
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 53.05

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

Особенности вариаций концентрации метана в летне-осенний период на арктической станции Барроу (Аляска) по наземным и спутниковым данным

¹Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
г. Якутск, Россия

²СВФУ им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

Аннотация. За последние два с половиной столетия общее содержание метана в атмосфере Земли увеличилось более чем в два раза [1]. Учитывая, что потенциал глобального потепления метана в 20 раз больше, чем углекислого газа, мониторинг и исследование свойств метана являются одной из насущных задач современной экологии. В работе представлены результаты исследования вариаций концентрации метана на арктическом побережье Аляски по данным станции Барроу (1986-2018 гг.), а также по данным дистанционного зондирования (радиометр AIRS, ИСЗ Aqua). Анализ особенностей сезонного хода метана показал, что в межсезонье (лето-осень) на ст. Барроу нередко наблюдаются резкие скачки (повышение) концентрации метана с амплитудами, превышающими фоновые на $\sim > 5\%$, и длительностью от нескольких десятков часов до нескольких суток. Подобные события наблюдались преимущественно с июня по ноябрь. Логично предположить, что подобное поведение метана в летне-осеннее время, когда содержание метана в атмосфере над акваторией северных морей в среднем ниже, чем над сушей, обусловлено динамикой северных и южных ветров в точке наблюдения (ст. Барроу). Были проведены исследования зависимости концентрации метана от направления ветра, показавшие, что значительные скачки концентрации метана на станции регистрировались при ветре, дующем со стороны суши. В случае ветра с севера значения метана в целом соответствовали невозмущенному (фоновому) уровню. Анализ усредненных среднемесячных карт распределения концентрации метана, построенных по спутниковым данным, показал, что в зимний период на высоких широтах значения метана над поверхностью суши и северными морями существенно не отличаются. Однако в летне-осенний период концентрация метана над сушей заметно выше, чем над морями. Дополнительные расчеты траекторий перемещения воздушных масс в зоне исследования также подтвердили

СТАРОДУБЦЕВ Вадим Сергеевич – м. н. с., Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН.

E-mail: starodubjr@ikfia.sbras.ru

STARODUBTSEV Vadim Sergeevich – Junior Researcher, Yu. G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

СОЛОВЬЕВ Владимир Степанович – к. ф.-м. н., Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН; доцент, Физико-технический институт СВФУ им. М.К. Аммосова.

SOLOVYEV Vladimir Stepanovich – Ph.D., Senior Researcher, Yu. G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Associate Professor of the Physical-Technical Institute of the M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.

предположение, что быстрые повышения концентрации метана в летне-осенний период на ст. Барроу, расположенной на арктическом побережье, обусловлены переносом со стороны суши воздушных масс с повышенным содержанием метана.

Ключевые слова: вариации метана, Арктика, станция Барроу, вечная мерзлота, дистанционное зондирование, динамика ветра, AIRS, HYSPLIT.

DOI

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

Features Variations of Methane Concentration of the Summer-Autumn Period at Arctic Station Barrow (Alaska) By Terrestrial and Satellite Data

¹Yu. G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

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

Abstract. Over the past two and a half centuries total methane content in the Earth's atmosphere has more than doubled [1]. The global warming potential of methane is 20 times greater than that of carbon dioxide, considering that, monitoring and studying the properties of methane are one of the urgent tasks of modern ecology. This paper presents a study of methane concentration variations on the Arctic coast of Alaska, according to Barrow station data (1986-2018), and remote sensing data (AIRS radiometer, Aqua satellite). Analysis of the seasonal variation of methane showed that in the off-season (summer-autumn) at station Barrow quite often there are sharp jumps (increases) in methane concentration with amplitudes exceeding the background by $\sim > 5\%$ and lasting from several / tens of hours to several days. Similar events were mainly observed from June to November. It is logical to assume that this behavior of methane in summer and autumn, when methane content in the atmosphere above the northern seas is on average lower than over land, is due to the dynamics of north and south winds at the observation point (Barrow station). Studies were conducted of the dependence of methane concentration on the direction of wind, that showing significant jumps in methane concentration at the station were recorded with wind blowing from the land. In case of wind from the north, methane values generally corresponded to an unperturbed / background level. Analysis of monthly averaged distribution maps of methane concentration, based on satellite data, showed that in winter, at high latitudes, methane values above the land surface and northern seas do not differ significantly. However, in summer-autumn period, the concentration of methane over land is much higher than over the seas. Additional calculations of the trajectories of air mass movements in study area also confirmed the assumption that rapid increases in methane concentration in the summer-autumn period at station Barrow, located on the Arctic coast, is caused by the transfer from the land side of the air masses with a high methane content.

