Оценки эмиссии метана от некоторых арктических и приарктических районов по данным орбитального интерферометра IASI

Л.Н. Юрганов¹, А. Лейфер²

¹University of Maryland Baltimore County, Baltimore, 21250, USA E-mail: yurganov@umbc.edu ²Bubbleology Research International, Santa Barbara, 93106, USA

Метан является важным парниковым газом. Примерно половина его источников связана непосредственно с деятельностью человека, а вторая половина - с различными природными механизмами. Многие из этих механизмов имеют положительную зависимость от температуры. Как известно, потепление Арктики происходит примерно в два раза быстрее, чем рост глобальной температуры. Этот факт привлекает внимание к изучению процессов выброса метана в Арктике, которые могут быть причиной положительной климатической обратной связи. Особое внимание уделяется эмиссии метана от морей Северного Ледовитого океана (СЛО). В силу различных логистических причин концентрации метана над СЛО, в особенности в холодный период года, изучены недостаточно. Между тем, начиная с 2002 года, на орбите находится спектрометр AIRS, а с 2007 года – интерферометр IASI, и результаты восстановления профилей метана находятся в публичном доступе. Оба прибора работают в средней области ИК спектра и регистрируют собственное излучение Земли и атмосферы. Для получения информации о содержании газов необходим достаточный температурный контраст в атмосфере. В работе анализируются данные IASI для случаев температурного контраста (разницы между температурами на поверхности и на высоте 4 км), превышающих 10°С. Все измерения в диапазоне высот 0-4 км для периода с 2010 г. по 2014 г. усреднены, и из них вычтен климатологический фон. Предположено, что полученные таким образом аномалии метана пропорциональны скорости эмиссии метана. Для калибровки шкалы потоков метана использован относительно хорошо изученный район Западно-Сибирской низменности, для которого годовой выброс метана оценивается величиной 22 Тг. Приведены карты пространственного распределения скоростей эмиссии метана от поверхности моря вблизи Норвегии, Шпицбергена, Новой Земли, моря Лаптевых, а также прибрежных районов Охотского моря и от территории Аляски. Полученные оценки подтверждаются имеющимися в литературе модельными и экспериментальными данными для Аляски, а также оценками эмиссии метана, полученными из измерений его перенасыщения в поверхностных водах моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря.

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

Одобрена к печати: 05.04.2016 DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-173-183

Введение

Метан, как один из парниковых газов, играет важную климатообразующую роль. Интенсивность многих естественных источников метана, например деградация придонной мерзлоты (Космач и др., 2015) или метаногидратов (Обжиров, 2012), зависит от температуры (Анисимов, Лавров, Ренева, 2005). Температура воздуха и подстилающей поверхности в Арктике растет с годами в два раза быстрее, чем в среднем по земному шару (Walsh et al., 2002; Иванов и др., 2013). Роль метановой положительной обратной связи в аномальном потеплении Арктики нельзя исключить ни в настоящем, ни тем более в будущем (Archer, 2007). Между тем разброс оценок скоростей эмиссии метана в Арктике превышает порядок величины. Например, диапазон оценок эмиссии метана от морей Восточной Арктики (МВА) составляет от 1 до 17 Тг СН₄ в год (Shakhova et al., 2010, 2014; АМАР Assessment..., 2015). При этом никаких оценок эмиссии метана от морей Западной Арктики (МЗА) и остальной части СЛО в литературе не имеется.

В качестве сравнения, для обводненных пространств Западно-Сибирской низменности (ЗСН) разброс оценок ниже: $5-28\,\mathrm{Tr}\,\mathrm{CH_4}$ в год (Berchet et al., 2015), но все же неприемлемо велик. Для Аляски существуют как модельные, так и экспериментальные работы, хотя распространение локальных измерений потоков на всю Аляску приводит к значительной неопределенности. Систематические самолетные измерения в рамках проекта CARVE (Chang et al., 2014) обещают значительное продвижение в этом вопросе, по крайней мере для Аляски.

В нашей предыдущей работе (Юрганов, Лейфер, Лунд Майр, 2016) впервые для оценок эмиссии метана в Арктике были использованы данные орбитального прибора IASI. Сканирующий интерферометр IASI (Crevoisier et al., 2009; Razavi et al., 2009), установленный на европейском спутнике МЕТОР-А, способен поставлять достаточно хорошие данные о спектрах уходящего излучения в среднем (тепловом) ИК диапазоне со спектральным разрешением ~0,5 см⁻ и с высоким отношением сигнала к шуму днем и ночью в течение всего года над всей поверхностью Земли, включая Арктику. Для Арктики, как и для континентальных районов умеренных и полярных широт, однако, имеется существенное ограничение, связанное с недостаточным вертикальным температурным контрастом над холодной поверхностью суши зимой или пакового льда в течение всего года. В работе (Юрганов, Лейфер, Лунд Майр, 2016), как и в данной работе, это ограничение было отчасти преодолено введением добавочного критерия качества: температурного контраста (ТК), определенного как разность температур между подстилающей поверхностью и высотой 4 км. Применение предложенного критерия ТК>10 °С уменьшает объем данных о концентрации метана для всей Арктики вплоть до 2 раз, при этом оставшиеся данные о метане не зависят от ТК и являются источником информации о концентрации метана в нижнем слое тропосферы. В той же работе эмиссия метана от СЛО оценена как ~ 68% выбросов от континентальной Арктики к северу от 60° с.ш. При этом моря Западной Арктики (МЗА) ответственны за ~68%, а моря Восточной Арктики (МВА) за ~12% метана, выбрасываемого СЛО в целом.

