмосферный метан

Одобрена к печати: 09.02.2016
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-107-119

Введение

Метан (CH_4) играет важную роль в парниковом эффекте атмосферы, его радиационный эффект (radiative forcing) составляет $0,48\text{ Вт/м}^2$, что можно сравнить с суммарным радиационным эффектом атмосферных газов: $2,83\text{ Вт/м}^2$ (IPCC, 2013). Принято считать, что подавляющая часть всех источников метана сосредоточена на суше (AMAP Assessment, 2015). В целом это правильно, однако в случае Северного Ледовитого океана (СЛО) существует большая неопределенность, связанная с экспериментальными трудностями измерений, особенно в холодный период года. Так, согласно (AMAP Assessment, 2015), диапазон оценок эмиссии метана от СЛО составляет от 1 до 17 Тг CH_4 в год ($1\text{ Тг} = 10^{12}\text{ г}$). Постоянные измерения концентраций метана на 3–4 прибрежных станциях недостаточны для надежных оценок вклада огромных площадей океана. Самолетные (Kort et al., 2012) и корабельные (Shakhova et al., 2010, 2014) измерения над океаном носят эпизодический характер.

Между тем, большой интерес вызывает гипотеза о возможности выброса значительных объемов метана со дна СЛО, вызванного потеплением морской воды (Archer, 2007). По современным оценкам подо дном СЛО находится от 455 до 2500 Пг С ($1\text{ Пг} = 10^{15}\text{ г}$) в виде гидратов

метана (AMAP Assessment, 2015). Диссоциация даже небольшой доли гидратов метана в условиях современного потепления Арктики способна существенно повысить его концентрацию в атмосфере, в первую очередь – в самой Арктике. Это может привести к добавочному нагреванию воздуха вследствие парникового эффекта, другими словами, к положительной климатической обратной связи (Сергиенко и др., 2012). Следует отметить, тем не менее, что возможность интенсивного выброса метана от гидратов, по крайней мере в районе морей Восточной Арктики (МВА), вызывает серьезные возражения (Dlugokencky et al., 2011; Анисимов и др., 2014). Из других возможных источников метана можно назвать процесс образования метана в поверхностном слое воды и в тающем морском льде (Damm et al., 2015). Весьма вероятны также эмиссия метана от таяния субаквальной мерзлоты и выбросы вблизи геологических разломов и русел палеорек (Анисимов и др., 2014).

Спутниковые измерения необходимы для получения данных о метане в нижней атмосфере над СЛО и его изменчивости как сезонной, так и межгодовой. Существует два типа спутниковых спектрометров, позволяющих оценить концентрацию метана по измерениям в надир. К первому типу относятся приборы, работающие по отраженному от поверхности излучению Солнца в спектральных областях около 1,7 или 2,3 мкм (Frankenberg et al., 2005; Tadic et al., 2014). Эти приборы непригодны для измерений в Арктике во время полярной ночи, а в летнее время года отношение сигнала к шуму недостаточно из-за низких углов Солнца и крайне малых значений коэффициента отражения от воды и льда (всего несколько процентов). Примерами спутниковых приборов первого типа являются SCIAMACHY и TANSO/NIR (Near IR). Приборы второго типа (AIRS, IASI, TANSO/TIR), использующие уходящее излучение Земли в средней ИК области около 7,8 мкм (Thermal IR, TIR), лишены недостатков приборов первого типа (Xiong et al., 2010; Razavi et al., 2009), однако имеют пониженную чувствительность к нижней тропосфере. Для надежного определения концентраций атмосферных газов ниже высоты 5 км необходим достаточно большой положительный температурный контраст (ТК) между температурами подстилающей поверхности и пограничного слоя с одной стороны и температурами вышележащих слоев воздуха – с другой. Анисимов и Кокорев (Анисимов, Кокорев, 2015) проанализировали данные AIRS для метана в июле – октябре, когда такие условия выполняются для значительной части СЛО. Введение порогового значения ТК для фильтрации случаев недостаточного контраста позволило бы использовать круглогодичные данные.

В данной работе представлены результаты анализа имеющихся в свободном доступе данных AIRS и IASI для СЛО. Нами выбран критерий надежности данных по чувствительности к нижним слоям тропосферы, где вариации метана наиболее вероятны. Проведено сравнение с прямыми измерениями в приземном слое. Получены предварительные оценки эмиссии метана от СЛО.

Спутниковые данные и контроль их качества

Как днем, так и ночью, спектр уходящего излучения Земли может быть измерен с высокой точностью. Все методы восстановления профиля метана, тем не менее, сталкиваются с принци-

пиальными ограничениями точности. Если над нижележащим слоем находятся более теплые слои, то прибор регистрирует радиацию, излученную не поверхностью, а газами, находящимися в вышележащих атмосферных слоях. По этой причине данными методами невозможно измерить концентрацию газов в приземном слое даже приблизительно в случае приземной температурной инверсии. При отсутствии инверсии можно ожидать, что чувствительность метода будет тем выше, чем больше температурный градиент в атмосфере. В применении к Арктике это значит, что наиболее благоприятные условия для измерения метана складываются над относительно теплой поверхностью океана, свободной от льда, что характерно для морей Западной Арктики (МЗА). Зимние инверсии, наблюдаемые над покрытыми льдом МВА, приводят к тому, что спутник преимущественно чувствителен к концентрации метана в средней атмосфере. Однако в июле – октябре, когда акватория МВА свободна от льда, можно ожидать отличную от нуля чувствительность как для AIRS, так и для IASI даже к приземному слою атмосферы.

