

Особенности вариаций метана на арктическом побережье в летне-осенний период

В. С. Стародубцев¹, В. С. Соловьев^{1,2}

¹ *Институт космофизических исследований и аэронавтики им. Ю. Г. Шафера
СО РАН, Якутск, 677027, Россия*

E-mails: starodubjr@ikfia.ysn.ru, solo@ikfia.ysn.ru

² *Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова
Якутск, 677000, Россия*

В работе представлены результаты исследования особенностей вариаций концентрации метана на арктическом побережье по данным трёх арктических станций: Барроу (США), Тикси (Россия), Алерт (Канада) — и данным бортового спектрометра AIRS (ИСЗ Aqua). Показана тенденция накопления метана в арктической зоне: по данным наземных станций рост концентрации метана (с 1980-х по 2019 г.) составил ~6–7 %, по спутниковым данным (2003–2019) — ~5–6 %. Рассчитан сезонный ход концентрации метана по наземным спутниковым данным. Анализ наземных данных показал, что в межсезонье (лето–осень) на станциях Барроу (с июня по ноябрь) и Тикси (с июня по сентябрь) часто наблюдаются кратковременные всплески концентрации метана, что может быть обусловлено ветровой динамикой в пунктах наблюдения. На ст. Алерт подобные всплески не отмечены. По данным спектрометра AIRS построены карты распределения концентрации метана для летне-осеннего и зимне-весеннего периодов на высоте 400 гПа. В летне-осенний период над сушей отмечаются более высокие концентрации метана, чем над водной поверхностью. А в зимне-весенний период значительной разницы между концентрацией метана над сушей и водной поверхностью не наблюдается.

Ключевые слова: метан, Арктика, дистанционное зондирование, AIRS, HYSPLIT

Одобрена к печати: 21.10.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-253-264

Введение

Метан (CH₄) — третий по значимости парниковый газ после углекислого газа (CO₂) и водяного пара (Climate..., 2013; Kirschke et al., 2013), радиационное воздействие одной его молекулы в 25 раз больше, чем молекулы CO₂, из расчёта за 100-летний период (Climate..., 2007; Harvey, 1993). Глобальная концентрация CH₄ в атмосфере увеличилась с 0,7 ppm (*англ. parts per million by volume*, частей на миллион по объёму) в доиндустриальную эпоху до 1,8–1,9 ppm в настоящее время (Saunois et al., 2020; Thompson et al., 1993). В атмосфере CH₄ не образуется, его содержание определяется наземными источниками (сельское хозяйство, промышленность, нефтегазодобыча, природные объекты, лесные пожары, отходы предприятий и пр.) (Бажин, 2000; Ehhalt, Schmidt, 1978; Topp, Pattey, 1997). Основной (до 90 %) сток метана (Levy, 1971) происходит за счёт химических реакций в тропосфере с радикалами гидроксила (ОН), а оставшиеся 10 % приходятся на сток в почву и реакцию с атомарным хлором в верхних слоях атмосферы (Climate..., 1994; Ehhalt, 1974). Темпы роста температуры на высоких широтах в два раза выше, чем в среднем по земному шару (Overland et al., 2019), что угрожает разрушением вечной мерзлоты, содержащей огромное количество (~1672 Гт) углеродосодержащих соединений, в том числе и CH₄ (Schuur et al., 2008).

По результатам экспедиции на дрейфующей станции СП-39 (Нагурный и др., 2013) были предложены возможные источники и стоки метана в центральной части Северного Ледовитого океана (СЛО) и дана оценка вклада источников СЛО в глобальный бюджет метана. В работе (Обжиров и др., 2015), посвящённой исследованиям определения источника поступления метана и геологических условий формирования газогидратов, показано, что потоки CH₄ и газогидраты образуются в зонах разломов, по которым метан поднимается

к поверхности из нефтегазовых залежей. Л. Н. Юрганов и А. Лейфер (2016) привели оценку эмиссии метана от некоторых арктических районов по данным орбитального интерферометра IASI (*англ.* Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) за 2010–2014 гг. В работе были локализованы источники метана в морях западной Арктики; установлено, что значительная часть выбросов метана происходит вдоль северного побережья Норвегии и западных побережий островов Новая Земля и Шпицберген на глубине моря от 100 до 300 м. Также приведено сравнение полученной оценки эмиссии метана (4 Тг CH_4 /год) с оценками, полученными в работах различных авторов.

Повышенные темпы потепления на высоких широтах, способные спровоцировать выброс огромного количества парниковых газов, содержащихся в вечномёрзлых породах и шельфах арктических морей, вызывают обоснованные опасения по поводу возможных негативных последствий для климата и жизнедеятельности человека. Цель настоящей работы заключается в исследовании особенностей вариаций концентрации метана в арктической зоне по наземным и спутниковым данным. Рассматриваются внезапные всплески концентрации метана в летне-осенний период, длящиеся от нескольких/десятков часов до суток с амплитудой, превышающей 5 % от фоновой составляющей, а также сезонный ход концентрации CH_4 по наземным и спутниковым данным.

Используемые данные

В работе были использованы данные Всемирного центра обработки данных по парниковым газам (*англ.* World Data Centre for Greenhouse Gases), размещённые на интернет-ресурсе <https://gaw.kishou.go.jp>. Были отобраны три станции, расположенные в зоне Арктики: Алерт, Барроу и Тикси, на которых длительное время проводятся измерения концентрации метана в приземном слое воздуха. Все эти станции характеризуются полярным климатом (почти круглогодичной отрицательной температурой и минимальным уровнем осадков), крайне низкой плотностью населения, а также отсутствием в непосредственной близости от станций крупных инфраструктурных объектов. Поэтому с высокой степенью уверенности можно утверждать, что на изменение концентрации CH_4 значительное влияние оказывают именно природные (естественные) источники. Географическое расположение станций показано на *рис. 1*.

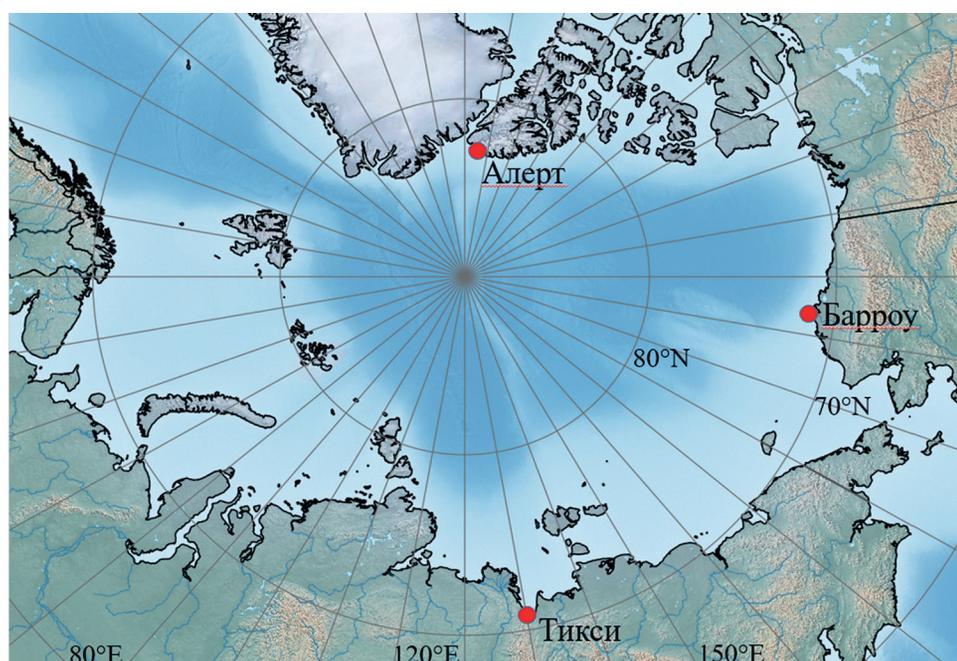


Рис. 1. Географическое расположение арктических станций, на которых проводятся измерения концентрации метана