Keywords: methane variations, Arctic, Barrow station, permafrost, remote sensing, wind dynamics, AIRS, HYSPLIT.

Введение

К важнейшим газовым примесям, играющим заметную роль в тепловом балансе атмосферы, относится метан, процентное содержание которого очень невелико, но, несмотря на это, он является эффективным парниковым газом с потенциалом глобального потепления более чем в 20 раз выше (из расчета 100 лет), чем у основного парникового газа CO₂ [2]. В порядке оцениваемого воздействия на температурный режим атмосферы метан занимает третье место после водяного пара и углекислого газа [3]. Учитывая, что, начиная с доиндустриального периода, концентрация метана в атмосфере выросла примерно на ~150%, а CO₂ – на ~40%, роль метана в парниковом эффекте существенно возрастает.

Химическим путем в воздухе CH_4 практически не образуется, поэтому его содержание в атмосфере полностью определяется наземными источниками [4], к которым относятся: болота, озера и реки, лесные пожары и утилизация ископаемого топлива, объекты растениеводства и животноводства, метангидраты океанского шельфа, многолетние мерзлые породы и другие глубинные геологические источники. Доминирующим естественным источником метана являются заболоченные территории – они дают от 25 до 32% от всех его выбросов, на долю антропогенных выбросов приходится ~ от 49 до 61% глобального выброса CH_4 [5]. Основным механизмом стока метана, при котором ежегодно из атмосферы удаляется примерно 90% всех его поступающих эмиссий, является окисление метана свободным радикалом ОН. Кроме реакции с ОН сток происходит за счет микробиологического поглощения в почве и реакции метана с атомами хлора на поверхности моря [6].

На высоких широтах в балансе метана заметен вклад донных залежей метангидратов на арктическом шельфе. В условиях глобального потепления и соответствующем росте температуры воды метангидраты разрушаются и освобожденный метан поступает в атмосферу. Иногда локальный выброс метана носит фонтанирующий характер, во время экспедиций в Охотском море на его поверхности наблюдалась область образования пузырьков. Пробы, забранные в месте появления пузырьков, показали высокие концентрации метана, а в результате эхо-локации было обнаружено субаквальное тело «факел Обжирова» [7] на дне морского шельфа. В работах [8-9] приводятся результаты спутниковых наблюдений, выявивших аномалии над морями Северного Ледовитого океана.

Эффекты глобального изменения климата наиболее заметны на высоких широтах, где темпы роста температуры в два раза превышают средние по земному шару [10]. Рост температуры оказывает разрушительное действие на вечную мерзлоту, содержащую в большом количестве (по приблизительным оценкам не менее 1400 Гт метана [11]) парниковые газы CH_4 , CO_2 , и, соответственно, повышает эмиссию метана из почвы.

Экспериментальные исследования метана в Арктике, результатам которых посвящен ряд публикаций [12-16], достаточно трудоемки, материально затратны, осложнены суровым климатом и труднодоступностью региона, как следствие количество стационарных пунктов наблюдения в Арктике невелико. В России таких станций пять: аэрологическая станция «Воейково», гидрометеорологическая станция «Териберка», станция «Новый Порт», главная метеорологическая обсерватория «Тикси» и Северо-Восточная научная станция в пос. Черский. За рубежом также существует ряд подобных станций: «Алерт» (Канада), «Барроу» (США, Аляска), «Паллас» (Финляндия), «Шпицберген» (Норвегия).