Вышесказанное иллюстрируется *рис. 1* и *2*. На *рис. 1* показаны значения средней концентрации метана в диапазоне высот от подстилающей поверхности до 4 км, усредненные для всех ноябрьских и декабрьских значений с 2009 по 2012 гг. для морей СЛО к северу от 67° с.ш. по данным прибора IASI, в зависимости от температурного контраста (ТК). Последний определен нами как разница между температурой подстилающей поверхности и температурой воздуха для уровня 600 гПа (~4 км). Эта эмпирическая зависимость имеет плато для всех $TK > 10^{\circ}C$. Можно предположить, что для $TK < 10^{\circ}C$, когда измеренная концентрация метана понижена, чувствительность методики к пограничному слою недостаточна. Для обоснования этого предположения обратимся к *рис. 2*.

Рис. 1. Средняя концентрация метана в слое 0–4 км над СЛО в ноябре – декабре 2009–2012 гг. по данным IASI как функция температурного контраста (ТК). Вертикальные штрихи соответствуют одному среднеквадратичному отклонению отдельных измерений

Рис. 2. (а) – концентрации метана в слое 0–4 км, измеренные AIRS (обработка по версии 6) 6 марта 2013 г., контроль качества, рекомендованный НАСА, красными кружками отмечены случаи, рассмотренные в тексте; (б) – те же данные, но пиксели для $TK < 10^\circ\text{C}$ удалены; (в) и (г) – весовые функции для восстановления профилей метана над морями Баренцевым и Лаптевых соответственно, приведены значения давления для центров слоев в гПа; (д) – профили температуры воздуха по данным AIRS и первое приближение профиля метана (априорное) в методике восстановления (сплошная черная линия, верхняя шкала); (е) – априорная концентрация в нижнем 4-км слое в зависимости от широты

Рисунок 2а представляет собой карту единичных измерений средней концентрации метана в слое 0–4 км по данным прибора AIRS для 6 марта 2013 г., причем данные, не удовлетворяющие стандартным критериям контроля качества (например, для сплошной облачности), удалены, но данные для $TK < 10^\circ\text{C}$ присутствуют. На рис. 2б также удалены все точки для $TK < 10^\circ\text{C}$. Отметим, что все удаленные точки отвечают пониженным концентрациям метана в согласии с рис. 1.

Температурные профили по данным AIRS (рис. 2д) показаны для двух случаев: для свободного ото льда Баренцева моря и покрытого льдом моря Лаптевых (красные кружки на картах). Над Баренцевым морем наблюдались максимум температуры у поверхности и плавное падение температуры с высотой, при этом $T_K=26^\circ\text{C}$. Над морем Лаптевых, напротив, имела место приземная температурная инверсия и $T_K=-2^\circ\text{C}$.

Согласно (Rodgers, 2000), оцененный по данным дистанционного зондирования профиль концентрации газа $C_{\text{изм}}$ связан с истинной $C_{\text{ист}}$ и априорной $C_{\text{апр}}$ концентрациями уравнением: $C_{\text{изм}} - C_{\text{апр}} = \mathbf{K} \times (C_{\text{ист}} - C_{\text{апр}})$, где $\mathbf{K}$ – весовая функция (averaging kernel), которая представляет собой квадратную матрицу (в нашем случае, когда число слоев в атмосфере взято равным 10, 10×10). $\mathbf{K}$ описывает чувствительность аномалии концентрации, восстановленной для каждого слоя ($C_{\text{изм}} - C_{\text{апр}}$), по отношению к истинной аномалии концентрации ($C_{\text{ист}} - C_{\text{апр}}$) в каждом слое в атмосфере. Для двух крайних случаев при $\mathbf{K} = 1$ (единичная матрица) $C_{\text{изм}} = C_{\text{ист}}$, и для $\mathbf{K} = 0$ – $C_{\text{изм}} = C_{\text{апр}}$. Можно сказать, что примененная методика восстанавливает не сам профиль концентрации, а профиль аномалии концентрации относительно априорного профиля. Априорный профиль $C_{\text{апр}}$ в нашем случае (рис. 2д и 2е) зависит только от широты и не имеет сезонного хода.

На рис. 2в и 2г представлены весовые функции для Баренцева моря и моря Лаптевых. Толстые линии соответствуют двум нижним слоям атмосферы ниже 4 км высоты. Как и предполагалось выше, для нижнего слоя атмосферы над морем Лаптевых определение концентрации метана теряет смысл вообще (весовая функция теряет устойчивость), а чувствительность для второго слоя падает в 3 раза. Однако уже для третьего слоя снизу (с центром около 506 гПа) весовые функции для этих двух случаев отличаются незначительно. Как легко видеть, зависимость весовой функции от температурного профиля значительна.