В данной работе более детально рассмотрены эмиссии от прибрежных районов Норвежского, Баренцева, Охотского морей, а также моря Лаптевых и Аляски. Приводятся сравнения с имеющимися данными об эмиссии метана от МВА и территории Аляски.

Спутниковые данные

Данные IASI находятся в свободном доступе (http://www.nsof.class.noaa.gov/saa/products/welcome). Все параметры (профиль температуры воздуха и температура поверхности, профиль влажности, эмиссионная способность поверхности, высота облаков, профили газов: ${\rm CO_2}$, ${\rm CH_4}$, ${\rm N_2O}$, ${\rm O_3}$, ${\rm SO_2}$, ${\rm HNO_3}$) восстанавливаются с помощью единой системы алгоритмов NUCAPS (http://www.ospo.noaa.gov/Products/atmosphere/soundings/nucaps/). Восстановление профилей метана и валидация с помощью самолетных измерений

концентрации метана описаны в работе (Xiong et al., 2013). Полученные профили метана для 10 слоев интерполируются на 100 слоев. В настоящее время доступны лишь данные второго уровня (индивидуальные измерения профилей концентрации, широта, долгота, время, флаги качества и т.д.). Весовые функции (averaging kernels) не входят в набор архивируемых данных. Данные третьего уровня, т.е. усредненные по регулярной широтнодолготной сетке, также недоступны.

В настоящей работе проанализированы концентрации метана, усредненные по двум нижним восстановленным слоям из 10, что соответствует диапазону от поверхности до высоты, примерно равной 4 км. Случайная ошибка одного измерения, оцененная по разбросу данных, не превышает ± 20 ppb. Как сказано выше, кроме стандартного контроля качества (например, удаление точек для сплошной облачности), применен контроль данных для недостаточно высокого температурного контраста (ТК<10 °C), подробно обоснованный в работе (Юрганов, Лейфер, Лунд Майр, 2016). Там же показано согласие сезонных и межгодовых вариаций концентраций метана, оцененных по спутниковым и приземным измерениям в Арктике.

Методика предварительной оценки среднегодовой скорости эмиссии метана

Для более точных оценок скоростей эмиссии исходя из измеренных концентраций необходимо решать обратную задачу (inverse modelling), что предполагает моделирование стоков газа, в данном случае – реакцию метана с гидроксилом, и атмосферного переноса, как вертикального, так и горизонтального. Примером такой работы для глобальных континентальных источников метана с использованием данных спутникового спектрометра SCIAMACHY, работавшего по солнечной радиации, отраженной от поверхности Земли, является статья Bergamaschi et al. (2013). Однако предварительные оценки для Арктики, даже без применения такого моделирования, могут быть полезны.

Фотохимический сток метана (гидроксил возникает в атмосфере под действием УФ радиации (Montzka et al., 2011)) в случае Арктики не эффективен, в особенности в темное время года. Атмосферный перенос определяется синоптическими процессами, которые в значительной мере хаотичны. При усреднении всех данных за все сезоны можно ожидать, что влияние переноса на наблюдаемые *аномалии* метана понижается, и распределение аномалий будет примерно следовать распределению источников. Кроме того, при усреднении по 5 годам на каждую ячейку 0,5°х0,5° размером ~20х50 км приходится 1000 — 1500 отдельных измерений метана, что резко повышает точность измерений. Под *аномалией* будем понимать превышение концентрации над фоновым значением. В качестве последнего можно взять климатологическое среднегодовое распределение метана, используемое в качестве начального приближения в методике восстановления метана из спутниковых данных NUCAPS (Юрганов, Лейфер, Лунд Майр, 2016). Межгодовой тренд глобальной концентрации — ~6 ррв в год (АМАР Assessment..., 2015) — должен быть учтен.

В нашем случае исходный фон был увеличен на 11 ppb, при этом чувствительность конечных оценок к выбору величины сдвига фона оказалась незначительной. Небольшие отрицательные значения аномалии метана, когда измеренная концентрация была ниже фоновой (например, над Гренландией), формально соответствовали поглощению метана. Эти значения приравнивались к нулю в предположении отсутствия поверхностных стоков метана. Средняя аномалия метана для Западно-Сибирской низменности (3CH) оказалась равной 9,5 ppb. Berchet et al. (2015) оценивают эмиссию от этого района в диапазоне 5–28 Tr ${\rm CH_4/rog}$. Мы используем оценку 22 Tr ${\rm CH_4/rog}$ (рассчитанную исходя из данных Fung et al. (1991), и включающую эмиссии от обводненных территорий, утечки натурального газа, выброс метана жвачными животными и т.д.), что эквивалентно 26,4 мг ${\rm CH_4/m^2/}$ день. Таким образом, величина 26,4/9,5 = 2,8 может быть использована в качестве коэффициента для пересчета аномалии концентрации метана в скорость эмиссии метана на кв. м. При этом погрешность оценки, по данным IASI, исходя из вышеприведенного диапазона неопределенности эмиссии для 3CH будет между -300% и + 30%, т.е. наши оценки близки к максимальным.