Измерения на станциях носят локальный характер, поэтому чтобы получить пространственно-временную картину распределения метана над обширными территориями требуются спутниковые средства наблюдения, обеспечивающие с широким охватом и достаточным временным/пространственным разрешением измерения атмосферного метана [17-19].

Рост содержания метана в атмосфере на высоких широтах в результате деградации вечной мерзлоты и разрушения метангидратов на арктическом шельфе, вызванные глобальным потеплением, ведет к повышению темпов парникового эффекта. Это обстоятельство во многом определяет актуальность исследований парниковых газов в арктической зоне и приполярных территориях.

Целью данной работы является исследование особенностей быстрых вариаций концентрации атмосферного метана на арктическом побережье (ст. Барроу) по данным наземных и спутниковых наблюдений.



Рис. 1. Карта расположения ст. Барроу

Данные и методика

В работе использованы данные станции Барроу (71°36' с. ш., 156°6' з. д.), расположенной в 500 км к северу от полярного круга (рис. 1). Данные станции размещены в открытом доступе на интернет-ресурсе (ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg). Местность вблизи станции характеризуется отсутствием крупных инфраструктурных объектов, а также низкой плотностью населения, что снижает уровень антропогенного влияния на результаты наблюдений.

Измерения метана на ст. Барроу проводятся в непрерывном режиме с 1986 г. и по настоящее время. Для измерения концентрации газовых компонентов используется пламенно-ионизационный спектрограф. Данные имеют среднечасовой формат представления, даты и время указаны в формате UTC.

Среднечасовые данные о направлении и скорости ветра доступны по ссылке https://www.esrl.noaa.gov/gmd/dv/data/index.php?parameter_name=Meteorology&site=BRW.

Помимо наземных измерений, в работе использованы данные бортового радиометра AIRS (Atmospheric Infrared Sounder), представляющие собой карты среднемесячного распределения метана с разрешением 1x1 град. (продукт AIRX3STM), доступные по URL-ссылке <https://giovanni.gsfc.nasa.gov>.

Для трассировки путей переноса воздушных масс была использована модель HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model), которой можно свободно пользоваться через web-интерфейс по URL-адресу <https://www.ready.noaa.gov/hypub-in/trajtype.pl?runttype=archive>.

Обсуждение

В результате анализа набора наземных данных измерений метана с 1986 по 2018 гг. был выделен период июнь-ноябрь, в течение которого чаще наблюдались резкие скачки (повышение) значений концентрации метана со следующими признаками:

- резкому повышению CH_4 предшествовал спокойный, невозмущенный период в течение не менее трех суток;
- амплитуда скачка CH_4 превышала невозмущенные значения на $\sim > 5\%$;
- длительность отдельных скачков повышений концентрации метана составляла от нескольких десятков часов до нескольких суток;
- после внезапных повышений метана наблюдался спокойный период длительностью не менее трех суток.

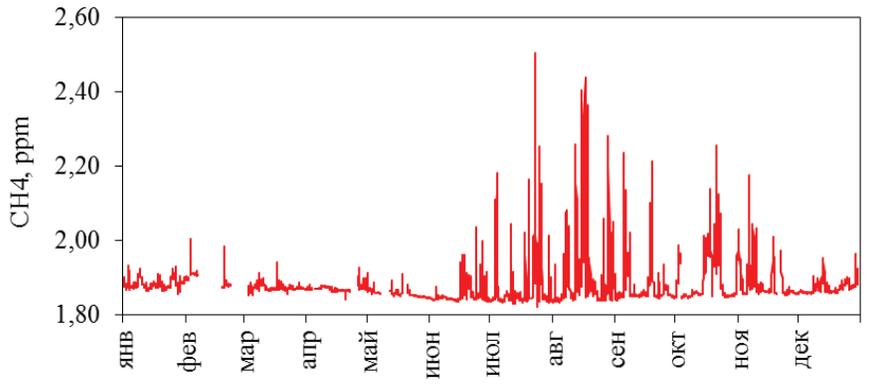


Рис. 2. Пример быстрых вариаций CH_4 в летне-осенний период 2004 г.