Таким образом, для Арктики можно рекомендовать использование в практике спутниковых данных при $T_K > 10^\circ\text{C}$. Профили, рассчитанные по моделям, весьма желательно преобразовывать согласно вышеприведенному уравнению для надежного сравнения со спутниковыми данными. По всей вероятности, эти выводы можно распространить и на другие газовые компоненты, например, монооксид углерода CO или диоксид углерода CO₂.

Профили метана, восстановленные по уходящей ИК радиации, имеются в свободном доступе, например, данные спутников AIRS/Aqua (с 2002 г., ftp://anonymous@acdisc.gsfc.nasa.gov/ftp/data/s4pa/Aqua_AIRS_Level3), IASI-1/Metop-A (с 2007 г., <http://www.nsop.class.noaa.gov/saa/products/welcome>), IASI-2/Metop-B (с 2012 г.), и TANSO/Ibuki (с 2009 г.). Нами были использованы данные первых двух спутниковых приборов. Пространственное разрешение составляет 30–50 км, спектральное разрешение AIRS равно $1,5 \text{ см}^{-1}$, для IASI оно выше: $0,5 \text{ см}^{-1}$. Исходя из существенно более высокого спектрального разрешения, можно ожидать, что результаты IASI более чувствительны по отношению к нижним слоям атмосферы. Методики восстановления профилей метана для этих двух рядов данных аналогичны (Xiong et al., 2010, 2013). В этих же работах содержатся сведения о валидации данных с помощью независимых самолетных и других измерений, хотя количество последних для морей Арктики незначительно.

Сезонные и межгодовые вариации концентрации метана над СЛО

Для проверки надежности спутниковых данных полезно сравнить их результаты с независимыми непрерывными измерениями концентрации в прибрежной обсерватории Цепелин (ZEP, 78°54'29" с.ш., 11°52'53" в.д., высота над уровнем моря 474 м) на арх. Шпицберген с помощью лазерных анализаторов Picarro (Tadic et al., 2014). Fisher et al. (2011) характеризуют этот пункт измерений как фоновую станцию, как правило, находящуюся выше планетарного пограничного слоя с ограниченным влиянием локальных источников метана. Временами происходит эпизодический заток воздуха из пограничного слоя, что является, по видимому, причиной наблюдаемых всплесков концентрации метана (рис. 3). Это осложняет сравнение со спутниковыми данными низкого пространственного разрешения: размер одного пикселя для IASI не менее 30 км, а рельеф Шпицбергена гористый. По этой причине мы выбрали для сравнения домен усреднения спутниковых данных над однородной поверхностью моря, непосредственно прилегающий к западному берегу Шпицбергена (вставка к рис. 3). Рисунок 3 говорит о хорошем согласии сезонных вариаций метана для среднемесячных данных, полученных двумя независимыми методами. Кроме того, в холодный период года наблюдаются похожие по величине всплески концентрации метана величиной до 100 ppb с длительностью до нескольких дней для обоих рядов данных. Однако эти всплески не коррелируют друг с другом по времени; видимо, их причины различны.

Рис. 3. Сезонные вариации метана. Точки – среднесуточные значения концентраций метана в обсерватории ZEP (Шпицберген) и над прилегающим районом моря по данным IASI (карта на вставке). Линии – среднемесячные значения. Ниже – один год измерений в увеличенном масштабе. На вставке распределение концентрации метана, усредненное по 226 дням с повышенным его содержанием в течение 2009–2015 гг.

На вставке к *рис. 3* показаны концентрации метана, усредненные по 226 дням с положительными аномалиями относительно средних месячных значений в течение 2009–2015 г.г. Область повышенных концентраций близка к той, в которой с помощью сонаров обнаружены восходящие потоки пузырьков метана в морской воде (Westbrook et al., 2009; Gentz et al., 2014), а также к подводному оползню Хинлопен, одним из триггеров которого считаются газовые гидраты (Портнов, 2016, частное сообщение; Winkelmann and Stein, 2007). Этот факт служит еще одним свидетельством надежности спутниковых измерений метана.

Среднемесячные карты распределения метана для всей Арктики в 2013 г. по данным AIRS показаны на *рис. 4*. В течение мая – августа никаких аномалий метана над СЛО не наблюдается. Основное нарастание аномалии метана с сентября по декабрь происходит над МЗА. Начиная с января вследствие усиления фотохимического стока концентрация падает и к лету возвращается к минимальным значениям. Вторичный максимум в марте наблюдался не каждый год; в 2013 г. высокое содержание метана наблюдалось обоими приборами. Причина этого эффекта не ясна.

