

**ИЗМЕРЕНИЕ ВЫБРОСОВ МЕТАНА
В ПРИЛЕДНЫЙ СЛОЙ АТМОСФЕРЫ НА ДРЕЙФУЮЩЕЙ
ЛЕДОВОЙ СТАНЦИИ «СЕВЕРНЫЙ ПОЛЮС-36» (2009 г.)**

канд. физ.-мат. наук А.П.НАГУРНЫЙ, д-р физ.-мат. наук А.П.МАКШТАС

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, nagurny@aari.nw.ru, maksh@aari.nw.ru

Измерение концентрации метана в приледном слое атмосферы на ледовой дрейфующей станции «Северный полюс-36» показало наличие выбросов метана в атмосферу с амплитудой $4,2 \text{ млн}^{-1}$ при подходе станции к глубоководному хребту Ломоносова и далее при нахождении станции над материковым ложем Северного Ледовитого океана вблизи Гренландии. Фоновые значения концентрации метана в приледном слое атмосферы оказались ниже его глобального среднего значения. Приводятся наиболее вероятные механизмы генерации отмеченных выбросов метана в Северном Ледовитом океане.

Ключевые слова: концентрация метана, приледный слой атмосферы, Северный Ледовитый океан.

ВВЕДЕНИЕ

Измерения приземной концентрации метана (CH_4) в арктической атмосфере осуществляются на протяжении нескольких последних десятилетий на трех станциях мониторинга парниковых газов (<ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/flask/month/>), расположенных на берегах и островах Северного Ледовитого океана (СЛО). Отмечается максимальный сезонный размах колебания концентрации CH_4 в околополярных северных областях на фоне устойчивого широтного возрастания концентрации CH_4 от Южного полюса к высоким северным широтам. Специальные измерения в приледном слое атмосферы морей Лаптевых и Восточно-Сибирского показали наличие выбросов CH_4 в атмосферу величиной $6\text{--}8 \text{ млн}^{-1}$ [5]. Детальные пространственные определения растворенного CH_4 в водах шельфовых морей Арктики [10] свидетельствуют о том, что источником выбросов CH_4 в атмосферу являются процессы разрушения газогидратов метана в шельфовой зоне арктических морей. Разрушению газогидратов способствуют подъем уровня Мирового океана и, соответственно, трансгрессия арктических вод, отмечаемая в последние десятилетия, а также увеличение температуры вод, поступающих в СЛО [8]. В настоящей статье приведены данные измерений метана на дрейфующей ледовой станции «Северный полюс-36» (СП-36) в 2009 г.

МЕТОД НАБЛЮДЕНИЙ

Измерение концентрации CH_4 в приледном слое атмосферы центральной части СЛО ранее не производились, поэтому на ледовой дрейфующей станции СП-36 было организовано измерение концентрации CH_4 во время дрейфа станции над глубоководной частью СЛО от хребта Ломоносова, далее над котловиной Амудсена и затем над материковым склоном при подходе к Гренландии. Измерения проводились в период с 26 апреля по 15 августа 2009 г.

Использовался малогабаритный оптический газоанализатор с регистрацией данных наблюдений на персональном компьютере. Принцип действия газоанализа-