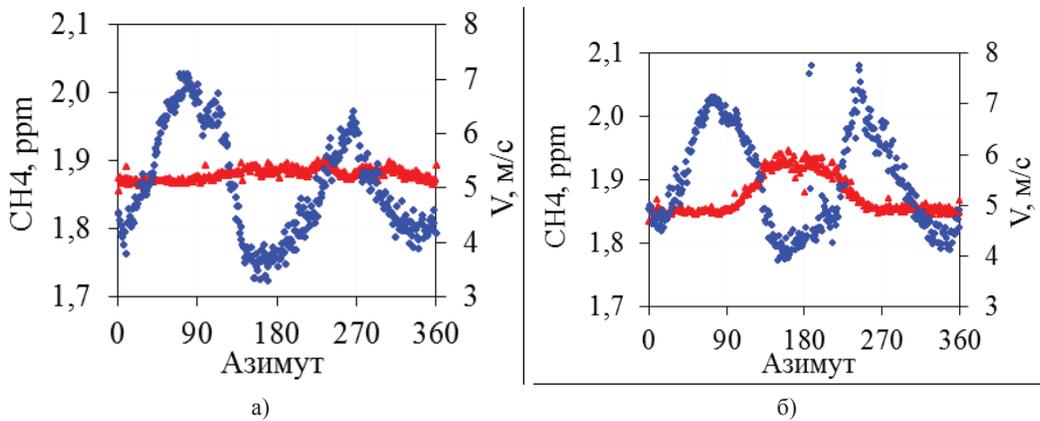


Рис. 3. Зависимость концентрации метана (красная кривая) и скорости ветра (синяя кривая) от азимута: а) декабрь-май, б) июнь-ноябрь 1986-2018 гг.

На рис. 2 представлен яркий пример наблюдаемых в летне-осенний период вариаций метана с высокими амплитудами на фоне общего сезонного хода CH_4 с характерным повышенным содержанием метана зимой и пониженным в летнее время [20].

С наступлением летнего сезона активизируются природные (биогенные) источники метана – анаэробные микроорганизмы, содержащиеся в почве и болотах [21-22]. Активная жизнедеятельность этих микроорганизмов прослеживается вплоть до ноября, когда температура почвы на глубине ~ 5-15 см остается на уровне около 0°C [23].

На рис. 3 представлены зависимости концентрации метана (красные маркеры) и скорости ветра (синие маркеры) от азимута ветра в периоды декабрь-май и июнь-ноябрь, усреднённые за весь период наблюдений (1986-2018 гг.). Направлению ветра, дующего с суши, соответствует азимутальный сектор 80-280 град., остальные направления относятся к ветрам, дующим с акватории северных морей (Бофорта, Чукотского). Можно отметить характерную для арктического побережья ветровую динамику – ветры с северных морей в среднем имеют заметно большую амплитуду по сравнению с южными ветрами.

Как видно из графика (рис. 3а), уровень концентрации метана в декабре-мае не зависит от направления (азимута) ветра. Тогда как рис. 3б показывает, что в июне-ноябре для азимутального сектора суши наблюдаются заметно более высокие значения метана (~ >5%) по сравнению с азимутами ветров, дующих со стороны

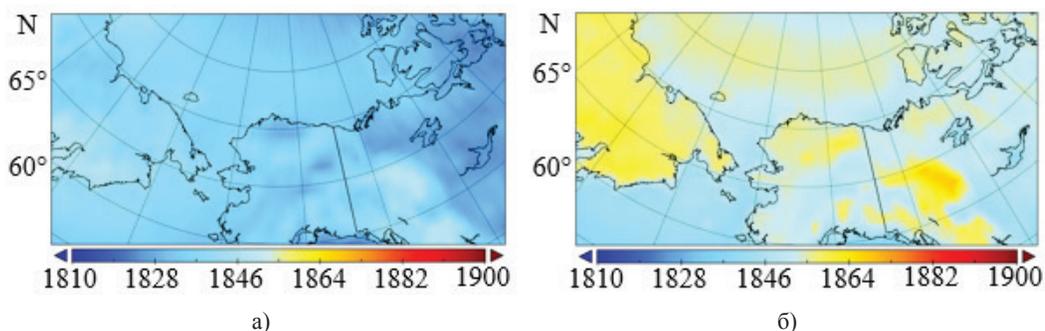


Рис. 4. Усредненные за 2003-2018 гг. карты распределения концентрации метана на высоте 400 гПа: а) декабрь-май, б) июнь-ноябрь

