

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НАЗЕМНЫХ, МОРСКИХ И СПУТНИКОВЫХ
ИЗМЕРЕНИЙ МЕТАНА В НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЕ РОССИЙСКОЙ ЧАСТИ
АРКТИКИ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

© 2015 г. О. А. Анисимов^{1,2*}, В. А. Кокорев¹

¹Федеральное бюджетное государственное учреждение
“Государственный гидрологический институт”, Санкт-Петербург
²Международный научно-образовательный центр “BEST” при
Северо-Восточном Федеральном университете, Якутск

E-mail: *oleg@oa7661.spb.edu

Поступила в редакцию 16.04.2014 г.

На основе анализа данных наземных, морских и спутниковых измерений были выявлены особенности изменений концентрации метана в нижней атмосфере в теплые месяцы года (июль–октябрь) в регионах Арктики, обладающих различным потенциалом метаногенеза. Данные спутникового ИК-спектрометра AIRS за 2002–2013 гг. были использованы для изучения изменения соотношения между локальными источниками метана в континентальной части евразийской Арктики и на шельфе арктических морей на протяжении теплого периода. Были рассчитаны параметры линейных трендов концентрации метана в атмосфере над различными районами Арктики и проверена гипотеза обусловленности вариаций концентрации климатическими факторами. На основе синтеза данных спутниковых, наземных и морских измерений была построена концептуальная модель формирования поля атмосферного метана в сухопутной части и на шельфе Арктической зоны России. Было показано, что в современный период скорость роста концентрации метана в Арктике не превышает среднюю по всему северному полушарию. Сделан вывод о том, что эмиссия метана за счет источников, находящихся в Арктике, оказывает малое влияние на глобальный климат по сравнению с другими факторами.

Ключевые слова: вечная мерзлота, изменение климата, метан, газовые гидраты, наблюдения

ВВЕДЕНИЕ

Одним из малоизученных вопросов остается воздействие на глобальный климат эмиссии метана в континентальной и морской частях Арктики, обусловленной таянием многолетнемерзлых грунтов (ММГ). Область их распространения, называемая криолитозоной, занимает в Северном полушарии около 24% суши ($22.8 \times 10^6 \text{ км}^2$), в том числе около 63% территории России (Zhang et al., 2000). На протяжении всего голоцена арктические почвы были нетто-стоком атмосферного углерода благодаря положительному балансу между относительно небольшой первичной продукцией и еще меньшей декомпозицией почвенного органического вещества при низких температурах в короткий теплый период. Согласно современным представлениям, верхний трехметровый слой арктических почв всего Северного полушария содержит около 750 Пг С (1 петаграмм, Пг, = 10^{15} г) (Schuur et al., 2008); еще около 450 Пг С содержат многолетнемерзлые переувлажненные торфяники, которые далее в статье для краткости именуются болотами (Gorham, 1991; McGuire et al., 2009; Tarnocai et al., 2009). Лессовые отложения в

Сибири (т.н. едома) на глубинах от 3 до 25 м могут содержать еще около 400 Пг С (Zimov et al., 2006a, 2006b). В дельтах крупных арктических рек в отложениях ниже 3 м может содержаться еще 250 Пг С (Schuur et al., 2008). Суммирование приведенных оценок указывает на то, что общее содержание почвенного углерода в Арктике может достигать 1850 Пг (Hugelius et al., 2012; Kuhry et al., 2009; Tarnocai et al., 2009), что вдвое больше, чем в атмосфере, и в 3 с лишним раза больше, чем в биомассе всех лесов на планете. Близка к этому и оценка, полученная в работе (Hugelius et al., 2014) обобщением и экстраполяцией на основе почвенных карт много большего, чем ранее, числа наблюдений в различных почвенных зонах. Согласно этим данным, запас почвенного углерода в ММГ оценивается в 1300–1370 Пг при том, что диапазон неопределенности велик и составляет 930–1690 Пг.

В многочисленных исследованиях было показано, что современное изменение климата может привести к высвобождению части накопленного почвенного углерода и увеличению эмиссии метана в криолитозоне за счет таяния ММГ, а также

иных механизмов, например, термодиссоциации газовых гидратов в шельфовой зоне или же формирования этого газа в озерных отложениях (Шахова et al., 2009a, 2009b; Christensen et al., 2004; Friberg et al., 2003; Walter et al., 2006, 2007). В последние три десятилетия температура в Арктике стала примерно вдвое больше, чем в среднем по Земле (Snow, water, ice..., 2011), в особенности весной. В Сибири и на Чукотке в период 1976–2012-х годов весенняя температура росла со скоростью 0.8–1.2°C за 10 лет (Доклад об особенностях климата..., 2013). Одновременно в северной Евразии наблюдается увеличение высоты снежного покрова, что также приводит к повышению температуры грунтов (Шерстюков, 2008, 2009). Согласно данным наземных наблюдений, за последние 35 лет температура ММГ почти повсеместно увеличилась на 0.5–2.0°C, причем низкие темпы роста температуры были типичны для льдонасыщенных грунтов со слабоотрицательной температурой, в то время как холодные районы криолитозоны теплели наиболее быстро (Romanovsky et al., 2010; Vaughan, Comiso, 2013).

Потепление ММГ сопровождается увеличением мощности сезонно-талого слоя, в результате чего ранее законсервированный почвенный углерод может участвовать в газообмене и высвобождаться в атмосферу либо в форме углекислого газа, либо в форме метана. Последнее происходит в случае, если органический углерод преобразуется в анаэробных условиях, т.е. при отсутствии кислорода, необходимого для синтеза углекислого газа. Такие условия имеют место на значительной части тундровой зоны Российской Арктики, в болотах, в термокарстовых озерах и на поймах рек. Источником метана являются и донные осадки на мелководном шельфе морей Восточной Арктики (МВА, включает моря Лаптева и Восточно-Сибирское), где субстрат для биогенной продукции постоянно пополняется органическим веществом, выносимым Сибирскими реками и береговой эрозией. Усиление эмиссии метана вызывает опасения из-за того, что он оказывает много большее радиационное воздействие на климат, чем углекислый газ.

Оценки влияния эмиссии метана, обусловленной таянием ММГ, на глобальный климат противоречивы. Одна группа исследователей полагает, что эффект будет невелик, поскольку по модельным расчетам до конца XXI в. обусловленный этим рост глобально осредненной температуры воздуха составит 0.012–0.2°C, прежде всего за счет увеличения эмиссии метана при оттаивании мерзлых торфяников (Анисимов, Ренева, 2011; Anisimov, 2007; Dmitrenko et al., 2011; Schneider von Deimling et al., 2012). Другая группа полагает, что мощным источником метана может стать субаквальная криолитозона площадью около 2 млн км²

на шельфе МВА (Shakhova et al., 2010, 2013). Он является самой широкой (400–800 км от береговой линии) и мелководной (средняя глубина 20–30 м) шельфовой зоной мирового океана (Dmitrenko et al., 2011). В этом районе происходят изменения внешних условий, определяющих термическое состояние и углеродный баланс донных отложений. По данным спутниковых наблюдений NOAA (<http://www.arctic.noaa.gov/>), в период 1978–2013-х годов минимальная площадь морских льдов в Арктике сокращалась со средней скоростью 13.7% за 10 лет. Это привело к увеличению продолжительности безледного периода и волновой активности, в результате чего усилились береговая эрозия и вынос органического вещества на шельф. По океанографическим данным, с середины 1980-х годов по настоящее время в летний период придонная температура на шельфе МВА увеличилась на 2.1°C (Dmitrenko et al., 2011). Все эти факторы способствуют увеличению эмиссии метана на шельфе, прежде всего ее биогенной составляющей, которая растет как с увеличением количества доступного органического вещества, поставляемого реками и береговой эрозией, так и температуры субстрата (Christensen et al., 2003).

