

МЕТАН В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ АРКТИКИ

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

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail:nagurny@aari.ru

Обобщены результаты наблюдений за концентрацией метана в приповерхностном слое атмосферы, выполненных в экспедициях Арктического и антарктического научно-исследовательского института в 2002–2014 гг. Наблюдения проводились на дрейфующих станциях «Северный полюс-36» и «Северный полюс-39» в Центральной Арктике, в Гидрометеорологической обсерватории Тикси, расположенной на берегу моря Лаптева в зоне многолетней мерзлоты и на научно-исследовательской станции «Остров Самойловский» в дельте реки Лены.

Ключевые слова: метан, приземный слой атмосферы, дрейфующая станция, Северный Ледовитый океан.

ВВЕДЕНИЕ

Последние несколько десятилетий осуществляются регулярные наблюдения за изменчивостью концентрации метана в приземном слое арктической атмосферы на станциях мониторинга парниковых газов, расположенных вблизи Северного Ледовитого океана (СЛО). Измерения показали наличие значительных сезонных изменений концентраций метана в северной полярной области. В частности, были зарегистрированы эпизодические интенсивные увеличения концентрации метана в нижнем слое атмосферы на шельфе морей Лаптева и Восточно-Сибирского, достигающие $6\text{--}8 \text{ млн}^{-1}$ (Shakhova et al., 2010), а также вблизи материкового склона СЛО величиной более 4 млн^{-1} (Нагурный, Макштас, 2011). Причиной таких явлений могут быть разрушение газогидратов в шельфовой зоне арктических морей и эрозия осадочных пород, содержащих газогидраты в области материкового склона СЛО, например, в результате действия мутьевых (аналог селевых) потоков, вызванных неустойчивостью склоновых течений, а также геологической активностью в зоне больших перепадов глубин. Повышенный фон концентрации метана в атмосфере центральной части СЛО обусловлен, вероятней всего, биологической активностью в толще морского льда и на его нижней границе (Нагурный и др., 2013).

В настоящей статье представлен обзор результатов измерений концентрации метана в приповерхностном слое атмосферы, выполненных в центральной части СЛО на дрейфующих станциях «Северный полюс-36» (2009–2010 гг.) и «Северный полюс-39» (2011–2012 гг.), а также в Гидрометеорологической обсерватории Тикси (Киселев, Решетников, 2013), где повышенный фон и значительная сезонная изменчивость концентрации метана обусловлены главным образом наличием слоя многолетней мерзлоты. В заключение представлены предварительные результаты измерений

концентрации парниковых газов, выполняемых в летний период ежегодно начиная с 1998 г. ААНИИ и Институтом морских и полярных исследований им. Альфреда Вегенера (Германия) в дельте реки Лены.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ НА ДРЕЙФУЮЩЕЙ СТАНЦИИ СП-36

Дрейфующая станция СП-36 дрейфовала в потоке трансарктического течения. При подходе станции к глубоководному хребту Ломоносова со стороны Канадского бассейна в конце апреля и первой половине мая были отмечены экстремальные концентрации CH_4 , достигающие $4,2 \text{ млн}^{-1}$ (рис. 1). Максимальные концентрации наблюдались непосредственно над глубоководной частью склона хребта, вдоль которого станция дрейфовала с 29 апреля по 15 мая 2009 г. Аналогичные концентрации наблюдались в ходе дрейфа станции над ложем материкового склона шельфа Гренландии (23 июля 2009 г.).

Можно предположить существование нескольких источников метана в СЛО: биогенный метан, образующийся в поверхностных слоях осадков; биогенный метан, синтезированный во всей толще донных осадков; газогидраты в придонном слое океана; непосредственное выделение литосферных газов, не перешедших в форму газогидратов. Первые два источника, как правило, равномерно распространены в пространстве, и интенсивность их невелика. Они способны лишь несколько повысить концентрацию CH_4 в пределах придонных слоев воды. Последние два источника распределены в пространстве неравномерно, а их интенсивность может быть самой разной величины, вплоть до залповых выбросов. 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 . Устойчивые газогидраты метана существуют при определенных термобарических условиях, типичных для 90 % дна океанов и морей. В глобальном масштабе внутримерзлотные залежи содержат лишь незначительную часть ресурсов газа, которые связывают с природными газогидратами. В морях СЛО зона стабильности газогидратов соответствует интервалу глубин от дна до глубины 300–400 м. Именно в этом интервале была обнаружена основная масса природных газогидратов метана (Макогон, 2003).