Рис. 4. Среднемесячные карты распределения метана для всей Арктики в 2013 г. по данным AIRS. Месяцы указаны в верхнем левом углу каждой карты

Как известно (AMAP Assessment, 2015), глобальная и арктическая концентрации метана в приземном воздухе растут со скоростью ~ 6 ppb/год в год в течение 2008–2013 гг. Для сравнения среднегодовых спутниковых данных с приземными измерениями (Dlugokencky et al., 2015) была выбрана часть МЗА, охватывающая Баренцево море, а также части Карского, Норвежского и Гренландского морей, где возможны круглогодичные измерения вследствие достаточно высоких ТК (*рис. 5*, границы домена показаны на *рис. 6*). При таком усреднении между данными AIRS и IASI проявляется систематическая разница в 26 PPB ($\sim 1,4\%$).

Причина этой разницы требует дальнейшего анализа; возможно, она кроется в особенностях методики восстановления метана, например, в различных спектроскопических константах. Для сравнимости величина этой разницы была вычтена из данных AIRS. Наблюдаемое хорошее согласие межгодового хода метана для приземных и спутниковых измерений так же, как и в случае сезонных вариаций, свидетельствует о надежности спутниковых данных.

Рис. 5. Среднегодовые концентрации метана в приземном слое по данным NOAA для трех обсерваторий в сравнении с аналогичными спутниковыми данными, усредненными для слоя 0–4 км для домена МЗА, показанного на рис. 6. Систематическая разница в 26 ppb вычтена из данных AIRS

Рис. 6. Распределение усредненной за 2010–2014 гг. аномалии метана (верхняя шкала в ppb) для случаев $TK > 10^\circ\text{C}$. Нижняя шкала для среднегодовой эмиссии построена в предположении линейной связи между аномалией концентрации и скоростью эмиссии (см. текст)

Предварительные оценки скорости эмиссии

Распределение метана над Арктикой регулируется распределением эмиссий, атмосферным переносом и фотохимическими процессами. Фотохимический сток в случае Арктики неэффективен, в особенности в темное время года. Влияние атмосферного переноса на картину распределения метана при усреднении всех данных за все сезоны понижено: синоптические процессы в значительной мере хаотичны. Поэтому распределение *аномалии* метана при таком усреднении будет примерно следовать распределению источников. Под аномалией будем понимать превышение концентрации над фоновым значением. В качестве последнего взято климатологическое среднегодовое распределение метана, используемое в качестве начального приближения в методиках восстановления метана из спутниковых данных (*рис. 2д и 2е*).

Рисунок 6 представляет собой карту распределения аномалии средней по диапазону высот от 0 до 4 км концентрации метана в Арктике (верхняя цветовая шкала). На суше зеленым цветом выделяется увлажненная Западно-Сибирская низменность (ЗСН) между Уралом и Енисеем. В литературе эмиссия метана от этого района (55° – 67° с.ш., 30° – 60° в.д., площадью 2,3 млн. кв. км) оценивается как 5–28 Тг CH_4 в/год (Berchet et al., 2015). Мы используем для определенности оценку 22 Тг CH_4 /год (Fung et al., 1991), что эквивалентно $26,4 \text{ мг } \text{CH}_4/\text{м}^2/\text{день}$. Средняя аномалия метана для этого района 9,5 ppb; таким образом, величина $26,4/9,5 = 2,8$ будет коэффициентом пересчета шкалы аномалии метана в шкалу скорости эмиссии ($\text{мг } \text{CH}_4/\text{м}^2/\text{день}$) в качестве оценки, близкой к максимальной. Среднегодовая скорость эмиссии достигает пиковых величин $\sim 100 \text{ мг } \text{CH}_4/\text{м}^2/\text{день}$ вблизи берегов Норвегии, Новой Земли и Шпицбергена. Суммировав по площадям доменов, границы которых показаны на *рис. 6*, получим суммарные за год выбросы метана (*табл. 1*, полужирным шрифтом выделено значение, взятое за основу при пересчете аномалий метана в эмиссию). Эмиссия метана от МЗА превышает эмиссию от МВА в 5,5 раз, а общая эмиссия метана от СЛО к северу от 67° с.ш. составляет 68 % от выброса суши к северу от 60-й параллели.

Таблица 1. Предварительные оценки эмиссии метана в Арктике по данным IASI

	<i>МВА</i>	<i>МЗА</i>	<i>ЗСН</i>	<i>СЛО</i>	<i>Аркт. суша > 60° с.ш.</i>
Площадь, млн. кв. км	1,4	4,7	2,3	12,1	17,2
Эмиссия, Тг CH_4 /год	6,1	33,3	22,0	48,5	70,7

Заключение

Основным результатом работы является подтверждение надежности спутниковых измерений метана в Арктике, что согласуется с успешной валидацией этих данных на более низких широтах (Xiong et al., 2010, 2013). Спутниковые измерения позволяют вести круглогодичный мониторинг этого важного парникового газа над МЗА. Для получения достовер-

ной информации о концентрации метана в нижней тропосфере необходимо исключать из рассмотрения данные, отвечающие недостаточному температурному контрасту. Усреднение за 5 лет позволило выделить наиболее важные районы вдоль берегов МЗА с устойчивой повышенной концентрацией метана, вызванной, скорее всего, эмиссией от морской поверхности. Общий годовой выброс метана от морей СЛО, оцененный в предположении линейной связи между скоростью его эмиссии и аномалией концентрации, составляет 68% эмиссии от континентальной Арктики. Вклад МЗА более, чем в 5 раз превышает выброс метана от МВА и составляет более половины метана, выброшенного СЛО.