Возможен и иной более мощный механизм эмиссии метана, обусловленный диссоциацией газовых гидратов при повышении их температуры. Слой, где могут находиться гидраты, расположен на глубинах ниже 150 м от уровня моря. На большей части шельфа он перекрыт многолетне-мерзлыми донными осадками, газовая проницаемость которых близка к нулю. Это создает условия для самоконсервации газогидратов даже в случае повышения их температуры (Истомин и др., 2006). Исключением являются участки, где имеются сквозные талики, например, подозерные, сформировавшиеся до и в процессе затопления шельфа в голоцене 9–6 тыс. лет назад, а также участки вблизи геологических разломов и русел палеорек, где изначально отсутствовали мерзлые отложения (Анисимов и др., 2014). Авторами работы (Shakhova et al., 2010) было высказано предположение, что современные изменения климата ведут к формированию новых таликов в субаквальной криолитозоне. Они увеличивают газовую проницаемость донных осадков и создают пути для выхода метана, образуемого в глубинных слоях за счет термодиссоциации гидратов. В подтверждение этой гипотезы приводятся данные морских измерений, выявившие повышенные концентрации метана в воде на отдельных участках шельфа МВА, а также наблюдаемые потоки пузырькового метана вблизи дна (Сергиенко и др., 2012; Semiletov et al., 2010, 2012, 2013). Заметим, что эта гипотеза, первоначально получившая название “метангидратного ружья”, была выдвинута еще в 2000 г. в работе (Kennett et al., 2000). Она

до сих пор находит широкой отклик в прессе, в том числе в авторитетных изданиях, обсуждающих проблемы науки на серьезном уровне, таких, например, как газета *The Guardian* (Ahmed, 2013). Противники этой гипотезы, соглашаясь с тем, что на отдельных участках шельфа МВА, где отсутствуют мерзлые отложения, может происходить выход метана из глубоких слоев, отрицают связь этого процесса с современным потеплением (Анисимов и др., 2012; Dmitrenko et al., 2011; Petrenko et al., 2010). При большой неопределенности оценок современного суммарного потока метана в атмосферу в районе шельфа МВА, разногласие лишь в том, происходит ли в настоящее время его усиление. Этот же вопрос отчасти применим и к континентальным ММГ, в особенности там, где значительная часть площади занята мерзлыми болотами, оттаивание которых может сопровождаться значительным усилением эмиссии метана.

Задачи данной работы – определить соотношение источников, формирующих атмосферные концентрации метана в континентальной и морской частях российской Арктики в различные месяцы и сезоны; сравнить закономерности их временного хода с изменением содержания атмосферного метана во всем Северном полушарии и оценить климатообусловленную составляющую, проведя анализ корреляции с температурой воздуха и осадками. Для получения цельной пространственно-временной картины необходимы анализ спутниковых данных за последнее десятилетие и сравнение их с немногочисленными наземными и морскими наблюдениями в Арктике.

СПУТНИКОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ МЕТАНА В ТРОПОСФЕРЕ

Содержание метана в тропосфере оценивается по ослаблению излучения в спектральных диапазонах, соответствующих максимумам полос поглощения этого газа. В настоящее время на орбите находятся несколько спутников, на которых установлены два типа спектрометров. В одном из них источником является солнечное излучение, проходящее через толщу атмосферы и отражаемое от подстилающей поверхности. Для измерения содержания метана этими приборами используются полосы поглощения ближней инфракрасной (БИК) области спектра 0.76, 1.6 и 2.0 мкм. Второй тип приборов измеряет излучение поверхности Земли и самой атмосферы. О содержании метана в этом случае можно судить по поглощению излучения в среднем ИК-диапазоне с длиной волны около 7.6 мкм. Наиболее длинный ряд наблюдений за содержанием метана получен по данным спутника *ENVISAT*, который был запущен 1 марта 2002 г. Он оборудован пассивным

спектрометром *SCIAMACHY*, проводящим измерения в диапазоне 0.24–2.38 мкм. В январе 2009 г. японским космическим агентством был запущен спутник *GOSAT* (этот спутник также называют *Ibuki*, что на японском языке означает “дыхание”). Он оборудован прибором *TANSO* (Thermal and Nearinfrared Sensor for carbon Observation), представляющим собой фурье-спектрометр с двумя датчиками теплового и ближне-инфракрасного излучения, которые работают в четырех диапазонах для измерения содержания CO_2 и CH_4 . Диапазоны около 0.76, 1.6 и 2.0 мкм обеспечивают чувствительность к поглотителям около поверхности земли, полоса 5.5–14.3 мкм позволяет оценить поглощение в средней тропосфере (Yoshida et al., 2010), см. также техническое описание на <http://www.gosat.nies.go.jp/>. Принципиальным отличием от данных *ENVISAT* является раздельное измерение концентрации метана в различных слоях тропосферы с использованием ИК-излучения Солнца и БИК Земли. Методика наблюдения оптимизирована для получения характеристик источников парниковых газов на больших пространственных масштабах с целью достичь относительной точности 0.3–1% для трехмесячных средних значений при пространственном разрешении 100–1000 км (Kuze et al., 2009).

Показания приборов на спутнике не являются еще полноценными данными о содержании метана в атмосфере. Для получения таких данных необходимы калибровка и валидация показаний приборов по данным независимых измерений, в том числе наземных, после чего применяются различные алгоритмы расчета концентрации и эмиссии парниковых газов в атмосфере. В публикации (Parker, 2012) описаны шесть различных алгоритмов оценки концентрации метана в атмосфере. Они были разработаны в рамках проекта *GHG-CCI* (Greenhouse Gases – Climate Change Initiative), с результатами которого можно ознакомиться на портале Европейского космического агентства (ESA) www.esa-ghg-cci.org. Целью алгоритмов является уменьшение различных типов ошибок измерений, прежде всего обусловленных особенностями состояния атмосферы. Согласно оценкам, данные *SCIAMACHY* позволяют определить концентрации метана в столбе атмосферы с точностью 50–70 ppb для отдельного измерения и 9–16 ppb для среднемесячных значений. Много более точные результаты дает обработка данных *GOSAT*. Ошибка расчета концентрации метана в атмосфере в этом случае составляет, в зависимости от алгоритма, 14–18 ppb для единичного измерения и 1–2 ppb для среднемесячных значений. Описанные выше алгоритмы, которые позволяют рассчитывать концентрации парниковых газов на различных уровнях в тропосфере, были разработаны во второй фазе проектов *GOSAT* космического

агентства Японии. С 2012 г. эти данные доступны через интернет-портал <http://data.gosat.nies.go.jp>.

Серьезные ограничения на использование данных спутниковых приборов SCIAMACHY и TANSO с датчиком БИК для измерений в Арктике, в особенности в морской части, накладывают низкий угол Солнца, отсутствие солнечного излучения во время полярной ночи и низкая отражательная способность океана и льда в ближней ИК-области. По этой причине в работе было отдано предпочтение данным приборов, работающих в средней ИК-области спектра (AIRS, IASI, TES, TANSO с датчиком ИК, CrIS), которые регистрируют излучение поверхности Земли и нижних наиболее теплых слоев тропосферы. Из этого следует возможность проведения измерений спектра с высокой точностью независимо от времени суток. Однако этот метод также имеет ограничения. Одно из них состоит в том, что до спутника доходит собственное излучение поверхности или приземного слоя атмосферы в том случае, если над ним не находятся более теплые слои, которые поглощают и переизлучают лучистую энергию в среднем ИК-диапазоне. В таких условиях спутник регистрирует спектр излучения расположенных выше слоев и “не видит” на их фоне ничего, что расположено ниже. Из этого непосредственно следует, что данным методом невозможно измерить концентрацию газов в приземном слое в случае температурной инверсии. При отсутствии инверсии чувствительность метода будет тем выше, чем больше температурный градиент в атмосфере. В применении к Арктике это значит, что наиболее благоприятные условия для измерения метана складываются над поверхностью океана, свободной ото льда. Зимние инверсии, характерные для МВА, приводят к тому, что спутник перестает “видеть” нижний слой атмосферы, в особенности надо льдом, и регистрирует спектр, излучаемый более теплым расположенным выше слоем. Однако в августе–октябре, когда акватория свободна ото льда, вертикальная граница чувствительности спутника опускается, и по получаемому спектру можно судить о содержании метана в нижнем слое атмосферы.

С учетом отмеченных выше достоинств и ограничений спутниковых измерений атмосферных концентраций метана, нами были выбраны данные AIRS в среднем ИК-диапазоне, при этом одним из решающих обстоятельств было то, что они имеются в свободном доступе (ftp://anonymous@acdisc.gsfc.nasa.gov/ftp/data/s4ra/Aqua_AIRS_Level3/AIRX3STM.006). Методика обработки измеряемых AIRS спектров, по которой на основе первичных данных получают концентрации метана на различных барических уровнях, а также описание валидации данных с помощью независимых измерений даны

в (Xiong et al., 2010, 2014). Дилемма, связанная с выбором барических уровней для анализа, состоит в том, что, с одной стороны, для оценки интенсивности источников наиболее информативны данные о концентрации метана вблизи поверхности Земли или воды, а с другой — по отмеченным выше причинам спутник может “не видеть” низкие уровни в непосредственной близости от излучающей поверхности из-за наличия в атмосфере расположенных выше более теплых слоев. В последующем анализе нами использовались данные, осредненные по третьему и четвертому барическим уровням AIRS. При том, что первый уровень соответствует уровню моря, указанные уровни (850–700 ГПа) примерно соответствуют высотному диапазону от 1.5 до 3 км.

НАЗЕМНЫЕ И МОРСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Наземные измерения метана вблизи поверхности немногочисленны. Регулярные измерения проводятся на глобальной сети наблюдений за парниковыми газами. Она включает данные четырех стационаров, градиентные наблюдения на восьми специализированных вышках до высот порядка 300 м, а также результаты анализа периодических проб воздуха, отбираемых вакуумированными флягами более чем в 50 точках, расположенных в различных биоклиматических зонах. В Арктике регулярные измерения метана проводятся в четырех пунктах: Тикси и Териберка в России; Бэрроу на севере Аляски и Алерт на канадском острове Элсмир в 817 км от Северного полюса. Данные этих наблюдений собраны и систематизированы исследовательской группой NOAA, результаты представлены на интернет-портале <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/>.

