

МЕТАН В АТМОСФЕРЕ АРКТИКИ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ, ПРИЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

И.А. Репина, А.А. Аниферов, А.Ю. Артамонов

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН,
г. Москва, Россия*

E-mail: repina@ifaran.ru

Метан играет важную роль в экологических процессах на Земле. В атмосфере он является эффективным парниковым газом. Рост его концентрации приводит к гораздо более сильному парниковому эффекту по сравнению с аналогичным приростом (в процентах) в случае CO_2 . В работе с использованием данных измерений, численного моделирования и спутниковых наблюдений рассмотрена эмиссия метана в Арктике. Рассчитана предполагаемая мощность источников в море Лаптевых. Для валидации расчетов используются данные мониторинга концентраций метана в ГМО Тикси.

Введение

Одной из центральных проблем современной физики атмосферы является математическое моделирование изменчивости газового и аэрозольного состава атмосферы, а также оценка влияния атмосферных примесей на окружающую среду. Атмосфера представляет собой сложную динамическую систему, в которой протекают различные динамические и физико-химические процессы. Эти процессы обусловлены как атмосферной циркуляцией, так и трансформацией газовых и аэрозольных примесей. Важнейшую роль в экологических процессах на Земле играет метан (CH_4). Несмотря на то, что его процентное содержание в атмосфере очень невелико, он является эффективным парниковым газом. Рост его концентрации приводит к гораздо более сильному парниковому эффекту по сравнению с аналогичным приростом (в процентах) углекислого газа. Потенциал глобального потепления CH_4 в краткосрочной перспективе в 72, а среднесрочной в 25 раз выше, чем у CO_2 [1]. 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. Кроме того, увеличение содержания метана способствует росту концентрации другого парникового и жизнеобеспечивающего газа – озона как в тропосфере [2], так и в стратосфере [3].

Потепление в Арктике проходит в два раза быстрее, чем в других районах планеты. Это потепление влияет на естественные источники метана,

мощность многих из которых зависит от окружающей температуры. Исследования последних десятилетий показали, что в отдельных районах морей российской Арктики наблюдаются повышенные концентрации метана как в водной толще, так и в атмосфере. Есть предположение, что подобные концентрации могут быть объяснены выходом метана, значительное количество которого находится под вечной мерзлотой шельфа арктических морей в виде метангидратов [4]. Причиной их разрушения может служить изменение термодинамических условий, в которых они находятся по сравнению с условиями последнего ледникового периода [5]. Из-за послеледниковой трансгрессии моря огромные площади суши были затоплены, и вечная мерзлота, мощность которой достигала 500-600 метров, оказалась в условиях при температуре выше на $5-10^{\circ}$. В результате метангидраты оказались в состоянии фазового перехода «мерзлотное состояние - талое состояние» [5], возникла опасность их массового разрушения и выхода метана в атмосферу, что может привести к усилению парникового эффекта и повторению катастрофической ситуации, которая наблюдалась по палеоданным 55 млн. лет назад [4]. По оценкам геологов, содержание гидратов только на континентальном шельфе морей Восточной Сибири составляет более чем $3,5 \times 10^5$ Мт С [6]. Согласно более консервативной оценке [7], глобальное содержание углерода в гидратах составляет $1,8 \times 10^6$ Мт. Но эта теория далеко не однозначна. Существует теория о выделении метана из-за деградации зоны вечной мерзлоты в условиях современного потепления [8,9], а также оценки отклика эмиссии метана на эту деградацию [10,11]. В некоторых работах (см., напр., [12]) подчеркивается высокая степень неопределенности этого источника эмиссии метана, в частности, на шельфе моря Лаптевых он оценивается в 1–12 Мт С/год. Кроме того, модельные расчеты [13], а также наблюдения температуры на разных глубинах на шельфе показывают: текущего потепления недостаточно, чтобы вызвать дестабилизацию вечной мерзлоты на шельфе моря Лаптевых.

Целью данной работы является оценка возможных источников метана на шельфе моря Лаптевых по данным наземных и спутниковых наблюдений.

Оценка мощности источника метана

На рисунке 1 показана карта маршрута научно-исследовательского судна «Яков Смирницкий» с нанесёнными значениями измеренной с борта судна с помощью высокочастотного газоанализатора закрытого типа DLT-100 концентрации метана в атмосфере.