Обсуждение вопроса о механизмах эмиссии метана выходит за рамки данной работы. Нам представляется, однако, что эмиссия от морского дна играет большую роль, чем образование метана в поверхностном слое океана. Пространственное совпадение обнаруженных нами рекордно высоких аномалий метана к западу от Шпицбергена (вставка к *рис. 3 и 6*) с неоднократными наблюдениями восходящих потоков метана в толще морской воды в этом районе (Westbrook et al., 2009; Gentz et al., 2014, также см. ссылки в последней работе) вряд ли случайно.

Для дальнейших исследований процессов эмиссии метана важно отметить следующее.

1. Выделение метана происходит вдоль берегов Норвегии, Новой Земли и Шпицбергена, т.е., вдоль пути теплого Северо-Атлантического течения.
2. Сезонное возрастание метана наблюдается начиная с конца октября – начала ноября. Это можно связать с моментом начала вертикальной конвекции в океане, вызванной охлаждением поверхностных слоев и одновременным повышением температуры нижележащих слоев воды. Насыщенные метаном донные слои выносятся на поверхность.
3. Прямых доказательств решающей роли морских арктических эмиссий метана для его глобального роста в данной работе не получено (*рис. 5*). Тем не менее, полностью этот эффект исключить нельзя, поскольку интенсивный атмосферный обмен между высокими и умеренными широтами возможно способен сгладить разницу в концентрациях, вызванную ускорением эмиссий от СЛО.

Авторы выражают благодарность Натаниэлю Лебеда (Университет Мэриленда) за помощь в построении графиков; Геннадия Чепурину (Университет Мэриленда), Ирине Репиной (ИФА/ИКИ) и Алексею Портнову (CAGE, Norway) за полезное обсуждение, а также архивным центрам НАСА и НОАА. Работа выполнена благодаря гранту НАСА «Long-term Satellite Data Fusion Observations of Arctic Ice Cover and Methane as a Climate Change Feedback».

Литература

1. Анисимов О.А., Забойкина Ю.Г, Кокорев В.А., Юрганов Л.Н. Возможные причины эмиссии метана на шельфе морей Восточной Арктики // Лед и Снег. 2014. № 2 (126). С. 69–81.
2. Анисимов О.А., Кокорев В.А. Сравнительный анализ наземных, морских и спутниковых измерений метана в нижней атмосфере российской части Арктики в условиях изменения климата // Исследование Земли из космоса. 2015. № 2. С. 1–14
3. Портнов А. Частное сообщение. 2016.