Помимо регулярных измерений NOAA, в 1995–2013 гг. проводились экспедиционные морские измерения концентрации метана в воде и в воздухе на шельфе МВА. На отдельных участках шельфа они выявили повышенное содержание метана, до 8 ppm, что более чем в 4 раза превышает среднеширотную концентрацию в атмосфере, которая составляет около 1.85 ppm (Shakhova et al., 2010, 2013). Особенностью этих измерений является приуроченность наблюдений в каждой точке к конкретным дням в относительно небольшом интервале времени проведения экспедиций (как правило, сентябрь–октябрь).

Большой интерес представляют данные измерений стационара Тикси, где с 2010 г. автоматизированная станция ведет непрерывный круглогодичный мониторинг парниковых газов (Решетников, Макштас, 2012). При том, что многие маршруты морских экспедиций, в которых отмечались высокие концентрации метана, проходили на расстояниях 50–100 км от этого стационара,

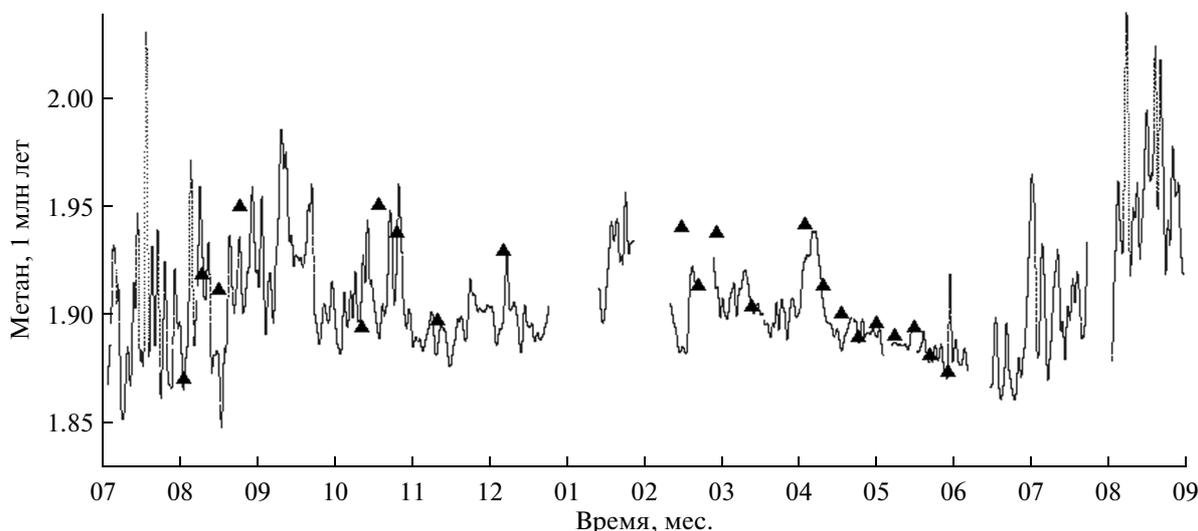


Рис. 1. Данные наблюдений атмосферной концентрации метана на стационаре Тикси в 2010–2011 гг. Кривая с разрывами, обусловленными отсутствием подачи электропитания на станцию, — данные автоматизированных измерений; треугольники — данные фляжных измерений (Решетников, Ивахов, 2012).

измерения в Тикси ни разу не регистрировали атмосферные концентрации метана выше 2.1 ppb (см. рис. 1), что плохо согласуется с данными экспедиционных измерений на акватории (Решетников, Ивахов, 2012).

Как видно из рис. 1, сезонный максимум концентрации метана достигается в сентябре-октябре. Все морские экспедиционные измерения также проводились в осенний период, в силу чего их данные могут быть нерепрезентативны для других месяцев. Этому недостатка лишены наблюдения в Тикси, которые дают круглогодичную информацию, но лишь для одной точки. В (Решетников, Ивахов, 2012) сравниваются измерения, проводимые на арктических станциях в четырех пунктах, Тикси и Териберка в России, Бэрроу, также расположенном вблизи шельфа, и Алерт, расположенной вне зоны шельфа. В этой работе отмечено, что в 2002–2010 гг. не наблюдалось не только аномальных, но даже просто высоких значений среднегодовых концентраций метана, при том, что в период, когда достигается минимум площади морских льдов (сентябрь), концентрации метана в районе Тикси были на 10–14 ppb выше, чем в Териберке, и на 20–26 ppb выше, чем в Бэрроу. На станции Алерт концентрации всегда ниже, чем где-либо, что обусловлено отсутствием шельфа и воды, полностью свободной ото льда даже в летние месяцы. По этой причине авторы (Решетников, Ивахов, 2012) полагают, что данные этой станции хорошо характеризуют морской фон, но не показательны для шельфа.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА ПОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА В НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЕ НАД АРКТИКОЙ

Спутниковые данные характеризуются непрерывностью в пространстве и позволяют дифференцировать регионы, обладающие различным потенциалом эмиссии парниковых газов. Нами были составлены несколько пространственных масок, которые использовались для выделения нужных спутниковых данных и их последующей обработки средствами ГИС IDRISI Selva. Маски были составлены таким образом, чтобы возможно более полно учесть различия между условиями над сушей и над морем, особенности ММГ и заболоченных территорий. Далее анализируются спутниковые данные, выделенные с использованием следующих основных масок.

Маска всей арктической зоны Северного полушария за исключением приполярной области. Она представляет собой прямоугольную широтно-долготную зону [58° с.ш., 83.5° с.ш.] по широте и [–180° з.д., 180° в.д.] по долготе. Северная граница была выбрана так, чтобы в маску вошли арктические моря и острова. Выбор южной границы арктической зоны по 58° с.ш. нетрадиционен и обусловлен соображениями сопоставимости с результатами наземных и морских наблюдений NOAA, в которых под Арктикой понимается территория к северу от этой широты. Аргументом, оправдывающим такой выбор, является и то, что при этом в рассматриваемую зону попадает практически вся область сплошного распространения ММГ за исключением континентальных