Оценки потока метана и сравнение с литературными данными

На $puc.\ 1$ показаны карты распределения среднегодовой скорости выброса метана, построенные путем интерполяции данных регулярной широтно-долготной сетки $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$. Для всех четырех прибрежных районов морей Арктики ширина областей с аномалиями концентрации метана, превышающими 16 ppb, составляет не более 60 км при средней глубине моря более 100 м, хотя в случае Охотского моря его глубина для прибрежных районов была несколько меньше ($maбn.\ 1$). Средняя и максимальная эмиссии считались по ячейкам, для которых эмиссия превышала 45 мг ${\rm CH_4/m^2/денb}$, что соответствует аномалии метана 16 ppb. Следует ожидать, что при данной методике оценка эмиссии занижается вследствие неучета атмосферного переноса метана, уменьшающего аномалию, по сравнению с условиями отсутствия переноса. В $maбn.\ 1$ также приведены средние и максимальные глубины моря для выбранных ячеек.

Таблица 1. Средние и максимальные значения скоростей эмиссии метана от поверхности моря для некоторых прибрежных районов по данным IASI

	Шпицберген	Норвегия	Новая Земля	С3. побережье Охотского моря
Средняя эмиссия, мг СН ₄ /м²/день	71	65	62	55
Максимальная эмиссия, мг ${\rm CH_4/m^2/день}$	124	98	91	73
Средняя глубина моря, м	113	159	90	74
Максим. глубина моря, м	239	312	275	147

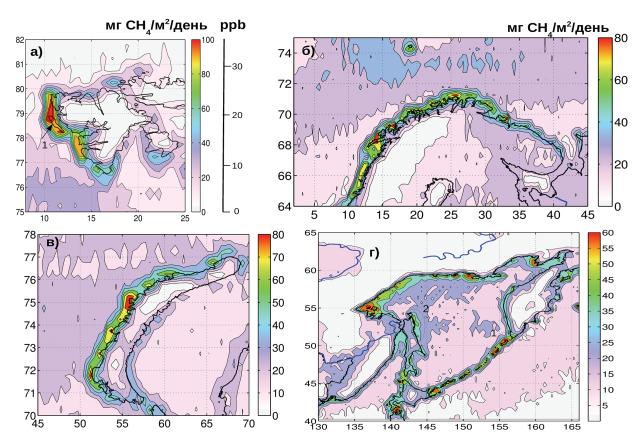


Рис. 1. Аномалия концентрации метана, восстановленной из данных измерений IASI и усредненной от поверхности до высоты 4 км за период 2010-2014 гг. (правая шкала на рис. а). Аномалия пересчитана на среднюю скорость эмиссии метана (левая шкала на рис. а и остальные шкалы), см. текст. (а): арх. Шпицберген, 1 — о. Земля Принца Карла; б): северная часть Скандинавии; в верхней части карты о. Медвежий; (в): архипелаг Северная Земля; (г): Охотское море; положение известных месторождений газогидратов: 1 — о. Парамушир, 2 — впадина Дерюгина

Максимальные величины эмиссии метана наблюдались у западных берегов арх. Шпицберген, при этом четко видны два района: один к северу от о. Земля Принца Карла, другой – южнее. Расположение северного из этих районов близко к тому, в котором с помощью сонаров регулярно наблюдаются восходящие потоки пузырьков метана в морской воде (Westbrook et al., 2009), объясняемые диссоциацией метаногидратов (Berndt et al., 2014). Похожие картины распределения эмиссий метана наблюдаются и в двух других районах МЗА.

В Охотском море (*puc. 1г*) можно отметить повышенные эмиссии метана вдоль его северо-западного берега, вдоль Курильской гряды, а также у побережья о. Сахалин. Охотское море лучше других морей исследовано с точки зрения поисков месторождений газогидратов. Обжиров (2012) отмечает два района Охотского моря, где обнаружены залежи газогидратов: юго-восточный борт Голыгинского прогиба в прибрежье о. Парамушир (район 1 на *puc. 1г*) и западный борт впадины Дерюгина вблизи северного Сахалина (район 2 на *puc. 1г*). Матвеева и Соловьев (2003) также обращают внимание на эти же районы в плане наличия газогидратов, однако относят северо-западную оконечность Охотского моря, где наблюдаются повышенные концентрации метана по данным IASI, к областям, в которых гидраты углеводородных газов не могут существовать из-за отсутствия

необходимых термобарических условий. Независимо от того, какие механизмы приводят к появлению аномалий метана, Охотское море вполне может конкурировать с МЗА и ЗСН как важный источник атмосферного метана: интегрирование потоков, представленных на $puc.\ 1\varepsilon$, дает примерно 20 $Tr\ CH_4/rog$.