Измерения на ст. Тикси ведутся с 2011 г. с помощью лазерного спектрографа Picarro G2301 с периодичностью 5 мин. На станциях Барроу и Алерт измерения проводятся с помощью пламенно-ионизационного детектора с периодичностью 1 мин (с 1986 и 1988 г. соответственно). В нашем анализе все исходные данные приведены к среднечасовому периоду в формате времени UTC (*англ.* Coordinated Universal Time, всемирное координированное время).

Трассировка переноса воздушных масс (ВМ) была осуществлена с помощью модели HYSPLIT (*англ.* Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model), которой можно свободно воспользоваться через веб-интерфейс на интернет-ресурсе <https://www.ready.noaa.gov/hypub-in/trajtype.pl?runtype=archive>.

Для сравнения с наземными измерениями в работе использованы данные спектрометра AIRS (*англ.* Atmospheric Infrared Sounder), установленного на спутнике Aqua. Был использован продукт AIRX3STM v.6 (Baijun et al., 2017), представляющий собой двумерные карты среднемесячного распределения метана на различных барических высотах (от приземного уровня 0 км до примерно 20 000 км) с разрешением $1 \times 1^\circ$. Данный продукт доступен по веб-ссылке <https://giovanni.gsfc.nasa.gov>. Было проведено усреднение 192 файлов продукта AIRX3STM v.6 за период с 2003 по 2019 г. на уровне 400 гПа для двух временных периодов: зима – весна и лето – осень. Выбор использованной в настоящей работе высоты 400 гПа обусловлен рекомендациями, представленными в публикациях (Юрганов и др., 2016; Xiong et al., 2008). В этих работах показано, что слой, в котором данные прибора AIRS восстанавливаются с достаточной достоверностью, зависит от температурного контраста и пик чувствительности для полярной зоны ($60\text{--}90^\circ$ с. ш.) приходится на уровень 400–500 гПа (примерно 6–7 км). Так как для широт вблизи полюса ошибки алгоритма восстановления данных существенно возрастают (Xiong et al., 2016), было принято решение ограничиться рассмотрением широтного пояса $65\text{--}85^\circ$ с. ш. Данные AIRS усреднялись в пределах выбранного широтного пояса.

Обсуждение

На *рис. 2* представлена динамика изменения среднемесячных значений концентрации метана на трёх наземных станциях и по данным AIRS ($65\text{--}85^\circ$ с. ш.). За весь период наблюдений можно отметить практически одинаковый рост концентрации метана как по наземным (около 6–7 %), так и по спутниковым данным (5–6 %).

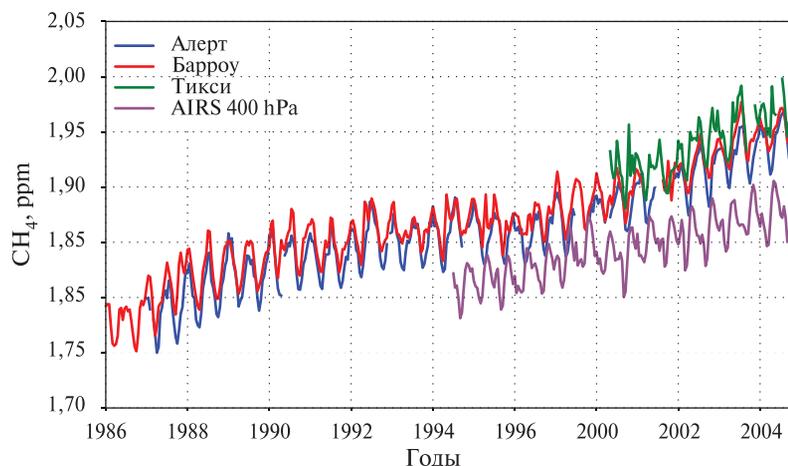


Рис. 2. Динамика изменения среднемесячной концентрации метана на наземных станциях и по данным спутникового наблюдения с 1986 по 2019 г.

Также видно, что значения концентрации по данным AIRS на высоте 6 км ниже, чем значения концентрации по данным наземных станций. Спутниковые данные соответствуют измеренным значениям концентрации CH_4 , полученным с борта самолёта-лаборатории Ан-30

«Оптик-Э» (Аршинов и др., 2009) на соответствующих высотах (5–7 км). Можно отметить, что данные наземного и спутникового наблюдений не противоречат общепринятому положению о постепенном накоплении метана в атмосфере.

В период с 1998 по 2007 г. значения концентрации метана оставались примерно на одном уровне. До настоящего времени однозначного объяснения этому «плато» в научной литературе нет. Некоторые исследователи объясняют эту ситуацию наличием обратной связи между температурой и процессами эмиссии и стока CH_4 в 1998–2007 гг., когда темпы роста температуры существенно снизились (Bousquet et al., 2006; Fiore et al., 2004). Другие исследователи связывают это плато со снижением выбросов угольной промышленности, обустройством свалок в западных странах (Бажин, 2010). Затем с 2007 г. рост концентрации метана возобновился (Rigby et al., 2008).

На *рис. 3* представлен усреднённый сезонный ход концентрации CH_4 по данным станций Алерт, Барроу, Тикси и спектрометра AIRS, характерный для Северного полушария (Khalil, Rasmussen, 1983), с максимумом в зимнее время года и минимумом — в летнее. Так как длина рядов данных у каждой станции различна: для ст. Алерт составляет 32 года, Барроу — 34 года, Тикси — 9 лет, а AIRS — 17 лет, то для корректного сравнения усреднённого сезонного хода были взяты данные с 2011 по 2019 г. по каждому набору данных. Здесь примечательно, что на станциях Барроу и Тикси минимум концентрации метана приходится на июнь, а на ст. Алерт он наблюдается на месяц позже — в июле. По данным же прибора AIRS минимум концентрации метана наблюдается в мае, а максимум — в сентябре.