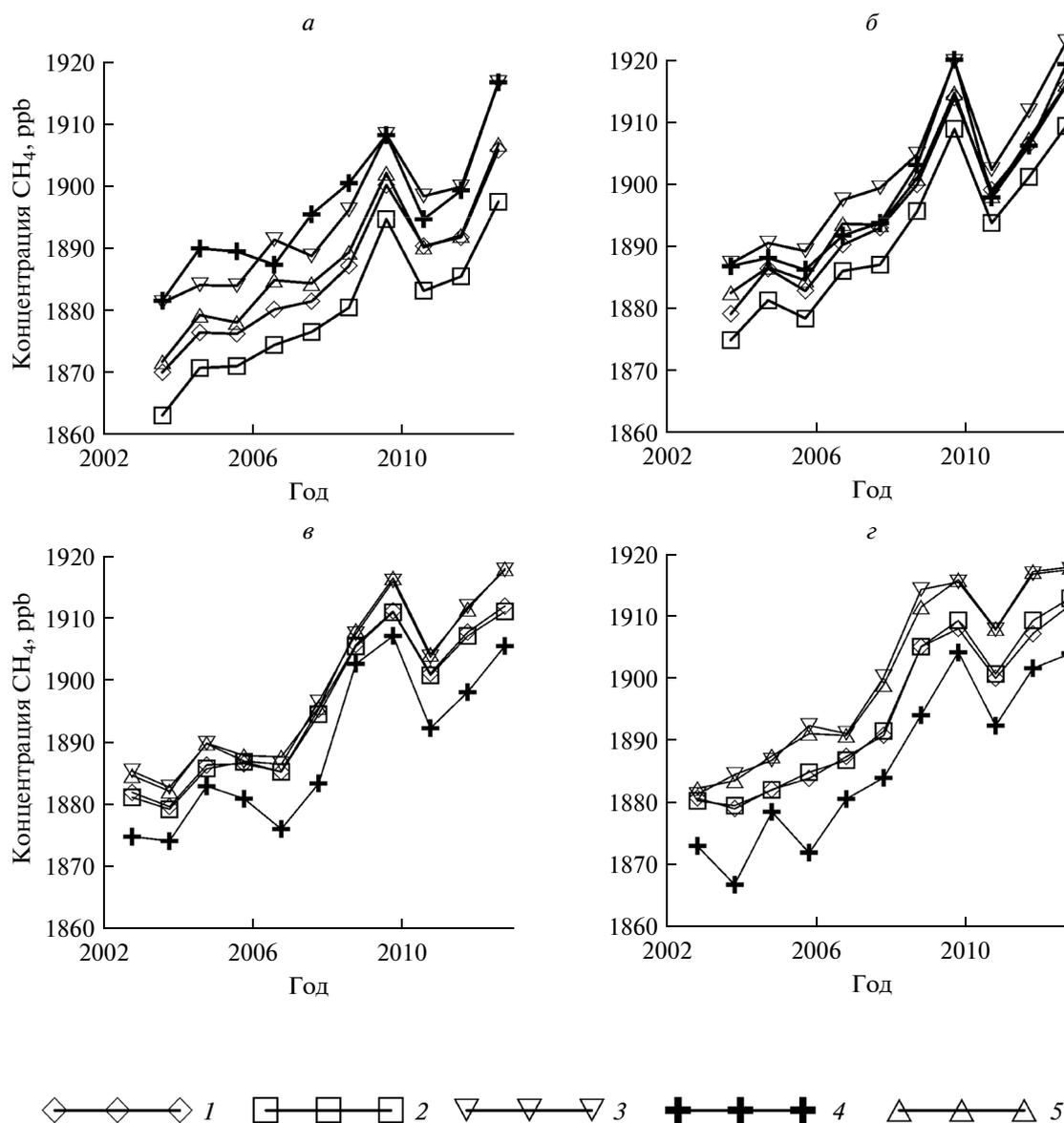


Рис. 2. Изменения среднемесячных концентраций метана в нижней тропосфере, осредненные по различным регионам Арктики. Данные спутника AIRS за период 2002–2013: *а* – июль, *б* – август, *в* – сентябрь, *з* – октябрь; 1 – суша всей Арктики, 2 – вся Арктика, 3 – область распространения ММГ в Северном полушарии, 4 – территория России, где болота занимают более 20% площади, 5 – вся восточная Арктика.

районов Якутии и горных районов южнее 58° с.ш., где также встречаются ММГ. В отдельную маску суши были выделены континентальная часть и арктические острова.

Маска Восточной Арктики представляет собой часть маски всей арктической зоны восточнее 50° в.д. В отдельные маски была выделены ее сухопутная часть; часть, на которой распространены ММГ, а также совокупность разрозненных фрагментов территории размером 0.5° по широте и долготе, где доля болот составляет более 20% площади. Последняя маска была создана для того, чтобы выделить территориальные единицы,

на которых предположительно должна проследиться сильная связь вариаций эмиссии метана с температурой воздуха, влияющей на интенсивность биогенного метаногенеза в анаэробных условиях. Ее расширенный вариант выходит за южную границу Арктики и простирается до 43° с.ш., охватывая всю область болот на территории России.

В каждый из месяцев активного метаногенеза (июль–октябрь) за период спутниковых наблюдений 2002–2013-х годов были выделены массивы данных для всех рассматриваемых регионов. Регионально осредненные спутниковые данные о концентрации метана в нижней атмосфере за от-

дельные месяцы показаны на рис. 2. На рис. 3 показаны осредненные по всему Северному полушарию и по всей Арктике данные наземных и морских наблюдений NOAA за более длительный период 1984–2012 гг.

Можно сравнить общие закономерности временного хода концентрации метана в Арктике по данным прямых (наземных и морских) измерений (рис. 3) и по спутниковым данным (рис. 2) за общий период наблюдений с сентября 2002 по октябрь 2012 г. При анализе межгодовой изменчивости целесообразно учитывать температуру воздуха и осадки, поскольку эти два параметра влияют на скорость биогенной продукции метана на переувлажненных территориях. Соответствующие данные были взяты из сеточного архива CRU-3.21, охватывающего все континенты с пространственным разрешением 0.5° по широте и долготе. К ним также были применены разработанные нами маски с тем, чтобы получить региональные массивы. На рис. 4 и 5 показаны среднемесячные величины приземной температура воздуха и сумм осадков, осредненные по рассматриваемым регионам Арктики.

Прямые наблюдения свидетельствуют о том, что в период 1999–2006 гг. в Арктике, как и во всем Северном полушарии, скорость роста концентрации CH_4 стала близка к нулевой при сохранении ежегодной сезонной динамики (рис. 3). В теплый период между июлем и октябрем концентрация увеличивалась примерно на 20–25 ppb, в последующие месяцы происходило ее уменьшение. В 2003 г. образовался локальный максимум, и в летние месяцы концентрация метана превысила среднюю за период на 5–10 ppb, при этом температура воздуха также была на $1–1.5^\circ\text{C}$ выше средней (рис. 4). В 2007 г. произошло значительное увеличение концентрации метана более чем на 20 ppb во все летние месяцы. Как и в случае максимума 2003 г., это можно было бы объяснить более теплым, чем в предыдущий год, летом (рис. 4) в сочетании с большим количеством осадков в августе (рис. 5), что должно было привести к усилению бактериального метаногенеза на переувлажненных землях, в поймах рек и в слое донных осадков озер и шельфа МВА. Данные следующего 2008 г. показали уменьшение концентрации метана во все месяцы, за исключением июля, что в целом соответствовало уменьшению по сравнению с предыдущим годом температуры в летние месяцы и тому, что количество осадков в июле 2008 г. было много больше, чем в предыдущий год. Однако наблюдения последующих лет вплоть до настоящего времени опровергли предположение о климатической обусловленности этих вариаций и о стабилизации концентрации метана в атмосфере, поскольку продолжился ее монотонный рост во все месяцы

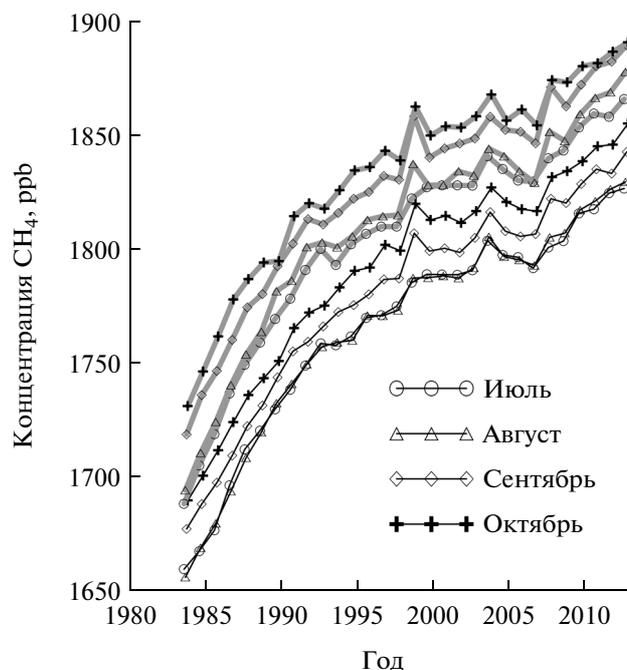


Рис. 3. Изменения среднемесячных концентраций метана в нижней тропосфере Северного полушария (тонкие черные линии) и Арктики (циркумполярная область $>58\text{N}$, толстые серые линии). Данные наземных и морских наблюдений NOAA за период 1984–2012 гг.

года без какой-либо значимой связи с вариациями температуры и осадков.

Спутниковые данные показывают совершенно иную картину (рис. 2). В ней полностью отсутствуют локальные максимумы 2003 и 2007 г., а период стабилизации 1999–2006 гг. выделяется лишь на данных для сентября. В 2010 г. выявляется отсутствующий в прямых наблюдениях локальный минимум во все теплые месяцы, несмотря на то, что, за исключением сентября, это был достаточно теплый для Арктики год (рис. 4) с осадками, близкими к среднему за период, а в августе превышающими средние (рис. 5). Причинами расхождений могут быть как отмеченные ранее принципиальные ограничения спутниковых измерений, так и крайне редкая сеть наземных и морских наблюдений.