северных морей. Следовательно, можно предположить, что южные ветры приносят в точку наблюдения воздушные массы с высокой концентрацией метана, а ветры с морей – с низким содержанием метана. Подобное объяснение для данных ст. Тикси приводится в [24-26].

На рис. 4 представлены усредненные за 2003-2018 гг. карты распределения концентрации метана на высоте 400 гПа, построенные по данным радиометра AIRS, установленного на спутнике AQUA. Продукт AIRX3STM дает возможность строить карты на разных барических высотах. Выбор использованной в настоящей работе высоты 400 гПа обусловлен рекомендациями, представленными в работах [27-28], где измерения метана на уровне 400-500 гПа (~ 6-7 км) представляются наиболее достоверными для арктической зоны. Значения распределения концентрации метана на рис. 4 соответствуют цветовой шкале в единицах ppb.

Было произведено усреднение в период с 2003 по 2018 гг. для всего северного полушария. Картина усредненного распределения метана представлена на рис. 4, где а) – распределение в декабре-мае, б) – распределение в июне-ноябре. В зимне-весеннее время, как следует из рис. 4а, заметного различия в содержании метана над сушей и водной поверхностью не наблюдается. Напротив, в период июнь-ноябрь (рис. 4б) содержание метана над сушей заметно превышает его содержание над водной поверхностью; отчетливо наблюдается граница раздела областей с высоким и низким содержанием метана, проходящая по береговой линии. Особенности картины распределения метана объясняются балансом механизмов истока (биогенные источники) и стока (окисление CH_4 свободными радикалами) в означенные времена года.

Пример одного из рассматриваемых событий с резким повышением концентрации метана представлен на рис. 5, из которого следует, что в течение 7-12 августа 2010 г. концентрация метана оставалась на невозмущенном фоновом уровне. С 13 по 17 августа наблюдаются несколько резких скачков концентрации с высокими амплитудами. После 17 августа концентрация метана снижается до невозмущенных значений и сохраняется на данном уровне в течение нескольких суток.

По модели HYSPLIT были проведены расчеты траекторий переноса воздушных масс в течение двух суток, предшествующих отмеченным стрелками (рис. 5) датам. Результаты трассировки представлены на рис. 6. Временной интервал между точками траектории соответствует одному часу. Траектории синего цвета (№1, №2) соответствуют невозмущенным значениям концентрации метана 10 и 12 августа, а красные траектории (№3-6) – резким скачкам значений концентрации 13-15 и 16 августа соответственно.

Как следует из рис. 6, синие траектории (№1 и №2) полностью находятся в акватории моря Бофорта. Траектория красного цвета №3, хотя и берет свое начало в море Бофорта,

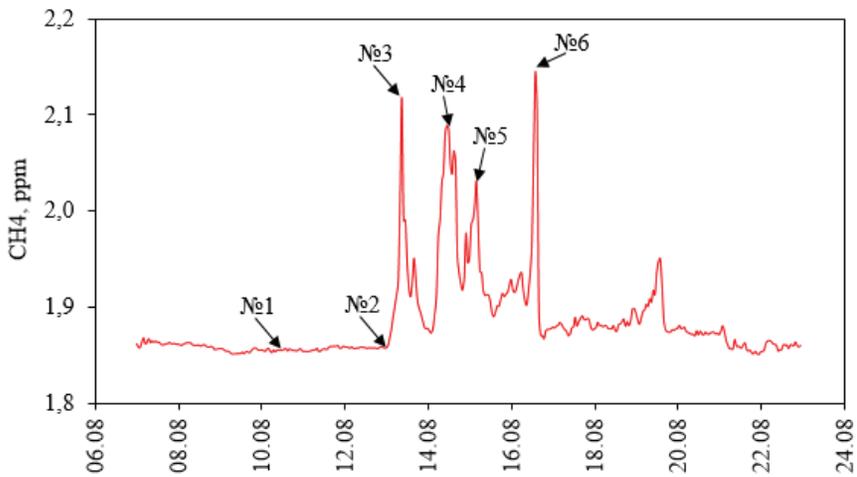


Рис. 5. Вариации концентрации метана на ст. Барроу 7-22 августа 2010 г.