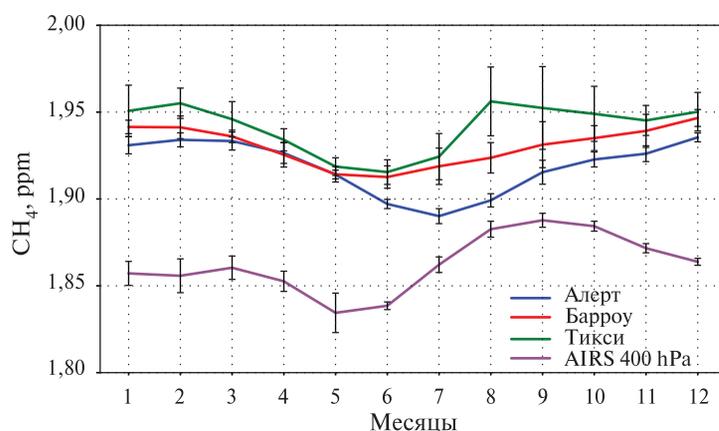


Рис. 3. Усреднённый за 2011–2019 гг. сезонный ход концентрации CH_4

В результате анализа данных для ст. Тикси был выделен летне-осенний период с июня по сентябрь, а для ст. Барроу — с июня по ноябрь, в течение которых чаще наблюдались резкие всплески концентрации метана, из которых для дальнейшего рассмотрения отбирались события со следующими признаками: 1) резкому повышению концентрации CH_4 предшествовал спокойный период в течение не менее 2–3 сут; 2) амплитуда всплесков концентрации CH_4 превышала невозмущённые (фоновые) значения на величину больше чем 5 %; 3) длительность отдельных всплесков концентрации CH_4 составляла от нескольких/десятков часов до нескольких суток; 4) после внезапных всплесков концентрации CH_4 наблюдался спокойный период длительностью не менее 2–3 сут.

На *рис. 4* (см. с. 257) представлены примеры наблюдаемых в летне-осенний период всплесков метана с высокими амплитудами на станциях Барроу и Тикси (см. *рис. 4а* и *б* соответственно): всплески хорошо выделяются на фоне общего сезонного хода CH_4 . На ст. Барроу резкие всплески чаще всего фиксировались в период с июня по ноябрь (Стародубцев, Соловьев, 2020), а на ст. Тикси — с июня по сентябрь. Станция Алерт расположена севернее остальных станций ($82^\circ 45'$ с. ш., $62^\circ 52'$ з. д.), и средние положительные температуры здесь наблюдаются только в июле и августе. Даже в летнее время года вблизи станции отсутствуют

зоны, свободные ото льда (Решетников, Ивахов, 2012). Можно также отметить (см. *рис. 2 и 3*), что и значения концентрации метана на ст. Алерт ниже, чем на станциях Барроу и Тикси. На ст. Алерт (см. *рис. 4в*) существенные всплески концентрации CH_4 не наблюдаются в течение всего года.

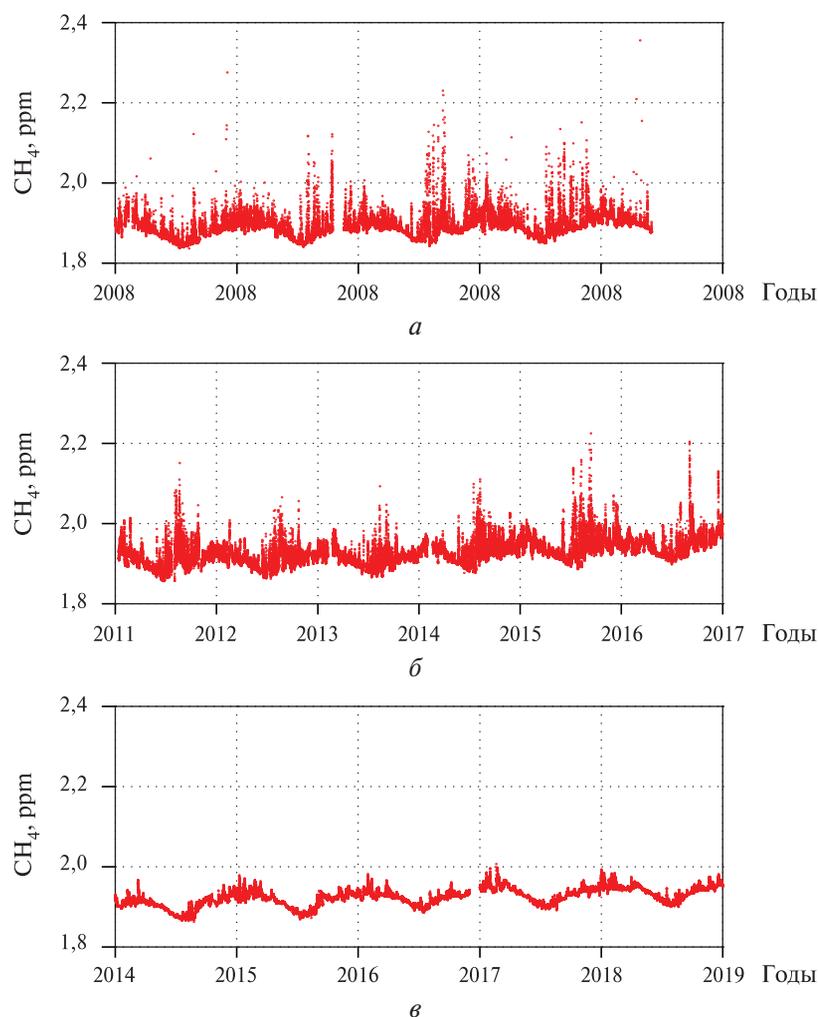


Рис. 4. Вариации концентрации CH_4 в летне-осенний период на станциях Барроу (*а*), Тикси (*б*) и Алерт (*в*)

Резкие всплески концентрации метана хорошо объясняются ветровой динамикой в пункте наблюдений. Связь концентрации метана с направлением ветра на ст. Барроу представлена на *рис. 5* (см. с. 258): в периоды декабрь – май (см. *рис. 5а*) и июнь – ноябрь (см. *рис. 5б*). Высокие значения концентрации метана в секторе «суша» и низкие в секторе «море» объясняются тем, что со стороны суши ветры приносят в пункт измерения воздух с повышенным содержанием концентрации CH_4 , тогда как с сектора «море» (моря Бофорта и Чукотское) — с пониженным. В остальное время года (декабрь – май), когда северные моря в целом покрыты льдом, разница между секторами не столь заметна (см. *рис. 5а*).

Аналогичная картина наблюдается на ст. Тикси, которая, также как и ст. Барроу, находится на побережье и имеет явно выделяющиеся секторы «суша» и «море». Для ст. Тикси сектор «суша» находится в пределах $90\text{--}360^\circ$, а сектор «море» — в пределах $10\text{--}89^\circ$. Как следует из *рис. 5г*, с сектора «суша» в период июнь – сентябрь в пункт измерения приносятся ВМ с высоким содержанием CH_4 , в то время как уровень концентрации метана в ВМ, приносимых с акватории моря Лаптевых, заметно ниже. Как отмечалось ранее, на ст. Алерт резкие всплески концентрации метана, характерные для станций Барроу и Тикси, не наблюдались.