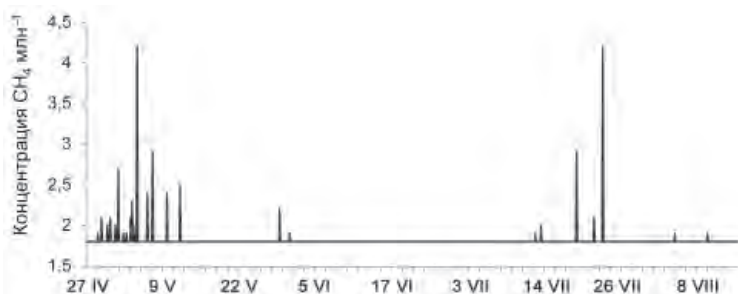


Рис. 1. Распределение концентрации CH_4 по маршруту дрейфа станции «Северный полюс-36» с 26 апреля по 15 августа 2009 г. в периоды, когда она превышала среднюю по земному шару величину $1,8 \text{ млн}^{-1}$.

Метан, попавший в воду, переносится путем диффузии и пузырьковым способом. 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, так как характерные вертикальные скорости, за исключением редких случаев проникающей глубоководной конвекции, когда вертикальный обмен возрастает на несколько порядков (Нагурный, Попов, 1985), имеют порядок 10 см/сут. За это время CH_4 большей частью успевает окислиться.

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. Вертикальные скорости наиболее крупных из них могут достигать величины 0,5–1 м/с. Это означает, что метан с глубины 4–3 км может достигнуть нижней кромки морского льда примерно за один час.

Можно предположить и возможность всплытия крупных моноблоков газогидратов метана (благодаря их положительной плавучести), если они освободились от донных осадков в результате, например, эрозии рельефа дна, вызванной мутьевыми потоками и неустойчивостью склоновых течений. Отмеченные на дрейфующей станции СП-36 аномалии концентрации CH_4 в приледном слое атмосферы, вероятнее всего, обусловлены подъемом крупных метановых пузырей со дна океана. Эти аномалии соответствуют в одном случае положению станции над глубоководной частью склона хребта Ломоносова со стороны котловины Макарова, в другом — над ложем материкового склона Гренландии. Подобные аномалии CH_4 в районах больших глубин, вероятно, свидетельствуют о наличии литосферных источников 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, 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.

Метан, попавший на нижнюю границу морского льда, подвергается более интенсивному аэробному окислению, которое сопровождается выделением сравнительно большого количества тепла (814 кДж/моль O_2). Это, возможно, способствует некоторому изменению реологических свойств ледового покрова и прежде всего прочностных характеристик льда, что должно отразиться на процессах торошения, образования трещин, разводий и каналов. В летнее время это может повлиять на процессы интенсификации таяния льда.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ НА ДРЕЙФУЮЩЕЙ СТАНЦИИ СП-39

Дрейф СП-39 проходил над западной частью Канадской котловины вблизи поднятия Альфа, смещаясь в направлении острова Элсмери (Канада), не достигая материкового склона Канадского шельфа. С момента открытия станции (30 сентября 2011 г.) общий дрейф составил 1730 км, генеральный дрейф 570 км. В течение дрейфа станция не покидала центральной части СЛО. Общее количество дней наблюдений — 332. На рис. 2 представлены среднесуточные значения концентрации метана за весь период наблюдений.

Максимальное значение концентрации метана по данным трехминутного осреднения зафиксировано 1 мая 2012 г. и составило $2,032 \text{ млн}^{-1}$, а минимальное

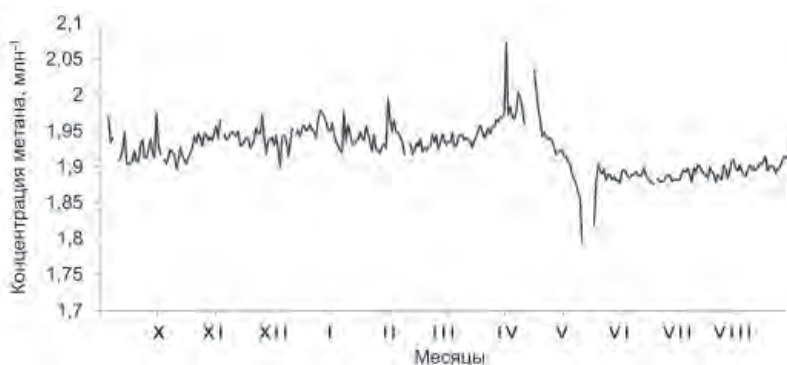


Рис. 2. Среднесуточные значения концентрации метана в приледном слое атмосферы на ледовой дрейфующей станции «Северный полюс-39» в период с 1 октября 2011г. по 7 сентября 2012 г.