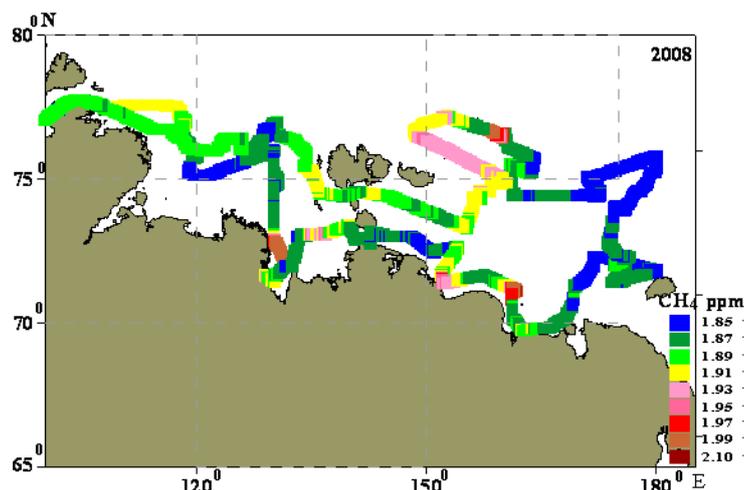


Рис. 1. Изменение концентрации метана по ходу НИС «Яков Смирницкий» во время измерений в 2008 г.

На карте можно выделить районы, где концентрация резко повышалась до 2–2.1 ppm, при фоновой концентрации 1.86 ppm. В настоящей работе анализируется один из таких источников вблизи эстуария реки Лена. В этом районе повышенные концентрации метана наблюдались регулярно [6]. Характерные размеры площадного источника 30*30 км, примерные координаты 72.6° с.ш. 130.62° в.д, а мощность, оцененная с помощью боксовой модели - 92 кг/км²/час при высоте однородной атмосферы 1000 метров.

Для решения прямой задачи нами предполагалось, что на поверхности моря есть площадной источник метана, характерный размер которого составляет примерно 10x10 километров. В условиях развитого турбулентного переноса, когда газ в приземном слое атмосферы быстро перемешивается, образуется практически однородная область с повышенной концентрацией до высоты 150 метров. В задаче определяется минимальная мощность источника, при которой концентрация метана в этой области будет расти.

Для решения задачи использовалось уравнение переноса примеси [14], а для численного решения задачи использовалась явная схема с первым порядком аппроксимации по времени и пространству.

В таблице 1 представлена полученная зависимость мощности источника, необходимой для возрастания концентрации метана в столбе, от времени.

Т.е., чтобы концентрация метана в столбе воздуха начала возрастать после 40 часов воздействия, нужно, чтобы мощность источника была не менее 89 нг/(м² с).

Для расчёта распространения концентрации примеси от площадного источника и, соответственно, местоположения источника нами была использована трёхмерная модель HYSPLIT (HYbridSingle-Particle Lagrangian Integrated Trajectory), разработанная в Air Resources Laboratory [15].

Из-за переменчивости направления и скорости ветра картина распределения концентрации будет иметь сложный вид и меняться во времени. Если рассматривать район $L \sim 200$ км, то характерное время изменения концентрации $L/u \sim 10$ часов будет определяться переносом (u –

характерная скорость ветра 20 км/час). Во время выполнения работ в районе эстуария реки Лена, по данным NOAA ветер имел западное и юго-западное направление. За это время мог образоваться шлейф концентрации метана, который судно пересекло почти поперёк. На рис. 2 показано рассчитанное расположение источника метана на основе измеренных концентраций. То есть можно предположить, что источник расположен где-то между двумя треками и находится не восточнее 133 в.д.

Таблица 1. Зависимость мощности источника, необходимой для возрастания концентрации метана в столбе, от времени.

	1.86-2 ppm	1.86-2.5 ppm	2-2.2 ppm
t, часы	нг/(м ² с)	нг/(м ² с)	нг/(м ² с)
5	208	267	113
10	177	225	93
20	150	193	63
40	89	193	52
80	89	193	38
200	89	193	22
400	89	152	22
800	58	152	22
1200	58	152	22
2000	30	115	22
4000	30	115	22



Рис. 2. Траектории модельных частиц и измеренные значения концентрации метана.

Сравнение рассчитанных и измеренных концентраций метана для источника с координатами 72.4 с.ш и 132.6 в.д. представлено точках в таблице 2.

Таблица 2. Сравнение рассчитанных и измеренных концентраций метана для источника с координатами 72.4 с.ш и 132.6 в.д.