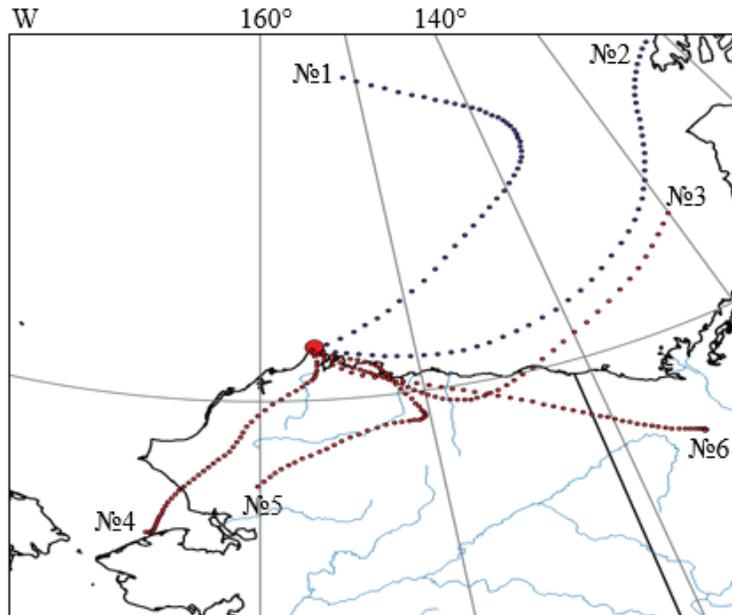


Рис. 6. Рассчитанные по модели HYSPLIT траектории переноса воздушных масс для соответствующих временным меткам датам

но последние 1,5 суток проходит через сушу. Остальные траектории (№4-6) полностью/ преимущественно лежат в пределах суши.

Данные дистанционного зондирования показывают, что в целом содержание метана в атмосфере над сушей больше, чем над морской поверхностью в рассматриваемые периоды времени (рис. 4). Таким образом, временной ход концентрации метана (рис. 3, рис. 5) вероятнее всего объясняется характером ветровой динамики. Ветры с суши, где метан интенсивно выделяется болотами и озерами, приносят воздушные массы с высоким содержанием метана и тогда на ст. Барроу регистрируется его резкое повышение, а ветры с севера имеют низкую концентрацию CH_4 , и, соответственно, содержание

метана опускается до невозмущенных значений. Подобная картина суточных вариаций метана, объясняемая характером ветровой динамики, наблюдалась также на арктической ст. Тикси [26].

Заключение

В результате анализа особенностей поведения метана на арктическом побережье по данным ст. Барроу (1986-2018 гг.) можно сделать следующие выводы:

– на фоне сезонного хода в летне-осенний период (чаще июнь–ноябрь) нередко наблюдаются резкие повышения концентрации метана, значительно ($\sim > 5\%$) превышающие фоновый уровень и длительностью от нескольких/десятков часов до нескольких суток;

– подобные вариации метана в летне-осенний период на станции Барроу, расположенной на арктическом побережье, объясняются ветровым режимом 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, и уровень метана на станции снижается до невозмущенных значений;

– спутниковые наблюдения хорошо согласуются с результатами, полученными по наземным данным, и подтверждают вывод о ветровом режиме.

Безусловно, для обобщения и масштабирования результатов исследования требуется привлечение данных других арктических станций наблюдения: «Воейково», «Териберка», «Новый Порт», «Тикси», Северо-Восточной научной станции в пос. Черский, «Алерт» (Канада), «Паллас» (Финляндия), «Шпицберген» (Норвегия) и детальных спутниковых измерений.