значение наблюдалось 31 мая 2012 г. и составило $1,685 \text{ млн}^{-1}$. Среднее значение концентрации метана в приледном слое за весь период наблюдений — $1,925 \text{ млн}^{-1}$. Как видно из рисунка, можно выделить два режима фонового значения метана. Первый, с высоким значением концентрации ($1,940 \text{ млн}^{-1}$), соответствует периоду полярной ночи (с ноября по март), второй, с меньшим значением ($1,893 \text{ млн}^{-1}$), соответствует полярному дню (с мая по сентябрь). Переход от одного режима к другому занимает один месяц — с середины апреля по середину мая. Разность фоновых значений концентрации составляет 47 млрд^{-1} .

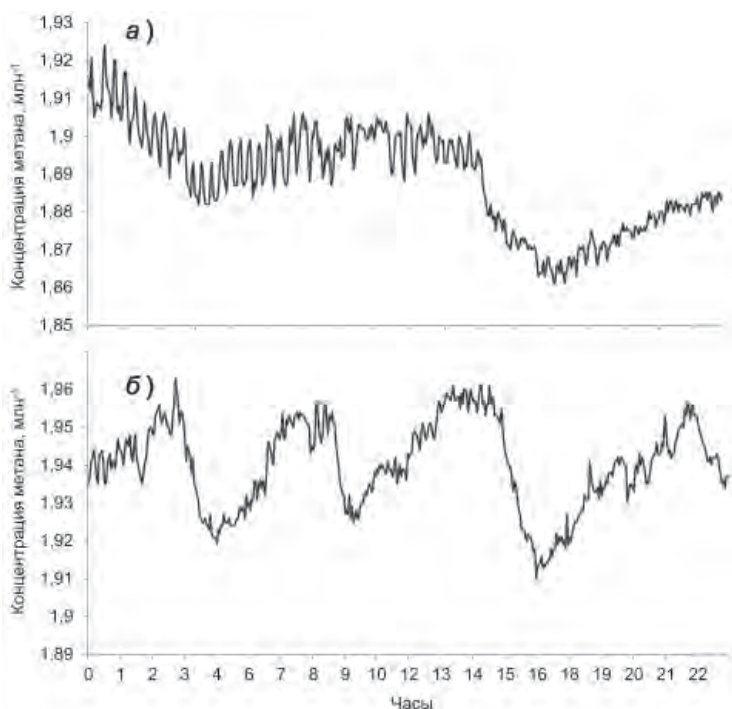


Рис. 3. Внутрисуточные изменения концентрации метана в приледном слое атмосферы на дрейфующей станции «Северный полюс-39» (а — 20 июня 2012 г; б — 7 апреля 2012 г.).

Анализ внутрисуточных изменений концентрации метана показал, что в период дрейфа наблюдались ее изменения с периодами, близкими к полусуточному приливу (рис. 3а) и его гармоники с шестичасовым периодом (рис. 3б). При этом размах изменения концентрации метана на частоте полусуточного прилива достигал 40 млрд⁻¹.

Для выявления наличия океанических приливов использовались данные GPS-наблюдений за координатами станции и предположение, что дрейф станции отслеживает приливные движения. Анализ данных подтвердил присутствие полусуточного прилива в случае, представленном на рис. 3а, и наличие его шестичасовой реверсивной гармоники в случае, представленном на рис. 3б.

На рисунке 3а можно также отметить более короткие колебания концентрации метана с периодом порядка 20 мин, характерным для внутренних волн, распространяющихся в верхнем распресненном слое СЛО. Этот слой хорошо развит в летнее время, когда тает морской лед (на станции СП-39 лед начал интенсивно таять в начале июня). Следует отметить, что движения подледного слоя вод различных масштабов вызывают деформации морского льда, способствующие развитию трещин, разводей, каналов или торосов в ледовом покрове, тем самым облегчая или затрудняя (при сжатии льда) газообмен между приледным слоем атмосферы, нижней границей морского льда и верхним слоем океана. Проявление колебаний концентрации метана в приледном слоя атмосферы на частоте океанических приливов и внутренних волн верхнего слоя океана свидетельствует о том, что источники метана находятся вблизи нижней границы ледового покрова и в самом льду.