Объяснение видится в том, что независимо от времени года карта распределения метана в окрестностях ст. Алерт по сравнению со станциями Барроу и Тикси имеет достаточно однородный вид (рис. 6, см. с. 258), на ней отсутствуют какие-либо заметные области с повышенным содержанием метана, которые могли бы стать источниками всплесков концентрации метана на ст. Алерт.

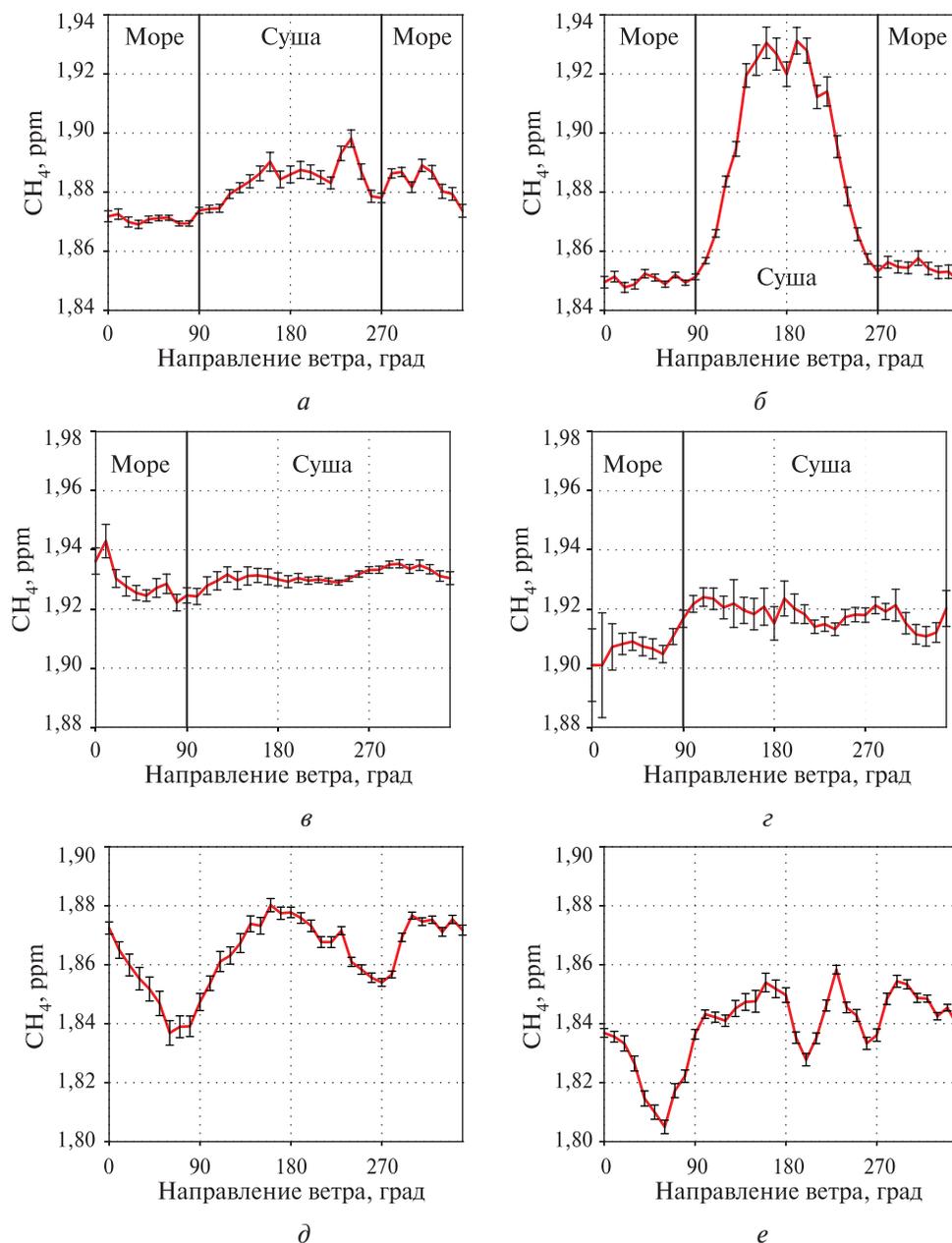


Рис. 5. Зависимость концентрации метана от направления ветра: на ст. Барроу в декабре–мае (а) и июне–ноябре (б); на ст. Тикси в октябре–мае (в) и июне–сентябре (г); на ст. Алерт в декабре–мае (д) и июне–ноябре (е)

Карты усреднённого распределения концентрации метана на высоте 400 гПа, построенные по данным спектрометра AIRS/Aqua, представлены на рис. 6, где показано распределение в декабре–мае и июне–ноябре (см. рис. 6а и б соответственно). В зимне-весеннее время, как следует из рис. 6а, заметного различия в содержании метана над сушей и водной поверхностью не отмечается, за исключением небольшой разницы на побережье моря Лаптевых и в районе расположения ст. Тикси (со стороны суши).

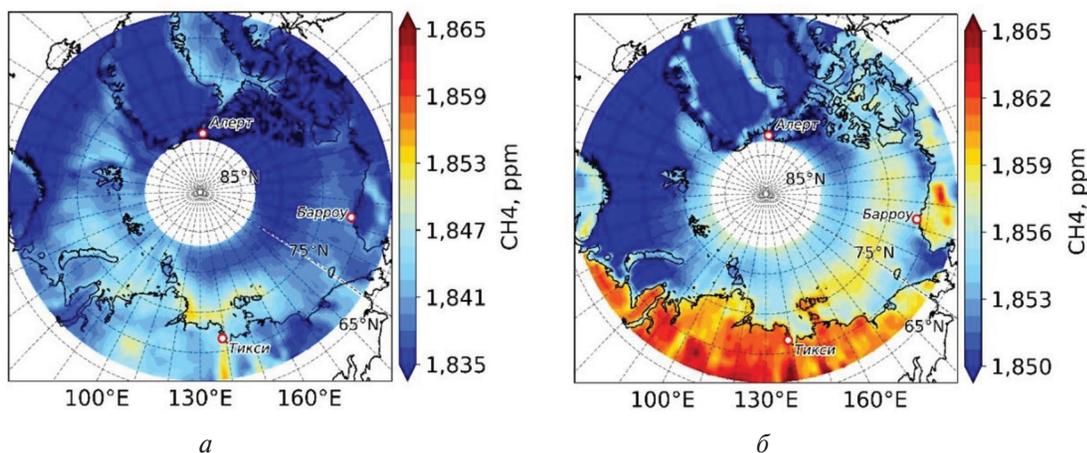


Рис. 6. Усреднённые за 2003–2019 гг. карты распределения концентрации метана на высоте 40 гПа: а — декабрь — май; б — июнь — ноябрь

В летне-осенний период (июнь — ноябрь) отчётливо наблюдается граница раздела областей с высоким и низким содержанием метана, совпадающая с береговой линией: концентрация CH_4 над сушей существенно превышает концентрацию над водной поверхностью (см. рис. 6б), в частности в районе станций Барроу и Тикси. Картина распределения метана объясняется балансом механизмов истока (биогенные источники) и стока (окисление CH_4 свободными радикалами OH). Летом, когда температура почвы прогревается ($>0^\circ\text{C}$), активизируются микроорганизмы-метаногены, которые до этого были в спячке, и начинают генерировать метан как побочный продукт метаболизма в бескислородных условиях. Метаногены могут продуцировать CH_4 вплоть до ноября, пока температура почвы держится на отметке $0 \pm 0,75^\circ\text{C}$ (Zona et al., 2016). Свой вклад в образование метана в тёплое время года вносят также болота и прочие наземные источники CH_4 . Над водной же поверхностью происходит основной сток CH_4 за счёт химических реакций с радикалами OH . Таким образом, формируется неоднородная карта распределения метана в летнее время над сушей и водной поверхностью. С другой стороны, в декабре — мае какого-либо существенного пространственного различия усреднённых значений концентрации CH_4 над сушей и водной поверхностью не наблюдается. Это обусловлено тем, что в холодное время года процессы эмиссии метана источниками, находящимися на суше, практически прекращаются. В это время также снижается темп стока метана за счёт реакций с радикалами OH , так как сокращается площадь свободной ото льда водной поверхности.