Несмотря на отмеченные различия, все наблюдения согласуются в том, что в Арктике продолжается увеличение содержания метана в атмосфере, которое прослеживается также и на глобальном уровне. Параметры региональных трендов, рассчитанные по отдельности для каждого из теплых месяцев по всем видам наблюдений, приведены в таблице. Жирным шрифтом в блоке спутниковых данных выделены наибольшие из региональных трендов (максимум в строке) для каждого месяца. Курсивом выделены наи-

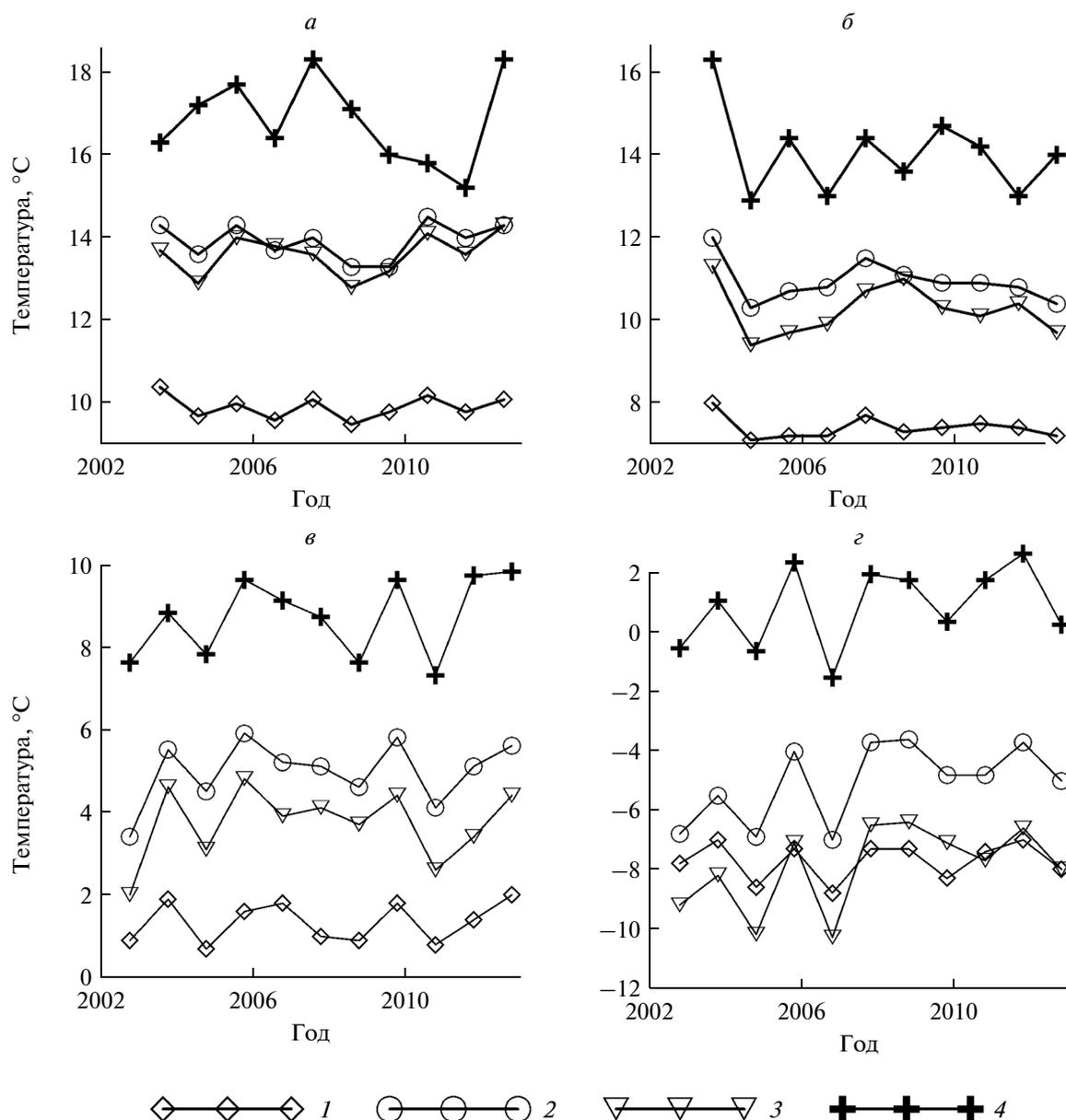


Рис. 4. Среднемесячная приземная температура воздуха, осредненная по различным регионам Арктики. Данные се- точного архива CRU 3.2: *а* – июль, *б* – август, *в* – сентябрь, *г* – октябрь; 1 – суша всей Арктики, 2 – суша восточной Арктики, 3 – область распространения ММГ в Северном полушарии, 4 – территория России, где болота занимают бо- лее 20% площади.

большие месячные тренды для каждого региона (максимум в столбце). Параметры трендов, рас- считанные по спутниковым данным, указывают на то, что с июля по сентябрь скорость роста кон- центрации атмосферного метана над сушей не- сколько выше (до 5%), чем в среднем по всей Арк- тике, и лишь в октябре ситуация меняется на об- ратную. При этом в целом за все рассматриваемые месяцы (июль–октябрь) концентрация над сушей растет быстрее средней. Наиболее быстрый рост концентрации метана наблюдается над восточ- ной Арктикой и над районами распространения

ММГ в конце теплого периода: >3.6 ppb/год в сентябре и >4 ppb/год в октябре. Вместе с тем в июле и августе тренды для этих регионов не- сколько ниже средних по всей Арктике. Самые низкие значения трендов были получены для за- болоченных территорий. Во все месяцы, кроме октября, они заметно ниже (до 12%), чем в сред- нем по всей Арктике. Тренды, рассчитанные по данным наземных и морских наблюдений для всей Арктики во все месяцы, кроме октября, за- метно выше (до 18%) рассчитанных по спутнико- вым данным.

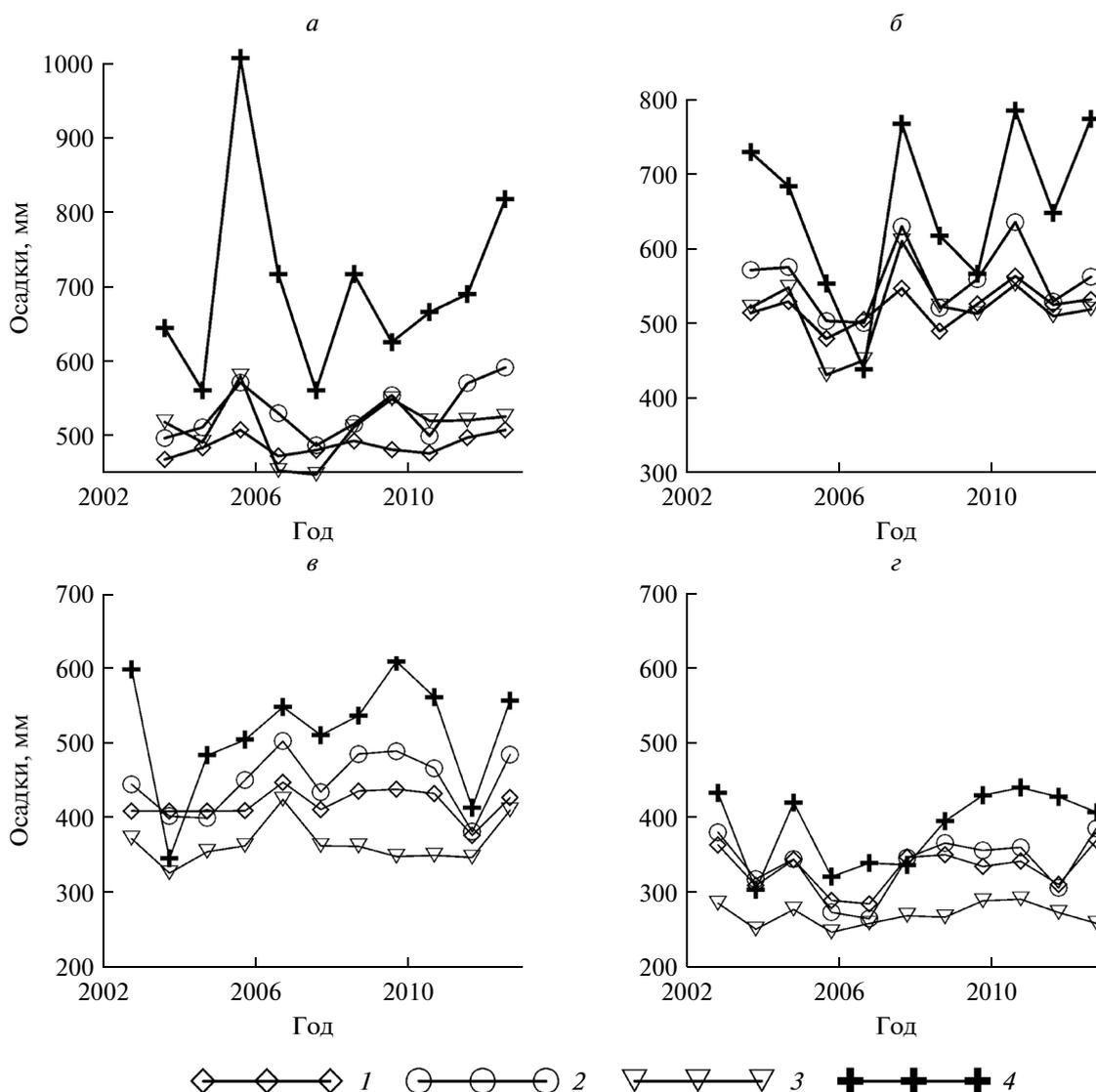


Рис. 5. Месячные суммы осадков, осредненные по различным регионам Арктики. Данные сеточного архива CRU 3.2: *а* – июль, *б* – август, *в* – сентябрь, *г* – октябрь; 1 – суша всей Арктики, 2 – суша восточной Арктики, 3 – область распространения ММГ в Северном полушарии, 4 – территория России, где болота занимают более 20% площади.