Сравнение внутригодовой изменчивости среднемесячных значений концентрации метана за 2012 г. на станциях мониторинга парниковых газов (www.esrl.noaa.gov), расположенных вблизи СЛО, с данными измерений на дрейфующей станции СП-39 показало (рис. 4), что среднемесячные значения концентрации метана на станциях мониторинга во все месяцы меньше, чем на дрейфующей станции. При этом в момент максимума концентрации метана на СП-39 превышение концентрации относительно станции Барроу составило 60 млрд⁻¹ в среднемесячных величинах. Следует отметить, что на всех станциях мониторинга и особенно на дрейфующей станции в центральной части СЛО прослеживается сезонный ход с максимумом в зимний период и амплитудой, составившей на СП-39 величину 79 млрд⁻¹.

Полученный результат можно объяснить существованием источников метана в верхнем слое воды и на нижней границе морского льда, а также в самой толще льда.

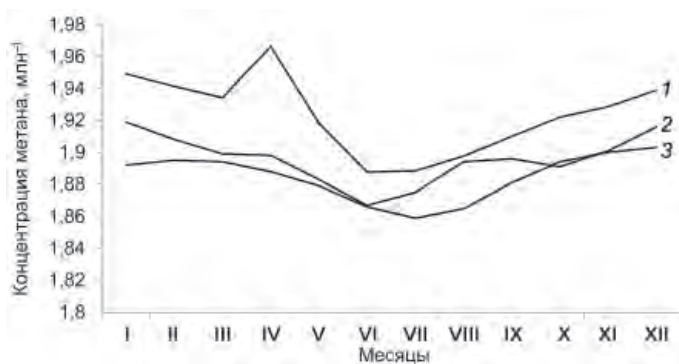


Рис. 4. Изменение среднемесячных значений концентрации метана в приледном слое атмосферы на дрейфующей станции «Северный полюс-39» (1), Барроу (2), Цеппелин (3).

Какова природа этих источников? Возможно, что эти источники связаны с геологической активностью или разрушением газогидратов на дне океана. Однако для геологических факторов, так же как и для океанической адвекции растворенного метана, сезонный ход не является типичным. Одним из возможных факторов, способных объяснить особенности изменения концентрации метана в центральной части СЛО, является биологическая активность в морском ледяном покрове (Мельников, 2005; Леин, Иванов, 2009).

Биологическая активность в морском льду наблюдалась давно, но о масштабах биологической продуктивности в целом для СЛО известно немного. Особенно большой продуктивностью обладают инфильтрационные льды, которые имеют небольшую толщину и подвержены большой сезонной изменчивости. В таких льдах, притопленных снежным покровом, морская вода поднимается по капиллярам и трещинам к границе лед–снег. На этой границе, когда имеются условия для фотосинтеза, а температура близка к 0 °С, образуется большое количество водорослей (так называемые бурые льды), масса которых намного превышает массу биологических продуктов в подледном слое. Следует попутно отметить, что в последние годы благодаря потеплению Арктики и уменьшению средней толщины морского льда отмечается увеличение биологической продуктивности (Нагурный, 2009).

В полярную ночь на нижней границе морского льда и в его толще, т. е. в условиях дефицита растворенного кислорода и отсутствия фотосинтеза, преобладают процессы микробной генерации метана. Происходит нечто зеркальное сибирским озерам и болотам, при этом роль дна играет нижняя граница морского льда. Росту концентрации метана способствует также инверсионный характер распределения температуры в пограничном слое полярной атмосферы, достигающий максимума высоты и мощности в марте (Nagurny, 1995). Развитый инверсионный слой, как правило, ослабляет вертикальный обмен метана с вышележащими слоями атмосферы. Исследования термической структуры нижнего километрового слоя атмосферы на станции СП-39, выполненные с помощью метеорологического температурного профилемера МТП-5Р, разработанного НПО АТТЕХ, показали, что инверсионный слой практически постоянно присутствовал в холодный период года. Его высота составляла от ста до восьмисот метров. Летом, в результате радиационного прогрева подстилающей поверхности, инверсий практически не наблюдалось.