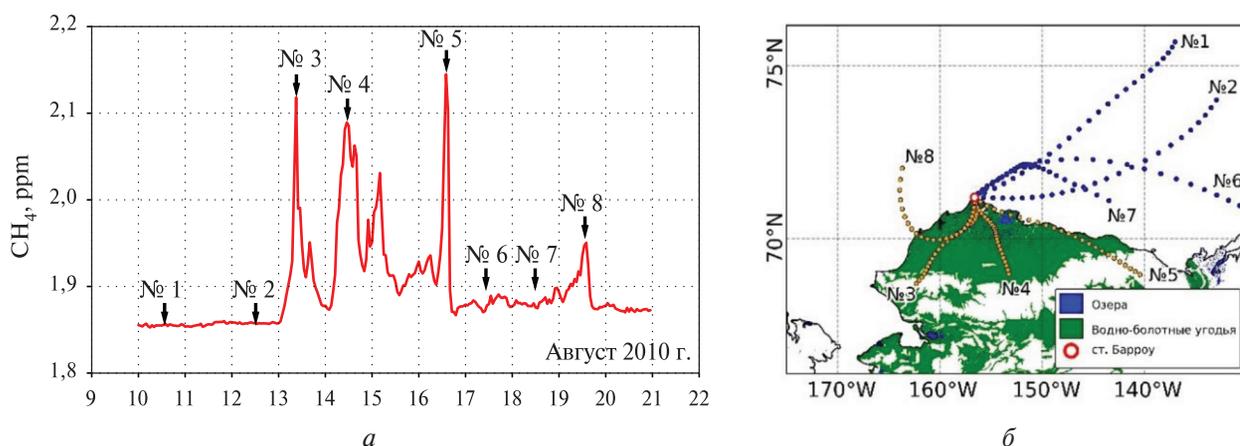


Рис. 7. Вариации метана на ст. Барроу (10–20 августа 2010 г.) и модельные траектории перемещения ВМ, построенные по модели HYSPLIT: а — всплески концентрации метана на ст. Барроу, б — траектории переноса ВМ

Характерный пример одного из рассматриваемых событий со всплесками концентрации метана на ст. Барроу представлен на *рис. 7а* (см. с. 259). Из него следует, что в период 10–12 августа 2010 г. концентрация метана оставалась на фоновом уровне. С 13 по 17 августа наблюдаются несколько резких всплесков концентрации с высокими амплитудами. После 17 августа концентрация метана снова снижается до фоновых значений и сохраняется на данном уровне в течение нескольких суток. С использованием модели HYSPLIT были проведены расчёты траекторий переноса воздушных масс в течение суток, предшествующих отмеченным стрелками (см. *рис. 7а*) датам. Результаты трассировки представлены на *рис. 7б*, здесь временной интервал между точками траектории соответствует одному часу, длительность трассировки составляет 24 ч. Траектории синего цвета (№ 1, 2, 6, 7) соответствуют невозмущённым значениям концентрации метана 10–12, 17 и 18 августа, а оранжевые траектории (№ 3–5, 8) — резким всплескам значений концентрации 13–15 и 16 августа соответственно.

Как следует из *рис. 7б*, «синие» траектории (№ 1, 2, 6, 7) полностью проходят через акваторию моря Бофорта. Траектория № 8, хотя и берёт своё начало в море Бофорта, но последние 15 ч проходит над сушей. Остальные траектории (№ 3–5) полностью приходятся на сушу. Таким образом, всплески концентрации метана в летне-осенний период определяются характером ветровой динамики. Ветры, направляющиеся с суши, где CH_4 интенсивно выделяется болотами и озёрами, приносят ВМ с высоким содержанием метана, и на станции наблюдения регистрируется резкое повышение концентрации CH_4 , в то время как ветры с акватории морей приносят ВМ с низким, фоновым содержанием CH_4 . Наиболее ярко такая картина наблюдается на ст. Барроу, хуже — на ст. Тикси и отсутствует на ст. Алерт, которая расположена значительно севернее двух предыдущих.

Заключение

В результате анализа особенностей поведения метана на арктическом побережье по данным станций Барроу (1986–2018) и Тикси (2011–2018) можно сделать следующие выводы.

На фоне сезонного хода в летне-осенний период часто наблюдаются резкие всплески концентрации метана, значительно превышающие (более чем на 5 %) фоновый уровень, с длительностью от нескольких/десятков часов до нескольких суток.

Подобные вариации метана в летне-осенний период можно объяснить ветровой динамикой в окрестностях станции наблюдения: южные ветры с суши приносят воздушные массы с повышенным содержанием метана (на станции наблюдения регистрируется резкое повышение концентрации метана), тогда как ветры с акватории северных морей — с пониженным; соответственно, уровень метана на станции снижается до невозмущённых (фоновых) значений.

На ст. Алерт резкие всплески концентрации метана не выявлены; это можно объяснить тем, что независимо от времени года пространственно-временное распределение метана в окрестностях ст. Алерт по сравнению со станциями Барроу и Тикси имеет достаточно однородный вид, на ней отсутствуют какие-либо заметные области с повышенным содержанием метана, которые могли бы стать источниками всплесков метана.

По данным и наземного, и спутникового наблюдений замечен рост концентрации метана за весь рассматриваемый период, который составил 5–7 %. По данным AIRS, усреднённый сезонный ход метана на высоте 400 гПа для широтного пояса с 65 по 85° с. ш. имеет минимум в мае и максимум — в сентябре.

Литература

1. Аршинов М. Ю., Белан Б. Д., Давыдов Д. К., Иноуе Г., Максюттов Ш., Мачида Т., Фофанов А. В. Вертикальное распределение парниковых газов над Западной Сибирью по данным многолетних измерений // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22. № 5. С. 457–464.
2. Бажин Н. М. Метан в атмосфере // Сорос. образоват. журн. 2000. Т. 6. № 3. С. 52–57.