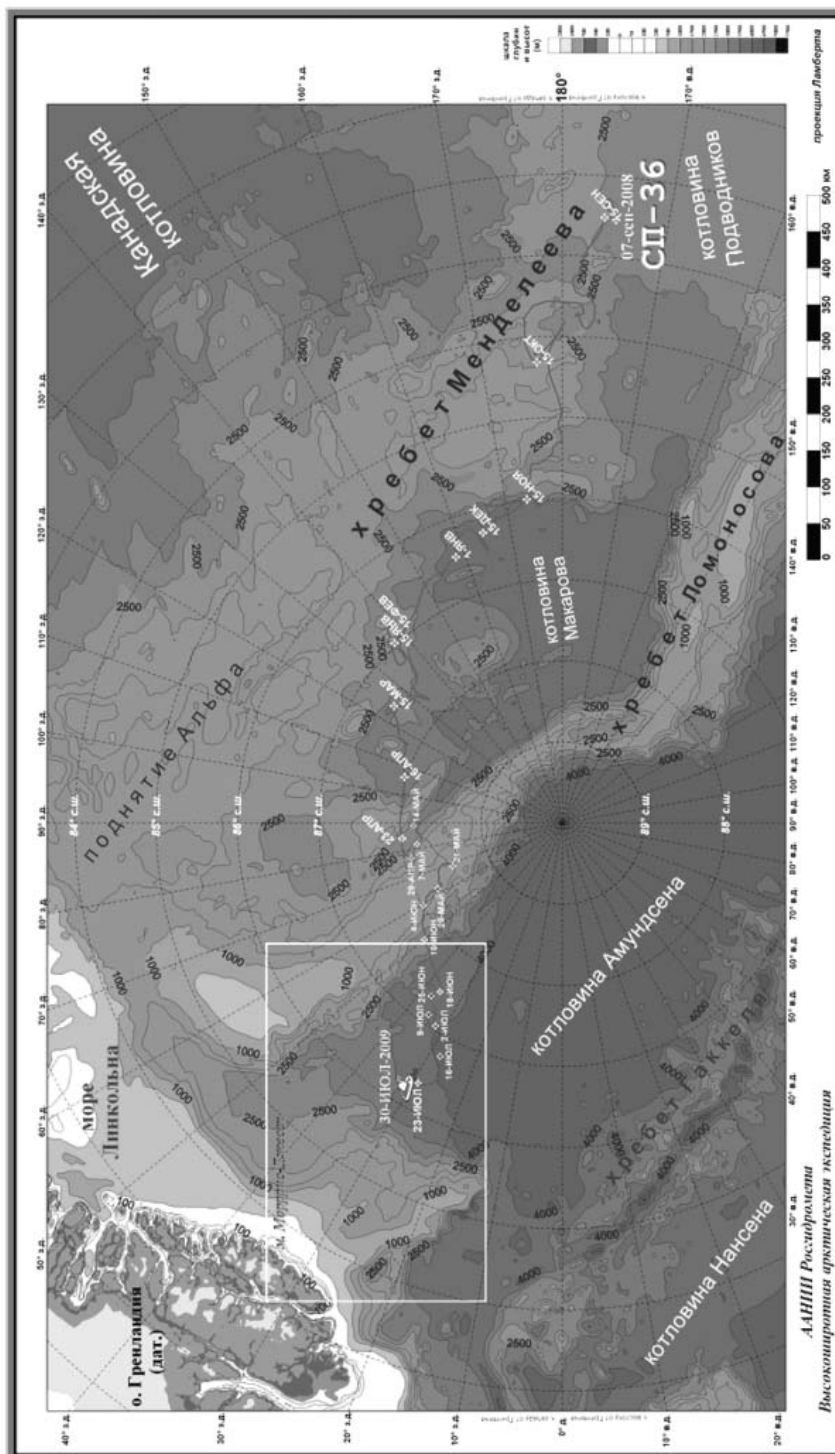


Рис. 1. Схема дрейфа ледовой станции «Северный полюс-36» с 07 сентября 2008 г. по 30 июля 2009 г.

тора основан на избирательном поглощении инфракрасного излучения молекулами метана в области длин волн 3,2–3,4 мкм (www.pp66.ru). Инфракрасное излучение источника (черного тела) проходит через измерительную газовую кювету, через которую прокачивается измеряемый газ, далее через электрически управляемый спектральный фильтр, спектр пропускания которого согласован со спектром поглощения измеряемого газа, и затем попадает на фотоприемник, стабилизируемый по температуре термоэлектрической батареей (элемент Пельтье). Пропускание спектрального фильтра, в зависимости от приложенного управляющего электрического сигнала, либо совпадает, либо не совпадает со спектром поглощения CH_4 . Таким образом, на приемнике возникает сигнал с частотой модуляции управляющего сигнала, амплитуда модуляции которого описывается в соответствии с выражением:

$$\frac{I_p - I_0}{0,5(I_p + I_0)} = 1 - \exp\{-[K(\lambda_p) - K(\lambda_0)]CL\},$$