С наступлением полярного дня (апрель) начинают действовать процессы фотосинтеза. Благодаря насыщению верхнего слоя океана талыми водами, обогащенными кислородом, усиливаются процессы подледной микробной метанотрофии. Следует отметить, что в Мировом океане более 80 % метана окисляется микроорганизмами. В экспериментах с радиоактивным метаном в природных экосистемах микробный процесс окисления метана происходит при температурах близких к 0 °С, т. е. температуре таяния поверхности льда (Леин, Иванов, 2009). Появление больших участков открытой воды в летний сезон усиливает процессы поглощения метана из атмосферы. Поглощение происходит распресненными талыми водами, которые не могут быть изначально насыщены метаном по природе своего происхождения.

Сток метана происходит и в приледном слое атмосферы в результате фотохимических процессов, которые особенно интенсивны в присутствии прямых солнечных лучей. Не обладая высокой реактивной способностью, молекулы метана взаимодействуют с активными молекулами гидроксила ОН, атомами возбужденного кислорода

и атомами галогенов Cl, Br и др. в реакции замещения углерода в молекуле метана (Кароль, Киселев, 2004). При этом следует отметить, что избыток галогенов характерен для верхних слоев океана с его высокой соленостью и биологическими продуктами. Атомы галогенов попадают в приледный слой атмосферы при деформациях льда и обрушении ветровых волн на открытых участках воды (Нагурный, 1989).

Если иметь в виду резкий переход в режиме изменения концентрации метана (рис. 4), когда интенсивное уменьшение его концентрации начинается с началом поллярного дня, но раньше времени интенсивного таяния морского ледяного покрова (июнь), то следует признать важность фотохимических процессов в балансе изменения количества метана в приледном слое атмосферы. Необходимо учитывать также, что над ледяным покровом с очень высоким альбедо интенсивность коротковолновой радиации может быстро возрастать (переоблучение пограничного слоя атмосферы).

В работе (Нагурный, Макштас, 2013) была выполнена приблизительная оценка максимальной величины генерации CH_4 морским льдом СЛО в течение года. Она не превышает значение 2,7 Мт метана в год. Наиболее вероятна оценка 1,5 Мт в год. Эта величина составляет 15 % от общего количества метана, генерируемого всем Мировым океаном (10 Мт) (Кароль, Киселев, 2004), что представляется существенной величиной, учитывая малую площадь морского льда СЛО относительно общей площади Мирового океана.

НАБЛЮДЕНИЯ В ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ТИКСИ

Россия располагает пятью постоянно действующими станциями, на которых выполняются измерения метана: Черский (68° 51' с.ш., 161° 53' в.д.), Териберка (69° 12' с.ш., 35° 06' в.д.), Новый Порт (67° 41' с.ш., 72° 52' в.д.), Тикси (71° 5' с.ш., 128° 9' в.д.) и Воейково (59° 57' с.ш., 30° 6' в.д.). При этом регулярные наблюдения за метаном в ГМО Тикси, расположенной на берегу моря Лаптевых, были начаты летом 2010 г. совместно Финским метеорологическим институтом и Главной геофизической обсерваторией им. Воейкова при технической поддержке ААНИИ.

Местоположение российских станций позволяет выделить местные особенности поведения концентрации метана. Одну из них (Териберка, Кольский полуостров) можно рассматривать как фоновую, другую (Новый Порт, полуостров Ямал) — в качестве станции, данные измерений на которой позволяют контролировать техногенные выбросы парниковых газов на близко расположенных месторождениях природного газа и нефти, а третью (Воейково) — как станцию в окрестности крупного мегаполиса. Особый интерес вызывают станции Новый Порт и Тикси, находящиеся в зоне сплошной многолетней мерзлоты с множеством небольших термокарстовых озер, накладывающей отпечаток на формирование поля концентрации метана (Киселев, Решетников, 2013).

Результаты многолетних измерений концентрации CH_4 как функции долготы места (от побережья п-ова Таймыр до устья р. Индигирки), обзор которых приведен в работе (Киселев, Решетников, 2013), показали, что максимальные значения концентраций метана наблюдались в области, близкой к долготе расположения ГМО Тикси. Измеренные на акватории моря Лаптевых концентрации CH_4 , на 25–30 % выше фоновых значений.