На рис. 2а и рис. 2в показаны распределения эмиссии метана для Аляски по данным IASI и по модельным данным (Melton et al., 2013; Wania et al., 2013; Fisher et al., 2011), соответственно. Выбросы метана в диапазоне от 10 до 15 мг СН₄/м²/день, как по данным IASI, так и по моделям, наблюдаются в низовьях реки Юкон (юго-западная часть Аляски) и южнее. Другой район, меньший по площади, с примерно такими же выбросами наблюдается в северо-западной прибрежной зоне Аляски. Максимальные величины выбросов для Аляски, до 50 мг CH₄/день, отмечаются по данным IASI вдоль Аляскинского полуострова и Алеутских островов на юго-западе Аляски. На крайнем юго-востоке штата Аляски, в районе арх. Александра и о. Королевы Шарлотты, эмиссия метана доходит до 30 мг CH₄/м²/день. Для двух последних районов, однако, из данных IASI не вполне ясно, где находятся источники метана, – на суше или на море. Отметим, что модельные расчеты, учитывающие только сухопутные источники, также показывают повышенные выбросы метана для этих двух районов, хотя и значительно меньшие по величине. По-видимому, только натурные измерения потоков в этих районах позволят определить локализацию источников метана. Низовья р. Маккензи (Канада), выходящие за пределы штата Аляски, характеризуются выбросами метана ~10 мг СН₄/м²/день.

Средняя скорость эмиссии метана от Аляски по модельным данным оценивается (Fisher et al., 2011) как 2,52 г ${\rm CH_4/m^2/rod}$, причем неопределенность этой оценки велика: \pm 4,02 г ${\rm CH_4/m^2/rod}$. С учетом площади штата Аляска (1,72 млн. кв. км) эта величина эквивалентна общему выбросу метана 4,3 ${\rm Tr}$ ${\rm CH_4/rod}$. Согласно самолетным измерениям (Chang et al., 2014), общая эмиссия метана от мая до сентября 2012 г. составляет 2,1 \pm 0,5 ${\rm Tg}$ ${\rm CH_4}$. Круглогодичные измерения потока метана от Аляскинской тундры с помощью метода вихревой корреляции, дополненного самолетными измерениями (Zona et al., 2016), показали, что в оставшуюся часть года (с сентября по май) выбрасывается примерно такое же количество метана, т. е. можно ожидать, что Аляска выделяет в год \sim 4 ${\rm Tr}$ ${\rm CH_4}$. Суммирование потоков по данным IASI (*puc. 2a*) дает среднегодовую оценку 6,7 ${\rm Tr}$ ${\rm CH_4/rod}$ (диапазон 1,5--8 ${\rm Tr}$ ${\rm CH_4/rod}$) при условии исключения из расчета Аляскинского полуострова и Архипелага Александра, где возможны выбросы от прибрежных вод. Если оценка 4 ${\rm Tr}$ ${\rm CH_4/rod}$ от континентальной Аляски будет подтверждена, то все спутниковые оценки данной работы и работы (Юрганов, Лейфер, Лунд Майр, 2016) следует уменьшить примерно в полтора раза.

На *рис.* 26 и *рис.* 22 показаны распределения эмиссии метана для MBA по данным IASI (для 2010–2014 гг.) и Shakhova et al. (2010) для 2003–2008 гг. соответственно. При сравнении карт обращают внимание повышенные среднегодовые эмиссии метана в дельте Лены (лагуна Ивашкина): ~ 35 мг ${\rm CH_4/m^2/день}$ как по нашим данным, так и по данным Shakhova et al. (2010). В октябре 2013 г. Shakhova et al. (2015) наблюдали в этом

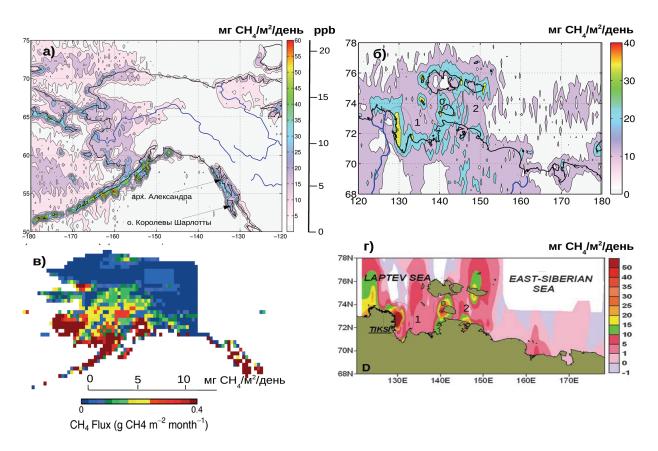


Рис. 2. Скорость эмиссии пересчитанная из аномалии концентрации метана по данным IASI для Аляски (а) и MBA (б) в сравнении с литературными данными ((в) и (г)). 1 — лагуна Ивашкина; 2 — Большой и Малый Ляховские о-ва. На рис. (а) показана также шкала аномалии метана в ppb; (в): результирующий поток метана, усредненный по 7 моделям WETCHAMP (Fisher et al., 2011); (г): скорости эмиссии, полученные по результатам натурных измерений метана, растворенного в поверхностных и придонных слоях моря (Shakhova et al., 2010)