где $K(\lambda)$ – коэффициент поглощения на заданной длине волны; L – оптическая длина кюветы; C – измеряемая концентрация газа; I_p – амплитуда сигнала на фотоприемнике в момент совпадения положения электрически управляемого спектрального фильтра со спектральной областью поглощения CH_4 ; I_0 – амплитуда сигнала на фотоприемнике в момент несовпадения положения электрически управляемого спектрального фильтра со спектральной областью поглощения CH_4 . Искомая концентрация газа находится по формуле:

$$C = -\text{Ln}[1 - ((I_p - I_0)/0,5(I_p + I_0))]/(L[K(\lambda_p) - K(\lambda_0)]).$$

Используемый спектрально-корреляционный метод регистрации позволяет устранить влияние паров воды, загрязнения оптических элементов и прочих неселективных помех (в том числе прочих углеводородных соединений), а также нестабильности, связанные с оптоэлектронными элементами газоанализатора. Погрешность регистрации концентрации CH_4 составляла $0,1 \text{ млн}^{-1}$ в диапазоне изменений $0\text{--}100 \text{ млн}^{-1}$. Этой точности достаточно для выявления выбросов CH_4 с амплитудой концентрации более 1 млн^{-1} . Для сравнения отметим, что глобальное фоновое значение концентрации CH_4 составляет величину порядка $1,8 \text{ млн}^{-1}$ (www.esrl.noaa.gov).

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Ледовая станция дрейфовала в потоке трансарктического течения (рис. 1). При подходе станции к глубоководному хребту Ломоносова со стороны Канадского суббассейна в конце апреля и первой половине мая отмечались выбросы CH_4 в приледный слой атмосферы амплитудой до $4,2 \text{ млн}^{-1}$ (05.05.2009, рис. 2). Максимальные выбросы наблюдались непосредственно над нижней частью склона хребта, вдоль которого станция дрейфовала с 29 апреля по 15 мая 2009 г. При дальнейшем дрейфе непосредственно над вершиной хребта и над его противоположным склоном выбросы CH_4 не отмечались (рис. 2).

В процессе дрейфа станции над ложем материкового склона шельфа Гренландии зарегистрированы выбросы CH_4 с максимальной величиной $4,2 \text{ млн}^{-1}$ (23.07.2009). Непосредственно над верхней частью материкового склона Гренландии выбросы метана не были отмечены вплоть до окончания работы станции. Фоновые значения концентрации CH_4 были значительно ниже глобальной фоновой величины.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Можно выделить несколько источников метана в СЛО: 1) биогенный метан, произведенный в поверхностных слоях осадка; 2) биогенный метан, синтезированный во всей толще донных осадков; 3) газогидраты в донном слое океана; 4) непосредственное выделение литосферных газов, не перешедших в форму газогидратов. Первые два источника, как правило, равномерно распространены в пространстве, и интенсивность их невелика. Они способны повысить концентрацию

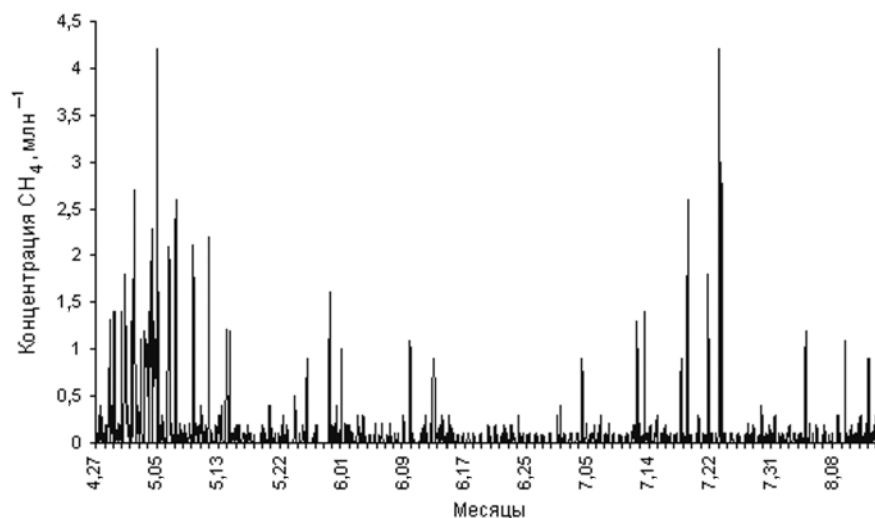


Рис. 2. Распределение концентрации CH_4 в приледном слое атмосферы на пути дрейфа ледовой станции «Северный полюс-36» с 26 апреля по 15 августа 2009 г.