По результатам двухмесячных непрерывных наблюдений на этой станции в 2011 г.: среднемесячная концентрация CH_4 составила 1909 ± 30 млрд⁻¹ в июле и 1959 ± 42 млрд⁻¹ в августе; максимальная амплитуда колебаний концентрации CH_4 достигала 140 млрд⁻¹ при максимальном значении концентрации 2008 млрд⁻¹ в июле и

около 300 млрд⁻¹ при максимальном значении 2150 млрд⁻¹ в августе. Максимальное значение приходилось на вторую половину августа, характеризующуюся и максимальными дневными температурами приземного слоя воздуха. Анализ возможных причин столь значительных расхождений результатов мониторинга в этом регионе содержится в работе (Решетников, Ивахов, 2012).

ИЗМЕРЕНИЕ ПОТОКОВ МЕТАНА НА НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ СТАНЦИИ «ОСТРОВ САМОЙЛОВСКИЙ»

Начиная с 1998 г. ААНИИ ежегодно проводит в летний период в дельте реки Лены совместно с Институтом морских и полярных исследований им. Альфреда Вегенера (Германия) натурные исследования. После визита Президента Российской Федерации Владимира Владимировича Путина на базу экспедиции по его поручению была построена научно-исследовательская станция «Остров Самойловский», открытая летом 2013 г. Остров расположен в области резко континентального климата, со среднегодовой температурой воздуха (–14,7 °C) и малым количеством осадков в летний период (137 мм). Мощность мерзлоты достигает 500–600 м, а мощность деятельного слоя составляет 50–70 см.

Научно-исследовательские работы в дельте р. Лены направлены на изучение причин и механизмов климатических изменений, которые происходили и происходят в природной среде системы моря Лаптевых на протяжении последних 10 тыс. лет. На базе экспедиции, расположенной на острове Самойловский в центре дельты р. Лены, ведутся наблюдения за различными компонентами природной среды — характеристиками приземного слоя атмосферы, мерзлотой и ландшафтами, которые позволяют расшифровать изменения, произошедшие в дельте р. Лены. Важное значение имеют многолетние наблюдения (с 2002 г.) за эмиссией парниковых газов — метана и углекислого газа из вечной мерзлоты.

Измерения эмиссии метана осуществляются с использованием системы датчиков для пульсационных наблюдений EDDY, которая была установлена в центре восточной части острова (Wilk et al., 2008). В районе исследований распространен ландшафт полигональной тундры, характеризующийся большим количеством некрупных озер изометрической формы, глубиной 1–1,5 м и специфической растительностью, представленной гидрофильными видами *Arex aquatilis*, *Carexchordorrhiza* и *Carex rariflora* и мхами *Drepanocladus revolvens*, *Meesia triquetra*, *Aulacomnium turgidum*. Основные результаты измерений представлены на рис. 5.

По сравнению с тремя другими районами Арктики, где выполняются наблюдения с помощью системы EDDY в Арктике (Аляска, Гренландия и север Финляндии), эмиссия метана на о. Самойловский была относительно низкой, вероятно из-за чрезвычайно холодной вечной мерзлоты, ограниченного метаногенеза в субстрате и относительно большого распространения незатопляемых и умеренно влажных поверхностей (Sachs et al., 2008). Как известно, температура почвы и турбулентность в пограничном слое атмосферы являются одними из основных факторов, контролирующих поток метана. Зависимость потока метана от атмосферной турбулентности и адвекции в районе наблюдений определяется значительным распространением открытых водоемов в ландшафте полигональной тундры и демонстрирует тесную связь с глубиной протаивания и зеркалом грунтовых вод, которые часто идентифицируются как основные причины, определяющие величину потока метана при краткосрочных наблюдениях с использованием методики наблюдений камерным методом (chamber