3. *Бажин Н. М.* Метан в окружающей среде: аналит. обзор / Учреждение Российской акад. наук Гос. публич. научно-техн. библиотека Сибир. отд-ния РАН. Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2010. Сер. Экология. Вып. 93. 56 с.
4. *Нагурный А. П., Махитас А. П., Соколов В. Т.* Результаты измерения концентрации метана в приледном слое атмосферы дрейфующей ледовой станции СП-39 (2011–2012 гг.) повышенный фон концентрации метана // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 4(98). С. 5–13.
5. *Обжиров А. И., Телегин Ю. А., Болбан А. В.* Потоки метана и газогидраты в Охотском море // Подвод. исслед. и робототехника. 2015. № 1(19). С. 56–62.
6. *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. Главной геофиз. обсерватории им. А. И. Воейкова / ред. В. М. Катцов, В. П. Мелешко. СПб.: Гидрометеоздат, 2012. С. 257–269.
7. *Стародубцев В. С., Соловьев В. С.* Особенности вариаций концентрации метана в летне-осенний период на арктической станции Барроу (Аляска) по наземным и спутниковым данным // Вестн. Северо-Восточного федер. ун-та им. М. К. Аммосова. 2020. № 1(75). С. 40–50.
8. *Юрганов Л. Н., Лейфер А.* Оценки эмиссии метана от некоторых арктических и приарктических районов по данным орбитального интерферометра IASI // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 173–183. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-173-183.
9. *Юрганов Л. Н., Лейфер А., Лунд Майр К.* Сезонная и межгодовая изменчивость атмосферного метана над морями Северного Ледовитого океана по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2016. Т. 13. № 2. С. 107–119. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-107-119.
10. *Baijun T., Manning E., Fetzer E., Olsen E., Wong S., Susskind J., Iredell L.* AIRS/AMSU/HSB Version 6 Level 3 Product User Guide. Pasadena, CA: California Inst. Technology, 2017. 40 p.
11. *Bousquet P., Ciais P., Miller J. B., Dlugokencky E. J., Hauglustaine D. A., Prigent C., Van der Werf G. R., Peylin P., Brunke E.-G., Carouge C., Langenfelds R. L., Lathiere J., Papa F., Ramonet M., Schmidt M., Steele L. P., Tyler S. C., White J.* Contribution of anthropogenic and natural sources to atmospheric methane variability // Nature. 2006. V. 443. P. 439–443. DOI: 10.1038/nature05132.
12. Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and An Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios: Reports of Working Groups I and III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, forming part of the IPCC Special Report to the first session Conf. Parties to the UN Framework Convention on Climate Change / IPCC; eds. Houghton J. T., Meira Filho L. G., Bruce J., Hoesung L., Callander B. A., Haites E., Harris N., Maskell K. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1994. 339 p.
13. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / IPCC; eds. Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K. B., Tignor M., Miller H. L. Cambridge, UK; N. Y., USA: Cambridge University Press, 2007. 996 p.
14. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / IPCC; eds. Stocker T. F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S. K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P. M. Cambridge, U. K.; N. Y., USA: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
15. *Ehhalt D. H.* The atmospheric cycle of methane // Tellus. 1974. V. 26. P. 58–70. DOI: 10.3402/tellusa.v26i1-2.9737.
16. *Ehhalt D. H., Schmidt U.* Sources and sinks of atmospheric methane // Pure and Applied Geophysics. 1978. V. 116. P. 452–464. DOI: 10.1007/BF01636899.
17. *Fiore A. M., Horowitz L. W., Dlugokencky E. J., West J. J.* Impact of meteorology and emissions on methane trends, 1990–2004 // Geophysical Research Letters. 2006. V. 33(12). Art. No. L12809. 4 p. DOI: 10.1029/2006GL026199.
18. *Harvey L. D. D.* A guide to global warming potentials (GWPs) // Energy Policy. 1993. V. 21. P. 24–34. DOI: 10.1016/0301-4215(93)90205-T.
19. *Khalil M. A. K., Rasmussen R. A.* Sources, sinks, and seasonal cycles of atmospheric methane // J. Geophysical Research: Oceans. 1983. V. 88. Iss. C9. P. 5131–5144. DOI: 10.1029/JC088iC09p05131.
20. *Kirschke S., Bousquet P., Ciais P., Saunois M., Canadell J. G., Dlugokencky E. J., Bergamaschi P., Bergmann D., Blake D. R., Bruhwiler L., Cameron-Smith P., Castaldi S., Chevallier F., Feng L., Fraser P. J., Krummel P. B., Lamarque J.-F., Langenfelds R. L., Le Quere C., Naik V., O'Doherty S., Palmer P. I., Pison I., Plummer D., Poulter B., Prinn R. G., Rigby M., Ringeval B., Santini M., Schmidt M., Shindell D. T., Simpson I. J., Spanhi R., Paul Steele L., Strode S. A., Sudo K., Szopa S., van der Werf G. R., Voulgarakis A., van Welle M., Williams J. E., Zeng G.* Three decades of global methane sources and sinks // Nature Geoscience. 2013. V. 6. P. 813–823. DOI: 10.1038/NGEO1955.