CH_4 в пределах придонных слоев воды. Последние два источника распределены в пространстве неравномерно, и их интенсивность может быть самой разной величины, вплоть до залповых выбросов. Из двух последних источников наиболее известны газогидраты, содержащие CH_4 [3]. Единичный объем газогидрата может содержать 160–180 объемов CH_4 . Плотность газогидрата метана ниже плотности воды и льда и составляет примерно 900 кг/м^3 . Газогидраты метана существуют при определенных термобарических условиях, таких, согласно которым зона стабильности газогидрата занимает 90 % дна океанов и морей. Внутримерзлотные залежи содержат лишь незначительную часть ресурсов газа, которые связывают с природными газогидратами. Основная часть ресурсов приурочена к зоне стабильности газогидратов — тому интервалу глубин, где имеют место термодинамические условия для гидратообразования. В морях СЛО это интервал глубин от дна до уровня 300–400 м. Именно в этом интервале была обнаружена основная масса природных газогидратов метана [3].

Метан, попавший в воду, переносится путем диффузии и пузырьковым способом [6]. Диффузия CH_4 в воду является медленным процессом. Далее растворенный CH_4 переносится океаническими течениями, для которых характерное время вертикального переноса от дна до поверхности составляет десятилетия (порядок вертикальных скоростей — 10 см/сутки [9]), за исключением редких случаев проникающей глубоководной конвекции, где вертикальный обмен возрастает на несколько порядков [4]. За время океанической адвекции CH_4 большей частью успевает окислиться. Реакция аэробной и анаэробной микробной метанотрофии имеет вид [3]: $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + \text{H}_2\text{O} + 814 \text{ кДж}$; $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + 4\text{H}_2 - 165 \text{ кДж}$. В сумме в этих реакциях выделяется значительное количество тепла.

Пузырьковый перенос значительно интенсивнее диффузионного. В глубоководной части СЛО этот процесс может обеспечить вынос CH_4 к нижней поверхности морского льда, если объем пузырьков достаточно велик. В противном случае CH_4 успеет раствориться по мере поднятия пузырьков до полного их исчезновения. Чем больше размер пузырька, тем быстрее он поднимается. Теоретически возможные

скорости всплытия крупных пузырьков описаны в работе [7]. Вертикальные скорости наиболее крупных из них могут достигать значения одного метра в секунду. Это означает, что метан с глубины 4–3 км может достигнуть нижней кромки морского льда примерно за один час.

Можно предположить возможность всплытия крупных моноблоков газогидратов метана (благодаря их положительной плавучести), если они освободились от донных осадков в результате, например, эрозии рельефа дна. Чем крупнее моноблок, тем быстрее он достигает нижней поверхности морского льда, постепенно разлагаясь на газ и воду в зоне первых нескольких сотен метров глубин с термобарической нестабильностью существования газогидратов.

Отмеченные в измерениях CH_4 аномалии концентрации газа в приледном слое атмосферы на ледовой станции СП-36, вероятнее всего, могут быть результатом выделения крупных метановых пузырей со дна океана. Подобные выделения CH_4 с больших глубин свидетельствуют в пользу литосферного источника выделения газов, которые, проникая в донные осадки, образуют полости в виде смеси газа и газогидрата метана. Образование крупных газовых пузырей возможно не только в результате эрозии рельефа дна океана, но и в результате разрушения газогидратов при изменении условий их стабильного существования, например в случае изменений геотермальных условий на дне океана. Последнее характерно для различного рода геологически активных разломов океанической и материковой части земной коры вблизи больших перепадов глубин. Например, вблизи материкового склона на северо-востоке Баренцева моря в поверхностных водах непосредственно прямыми измерениями выявлено аномально высокое содержание растворенного в воде метана [1].