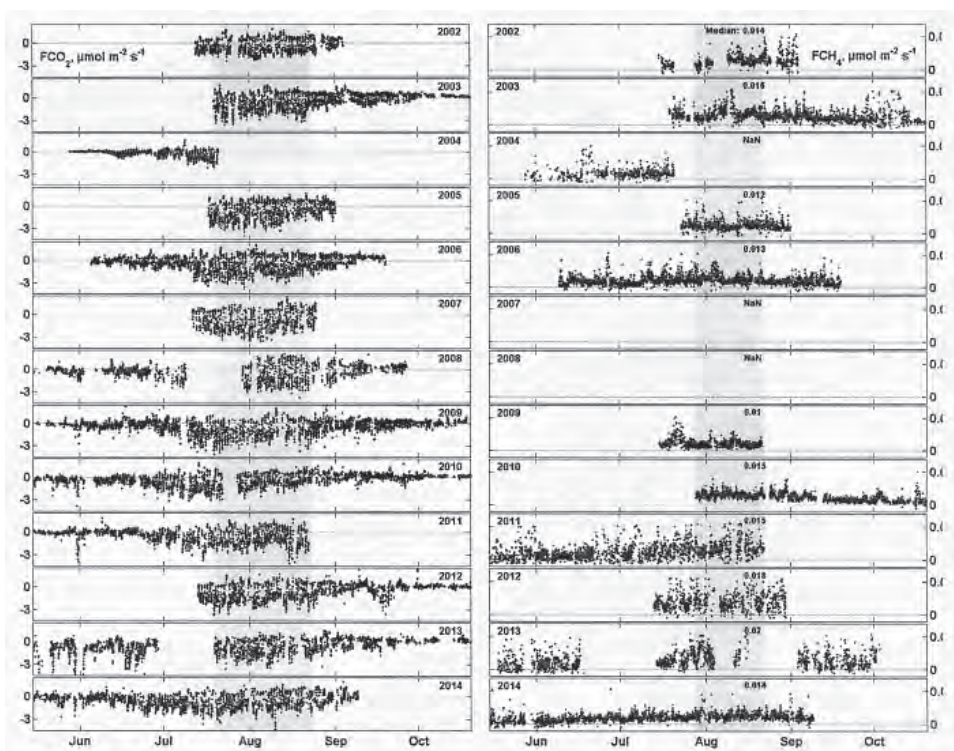


Рис. 5. Потоки (мкмоль·м⁻²·с⁻¹) диоксида углерода (CO₂ — слева) и метана (CH₄ — справа) в дельте реки Лены (Kutzbach, Wilk, в печати).

technique). Однако было обнаружено, что они не оказывают существенного влияния на осредненные результаты измерений при долгосрочных наблюдениях.

Соотношения между потоком метана и температурой почвы, найденные во время измерений в весенне-летний период, экстраполировались для оценки величины эмиссии метана в зимний период. По данным наблюдений она может быть оценена в 35 % от годового потока. Столь значительная величина эмиссии зимой обусловлена медленным промерзанием тундровых почв в начале зимы, длительным холодным периодом (октябрь–май) и, как правило, умеренным потоком метана в летний период. В целом эмиссия метана в ландшафте влажной полигональной тундры была низкой как в отношении ежедневных летних потоков (30 мг·м⁻²·день⁻¹), так и эмиссии метана за год (3,15 г·м⁻²). Причинами этого, как и предполагалось, являются очень низкая температура вечной мерзлоты в исследуемом регионе, песчаный состав почвы и малое количество питательных веществ в почвах (Sachs et al., 2010). В то же время в балансе потоков парниковых газов в тундре метан составляет 14 % от потока CO₂ и является важным компонентом формирования радиационного режима атмосферы, учитывая его высокую радиационную способность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отмечено несколько случаев аномальных значений концентрации CH₄ в приледном слое атмосферы СЛО. Все случаи аномальных значений концентрации CH₄ наблюдались в момент дрейфа станции над склоном глубоководного хребта Ломо-

носова со стороны котловины Макарова и материковым склоном Гренландии, при подходе станции к районам значительных перепадов глубин.

Фоновые значения концентрации метана в приледном слое атмосферы центральной части Северного Ледовитого океана оказались выше концентрации на станциях мониторинга парниковых газов, расположенных на прилегающих участках суши.

Выявлены особенности сезонного хода изменения концентрации метана в СЛО, имеющего характер двух режимов. Один — с повышенным фоновым значением во время полярной ночи и второй — с пониженным фоновым значением с период полярного дня. Переход от одного режима к другому осуществляется сравнительно быстро, в течение апреля–мая.

В масштабах внутрисуточных изменений концентрации метана на станции СП-39 отмечаются колебания на частотах полусуточного прилива и внутренних волн в верхнем слое океана. Это может свидетельствовать о существовании приледных источников метана, а также источников, расположенных на нижней границе льда и в его толще. Среди механизмов, описывающих природу источников и стоков метана в центральной части Северного Ледовитого океана, можно выделить генерацию метана микроорганизмами в толще морского льда и на его нижней границе. Этот процесс преобладает в период полярной ночи. В летний период преобладают процессы, связанные с фотохимическим разрушением метана в приледном слое атмосферы, микробной метанотрофией, а также поглощением метана из атмосферы распресненными тальными водами.