Для того чтобы оценить динамику локальных источников метана в Арктике и их относительный вклад в глобальную картину, мы использовали разности среднемесячных концентраций, осредненных по выделенным регионам и по всему Северному полушарию. Разности для месяцев с июля по октябрь, рассчитанные с использованием регионально осредненных спутниковых данных за период 2002–2012 гг., показаны на **рис. 6** и подтверждают, что для летне-осенних месяцев они характеризуются большой межгодовой изменчивостью и не имеют тенденции к увеличению. На рис. 7 показаны аналогичные разности концентраций для всех месяцев года, осредненных по всей Арктике и по Северному полушарию, которые были рассчитаны с использовани-

ем данных прямых наблюдений. Можно видеть, что на более длительном интервале времени 1983–2012 гг. имеет место отрицательный тренд рассматриваемой величины (-0.33 ppb/год) на фоне выраженной межгодовой изменчивости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты анализа, представленные в статье, проясняют пространственно-временную структуру поля атмосферного метана в Арктике, которая характеризуется следующими главными признаками.

Все виды наблюдений выявляют динамику концентрации метана над различными районами

Параметры трендов среднемесячной концентрации метана в нижней атмосфере для регионов Арктики и для всего Северного полушария за период 2002–2013 гг.

	Вся Арктика	Суша Арктики	Восточная Арктика	Болота Сибири	ММГ Сибири	Прямые набл.	
						сев. полуш.	Арктика
Июль							
α	3.25	3.42	3.16	2.88	3.38	3.40	3.57
R^2	0.83	0.85	0.80	0.70	0.82	0.77	0.78
σ	22.2	21.6	26.1	35.9	26.8	41.2	41.3
Август							
α	3.65	3.81	3.54	3.45	3.67	3.67	4.28
R^2	0.82	0.84	0.80	0.69	0.80	0.80	0.80
σ	29.3	29.2	31.3	55.3	33.9	41.4	41.4
Сентябрь							
α	3.39	3.41	3.66	3.23	3.62	3.62	4.02
R^2	0.86	0.86	0.84	0.72	0.83	0.81	0.80
σ	23.4	24.0	30.7	49.7	32.1	36.7	49.9
Октябрь							
α	3.69	3.53	4.04	3.76	4.02	3.64	3.36
R^2	0.90	0.89	0.91	0.85	0.90	0.82	0.78
σ	20.0	20.0	19.2	30.1	23.1	35.5	40.0
Весь период (июль–октябрь)							
α	3.42	3.54	3.58	3.44	3.69	3.58	3.81
R^2	0.63	0.86	0.71	0.65	0.80	0.80	0.79
σ	65.1	23.7	51.3	61.5	33.4	38.7	43.2

Примечание. Коэффициент линейного тренда – α ; коэффициент детерминации – R^2 ; дисперсия – σ . Жирным шрифтом выделены наибольшие из региональных трендов (наибольшее значение в строке) для каждого месяца по спутниковым данным; курсивом – наибольшие месячные тренды для каждого региона (наибольшее значение по столбцам).

Арктики в теплые месяцы года. На рис. 1 и 3 отчетливо выделяются годовые максимумы, которые приходятся на сентябрь–октябрь, что согласуется и со спутниковыми данными, показанными на рис. 2. В это время многие факторы способствуют сезонному увеличению эмиссии метана. Морские льды достигают ежегодного минимума, открывая водную поверхность; слой сезонного оттаивания ММГ на суше, в котором возможен биогенный метаногенез, достигает максимума, при этом усиливается транспорт органических веществ реками; осенняя штормовая активность в сочетании с уменьшенной прочностью ММГ также способствуют увеличению потока органического вещества, выносимого на шельф за счет береговой эрозии; относительно высокая температура придонных вод в конце теплого сезона и наличие разносимого по шельфу органического субстрата усиливают биогенный метаногенез в придонном слое осадков.

Более детальную информацию дает проведенный нами анализ карт среднемесячной концентрации метана, построенных по осредненным за

период наблюдений спутниковым данным (в статье не приводятся). Они позволяют выявить соотношение источников метана на суше и на акватории в различные месяцы активного метаногенеза. На картах отчетливо прослеживается формирование локального максимума над континентальной криолитозоной Евразии с характерными концентрациями в августе 1890–1895 ppb и более 1900 ppb в сентябре. Он хорошо согласуется с представлением об усилении потока биогенного метана, продуцируемого в достигшем годового максимума и хорошо прогретом сезонно-талом слое. В октябре и ноябре над континентальной криолитозоной концентрации метана резко спадают, причем на картах видно, что процесс этот развивается в направлении с востока на запад в соответствии с началом промерзания грунтов с поверхности, которое изолирует остаточный талый слой и препятствует дальнейшему выходу из него метана. В этот период меняются также и условия наблюдений. С установлением снежного покрова и уменьшением приземной температуры чувствительность спутникового прибора к нижним слоям атмосферы

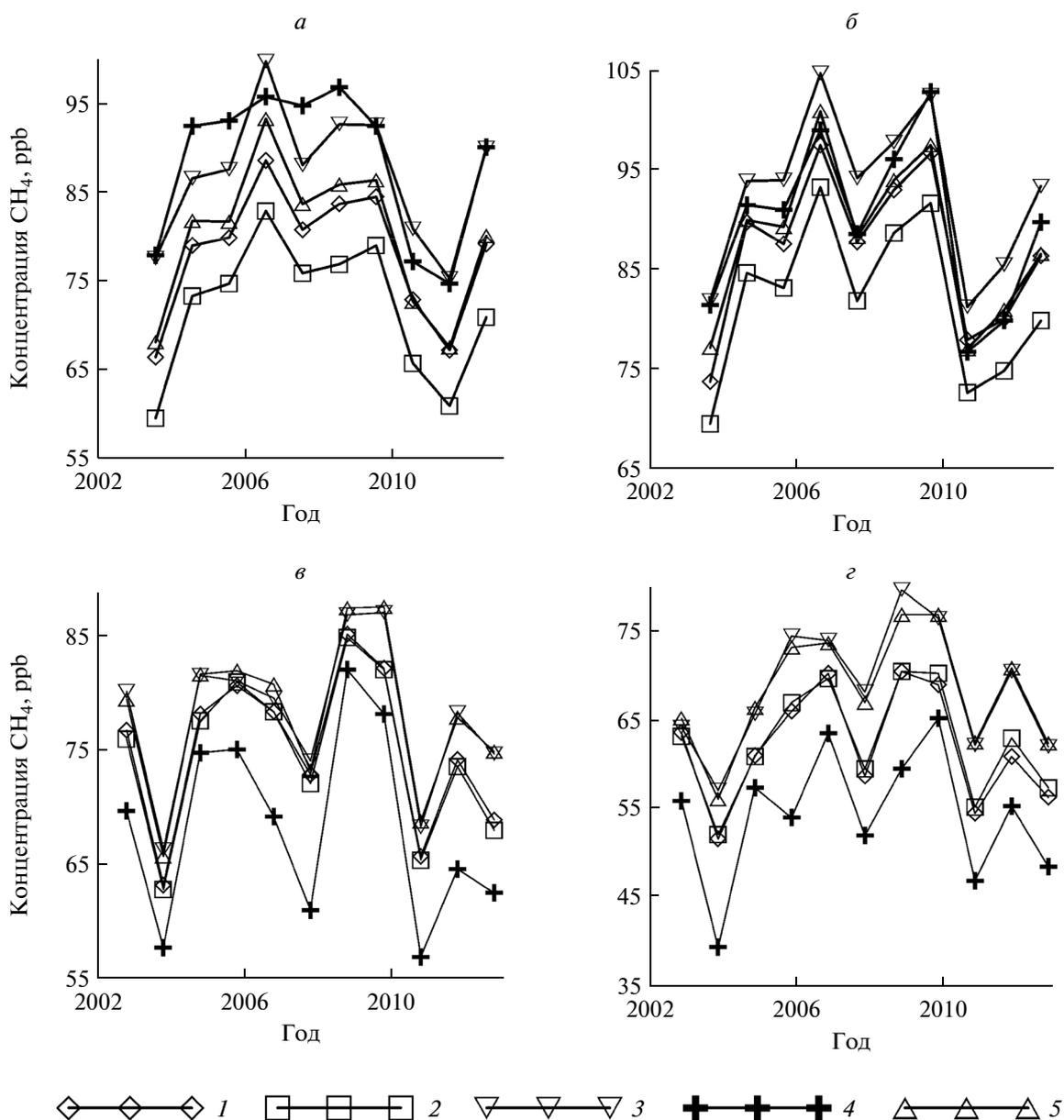


Рис. 6. Отклонения регионально осредненных среднемесячных концентраций метана от средней по Северному полушарию величины. Обозначения те же, что и на рис. 2. Региональные концентрации рассчитаны по данным спутника AIRS, средняя по Северному полушарию – по данным наземных и морских наблюдений NOAA: *а* – июль; *б* – август, *в* – сентябрь, *г* – октябрь; 1 – суша всей Арктики, 2 – вся Арктика, 3 – область распространения ММГ в Северном полушарии, 4 – территория России, где болота занимают более 20% площади, 5 – вся восточная Арктика.