районе на три порядка большие потоки: до 24 г ${\rm CH_4/m^2/день}$. В районе Большого и Малого Ляховских островов также наблюдается согласие между данными IASI и Shakhova et al. (2010): эмиссии метана около 20 мг ${\rm CH_4/m^2/день}$. В целом по MBA, как уже указывалось нами ранее (Юрганов, Лейфер, Лунд Майр, 2016), выбросы метана составляют по данным IASI 6,1 Тг ${\rm CH_4/rod}$, что находится в согласии с минимальной оценкой Shakhova et al. (2010) (6-10 Тг ${\rm CH_4/rod}$), но противоречит их же более поздней оценке 17 Тg ${\rm CH_4/rod}$ Shakhova et al. (2014). Космач и др. (2015) объясняют аномалии метана в поверхностных водах MBA деградацией природной мерзлоты и проникновением метана через глубокие и/или сквозные талики, сформированные в результате долговременного воздействия восходящего геотермального потока, усиленного влиянием относительно теплых вод р. Лены.

К низким значениям выбросов метана в 2012 г. (0,5–4,3 Тг СН₄/год) для МВА также привели модельные расчеты (Berchet et al., 2016) с использованием данных непрерывных измерений атмосферных концентраций метана на станциях Паллас (Северная Финляндия), Бэрроу (Аляска, США), Алёрт (Канадский Архипелаг) и Тикси (Восточная Сибирь, Россия) и с привлечением изотопных измерений на станции Цеппелин (Шпицберген, Норвегия). Таким образом, имеющиеся к настоящему времени данные показывают,

что первоначальная оценка Shakhova et al. (2010): 6-10 Tr CH_4 /год может быть использована в лучшем случае в качестве максимальной.

Заключение

В работе (Юрганов, Лейфер, Лунд Майр, 2016) был сделан вывод, что выброс метана от морей СЛО лишь несколько меньше поступления метана от континентальной Арктики, причем 2/3 морских выбросов сосредоточено в районе МЗА. В данной работе более подробно исследована локализация этих эмиссий и сделано сравнение с имеющимися оценками. Новейшая оценка Shakhova et al. (2014) потока метана от MBA (17 Тг CH_4 /год) явно завышена, более реалистичной является величина 4 Тг СН₄/год, что согласуется как с максимальной оценкой Berchet et al. (2016), так и с данными IASI. Значительная часть выброса метана от морей происходит вдоль северного побережья Норвегии и западных побережий Новой Земли и Шпицбергена с шириной полосы не более 60 км и на глубине моря в диапазоне от 100 до 300 м. Кроме этих районов, повышенные концентрации метана наблюдаются вдоль северо-западных берегов Охотского моря и Курильской гряды, западного берега Гренландии, над полыньей Баффинова залива. Предложенная оценка эмиссии метана может быть уточнена с помощью обратного моделирования. Кроме того, калибровка нашей методики по прямым измерениям потоков метана на Аляске позволит уточнить и оценки потоков от СЛО.

Авторы выражают признательность А.И. Обжирову (ТОИ ДОРАН) за полезную дискуссию и Натаниэлю Лебедда за помощь в построении графиков. Работа выполнена благодаря гранту HACA Long-term Satellite Data Fusion Observations of Arctic Ice Cover and Methane as a Climate Change Feedback.

Литература

- 1. Анисимов О.А., Лавров С.А., Ренева С.А. Эмиссия метана из многолетнемерзлых болот России в условиях изменения климата // Проблемы экологич. моделирования и мониторинга экосистем. Ред. Ю.А. Израэль. СПб.: Гидрометеоиздат, 2005. С. 124–142.
- Иванов В.В., Алексеев В.А., Алексеева Т.А., Колдунов Н.В., Репина И.А., Смирнов А.В. Арктический ледяной покров становится сезонным? // Исследование земли из космоса. 2013. № 4. С. 50–65.
- Космач Д.А., Сергиенко В.И., Дударев О.В., Куриленко А.В., Густаффсон О, Семилетов И.П., Шахова Н.Е. Метан в поверхностных водах окраинных морей Северной Евразии // ДАН. 2015. Т. 465. № 4. С. 441–445.
- Матвеева Т.В., Соловьев В.А. Газовые гидраты Охотского моря: закономерности формирования и распространения // Российский химический журнал. 2003. Т. 157. № 3. С. 101–111.
- Обжиров А.И. Геология и методы поиска газогидратов // Вестник инженерной школы ДФВУ. 2012. № 1 (10). 90–94.
- Юрганов Л.Н., Лейфер А., Лунд Майр К. Сезонная и межгодовая изменчивость атмосферного метана над морями Северного Ледовитого океана по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2016. Т. 13. № 2. С. 107–119.

- АМАР Assessment 2015: Methane as an Arctic climate forcer. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo, Norway: AMAP, 2015. vii + 139 pp. ISBN 978-82-7971-091-2.

 Archer D. Methane hydrate stability and anthropogenic climate change // Biogeosciences. 2007. Vol. 4. pp. 521–544.