4. Сергиенко В.И., Дударев О.В., Дмитриевский Н.Н., Шахова Н.Е., Никольский Н.Н., Никифоров С.Л., Саломатин А.С., Салюк Р.А., Карнаух В.В., Черных Д.Б., Тумской В.Е., Чувилин Е.М., Буханов Б.А. Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей Восточной Арктики как возможная причина «метановой катастрофы»: некоторые результаты комплексных исследований 2011 года // ДАН. 2012. Т. 445. № 3. С. 330–335.
5. AMAP Assessment 2015: Methane as an Arctic climate forcer: Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). 2015. Oslo, Norway. 139 p. ISBN – 978-82-7971-091-2.
6. Archer D. Methane hydrate stability and anthropogenic climate change // Biogeosciences, 2007. Vol. 4. P. 521–544.
7. Berchet A., Pison I., Chevallier F., Paris J.-D., Bousquet P., Bonne J.-L., Arshinov M.Y., Belan B.D., Cressot C., Davydov D.K., Dlugokencky E.J., Fofonov A.V., Galanin A., Lavrič J., Machida T., Parker R., Sasakawa M., Spahni R., Stocker B.D., Winderlich J. Natural and anthropogenic methane fluxes in Eurasia: a mesoscale quantification by generalized atmospheric inversion // Biogeosciences, 2015. Vol. 12. P. 5393–5414.
8. Bergamaschi P., Houweling S., Segers A., Krol M., Frankenberg C., Scheepmaker R., Dlugokencky E., Wofsy S., Kort E., Sweeney C., Schuck T., Brenninkmeijer C., Chen H., Beck V., Gerbig C. Atmospheric CH₄ in the first decade of the 21st century: Inverse modeling analysis using SCIAMACHY satellite retrievals and NOAA surface measurements // Journal of Geophysical Research. 2013. Vol. 118. No. 13. P. 7350–7369.
9. Damm E., Rudels B., Schauer U., Mau S., Dieckmann G. Methane excess in Arctic surface water-triggered by sea ice formation and melting // Scientific Reports. 2015. Vol. 5. 16179.
10. Dlugokencky E.J., Nisbet E.G., Fisher R., Lowry D. Global atmospheric methane: Budget, changes and dangers // Philosophical Transactions of the Royal Society A. 2011. Vol. 369. No. 1943. P. 2058–2072.
11. Dlugokencky E.J., Lang P.M., Crotwell M., Masarie K.A., Crotwell M.J., Atmospheric Methane Dry Air Mole Fractions from the NOAA ESRL Carbon Cycle Cooperative Global Air Sampling Network, 1983–2014, Version: 2015-08-03, Path: ftp://aftp.cmdl.noaa.gov/data/trace_gases/ch4/flask/surface/, 2015.
12. Fisher R.E., Sriskantharajah S., Lowry D., Lanoisellé M., Fowler C.M.R., James R.H., Hermansen O., Lund Myhre C., Stohl A., Greinert J., Nisbet-Jones P.B.R., Mienert J., Nisbet E.G. Arctic methane sources: isotopic evidence for atmospheric inputs // Geophysical Research Letters. 2011. Vol. 38. No. 21. L21803.
13. Frankenberg C., Meirink J., Bergamaschi P., Goede A., Heimann M., Körner S., Platt U., van Weele M., Wagner T. Satellite cartography of atmospheric methane from SCIAMACHY onboard ENVISAT: Analysis of the years 2003 and 2004 // Journal of Geophysical Research. 2006. Vol. 111. D07303.
14. Fung I., John J., Lerner J., Matthews E., Prather M., Steele L.P., Fraser P.J. Three-dimensional model synthesis of the global methane cycle // Journal of Geophysical Research. 1991. Vol. 96. No. D7. P. 13033–13065.
15. Gentz T., Damm E., von Deimling, J.S., Mau S., McGinnis D.F., Schlüter M. A water column study of methane around gas flares located at the West Spitsbergen continental margin // Continental Shelf Research. 2014. Vol. 72. P. 107–118.
16. 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. Stocker, T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. (eds.). Cambridge University Press.
17. Kort E.A., Wofsy S.C., Daube B.C., Diao M., Elkins J.W., Gao R.S., Hints E.J., Hurst D.F., Jimenez R., Moore F.L., Spackman J.R., Zondlo M.A. Atmospheric observations of Arctic Ocean methane emissions up to 82° North // Nature Geoscience. 2012. Vol. 5. No. 5. P. 318–321.
18. Razavi A., Clerbaux C., Wespes C., Clarisse L., Hurtmans D., Payan S., Camy-Peyret C., Coheur P. Characterization of methane retrievals from the IASI space-borne sounder // Atmospheric Chemistry and Physics. 2009. Vol. 9. No. 20. P. 7889–7899.
19. Rodgers C. Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice. World Scientific: Hackensack, NJ, USA. 2000. 238 p.
20. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Yusupov V., Kosmach D., Gustafsson O. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf // Science. 2010. Vol. 327. No. 5970. P. 1246–1250.
21. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., Sergienko V., Salyuk A., Kosmach D., Chernykh D., Stubbs C., Nicolsky D., Tumskoy V., Gustafsson O. Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf // Nature Geoscience. 2014. Vol. 7. No. 1. P. 64–70.
22. Tadic J.M., Loewenstein M., Frankenberg C., Butz A., Roby M., Iraci L.T., Yates E.L., Gore W., Kuze A. A Comparison of In Situ Aircraft Measurements of Carbon Dioxide and Methane to GOSAT Data Measured Over Railroad Valley Playa, Nevada, USA // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2014. Vol. 52(12). P. 7764–7774.
23. Westbrook G.K., Thatcher K.E., Rohling E.J., Piotrowski A.M., Pälike H., Osborne A.H., Nisbet E.G., Minshull E. A., Lanoisellé M., James R.H., Hühnerbach V., Green D., Fisher R. E., Crocker A.J., Chabert A., Bolton C., Beszczynska-Möller A., Berndt C., Aquilina A. Escape of methane gas from the seabed along the west Spitsbergen continental margin // Geophysical Research Letters. 2009. Vol. 36. L15608.
24. Winkelmann D., Stein R. Triggering of the Hinlopen/Yermak Megaslides in relation to paleoceanography and climate history of the continental margin north of Spitsbergen // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2007. Vol. 8. No. 6.
25. Xiong X., Barnett C., Maddy E., Wei J., Liu X., Pagano T. Seven Years' Observation of Mid-Upper Tropospheric Methane from Atmospheric Infrared Sounder // Remote Sensing. 2010. Vol. 2. No. 11. P. 2509–2530.
26. Xiong X., Barnett C., Maddy E., Gambacorta A., King T., Wofsy S. Mid-upper tropospheric methane retrieval from IASI and its validation // Atmospheric Measurement Techniques. 2013. Vol. 6. No. 9. P. 2255–2265.