Литература

1. Анисимов О. А., Анохин Ю. А и др. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории российской Федерации. Общее резюме. – ГУ НИЦ «Планета» // ГУ НИЦ «Планета», 2008. – 28 с.
2. Пачаури Р. К., Райзингер А. и основная группа авторов (ред.) МГЭИК: Изменение климата: Обобщающий доклад. Вклад рабочих групп I, II, III в Четвертый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата // МГЭИК, Женева, Швейцария, 2007 – 104 с.
3. J. T. Kiehl, Kevin E. Trenberth. Earth's Annual Global Mean Energy Budget // Bulletin of the American Meteorological Society. – Vol. 78, № 2, 1997 – P. 197-208.
4. Бажин Н. М. Метан в атмосфере // Соросовский образовательный журнал, Т.6 №3, 2000. – С. 52-57.
5. Saunio M., Bousquet P., Dlugokencky et al. The global methane budget 2000-2012 // Earth System Science Data 8, 2016. – P. 697-751.
6. IPCC, Climate Change: Radiative Forcing of Climate Change and An Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios - J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, J. Bruce, Hoesung Lee, B.A. Callander, E. Haites, N. Harris and K. Maskell (Eds.) // Cambridge University Press, UK, 1994. – P. 1-339.
7. Обжиров А. И., Телегин Ю. А., Болобан А. В. Потоки метана и газогидраты в Охотском море // Подводные исследования и робототехника, №1 (19), 2015. – С. 56-62.
8. Юрганов Л. Н., Лейфер А., Вадаккелупулямбатта С. Признаки ускорения возрастания концентрации метана в атмосфере после 2014 года: спутниковые данные для Арктики // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – Т.14 №5, 2017. – С. 248-258.
9. Yurganov L., Muller-Kager F., Leifer I. Methane increase over the Barents and Kara seas after the autumn pycnocline breakdown: satellite observations // Advances in Polar Science. – Vol. 30 №4, 2019 – P. 382-390.
10. IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, Second Assessment Report: Climate Change // Cambridge University Press, 1995. – P. 1-572.
11. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Kosmach D. Anomalies of methane in the atmosphere over the East Siberian shelf: Is there any sign of methane leakage from shallow shelf hydrates? // Geophysical Research

Abstracts, EGU General Assembly 2008, 10, EGU2008-A-01526.

12. Антонов К. Л., Поддубный В. А. и др. Некоторые итоги мониторинга парниковых газов в арктическом регионе России // Арктика: экология и экономика, № 1 (29), 2018. – С. 56-67.

13. Platt S. M., Eckhardt S., Ferre B., et al. Methane at Svalbard and over the European Arctic ocean // Atmospheric Chemistry and Physics. – Vol. 18(23), 2018 – P. 17207-17224.

14. James, R. H., Bousquet, P., Leifer, I. et al. Effects of climate change on methane emissions from seafloor sediments in the Arctic Ocean: A review // Limnology and Oceanography. – Vol. 61, 2016. – P. 283-299.

15. Miller S., Miller C., Commane R., et al. A multi-year estimate of methane fluxes in Alaska from CARVE atmospheric observations // Global Biogeochemical Cycles. – Vol. 30, 2016. – P. 1441-1453.

16. Thompson, R. L., Sasakawa, M., Machida, T. et al. Methane fluxes in the high northern latitudes for 2005-2013 estimated using a Bayesian atmospheric inversion // Atmospheric Chemistry and Physics. – Vol. 17, 2017. – P. 3553-3572.

17. Clearbaux C. et al. Monitoring of atmospheric composition using the thermal infrared IASI/MetOp sounder // Atmospheric Chemistry and Physics. – Vol. 9, 2009 – P. 6041-6054.

18. Schepers D., Guerlet S., Butz A. et al. Methane retrievals from Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT) shortwave infrared measurements: Performance comparison of proxy and physics retrieval algorithms // Journal of Geophysical Research D: Atmospheres. – Vol. 117, 2012. – P. 1-14.

19. Daniel D. Jacob, Xiong Liu et al. Satellite observations of atmospheric methane and their value for quantifying methane emissions // Atmospheric Chemistry and Physics. – Vol. 16, 2016 – P. 14371-14396.