21. Levy H. Normal atmosphere: large radical and formaldehyde concentrations predicted // *Science*. 1971. V. 173. Iss. 3992. P. 141–143. DOI: 10.1126/science.173.3992.141.
22. Overland J. E., Hanna E., Hassen-Bauer I., Kim S.-J., Walsh J. E., Wang M., Bhatt U. S., Thoman R. L., Ballinger T. J. Surface Air Temperature // *Arctic Report Card 2019* / eds. J. Ritcher-Menge, M. L. Druckenmiller, M. Jeffries. 2019. P. 5–10. URL: <http://www.arctic.noaa.gov/Report-Card>.
23. Rigby M., Prinn R. G., Fraser P. J., Simmonds P. G., Langendfelds R. L., Huang J., Cunnold D. M., Steele L. P., Krummel P. B., Weiss R. F., O'Doherty S., Salameh P. K., Wang H. J., Harth C. M., Mühle J., Porter L. W. Renewed growth of atmospheric methane // *Geophysical Research Letters*. 2008. V. 35. Iss. 22. Art. No. L22805. 6 p. DOI: 10.1029/2008GL036037.
24. Saunio M., Stavert A. R., Poulter B., Bousquet P., Canadell J. G., Jackson R. B., Raymond P. A., Dlugokenczy E. J., Houweling S., Patra P. K., Ciais P., Arora V. K., Bastviken D., Bergamaschi P., Blake D. R., Brailsford G., Bruhwiler L., Carlson K. M., Carrol M., Castaldi S., Chandra N., Crevoisier C., Crill P. M., Covey K., Curry C. L., Etiope G., Frankenberg C., Gedney N., Hegglin L., Höglund-Isaksson G., Hugelius M., Ishizawa A., Ito G., Janssens-Maenhout K. M., Jensen M. I., Joos F., Kleinen T., Krummel P. B., Langenfelds R. L., Laruelle G. G., Liu L., Machida T., Maksyutov S., McDonald K. C., McNorton J., Miller P. A., Melton J. R., Morino I., Müller J., Murgia-Flores F., Naik V., Niwa Y., Noce S., O'Doherty S., Parker R. J., Peng C., Peng S., Peters G. P., Prigent C., Prinn R., Ramonet M., Regnier P., Riley W. J., Rosentreter J. A., Segers A., Simpson I. J., Shi H., Smith S. J., Steele L. P., Thornton B. F., Tian H., Tohjima Y., Tubiello F. N., Tsuruta A., Viovy N., Voulgarakis A., Weber T. S., van Weele M., van der Werf G. R., Weiss R. F., Worthy D., Wunch D., Yin Y., Yoshida Y., Zhang W., Zhang Z., Zhao Y., Zheng B., Zhu Q., Zhuang Q. The global methane budget 2000–2017 // *Earth System Science Data*. 2020. V. 12. P. 1561–1623. DOI: 10.5194/essd-12-1561-2020.
25. Schuur Edward A. G., Bockheim J., Canadell J. G., Euskirchen E., Field C. B., Goryachkin S. V., Hagemann S., Kuhry P., Laflour 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 // *BioScience*. 2008. V. 58. No. 8. P. 701–714. DOI: 10.1641/B580807.
26. Thompson A. M., Chappellaz J. A., Fung I. Y., Kucsera T. L. The atmospheric CH₄ increase since the Last Glacial Maximum // *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*. 1993. V. 45. Iss. 3. P. 242–257. DOI: 10.3402/tellusb.v45i3.15727.
27. Topp E., Pattey E. Soils as sources and sinks for atmospheric methane // *Canadian J. Soil Science*. 1997. V. 77. P. 167–177. DOI: 10.4141/S96-107.
28. Xiong X., Barnett C., Maddy E., Sweeney C., Liu X., Zhou L., Goldberg M. Characterization and validation of methane products from the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) // *J. Geophysical Research*. 2008. V. 113. P. 1–14. DOI: 10.1029/2007JG000500.
29. Xiong X., Han Y., Liu Q., Weng F. Comparison of atmospheric methane retrievals from AIRS and IASI // *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2016. V. 9. No. 7. P. 3297–3303. DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2588279.
30. Zona D., Gioli B., Commane R., Lindaas J., Wofsy S. C., Miller C. E., Dinardo S. J., Dengel S., Sweeney C., Karion A., Chang R. Y.-W., Henderson J. M., Murphy P. C., Goodrich J. P., Moreaux V., Liljedahl A., Watts J. D., Kimball J. S., Lipson D. A., Oechel W. C. Cold season emissions dominate the Arctic tundra methane budget // *Proc. National Academy of Sciences*. 2016. V. 113. No. 1. P. 40–45. DOI: 10.1073/pnas.1516017113.

Analysis of methane variations on the Arctic coast in the summer-autumn period

V. S. Starodubtsev¹, V. S. Solovyev^{1,2}

¹ *Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS
Yakutsk 677027, Russia
E-mails: starodubjr@ikfia.ysn.ru, solo@ikfia.ysn.ru*

² *M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk 677000, Russia*

In this study, methane concentration variations on the Arctic coast were analyzed using data from three arctic stations: Barrow (USA), Tiksi (Russia), Alert (Canada), and remote sensing data (AIRS/Aqua). According to the data from ground-based stations, methane concentration experienced a 6–7 % increase during 1980–2019. A similar increase (5–6 %) is also reported by AIRS data for a shorter pe-

riod (2003–2019). Analysis of seasonal variation revealed short-term bursts in methane concentration, which were often observed during the off-season (summer–autumn) at Barrow (June–November) and Tiksi (June–September) stations, while no similar events were found at Alert. It is assumed that the probable cause of such bursts is wind dynamics at observation points. Additionally, we used AIRS data to analyze the spatial distribution of methane concentration at 400 hPa pressure level during summer–autumn and winter–spring periods. It is shown that during the summer–autumn period higher methane concentrations are observed over land, while during the winter–spring period there is no significant difference between the methane concentration over land and water surface.

Keywords: methane, Arctic, remote sensing, AIRS, HYSPLIT

Accepted: 21.10.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-253-264

References

1. Arshinov M. Yu., Belan B. D., Davidov D. K., Inouye G., Maksutov Sh., Machida T., Fofonov A. V., Vertical distribution of greenhouse gases over Western Siberia from long-term measurements data, *Optika atmosfery i okeana*, 2009, Vol. 22, No. 5, pp. 457–464 (in Russian).
2. Bazhin N. M., Methane in the atmosphere, *Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal*, 2000, Vol. 6, No. 3, pp. 52–57 (in Russian).
3. Bazhin N. M., *Metan v okruzhaushchei srede: analiticheskii obzor* (Methane in the environment: an analytical review), Novosibirsk, GPTNB SO RAN, 2010, Ser. Ekologiya, Issue 93, 56 p. (in Russian).
4. Nagurnyy A. P., Makshatas A. P., Sokolov V. T., The results of measuring the methane concentration in the near-ice layer of the atmosphere of the drifting ice station SP-39 (2011–2012) increased background of methane concentration, *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2013, No. 4(98), pp. 5–13 (in Russian).
5. Obzhairov A. I., Telegin Yu. A., Boloban A. V., Methane fluxes and gas hydrates in the Okhotsk Sea, *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika*, 2015, No. 1(19), pp. 56–62 (in Russian).
6. Reshetnikov A. I., Ivakhov V. M., The Results of continuous observations of methane concentration in Tiksi (comparison with the data of ship observations on the Laptev Sea shelf), *Trudy Glavnoi geofizicheskoi observatorii im. A. I. Voeikova*, V. M. Kattsov, V. P. Meleshko (eds.), Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 2012, pp. 257–269 (in Russian).
7. Starodubtsev V. S., Solovyev V. S., Features variations of methane concentration in the summer-autumn period at Arctic station Barrow (Alaska) by terrestrial and satellite data, *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M. K. Ammosova*, 2020, No. 1(75), pp. 40–50 (in Russian).
8. Yurganov L. N., Leifer A., Estimates of methane emission rates from some Arctic and sub-Arctic areas based on orbital interferometer IASI data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 3, pp. 173–183 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-173-183.
9. Yurganov L. N., Leifer A., Lund Myhre C., Seasonal and interannual variability of atmospheric methane over Arctic Ocean from satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 2, pp. 107–119 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-107-119.
10. Baijun T., Manning E., Fetzer E., Olsen E., Wong S., Susskind J., Iredell L., *AIRS/AMSU/HSB Version 6 Level 3 Product User Guide*, Pasadena, CA: California Inst. Technology, 2017, 40 p.
11. Bousquet P., Ciais P., Miller J. B., Dlugoczenky E. J., Hauglustaine D. A., Prigent C., Van der Werf G. R., Peylin P., Brunke E.-G., Carouge C., Langenfelds R. L., Lathiere J., Papa F., Ramonet M., Schmidt M., Steele L. P., Tyler S. C., White J., Contribution of anthropogenic and natural sources to atmospheric methane variability, *Nature*, 2006, Vol. 443, pp. 439–443, DOI: 10.1038/nature05132.
12. *Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and An Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios, Reports of Working Groups I and III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, forming part of the IPCC Special Report to the first session Conf. Parties to the UN Framework Convention on Climate Change*, IPCC, Houghton J. T., Meira Filho L. G., Bruce J., Hoesung L., Callander B. A., Haites E., Harris N., Maskell K. (eds.), Cambridge, UK: Cambridge University Press, UK, 1994, 339 p.
13. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC, Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K. B., Tignor M., Miller H. L. (eds.), Cambridge, UK; New York, USA: Cambridge University Press, 2007, 996 p.
14. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC, Stocker T. F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S. K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P. M. (eds.), Cambridge, UK; New York, USA: Cambridge University Press, 2013, 1535 p.