Время	Координаты	Измеренное значение	Вычисленное значение для 12 часов (72.4 с.ш. 132.6 в.д.), Kanthar-Clayson
25.08.13:00	73.021 с.ш 129.981 в.д	1,897	1,926
25.08.16:00	72.919 с.ш 130.066 в.д.	1,925	1,926
25.08.17:00	72.852 с.ш 130.108 в.д.	1,952	1,926
25.08.18:00	72.808 с.ш 130.161 в.д.	2,007	1,926
25.08.20:00	72.607 с.ш 130.615 в.д.	2,0157	2,03
25.08.21:00	72.464 с.ш 130.873 в.д.	2,0136	2,094
25.08.22:00	72.323 с.ш 131.159 в.д.	2,0185	2,094
25.08.23:00	72.174 с.ш 131.436 в.д.	2,0198	2,031
25.08.0:00	72.021 с.ш 131.725 в.д.	2,0077	2,031
25.08.1:00	71.958 с.ш 132.212 в.д.	2	1,948
25.08.3:00	71.923 с.ш 132.587 в.д.	1,998	1,913

Полученные результаты подтвердил анализ мониторинга потоков углекислого газа и метана на базе обсерватории Тикси, также расположенной в районе эстуария р. Лена. Максимальные концентрации метана в Тикси, как и везде в высоких широтах наблюдаются в июле из-за большого притока солнечной радиации и развития фотохимических процессов в тундре. Летом и осенью основная причина высоких концентраций метана – окружающая Тикси тундра и эмиссия с морского шельфа. Наземные источники оказывают влияние с июня по октябрь. В летний и осенний период концентрации метана в Тикси выше, чем на других станциях арктического мониторинга (Цепелин, Шпицберген и Барроу, Аляска) из-за эмиссии метана из сибирских болот. На рисунке 3 показана зависимость потока метана от направления ветра по измерениям 2012 года.

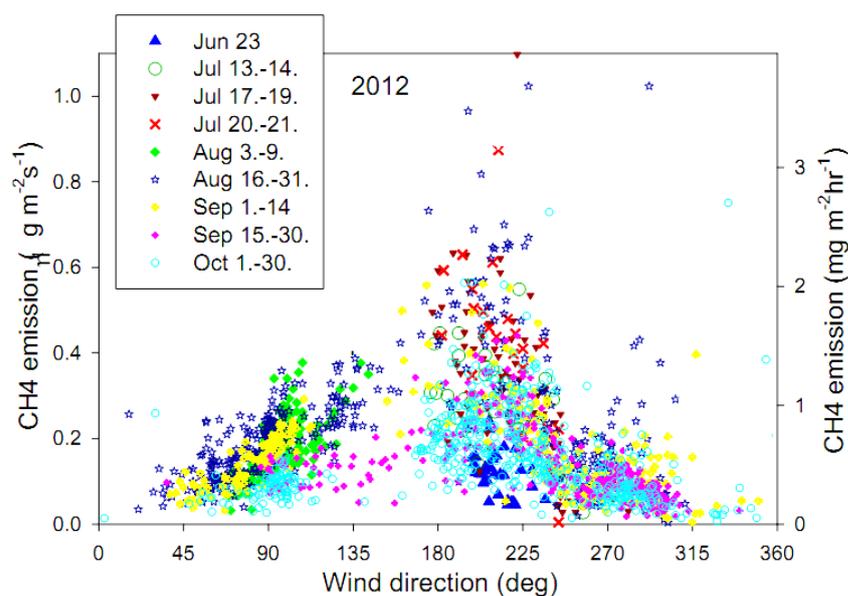


Рис. 3. Зависимость потока метана от направления ветра.

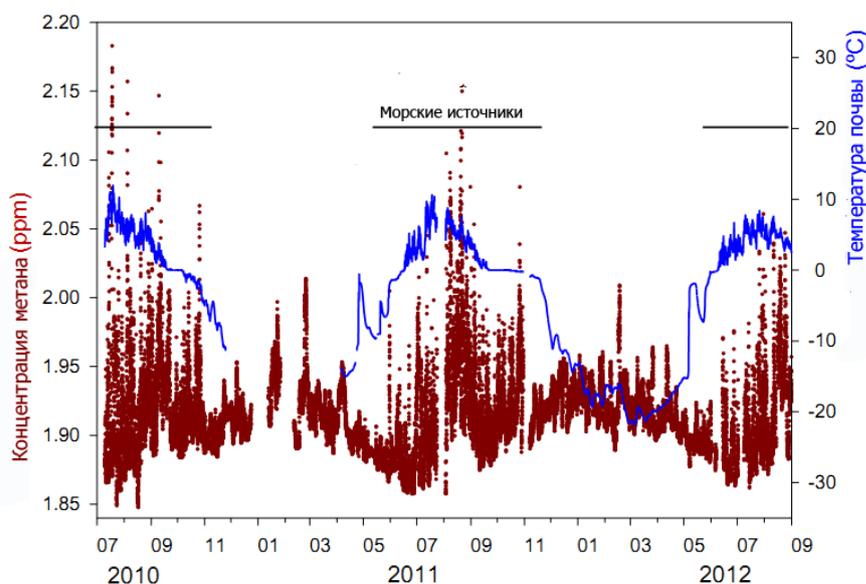


Рис. 4. Изменчивость концентраций метана за период наблюдений в Тикси.