 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 // Piogeosciences. 2015. Vol. 12, pp. 5203–5414. cation by generalized atmospheric inversion // Biogeosciences. 2015. Vol. 12. pp. 5393–5414.

- 10. Berchet A., Bousquet P., Pison I., Locatelli R., Chevallier F., Paris J.-D., Dlugokencky E.J., Laurila T., Hatakka J., Viisanen Y., Worthy D.E.J., Nisbet E.G., Fisher R.E., France J.L., Lowry D., Ivakhov V., Hermansen O. Atmospheric constraints on the methane emissions from the East Siberian Shelf // Atmospheric Chemistry and Physics. 2016. Vol.16. P. 4147-4157.
- 11. 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. P. 7350–7369.
- 12. Berndt C., Feseker T., Treude T., Krastel, S., Liebetrau V., Niemann H., Bertics V. J., Dumke I., Dunnbier K., Ferre B., Graves C., Gross F., Hissmann K., Huhnerbach V., Krause S., Lieser K., Schauer J., Steinle L. Temporal Constraints on Hydrate-Controlled Methane Seepage off Svalbard // Science. 2014. Vol. 343. P. 284–287.
- 13. Chang R.Y.-W., Miller C.E., Dinardo S.J., Karion A., Sweeney C., Daube B.C, Henderson J. M., Mountain M. E., Eluszkiewicz J., Miller J. B., Bruhwiler L. M. P., Wofsy S. C. Methane emissions from Alaska in 2012 from CARVE airborne observations // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2014. Vol. 111. P. 16694-16699.
- 14. Crevoisier C., Nobileau D., Fiore A.M., Armante R., Chedin A, Scott N.A. Tropospheric methane in the tropics first year from IASI hyperspectral infrared observations // Atmospheric Chemistry and Physics. 2009. Vol. 9. P. 6337–6350.
- 15. 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. L21803.
- 16. 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. P. 13033–13065.
- 17. Melton J.R., Wania R., Hodson E.L., Poulter B., Ringeval B., Spahni R., Bohn T., Avis C.A., Beerling D.J., Chen G., Eliseev A.V., Denisov S.N., Hopcroft P.O., Lettenmaier D.P., Riley W.J., Singarayer J.S., Subin Z.M., Tian H., Zürcher S., Brovkin V., van Bodegom P.M., Kleinen T., Yu Z.C., Kaplan J.O. Present state of global wetland extent and wetland methane modelling: conclusions from a model inter-comparison project (WETCHIMP) // Biogeosciences. 2013. Vol. 10. P. 753–788.
- 18. Montzka S.A., Krol M., Dlugokencky E., Hall B., Jockel P., Lelieveld J. Small Interannual Variability of Global Atmospheric Hydroxyl // Science. 2011. Vol. 331. P. 67–69.
- 19. Razavi A., Clerbaux C., Wespes C., Clarisse L., Hurtmans D., Payan S., Camy-Peyret C., Coheur P. Characterization of methane retrievals from the IASI spaceborne sounder // Atmospheric Chemistry and Physics. 2009. Vol. 9. P. 7889-7899.
- 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. 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. P. 64–70.
- 22. Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V., Lobkovsky L., Yusupov V., Salyuk A., Salomatin A., Chernykh D., Kosmach D., Panteleev G., Nicolsky D., Samarkin V., Joye S., Charkin A., Dudarev O., Meluzov A., Gustafsson O. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fuxes and role of sea ice // Philosophical Transactions of the Royal Society A. 2015. Vol. 373. Issue 2052. P. 1-13.
- 23. Walsh J.E., Kattsov V.M., Chapman W.L., Govorkova V., Pavlova T. Comparison of Arctic climate simulations by uncoupled and coupled global models // Journal of Climate. 2002. Vol. 15. P. 1429–1446.
- 24. Wania R., Melton J.R., Hodson E.L., Poulter B., Ringeval B., Spahni R., Bohn T., Avis C.A., Chen G., Eliseev A.V., Hopcroft P.O., Riley W.J., Subin Z.M., Tian H., van Bodegom P.M., Kleinen T., Yu Z.C., Singarayer J.S., Zürcher S., Lettenmaier D.P., Beerling D.J., Denisov S.N., Prigent C., Papa F., Kaplan J.O. Present state of global wetland extent and wetland methane modelling: methodology of a model inter-
- comparison project (WETCHIMP) // Geosciences Model Development. 2013. Vol. 6. P. 617–641.

 25. Westbrook G.K., Thatcher K.E., Rohling E J., Piotrowski A.M., Pälike H., Osborne A.H., Nisbet E.G., Minshull T 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
- Xi, Botton C., Beszezyńska-Motter A., Bernat C., Aquittua A. Escape of inclinate gas from the search along the west Spitsbergen continental margin // Geophysical Research Letters. 2009. Vol. 36. L15608.
 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. P. 2255–2265.
 Zona D., Gioli B., Commane R., Lindaas J., Wofsy S.C., Miller C.E., Dinardo S.J., Dengel S., Sweeney C., Karion A., Chang R.Y.-W, Henderson J.M., Murphy P.C., Goodrich J.P., Moreaux V., Liljedahl A., Watts J.D., Kimball J.S., Lipson D.A., Oechel W.C. Cold season emissions dominate the Arctic tundra methane budget // Proceedings of National Academy of Science. USA. 2016. Vol. 113 (1). P. 40–45.