Комплекс измерений содержания метана на российских полярных станциях дает основу для проведения оценок объемов его эмиссии в районах вечной мерзлоты.

Работа выполнена в рамках темы ЦНТП Росгидромета 1.5.3.2 при частичной поддержке Российско-германской лаборатории морских полярных исследований им. О.Ю. Шмидта и гранта РФФИ 14-05-00677 «Вклад размораживания многолетнемерзлого грунта Сибири в эмиссию метана в атмосферу при потеплении климата Арктики».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кароль И.Л., Киселев А.А. Атмосферный метан и глобальный климат // Природа. 2004. № 7. С. 47–52.
- Киселев А.А., Решетников А.И. Метан в Российской Арктике: результаты наблюдений и расчетов // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 2 (96). С. 5–15.
- Леин А.Ю., Иванов М.В. Биохимический цикл метана в океане. М.: Наука, 2009. 576 с.
- Макогон Ю.Ф. Природные газовые гидраты: распространение, модели образования, ресурсы // Российский химический журнал. 2003. Т. 48. № 3. С. 70–79.
- Мельников И.А. Экосистемы морского льда и верхнего слоя океана в условиях глобальных изменений в Арктике // Биология моря. 2005. Т. 30. Вып. 1. С. 3–10.
- 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.
- Нагурный А.П. Деформации морского льда как источник приледного аэрозоля по данным экспедиции на атомном ледоколе «Сибирь» (май–июнь, 1987 г.) // Доклады АН СССР. 1989. Т. 308. № 3. С. 582–584.

- Нагурный А.П.* Климатические тенденции в изменении толщины многолетнего морского льда в Арктическом бассейне (1970–2005 гг.) // Метеорология и гидрология. 2009. № 9. С. 72–78.
- Нагурный А.П., Махитас А.П.* Измерение выбросов метана в приледный слой атмосферы на дрейфующей ледовой станции «Северный полюс-36» (2009 г.) // Проблемы Арктики и Антарктики. 2011. № 1 (87). С. 22–28.
- Нагурный А. П., Махитас А.П., Соколов В.Т.* Результаты измерения концентрации метана в приледном слое атмосферы на дрейфующей ледовой станции СП-39 (2011–2012 гг.) // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 4 (98). С. 5–13.
- Решетников А.И., Ивахов В.М.* Результаты непрерывных наблюдений за концентрацией метана на станции Тикси (сравнение с данными наблюдений на шельфе моря Лаптевых) // Труды Главной геофизической обсерватории. 2012. Вып. 566. С. 257–269.
- Nagurny A.P.* Space-time distribution of temperature inversions in the Arctic atmospheric boundary layer // *Annals Geophysical*. 1995. Vol. 13. P. 1087–1092.
- Sachs T., Wilk C., Boike J., Kutzbach L.* Environmental controls on ecosystem-scale CH₄ emission from polygonal tundra in the Lena river delta, Siberia // *Journal of Geophysical Research – Biogeosciences*. 2008. Vol. 113. G00A03.
- Sachs T., Giebel M., Boike J., Kutzbach L.* Environmental controls on CH₄ emission from polygonal tundra on the micro-site scale in the Lena river delta, Siberia // *Global Change Biology*. 2010. Vol. 16 (11). P. 3096–3110.
- 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. 27. P. 1246–1250.
- Wilk C., Kutzbach L., Sachs T., Wagner D., Pfeiffer E.-M.* Methane emission from Siberian arctic polygonal tundra: EDDY covariance measurements and modeling // *Global Change Biology*. 2008. Vol. 14 (6). P. 1395–1408.

A.P. NAGURNY, A.P. MAKSHITAS, A.S. MAKAROV

METHANE IN THE ATMOSPHERIC SURFACE LAYER IN THE ARCTIC

The results of methane concentration observations in the atmospheric surface layer, carried out in expeditions of the Arctic and Antarctic Research Institute in 2002–2014 years are summarized. The observations were executed at the drifting stations “North Pole-36” and “North Pole-39” in the Central Arctic, at Hydrometeorological Observatory Tiksi, located on the shore of the Laptev Sea in the permafrost zone, and on the research station “Island Samoilovsky” in the delta of the Lena River.

Keywords: methane, atmospheric surface layer, drifting station, the Arctic Ocean.