Связь избыточных концентраций метана с направлением ветра подтверждают рис. 4 и 5. На рис. 4 показана изменчивость концентраций метана за все время наблюдений, на рис. 5 – отдельно за август 2012 года. Анализ расположения источника, вызвавшего увеличение концентрации метана 20 августа 2012, подтвердил полученные в предыдущих расчетах координаты источника. Он находится в море восточней 133 в.д. с мощностью порядка 170 – 380 мг/м²/сут.

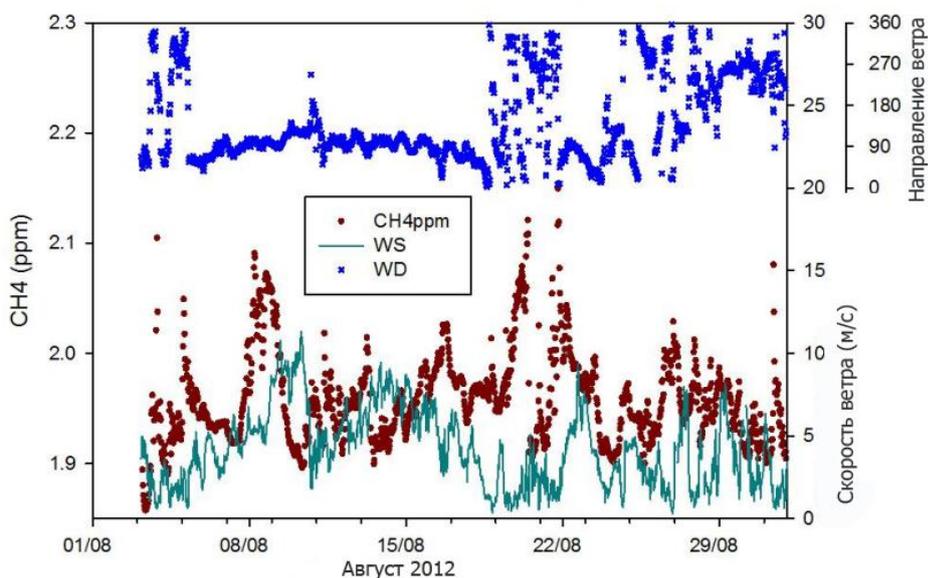


Рис. 5. Изменчивость концентраций метана, скорости и направления ветра в августе 2012 (Тикси).

Также для анализа были привлечены спутниковые данные. Спутниковые инструменты, работающие в ближней инфракрасной области (например, SCIAMACHY) используют в качестве источника солнечное излучение и, соответственно, неприменимы в Арктике, особенно во время полярной ночи. Спутниковые приборы, работающие в тепловой области ИК

диапазона (спектрометры AIRS, IASI, TANSO) способны изменять излучение Земли и атмосферы круглогодично и независимо от времени суток. Точность восстановления концентраций метана по этим приборам в тропосфере оставляет желать лучшего, но является приемлемой для решения определенных задач [16]. Различия в данных, осредненных по всему Северному ледовитому океану и только над открытой водой подтверждают, что стандартные данные измерений метана IASI чувствительны к нижней тропосфере (ниже 4 км) для случаев достаточного температурного градиента (над водой). Над льдом чувствительность либо недостаточна, либо практически отсутствует.

В районе Тикси также проведено сопоставление со спутниковыми данными AIRS, корреляция среднемесячных вариаций метана составила 0,69.

Анализ спутниковых данных по приборам IASI и AIRS для всего Северного Ледовитого океана показал, что измерения метана над СЛО с помощью спутников дают ценную информацию о содержании этого важного парникового газа. Наличие источников метана в акватории СЛО вполне вероятно. Однако, по состоянию на конец 2013 года, концентрация метана над океаном растет с той же скоростью, что и над умеренными и высокими широтами над континентами. Т.е., пока никакого роста выделения метана от СЛО не зарегистрировано.