Estimates of methane emission rates from some Arctic and sub-Arctic areas based on orbital interferometer IASI data

L.N. Yurganov¹, I. Leifer²

¹University of Maryland Baltimore County, Baltimore, 21250, USA E-mail: yurganov@umbc.edu ²Bubbleology Research International, Santa Barbara, 93106, USA

Methane is an important greenhouse gas. About half of its sources are directly induced by human activities, and the second half are connected with a variety of natural mechanisms. Many of these mechanisms have a positive temperature dependence. As it is known, the Arctic warming occurs to be approximately two times faster than the rise in global temperatures. This fact draws attention to studying processes of methane emissions in the Arctic, which may cause a positive climate feedback. Particular attention is given to methane emissions from the Arctic seas. For various logistical reasons the concentrations of methane over the Arctic Ocean are not well investigated. In particular, it is true for the cold period of the year. Meanwhile, a spectrometer AIRS and an interferometer IASI retrieve profiles of methane since 2002 and 2007, respectively. These data are publicly available. Both instruments operate in the thermal IR spectrum and record the outgoing radiation of the Earth and the atmosphere. Due to fundamental physical reasons, the content of the gases may be retrieved if a sufficient contrast in the atmospheric temperature takes place. The paper analyzes the data for cases of temperature contrast (the difference between the temperatures at the surface and at a height of 4 km) in excess of 10° C. All the measurements at the altitude range of 0-4 km for the period from 2010 to 2014 were averaged; then the climatological background was deducted from them. It was assumed that the methane anomaly have been proportional to the methane flux. A well-studied area of the West Siberian wetland with the annual emissions of methane 22 Tr was used to calibrate the scale of methane flux. The maps of the spatial distribution of methane emission rates from the sea surface near Norway, Spitsbergen, Novaya Zemlya, the Laptev Sea, and the Sea of Okhotsk, as well as the territory of Alaska were derived. These estimates are confirmed by the existing literature model and field data for Alaska, as well as by estimates of methane emissions derived from measurements of its supersaturation in the surface waters of the East Siberian Arctic Shelf (ESAS) area.

Keywords: IASI, Arctic, Arctic Ocean, Alaska, atmospheric methane

Accepted: 05.04.2016 DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-173-183

References

- Anisimov O.A., Lavrov S.A., Reneva S.A., Emissiya metana iz mnogoletnemerzlykh bolot Rossii v usloviyakh izmeneniya klimata (Emission of methane from permafrost swamps of Russia at the climate change conditions), *Problemy ekologich. modelirovaniya i monitoringa ekosistem*, Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 2005, pp. 124–142.
 Ivanov V.V., Alekseev V.A., Alekseeva T.A., Koldunov N.V., Repina I.A., Smirnov A.V. Arkticheskijj ledjanoji
- 2. Ivanov V.V., Alekseev V.A., Alekseeva T.A., Koldunov N.V., Repina I.A., Smirnov A.V. Arkticheskijj ledjanojj pokrov stanovitsja sezonnym? (Arctic ice cover transforms into seasonal one?), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, No. 4, pp. 50–65.
- 3. Kosmach D.A., Sergienko V.I., Dudarev O.V., Kurilenko A.V., Gustaffson O, Semiletov I. P., Shakhova N.E., Metan v poverhnostnyh vodah okrainnyh morej Severnoj Evrazii (Methane in surface waters of marginal seas of Northern Eurasia), *DAN*, 2015, Vol. 465, No. 4, pp. 441–445.
- 4. Matveeva T.V., Solov'ev V.A., Gazovye gidraty Ohotskogo morja: zakonomernosti formirovanija i rasprostranenija (Gas hydrates of the Sea of Okhotsk: conditions of forming and distribution), *Rossijskij himicheskij zhurnal*, 2003, Vol. 157, No. 3, pp. 101–111.
- Obzhirov A.I., Geologija i metody poiska gazogidratov (Geology and methods of gas hydrates exploretion), Vestnik inzhenernoj shkoly DFVU, 2012, No. 1 (10).
 Yurganov L.N., Leifer A., Lund Myhre C., Sezonnaya i mezhgodovaya izmenchivost' atmosfernogo metana nad
- 6. Yurganov L.N., Leifer A., Lund Myhre C., Sezonnaya i mezhgodovaya izmenchivost' atmosfernogo metana nad moryami Severnogo Ledovitogo okeana po sputnikovym dannym (Seasonal and interannual variability of atmospheric methane over Arctic Ocean from satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 2, pp. 107–119.
- 7. AMAP Assessment 2015: Methane as an Arctic climate forcer. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, vii + 139 pp. ISBN 978-82-7971-091-2.
- 8. Archer D. Methane hydrate stability and anthropogenic climate change, *Biogeosciences*, 2007, Vol. 4, pp. 521–544.
- 9. 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
- tification by generalized atmospheric inversion, *Biogeosciences*, 2015, Vol. 12, pp. 5393–5414.