В среднем фоновые значения концентрации CH_4 в приледном слое атмосферы СЛО оказались ниже уровня глобальной фоновой величины, что свидетельствует либо об экранирующей роли морского льда, либо об отсутствии большого числа источников метана в целом по всей акватории СЛО, так что, в основном, окружающие СЛО материковые источники CH_4 являются преобладающими в формировании фоновых значений концентрации CH_4 в приледном слое атмосферы СЛО.

Метан, попавший на нижнюю границу морского льда, подвергается более интенсивному аэробному окислению, которое сопровождается выделением сравнительно большого количества тепла. Это, возможно, способствует некоторому изменению реологических свойств ледового покрова и прежде всего прочностных характеристик льда, что должно отразиться на процессах торошения, образования трещин, разводий, каналов. В летнее время это может повлиять на процессы интенсификации таяния льда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отметим несколько основных моментов в экспериментах по наблюдению концентрации CH_4 на маршруте дрейфа ледовой станции СП-36 (2009 г.):

- фоновые значения концентрации CH_4 оказались ниже уровня глобальной фоновой величины;
- выявлено несколько случаев аномальных значений концентрации CH_4 в приледном слое атмосферы СЛО;
- все случаи аномальных значений концентрации CH_4 наблюдались в момент дрейфа станции над склоном глубоководного хребта Ломоносова со стороны котловины Макарова и материковым склоном Гренландии, т.е. при подходе станции к районам значительных перепадов глубин.

Авторы признательны сотрудникам Арктического и антарктического научно-исследовательского института С.В.Шутилину, И.А.Бобкову за качественное выполнение наблюдений в сложных условиях дрейфа ледовой станции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геворкьян В.Х., Чугунный Ю.Г., Сорокин А.Л., Лука Г.И., Павлов А.И. Геологические аспекты биологической продуктивности океана. Мурманск: Мурманское книжное издательство, 1990. 188 с.
2. Леин А.Ю., Иванов М.В. Биохимический цикл метана в океане. М.: Наука, 2009. 576 с.
3. Макогон Ю.Ф. Природные газовые гидраты: распространение, модели образования, ресурсы // Российский химический журнал. 2003. Т. 48. № 3. С. 70–79.
4. Нагурный А.П., Попов А.В. Интенсивное поднятие глубинных и донных вод и их формирование на поверхности в районе Гренландской котловины // Метеорология и гидрология. 1985. № 7. С. 70–75.
5. Шахова Н.Е., Семилетов И.П., Салюк А.Н., Бельчева Н.Н., Космач Д.А. Аномалии метана на шельфе Арктических морей России // Исследования морских экосистем и биоресурсов/ Под ред. В.П.Челомина. М.: Наука, 2007. С. 353–364.
6. Юсупов В.И., Салюк А.Н., Карнаух В.Н., Семилетов И.П., Шахова Н.Е. Обнаружение областей пузырьковой разгрузки метана на шельфе моря Лаптевых в Восточной Арктике // Доклады Академии наук. 2010. Т. 410. № 6. С. 820–823.
7. Clift R., Grace J.R., Weber M.E. Bubbles, Drops, and Particles. N.Y.: Acad. Press, 1978. 380 p.
8. Frolov I.E., Ashik I.M., Kassens H., Polyakov I.V., Proshutinsky A.Yu., Sokolov V.T., Timokhov L.A. Anomalous Variations in the Thermohaline Structure of the Arctic Ocean // Doklady Earth Sciences. 2009. Vol. 429A. № 9. P. 1567–1570.
9. Neelov I.A., Savchuk O.P. 3-D IO RAS AARI Coupled Model // Filatov et al. White Sea. Its marine Environment and ecosystem dynamics influenced by global change. Chichester: Springer-Praxis Publ., 2005. P. 410–442.
10. 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.

A.P.NAGURNY, A.P.MAKHTASH

INVESTIGATION OF METAN CONCENTRATION IN THE ATMOSPHERE BOUNDARY LAYER AT THE ICE DRIFT «NORTH POLE-36» STATION (2009)

Anomaly value of metan concentration perturbations with amplitude 4,5 ppm was observed at way of drift ice station NP-36 under ridge of Lomonosov and continental slope near of Greenland. Background value of metan concentration at under the North Pole ocean was smaller than global value. Some possible mechanisms were discussed.

Keywords: metan concentration, boundary layer of atmosphere, North Pole ocean.