Регистрировать локальные источники метана возможно по данным РСА (радиолокаторов синтезированной апертуры). Основные преимущества спутниковой радиолокации: возможность получения снимков высокого разрешения (до нескольких метров), широкая полоса обзора, независимость от освещенности и всепогодность. Наиболее доступны и пригодны для целей регулярного мониторинга данные РСА с европейских спутников ERS-1 (1991-2000гг), ERS-2 (1995-2011) и Envisat (2002-2012). В настоящее время работают радиолокаторы на канадском спутнике RADARSAT 2 и на немецких TerraSAR-X и TanDEM-X, но доступ к этим данным затруднен. Рассмотрим некоторые основные особенности радиолокационного обнаружения естественных газовых проявлений. При слабом волнении или штиле в местах выхода естественных газовых компонент при наличии пузырьковой составляющей будут наблюдаться аномалии положительной контрастности по отношению к уровню собственного шума приемника. Возникновение газовых компонент в толще воды приводит к появлению градиента плотности по глубине, что может вызвать генерацию внутренних волн, которые, взаимодействуя с поверхностным волнением, приводят к появлению гладких полос (сликов), что в свою очередь, отразится на радиолокационном изображении. Внутренние волны на РЛИ проявляются как темные или светлые (относительно фона) нитевидные полосы на поверхности воды. Они визуализируются благодаря сликовым полосам, образованным пленками поверхностно-активных веществ естественного происхождения, которые обладают способностью гашения гравитационно-капиллярных волн и тем самым уменьшают величину обратно рассеянного сигнала[17].

Заключение

По расчетам с использованием модели HYSPLIT мощности источников метана, расположенных в морях Восточной Арктики по данным об избыточной концентрации метана в прибрежных районах установлена предполагаемая мощность источников. Координаты источника, находятся не восточней 133 в.д., что подтверждено моделированием распространения частиц от вымышленного источника с координатами 73 с.ш и 138 в.д. Источник метана находится в море, это следует из картины распределения метана и направлении ветра на юго-запад, запад. Для объяснения измеренных концентраций во всех точках в этом районе, необходимо чтобы мощностью источника была порядка 170 – 380 мг/м²/сут., а площадь – порядка 30х30 км. Расчет обратных траекторий переноса воздушных масс, выполненный с использованием HYSPLIT для района обсерватории Тикси показал, что из 9 точек, концентрация СН₄ в которых существенно превышала фоновую, только для одной обратная траектория (высоты 100, 500 и 1000 м) проходила от материка, все остальные были с северных направлений, то есть от морских источников. Рабата выполнена при поддержке РФФИ (гранты 13-05-12082 и 14-05-91764).

Литература:

1. МГЭИК, 2007: Отчет Межправительственной группы экспертов по изменению климата, 2007. URL: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_ru.pdf.
2. Crutzen P.J., Zimmermann P.H. The changing photochemistry of the troposphere // *Tellus*. 1991. Vol. AB43. P. 136–151.
3. Ozone Depletion, 1994: Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1994. WMO Global Ozone Research and Monitoring Project. Report № 37. Geneva, 1994.
4. Голицын Г.С. Оценки возможного «быстрого» метанового потепления 55 млн. лет назад // Доклады академии наук. 2007. Т. 413. №6. С.1-4.
5. Шахова Н.Е., Никольский Д.Ю., Семилетов И.П. О современном состоянии подводной мерзлоты на Восточно-Сибирском шельфе: тестирование результатов моделирования данными натурных наблюдений // Доклады Академии Наук. 2009. Т. 429. № 4. С. 541-544.
6. Shakhova N., Semiletov I., Gustafsson O. Methane from the East Siberian Arctic Shelf-Response // *Science*. 2010. Vol. 329 (5996). P. 1147–1148.
7. Boswell R., Collett T.S. Current perspectives on gas hydrate resources // *Energy and Environmental Science*. 2011. Vol. 4. P. 1206–1215.
8. Малевский-Малевиц 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.
9. Малевский-Малевиц 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.
10. 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.
11. 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.

12. 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.
13. 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.
14. Алоян А.Е. Динамика и кинетика газовых примесей и аэрозолей в атмосфере // Курс лекций, М.: ИВМ РАН, 2002. 201 с.
15. Roland R., Draxler, G.D. *Hess*. DESCRIPTION OF THE HYSPLIT_4MODELING SYSTEM. // <http://www.arl.noaa.gov/documents/reports/arl-224.pdf>
16. Yurganov L., Leifer I., Xiong X. Atmospheric Methane over the Arctic Ocean: Thermal IR Satellite and Ship-Based Observations (в печати).
17. Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Митягина М.И., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 480 с.