 10. Berchet A., Bousquet P., Pison I., Locatelli R., Chevallier F., Paris J.-D., Dlugokencky E.J., Laurila T., Hatakka J., Viisanen Y., Worthy D.E.J., Nisbet E.G., Fisher R.E., France J.L., Lowry D., Ivakhov V., Hermansen O.,

Atmospheric constraints on the methane emissions from the East Siberian Shelf, Atmospheric Chemistry and

Physics, 2016, Vol. 16, pp. 4147-4157.

11. 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, pp. 7350-7369.

- 12. Berndt C., Feseker T., Treude T., Krastel, S., Liebetrau V., Niemann H., Bertics V.J., Dumke I., Dunnbier K., Ferre B., Graves C., Gross F., Hissmann K., Huhnerbach V., Krause S., Lieser K., Schauer J., Steinle L., Temporal
- Constraints on Hydrate-Controlled Methane Seepage off Svalbard, *Science*, 2014, Vol. 343, pp. 284–287.

 13. Chang R.Y.-W., Miller C.E., Dinardo S.J., Karion A., Sweeney C., Daube B.C, Henderson J.M., Mountain M.E. Eluszkiewicz J., Miller J.B., Bruhwiler L.M.P., Wofsy S.C., Methane emissions from Alaska in 2012 from CARVE airborne observations, Proceedings of the National Academy of Sciences, 2014, Vol. 111, pp. 16694–16699.
- 14. Crevoisier C., Nobileau D., Fiore A.M., Armante R., Chedin A, Scott N.A., Tropospheric methane in the tropics first year from IASI hyperspectral infrared observations, Atmospheric Chemistry and Physics, 2009, Vol. 9, pp. 6337–6350.
- 15. 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, L21803.

 16. 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, pp. 13033–13065
- 17. Melton J.R., Wania R., Hodson E.L., Poulter B., Ringeval B., Spahni R., Bohn T., Avis C.A., Beerling D.J., Chen G., Eliseev A.V., Denisov S.N., Hopcroft P.O., Lettenmaier D.P., Riley W.J., Singarayer J.S., Subin Z.M., Tian H., Zürcher S., Brovkin V., van Bodegom P.M., Kleinen T., Yu Z. C., Kaplan J.O., Present state of global wetland extent and wetland methane modelling: conclusions from a model inter-comparison project (WETCHIMP), Biogeosciences, 2013, Vol. 10, pp. 753–788.
- 18. Montzka S.A., Krol M., Dlugokencky E., Hall B., Jockel P., Lelieveld J., Small Interannual Variability of Global
- Atmospheric Hydroxyl, *Science*, 2011, Vol. 331, pp. 67–69.

 19. Razavi A., Clerbaux C., Wespes C., Clarisse L., Hurtmans D., Payan S., Camy-Peyret C., Coheur P., Characterization of methane retrievals from the IASI spaceborne sounder, Atmospheric Chemistry and Physics, 2009, Vol. 9,
- 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, pp. 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, pp. 64–70.
- 22. Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V., Lobkovsky L., Yusupov V., Salyuk A., Salomatin A., Chernykh D., Kosmach D., Panteleev G., Nicolsky D., Samarkin V., Joye S., Charkin A., Dudarev O., Meluzov A., Gustafsson O., The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice, Philosophical Transactions of the Royal Society A, 2015, Vol. 373, Issue 2052, pp. 1–13.
- Walsh J.E., Kattsov V.M., Chapman W.L., Govorkova V., Pavlova T., Comparison of Arctic climate simulations by uncoupled and coupled global models, *Journal of Climate*, 2002, Vol. 15, pp. 1429–1446
 Wania R., Melton J.R., Hodson E.L., Poulter B., Ringeval B., Spahni R., Bohn T., Avis C.A., Chen G., Eliseev A.V., Hopcroft P.O., Riley W.J., Subin Z.M., Tian H., van Bodegom P.M., Kleinen T., Yu Z.C., Singarayer J.S., Zürcher S., Lettermeier D.B., Populing D.L., Donicov S.N., Prigent C., Pang E., Kaplan L.O., Present state of global wetland. Lettenmaier D.P., Beerling D.J., Denisov S.N., Prigent C., Papa F., Kaplan J.O., Present state of global wetland extent and wetland methane modelling: methodology of a model inter-comparison project (WETCHIMP), *Geosciences Model Development*, 2013, Vol. 6, pp. 617–641

 25. Westbook 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.

 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, pp. 2255–2265.

 Zona D., Gioli B., Commane R., Lindaas J., Wofsy S.C., Miller C.E., Dinardo S.J., Dengel S., Sweeney C., Karion A., Chang R.Y.-W, Henderson J.M., Murphy P.C., Goodrich J.P., Moreaux V., Liljedahl A., Watts J.D., Kimbell J.S., Linear D.A., Oochel W.C., Cold according despired to the Arctic trade methans budget. Kimball J.S., Lipson D.A., Oechel W.C., Cold season emissions dominate the Arctic tundra methane budget, Proceedings of National Academy of Science, 2016, Vol. 113 (1), pp. 40–45.