Seasonal and interannual variability of atmospheric methane over Arctic Ocean from satellite data

L.N. Yurganov¹, I. Leifer², C. Lund Myhre³

¹University of Maryland, Baltimore County, Baltimore, 21250, USA
E-mail: yurganov@umbc.edu

²Bubbleology Research International, Santa Barbara, 93106, USA
E-mail: ira.leifer@bubbleology.com

³Norwegian Institute for Air Research, Kjeller, 2007, Norway
E-mail: cathrine.lund.myhre@nilu.no

Global increasing of atmospheric methane since 2007–2008 after a decade of its stability requires its investigation and explanation. Locations and nature of growing methane sources are still under discussion. Recent warming of the Arctic stimulated speculations about dissociation of methane hydrates in the Arctic seabed and a new climatic positive feedback. Unfortunately, regular measurements of methane concentrations over the surface of the Arctic Ocean are lacking. Satellite methane retrievals obtained at the Thermal IR (TIR) spectral region are possible year round, day and night. In this paper methane low tropospheric satellite retrievals over the Arctic Ocean from spectrometers using the band near 1300 cm⁻¹ were analyzed. There have been found favorable and unfavorable areas and periods for satellite TIR measurements. Temperature contrast, defined here as the temperature difference between the surface and the altitude of 4 km, was used as a parameter characterizing sensitivity to the lower troposphere: data with the temperature contrast less than 10°C were discarded as unrepresentative for the lower troposphere. Maximal positive methane anomalies were observed along coasts of Norway, Novaya Zemlya, and Spitsbergen in November – December. According to preliminary estimates, the seas of the Western Arctic are responsible for ~68% of total emission from the Arctic Ocean. East Siberian Arctic Shelf (ESAS) contributes ~12% of marine emission in the Arctic. Arctic Ocean methane emission comprise ~68% of the Arctic land emission to the North from 60° N. Satellite data since 2002 do not confirm conclusively a decisive role of the Arctic Ocean sources for the global CH₄ acceleration after 2007.

Keywords: AIRS, IASI, Arctic Ocean, atmospheric methane

Accepted: 09.02.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-107-119

References

1. Anisimov O.A., Zaboikina Yu.G., Kokorev V.A., Yurganov L.N., Vozmozhnye prichiny emissii metana na shel'fe morei Vostochnoi Arktiki (Possible causes of methane release from the East Arctic seas shelf), *Led i Sneg*, 2014, No. 2 (126), pp. 69–81.
2. Anisimov O.A., Kokorev V.A., Sravnitel'nyi analiz nazemnykh, morskikh i sputnikovykh izmerenii metana v nizhnei atmosfere rossiiskoi chasti Arktiki v usloviyakh izmeneniya klimata (Comparative analysis of ground-based, marine, and satellite measurements of methane in the low atmosphere in the Russian Arctic at conditions of changing climate), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2015, No. 2, pp. 1–14.
3. Portnov A. Private communication, 2016.
4. Sergienko V.I., Dudarev O.V., Dmitrevskii N.N., Shakhova N.E., Nikol'skii N.N., Nikiforov S.L., Salomatin A.S., Salyuk R.A., Karnaukh V.V., Chernykh D.B., Tumskoi V.E., Chuvilin E.M., Bukhanov B.A., Degradatsiya podvodnoi merzloty i razrushenie gidratov shel'fa morei Vostochnoi Arktiki kak vozmozhnaya prichina «metanovoi katastrofy»: nekotorye rezul'taty kompleksnykh issledovaniy 2011 goda (The degradation of submarine permafrost and the destruction of hydrates on the shelf of East Arctic seas as potential cause of the methane catastrophe: some results of integrated studies in 2011), *DAN*, 2012, Vol. 445, No. 3, pp. 330–335.
5. AMAP Assessment 2015: Methane as an Arctic climate forcer: *Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP)*, 2015, Oslo, Norway, 139 p. ISBN – 978-82-7971-091-2.
6. Archer D., Methane hydrate stability and anthropogenic climate change, *Biogeosciences*, 2007, Vol. 4, pp. 521–544.
7. Berchet A., Pison I., Chevallier F., Paris J.-D., Bousquet P., Bonne J.-L., Arshinov M. Y., Belan B. D., Cressot C., Davydov D.K., Dlugokencky E.J., Fofonov A.V., Galanin A., Lavrič J., Machida T., Parker R., Sasakawa M., Spahni R., Stocker B.D., Winderlich J., Natural and anthropogenic methane fluxes in Eurasia: a mesoscale quantification by generalized atmospheric inversion, *Biogeosciences*, 2015, Vol. 12, pp. 5393–5414.
8. Bergamaschi P., Houweling S., Segers A., Krol M., Frankenberg C., Scheepmaker R., Dlugokencky E., Wofsy S., Kort E., Sweeney C., Schuck T., Brenninkmeijer C., Chen H., Beck V., Gerbig C., Atmospheric CH₄ in the first decade of the 21st century: Inverse modeling analysis using SCIAMACHY satellite retrievals and NOAA surface measurements, *Journal of Geophysical Research*, 2013, Vol. 118, No. 13, pp. 7350–7369.
9. Damm E., Rudels B., Schauer U., Mau S., Dieckmann G., Methane excess in Arctic surface water-triggered by sea ice formation and melting, *Scientific Reports*, 2015, Vol. 5, 16179.
10. Dlugokencky E.J., Nisbet E.G., Fisher R., Lowry D., Global atmospheric methane: Budget, changes and dangers, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2011, Vol. 369, No. 1943, pp. 2058–2072.