15. Ehhalt D. H., The atmospheric cycle of methane, *Tellus*, 1974, Vol. 26, pp. 58–70, DOI: 10.3402/tellusa.v26i1-2.9737.
16. Ehhalt D. H., Schmidt U., Sources and sinks of atmospheric methane, *Pure and Applied Geophysics*, 1978, Vol. 116, pp. 452–464, DOI: 10.1007/BF01636899.
17. Fiore A. M., Horowitz L. W., Dlugokencky E. J., West J. J., Impact of meteorology and emissions on methane trends, 1990–2004, *Geophysical Research Letters*, 2006, Vol. 33, Art. No. L12809, 4 p., DOI: 10.1029/2006GL026199.
18. Harvey L. D. D., A guide to global warming potentials (GWPs), *Energy Policy*, 1993, Vol. 21, pp. 24–34, DOI: 10.1016/0301-4215(93)90205-T.
19. Khalil M. A. K., Rasmussen R. A., Sources, sinks, and seasonal cycles of atmospheric methane, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1983, Vol. 88, Issue C9, pp. 5131–5144, DOI: 10.1029/JC088iC09p05131.
20. Kirschke S., Bousquet P., Ciais P., Saunois M., Canadell J. G., Dlugokencky E. J., Bergamaschi P., Bergmann D., Blake D. R., Bruhwiler L., Cameron-Smith P., Castaldi S., Chevallier F., Feng L., Fraser P. J., Krummel P. B., Lamarque J.-F., Langenfelds R. L., Le Quere C., Naik V., O'Doherty S., Palmer P. I., Pison I., Plummer D., Poulter B., Prinn R. G., Rigby M., Ringeval B., Santini M., Schmidt M., Shindell D. T., Simpson I. J., Spanhi R., Paul Steele L., Strode S. A., Sudo K., Szopa S., van der Werf G. R., Voulgarakis A., van Welle M., Williams J. E., Zeng G., Three decades of global methane sources and sinks, *Nature Geoscience*, 2013, Vol. 6, pp. 813–823, DOI: 10.1038/NGEO1955.
21. Levy II H., Normal atmosphere: large radical and formaldehyde concentrations predicted, *Science*, 1971, Vol. 173, Issue 3992, pp. 141–143, DOI: 10.1126/science.173.3992.141.
22. Overland J. E., Hanna E., Hassen-Bauer I., Kim S.-J., Walsh J. E., Wang M., Bhatt U. S., Thoman R. L., Ballinger T. J., Surface Air Temperature, *Arctic Report Card 2019*, J. Richter-Menge, M. L. Druckenmiller, M. Jeffries (eds.), 2019, pp. 5–10, available at: <http://www.arctic.noaa.gov/Report-Card>.
23. Rigby M., Prinn R. G., Fraser P. J., Simmonds P. G., Langendfelds R. L., Huang J., Cunnold D. M., Steele L. P., Krummel P. B., Weiss R. F., O'Doherty S., Salameh P. K., Wang H. J., Harth C. M., Mühle J., Porter L. W., Renewed growth of atmospheric methane, *Geophysical Research Letters*, 2008, Vol. 35, Issue 22, Art. No. L22805, 6 p., DOI: 10.1029/2008GL036037.
24. Saunois M., Stavert A. R., Poulter B., Bousquet P., Canadell J. G., Jackson R. B., Raymond P. A., Dlugokencky E. J., Houweling S., Patra P. K., Ciais P., Arora V. K., Bastviken D., Bergamaschi P., Blake D. R., Brailsford G., Bruhwiler L., Carlson K. M., Carrol M., Castaldi S., Chandra N., Crevoisier C., Crill P. M., Covey K., Curry C. L., Etiope G., Frankenberg C., Gedney N., Hegglin L., Höglund-Isaksson G., Hugelius M., Ishizawa A., Ito G., Janssens-Maenhout K. M., Jensen M. I., Joos F., Kleinen T., Krummel P. B., Langenfelds R. L., Laruelle G. G., Liu L., Machida T., Maksyutov S., McDonald K. C., McNorton J., Miller P. A., Melton J. R., Morino I., Müller J., Murgia-Flores F., Naik V., Niwa Y., Noce S., O'Doherty S., Parker R. J., Peng C., Peng S., Peters G. P., Prigent C., Prinn R., Ramonet M., Regnier P., Riley W. J., Rosentreter J. A., Segers A., Simpson I. J., Shi H., Smith S. J., Steele L. P., Thornton B. F., Tian H., Tohjima Y., Tubiello F. N., Tsuruta A., Viovy N., Voulgarakis A., Weber T. S., van Weele M., van der Werf G. R., Weiss R. F., Worthy D., Wunch D., Yin Y., Yoshida Y., Zhang W., Zhang Z., Zhao Y., Zheng B., Zhu Q., Zhu Q., Zhuang Q., The global methane budget 2000–2017, *Earth System Science Data*, 2020, Vol. 12, pp. 1561–1623, DOI: 10.5194/essd-12-1561-2020.
25. Schuur Edward 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, *BioScience*, 2008, Vol. 58, No. 8, pp. 701–714, DOI: 10.1641/B580807.
26. Thompson A. M., Chappellaz J. A., Fung I. Y., Kucsera T. L., The atmospheric CH₄ increase since the Last Glacial Maximum, *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 1993, Vol. 45, Issue 3, pp. 242–257, DOI: 10.3402/tellusb.v45i3.15727.
27. Topp E., Pattey E., Soils as sources and sinks for atmospheric methane, *Canadian J. Soil Science*, 1997, Vol. 77, pp. 167–177, DOI: 10.4141/S96-107.
28. Xiong X., Barnet C., Maddy E., Sweeney C., Liu X., Zhou L., Goldberg M., Characterization and validation of methane products from the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS), *J. Geophysical Research*, 2008, Vol. 113, pp. 1–14, DOI: 10.1029/2007JG000500.
29. Xiong X., Han Y., Liu Q., Weng F., Comparison of atmospheric methane retrievals from AIRS and IASI, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, Vol. 9, No. 7, pp. 3297–3303, DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2588279.
30. Zona D., Gioli B., Commane R., Lindaas J., Wofsy S. C., Miller C. E., Dinardo S. J., Dengel S., Sweeney C., Karion A., Chang R. Y.-W., Henderson J. M., Murphy P. C., Goodrich J. P., Moreaux V., Liljedahl A., Watts J. D., Kimball J. S., Lipson D. A., Oechel W. C., Cold season emissions dominate the Arctic tundra methane budget, *Proc. National Academy of Sciences*, 2016, Vol. 113, No. 1, pp. 40–45, DOI: 10.1073/pnas.1516017113.