ры падает, и измеренная концентрация соответствует более высоким слоям. Показательно наличие в этот период локальных максимумов вблизи рек, где продолжается биогенный метаногенез и сохраняются пути выхода в атмосферу, пока река не перекрывается льдом. В это же время значительно возрастают концентрации метана над акваторией, где еще сохраняется открытая вода и температура поверхности остается близкой к 0°C. Максимум концентрации метана около 1920 ppb достигается непосредственно перед тем, как аква-

тория покрывается льдом, причем осенний ледостав начинается в восточной части и развивается в направлении на запад. Отчетливое повышение концентрации метана отмечается в октябре-ноябре на шельфе МВА, вдоль берегов Скандинавии, Новой Земли, Шпицбергена, Земли Франца-Иосифа, а также восточного побережья Гренландии. Биогенная продукция метана возможна в этих районах благодаря субстрату, поставляемому береговой эрозией. Можно отметить также значительное повышение от октября к ноябрю кон-

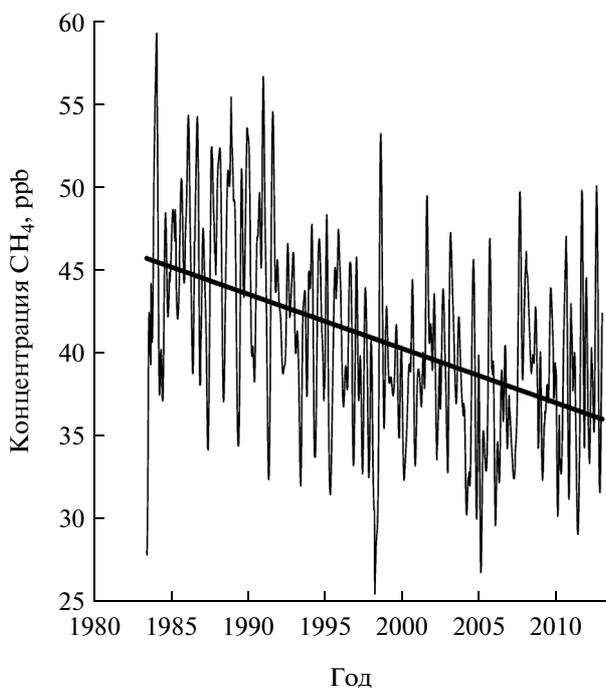


Рис. 7. Отклонения концентрации метана, осредненной по всей Арктике, от средней по Северному полушарию величины. При построении рисунка использованы данные наземных и морских наблюдений NOAA.

центрации метана над Баренцевым, Карским морями и Баффиновым заливом. Определение источника метана в этих районах требует дальнейших исследований.

Результаты, представленные в таблице, позволяют сделать важные выводы о скорости роста атмосферной концентрации метана над различными районами Арктики и сравнить их со средней по всему Северному полушарию величиной. Спутниковые данные указывают на то, что в период наиболее активного метаногенеза (июль—сентябрь) скорость роста концентрации метана над сушей выше, чем над морем. Более важно, впрочем, то, что в последние три десятилетия, которые характеризовались значительным потеплением в высоких широтах, рост концентрации метана в Арктике происходит с меньшей скоростью, чем в среднем во всем Северном полушарии (рис. 6 и 7). На рис. 7 видно, что на общий отрицательный тренд накладывается сильная межгодовая изменчивость. Так, по сравнению с источниками во всем Северном полушарии, источники метана в Арктике играли в 1983, 1998 и 2005 годы очень малую роль в формировании сезонных зимних минимумов, а в 2007, 2011 и 2012 — много большую роль в осенних максимумах концентрации атмосферного метана. Эта изменчивость не меняет главного вывода об уменьшении относительного

вклада локальных источников метана в формирование глобального поля метана за длительный период времени, для которого имеются наблюдения. Проведенный анализ позволяет дать оценку широко обсуждаемой гипотезы “метановой катастрофы” при деградации континентальной и субаквальной криолитозоны, базирующейся на предположении о возрастающей в относительном выражении эмиссии метана из региональных источников в Арктике, которая может вызвать быстрое и значительное изменение глобального климата. Полученные в работе результаты свидетельствуют об обратном и не поддерживают эту гипотезу.

Данная работа поддерживается грантом Российского научного фонда (проект 14-17-00037). Расчеты с использованием данных наземных наблюдений проводились при поддержке РФФИ (проекты 13-05-00072 и 13-05-91171-ГФЕН_а). Данные морских наблюдений были получены при поддержке немецко-российской лаборатории полярных исследований им. Отто Шмидта (проект OSL-14-03). Авторы выражают признательность Л.Н. Юрганову из университета Мэриленда, США, за полезные консультации по отбору спутниковых данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анисимов О.А., Борзенкова И.И., Лавров С.А., Стрельченко Ю.Г. Современная динамика подводной мерзлоты и эмиссия метана на шельфе морей восточной Арктики в контексте прошлых и будущих изменений климата // Лед и Снег. 2012. № 2. С. 97–105.
- Анисимов О.А., Ренева С.А. Углеродный баланс в криолитозоне России и глобальный климат: Современное состояние и прогноз, основанный на моделировании // Полярная криосфера и воды суши / Под ред. В.М. Котлякова. М.: СПб.: Paulsen, 2011. С. 122–140.
- Анисимов О.А., Г. Забойкина, Кокорев В.А., Юрганов Л.Н. Возможные причины эмиссии метана на шельфе морей восточной Арктики // Лед и Снег. 2014. № 2. С. 69–81.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2012 год / Под ред. А.И. Бедринского и др. М.: Росгидромет, 2013. 83 с.
- Истомин В.А., Якушев В.С., Махонина Н.А., Квон В.Г., Чувиллин Е.М. Эффект самоконсервации газовых гидратов // Газовая пром. Спец. вып. Газовые гидраты. 2006. № 3. С. 36–46.
- Решетников А.И., Ивахов В.М. Результаты непрерывных наблюдений за концентрацией метана на станции тикси (сравнение с данными судовых наблюдений на шельфе моря Лаптевых) // Тр. Гл. геофиз. обсерв. им. А.И. Воейкова / Под ред. В.П. Мелешко. СПб., 2012. С. 257–269.
- Решетников, А.И., Макитас А.П. Арктическая гидрометеорологическая обсерватория “тикси” // Тр. Гл. геофиз. обсерв. им. А.И. Воейкова / Под ред. В.П. Мелешко. СПб., 2012. С. 267–283.