11. Dlugokencky E.J., Lang P.M., Crotwell M., Masarie K.A., Crotwell M.J., *Atmospheric Methane Dry Air Mole Fractions from the NOAA ESRL Carbon Cycle Cooperative Global Air Sampling Network, 1983–2014, Version: 2015-08-03*, Path: ftp://aftp.cmdl.noaa.gov/data/trace_gases/ch4/flask/surface/, 2015.
12. Fisher R.E., Sriskantharajah S., Lowry D., Lanoisellé M., Fowler C.M.R., James R.H., Hermansen O., Lund Myhre C., Stohl A., Greinert J., Nisbet-Jones P. B. R., Mienert J., Nisbet E. G., Arctic methane sources: isotopic evidence for atmospheric inputs, *Geophysical Research Letters*, 2011, Vol. 38, No. 21, L21803.
13. Frankenberg C., Meirink J., Bergamaschi P., Goede A., Heimann M., Körner S., Platt U., van Weele M., Wagner T., Satellite chartography of atmospheric methane from SCIAMACHY on board ENVISAT: Analysis of the years 2003 and 2004, *Journal of Geophysical Research*, 2006, Vol. 111, D07303.
14. Fung, I., John J., Lerner J., Matthews E., Prather M., Steele L.P., and Fraser P.J., Three-dimensional model synthesis of the global methane cycle, *Journal of Geophysical Research*, 1991, Vol. 96, No. D7, pp. 13033–13065.
15. Gentz T., Damm E., von Deimling, J.S., Mau S., McGinnis D.F., Schlüter M., A water column study of methane around gas flares located at the West Spitsbergen continental margin, *Continental Shelf Research*, 2014, Vol. 72, pp. 107–118.
16. *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*, Stocker, T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., and Midgley P.M. (eds.). Cambridge University Press.
17. Kort E.A., Wofsy S.C., Daube B.C., Diao M., Elkins J.W., Gao R.S., Hints E.J., Hurst D.F., Jimenez R., Moore F.L., Spackman J.R., Zondlo M.A., Atmospheric observations of Arctic Ocean methane emissions up to 82° North, *Nature Geoscience*, 2012, Vol. 5, No. 5, pp. 318–321.
18. Razavi A., Clerbaux C., Wespes C., Clarisse L., Hurtmans D., Payan S., Camy-Peyret C., Coheur P., Characterization of methane retrievals from the IASI space-borne sounder, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, Vol. 9, No. 20, pp. 7889–7899.
19. Rodgers C. *Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice*, World Scientific: Hackensack, NJ, USA, 2000, 238 p.
20. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Yusupov V., Kosmach D., Gustafsson O., Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf, *Science*, 2010, Vol. 327, No. 5970, pp. 1246–1250.
21. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., Sergienko V., Salyuk A., Kosmach D., Chernykh D., Stubbs C., Nicolsky D., Tumskey V., Gustafsson O., Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf, *Nature Geoscience*, 2014, Vol. 7, No. 1, pp. 64–70.
22. Tadic J.M., Loewenstein M., Frankenberg C., Butz A., Roby M., Iraci L.T., Yates E.L., Gore W., Kuze A. A., Comparison of In Situ Aircraft Measurements of Carbon Dioxide and Methane to GOSAT Data Measured Over Railroad Valley Playa, Nevada, USA, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, Vol. 52(12), pp. 7764–7774.
23. Westbrook G. K., Thatcher K. E., Rohling E. J., Piotrowski A.M., Pälike H., Osborne A. H., Nisbet E. G., Minshull E. A., Lanoisellé M., James R. H., Hühnerbach V., Green D., Fisher R. E., Crocker A. J., Chabert A., Bolton C., Beszczynska-Möller A., Berndt C., Aquilina A., Escape of methane gas from the seabed along the west Spitsbergen continental margin, *Geophysical Research Letters*, 2009, Vol. 36, L15608.
24. Winkelmann D., Stein R., Triggering of the Hinlopen/Yermak Megaslides in relation to paleoceanography and climate history of the continental margin north of Spitsbergen, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2007, Vol. 8, No. 6.
25. Xiong X., Barnet C., Maddy E., Wei J., Liu X., Pagano T., Seven Years' Observation of Mid-Upper Tropospheric Methane from Atmospheric Infrared Sounder, *Remote Sensing*, 2010, Vol. 2, No. 11, pp. 2509–2530.
26. Xiong X., Barnet C., Maddy E., Gambacorta A., King T., Wofsy S., Mid-upper tropospheric methane retrieval from IASI and its validation, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, Vol. 6, No. 9, pp. 2255–2265.