- Сергиенко В.И., Дударев О.В., Дмитриевский Н.Н., Шахова Н.Е., Никольский Н.Н., Никифоров С.Л., Саломатин А.С., Салюк Р.А., Карнаух В.В., Черных Д.Б., Тумской В.Е., Чувилин Е.М., Буханов Б.А.* Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей восточной арктики как возможная причина “метановой катастрофы”: Некоторые результаты комплексных исследований 2011 года // Докл. РАН. 2012. № 3. С. 330–335.
- Шахова Н.Е., Сергиенко В.И., Семилетов И.П.* Вклад восточно-сибирского шельфа в современный цикл метана // Вестн. РАН. 2009. № 6. С. 507–518.
- Шахова Н.Е., Юсупов В.А., Салюк А.Н., Космач Д.А., Семилетов И.П.* Антропогенный фактор и эмиссия метана на восточно-сибирском шельфе // Докл. РАН. 2009. № 3. С. 398–401.
- Шерстюков А.Б.* Корреляция температуры почвогрунтов с температурой воздуха и высотой снежного покрова на территории России // Криосфера Земли. 2008. № 1. С. 78–86.
- Шерстюков А.Б.* Изменения климата и их последствия в зоне многолетней мерзлоты России. Обнинск: ГУ “ВНИИГМИ-МЦД”, 2009. 127 с.
- Ahmed N.* Seven facts you need to know about the arctic methane timebomb // The Guardian / Eds. Editor^Editors. 2013.
- Anisimov O.* Potential feedback of thawing permafrost to the global climate system through methane emission // Environ. Res. Lett. 2007. № 2. Doi:10.1088/1748-9326/2/4/045016.
- Christensen T.R., Ekberg A., Strom L., Mastepanov M., Panikov N., Mats O., Svensson B.H., Nykanen H., Martikainen P.J., Oskarsson H.* Factors controlling large scale variations in methane emissions from wetlands // Geophys. Res. Lett. 2003. № 7.
- Christensen T.R., Johansson T.R., Akerman H.J., Mastepanov M., Malmer N., Friberg T., Crill P., Svensson B.H.* Thawing sub-arctic permafrost: Effects on vegetation and methane emissions // Geophys. Res. Lett. 2004. L04501 p. Doi:10.1029/2003GL018680.
- Dmitrenko I.A., Kirillov S.A., Tremblay B., Kassens H., Anisimov O.A., Lavrov S.A., Razumov S.O., Grigoriev M.N.* Recent changes in shelf hydrography in the siberian arctic: Potential for subsea permafrost instability // J. Geophys. Res. 2011. № 116. C10027 p. Doi:10.1029/2011JC007218.
- Friberg T., Soegaard H., Christensen T.R., Lloyd C.R., Panikov N.S.* Siberian wetlands: Where a sink is a source // Geophys. Res. Lett. 2003. № 21. P. 2129.
- Gorham E.* Northern peatlands: Role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming // Ecol. Appl. 1991. № 2. P. 182–195.
- Hugelius G., Strauss J., Zubrzycki S., Harden J.W., Schuur E.A.G., Ping C.L., Schirmermeister L., Grosse G., Michaelson G.J., Koven C.D., O'Donnell J.A., Elberling B., Mishra U., Camill P., Yu Z., Palmtag J., Kuhry P.* Improved estimates show large circumpolar stocks of permafrost carbon while quantifying substantial uncertainty ranges and identifying remaining data gaps // Biogeosci. Disc. 2014. P. 4771–4822.
- Hugelius G., Tarnocai C., Broll G., Canadell J.G., Kuhry P., Swanson D.K.* The northern circumpolar soil carbon database: Spatially distributed datasets of soil coverage and soil carbon storage in the northern permafrost regions // Earth Syst. Sci. Data Disc. 2012. № 5. P. 707–733.
- Kennett J.P., Cannariato K.G., Hendy I.L., Behl R.J.* Carbon isotopic evidence for methane hydrate instability during quaternary interstadials // Sci. 2000. P. 128–133.
- Kuhry P., Ping C., Schuur E.A.G., Tarnocai C., Zimov S.* Rep. from the international permafrost association: Carbon pools in permafrost regions // Permafrost and Periglac. Proc. 2009. № 2. P. 229–234.
- Kuz A., Suto H., Nakajima M., Hamazaki T.* Thermal and near infrared sensor for carbon observation fourier-transform spectrometer on the greenhouse gases observing satellite for greenhouse gases monitoring // Appl. Optics. 2009. № 35. P. 6716–6733.
- McGuire A.D., Anderson L.G., Christensen T.R., Dallimore S., Guo L., Hayes D.J., Heimann M., Lorenson T.D., Macdonald R.W., Roulet N.* Sensitivity of the carbon cycle in the arctic to climate change // Ecol. Monogr. 2009. № 4. P. 523–555.
- McGuire A.D., Anderson L.G., Christensen T.R., Dallimore S., Guo L., Hayes D.J., Heimann M., Lorenson T.D., Macdonald R.W., Roulet N.* Sensitivity of the carbon cycle in the arctic to climate change // Ecol. Monogr. 2009. № 4. P. 523–555.
- Parke R.* Climate change initiative product specification document for the essential climate variable greenhouse gases. Vers. 2 // / Eds. Editor^Editors. 2012.
- Petrenko V.V., Etheridge D.M., Weiss R.F., Brook E.J., Schaefer H., Severinghaus J.P., Smith A.M., Lowe D., Hua Q., Riedel K.* Methane from the east siberian arctic shelf // Sci. 2010. P. 1146–1147.
- Romanovsky V., Drozdov D., Oberman N.G., Malkova G.V., Kholodov A.L., Marchenko S., Moskalenko N., Sergeev D., Ukrainceva N., Abramov A.* Thermal state of permafrost in russia // Permafrost and Periglac. Proc. 2010. № 2. P. 136–155.
- Schneider von Deimling, T., Meinshausen M., Levermann A., Huber V., Frieler K., Lawrence D.M., Brovkin V.* Estimating the near-surface permafrost-carbon feedback on global warming // Biogeosci. 2012. № 9. P. 649–665.
- Schuur E.A.G., Bockheim J., Canadell J.G., Euskirchen E., Field C.B., Goryachkin S.V., Hagemann S., Kuhry P., Lafleur P.M., Lee H., Mazhitova G., Nelson F.E., Rinke A., Romanovsky V.E., Shiklomanov N., Tarnocai C., Venevsky S., Vogel J.G., Zimov S.A.* Vulnerability of permafrost carbon to climate change: Implications for the global carbon cycle // Biosci. 2008. № 8. P. 701–714.
- Semiletov I.P., Shakhova N.E., Sergienko V.I., Pipko I.I., Dudarev O.V.* On carbon transport and fate in the east siberian arctic land-shelf-atmosphere system // Environ. Res. Lett. 2012. № 7. 13 p.
- Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., Rekant P., Salyuk A., Kosmach D.* Geochemical and geophysical evidence of methane release from the inner east siberian shelf // J. Geophys. Res. 2013. C08007 p. doi:10.1029/2009JC005602.
- Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., Sergienko V., Salyuk A., Kosmach D., Chernykh D., Stubbs C., Nikolsky D., Tumskoy V., Gustafsson O.* Ebullition and storm-induced methane release from the east siberian arctic shelf // Nature Geosci. 2013. № 24. P. 1–7.

- 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 // *Sci.* 2010. P. 1246–1250.
- Snow, water, ice and permafrost in the arctic (swipa): Climate change and the cryosphere / Eds. Editor^Editors. Oslo, Norway, 2011. 538 p.
- Tarnoca, C., Canadell J.G., Schuur E.A.G., Kuhry P., Mazhitova G., Zimov S.* Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region // *Global Biogeochem. Cycles.* 2009. № 23. P. GB2023. doi:10.1029/2008GB003327.
- Vaughan D.G., Comiso J.C.* Observations: Cryosphere // *Clim. Change.* 2013: The physical science basis. Contribution of working group i to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change / Eds. Editor^Editors. Cambridge: Cambr. Univ. Press, 2013. P. 317–382.
- Walter K.M., Zimov S.A., Chanton J.P., Verbyla D.I., Chapin F.S.* Methane bubbling from siberian thaw lakes as a positive feedback to climate warming // *Nature.* 2006. № 7107. P. 71–75.
- Xiong X., Barnet C.D., Maddy E.S., Gambacorta A., King T.S., Wofsy S.C.* Mid-upper tropospheric methane retrieval from iasi and its validation // *Atm. Measur. Techn.* 2014. № 6. P. 2501–2531.
- Xiong X., Barnet C.D., Zhuang Q., Machida T., Sweeney C., Patra P.K.* Mid-upper tropospheric methane in the high northern hemisphere: Spaceborne observations by airs, aircraft measurements, and model simulations // *J. Geophys. Res.* 2010. P. 10.1029/2009JD013796.
- Yoshida Y., Ota Y., Eguchi N., Kikuchi N., Nobuta K., Tran H., Morino I.* Retrieval algorithm for co2 and ch4 column abundances from short-wavelength infrared spectral observations by the greenhouse gases observing satellite // *Atm. Measur. Techn. Discus.* 2010. № 6. P. 4791–4833.
- Zhang T., Heginbottom J.A., Barry R.G., Brown J.* Further statistics of the distribution of permafrost and ground ice in the northern hemisphere // *Polar Geogr.* 2000. № 2. P. 126–131.
- Zimov S.A., Davydov S.P., Zimova G.M., Davydova A.I., Schuur E.A.G., Dutta K., Chapin F.S.* Permafrost carbon: Stock and decomposability of a globally significant carbon pool // *Geophys. Res. Lett.* 2006a. № 20.
- Zimov S.A., Schuur E.A.G., Chapin F.S.* Permafrost and the global carbon budget // *Sci.* 2006b. № 5780. P. 1612–1613.
- Walter K.M., Edwards M.E., Grosse G., Zimov S.A., Chapin F.S.* Thermokarst lakes as a source of atmospheric ch4 during the last deglaciation // *Sci.* 2007. № 5850. P. 633–636.

Comparative Analysis of the Land, Marine and Satellite Observations of Methane in the Lower Atmosphere in the Russian Arctic under the Conditions of the Changing Climate

O. A. Anisimov, V. A. Kokorev

Federal State Budgetary Institution “State hydrological Institute”, St. Petersburg

Land, marine and satellite observations have been used to study the changes of methane concentration in the lower atmosphere during the warm months of the year (July through October) over Arctic regions characterized by different potential with regard to methane production. The 2002–2013 data from satellite-based IR spectrometer AIRS have been used to explore the interplay between the local methane sources in the terrestrial regions of Eurasian Arctic and on the Arctic shelf over the warm period of the year. We calculated the linear trends in atmospheric methane concentrations over different Arctic regions and tested the hypothesis that they are related to variations of climatic parameters. We used the combination of land, marine and satellite observations to develop the conceptual model of atmospheric methane field over the terrestrial part of the Russian Arctic and the Arctic shelf. We demonstrated that the modern methane growth rate in the Arctic does not exceed the northern-hemisphere mean. Our ultimate conclusion is that the methane emission in the Arctic has little effect on the global climate compared to other factors.

Keywords: permafrost, climate change, methane, gas hydrates, observations