20. Khalil, M.A.K. and R.A. Rasmussen. Sources, sinks, and seasonal cycles of atmospheric methane // Journal of Geophysical Research. – Vol. 88(C9), 1983. – P. 5131-5144.

21. R. E. Fisher, et al. Arctic methane sources: Isotopic evidence for atmospheric inputs // Geophysical Research Letters. – Vol. 38, 2011. – P. 1-6.

22. Thibaud Thonat, Marielle Saunois, Phillipe Bousquet, et al. Detectability of Arctic methane sources at six sites performing continuous atmospheric measurements // Atmospheric Chemistry and Physics, Vol. 17, 2017. – P. 8371-8394.

23. Donatella Zona, Beniamino Giolici et al. Cold season emissions dominate the Arctic tundra methane budget // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. – Vol. 113 (1), 2016. – P. 40-45.

24. Репина И. А., Аниферов А. А., Артамонов А. Ю. Метан в атмосфере Арктики по данным дистанционного зондирования, приземных измерений и моделирования // Материалы III Международной научно-практической конференции «Прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий», 2015. – С. 191-199.

25. Starodubtsev V. S., Solovyev V. S. Methane measurements at Polar Geocosmophysical Observatory “Tixie” // Proceedings of 2nd International conference «Global warming and the human-nature dimension in Siberia: social adaptation to the changes of the terrestrial ecosystem, with an emphasis on water environments» and 7th Annual International Workshop “C/H₂O/Energy balance and climate over boreal and arctic regions with special emphasis on eastern Eurassia”, 2013. – P. 112-114.

26. Стародубцев В. С., Соловьев В. С. Исследование вариаций метана в приземном слое воздуха по наблюдениям на ст. Тикси // Природопользование в Арктике: современное состояние и перспективы развития. Сборник научных трудов I международной научно-практической конференции. – Якутск: Издательство: Северо-Восточный Федеральный университет, 2015. – С. 533-541.

27. Xiaozhen Xiong, Chris Barnet, Eric Maddy, Colm Sweeney, Xingpin Liu, Lihang Zhou and Mitch Goldberg. Characterization and validation of methane products from the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) // Journal of Geophysical Research. – Vol. 113, 2008. – P. 1-14.

28. 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, Т. 13. № 2, 2016. – С. 107-119.

References

1. Anisimov O. A., Anohin YU. A i dr. Ochenochnyj doklad ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii rossijskoj Federacii. Obshchee rezjume. – GU NIC «Planeta» // GU NIC «Planeta», 2008. – 28 s.
2. Pachauri R. K., Rajzinger A. i osnovnaya gruppa avtorov (red.) MGEIK: Izmenenie klimata: Obobshchayushchij doklad. Vklad rabochih grupp I, II, III v CHetvertyj doklad ob ocenke Mezhpriavitel'stvennoj gruppy ekspertov po izmeneniyu klimata // MGEIK, ZHeneva, SHvejcariya, 2007 – 104 s.
3. J. T. Kiehl, Kevin E. Trenberth. Earth's Annual Global Mean Energy Budget // Bulletin of the American Meteorological Society. – Vol. 78, № 2, 1997 – P. 197-208.
4. Bazhin N. M. Metan v atmosfere // Sorosovskij obrazovatel'nyj zhurnal, T.6 №3, 2000. – S. 52-57.
5. Saunio M., Bousquet P., Dlugokencky et al. The global methane budget 2000-2012 // Earth System Science Data 8, 2016. – P. 697-751.
6. IPCC, Climate Change: Radiative Forcing of Climate Change and An Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios - J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, J. Bruce, Hoesung Lee, B.A. Callander, E. Haites, N. Harris and K. Maskell (Eds.) // Cambridge University Press, UK, 1994. – P. 1-339.
7. Obzhairov A. I., Telegin YU. A., Boloban A. V. Potoki metana i gazogidraty v Ohotskom more // Podvodnye issledovaniya i robototekhnika, №1 (19), 2015. – S. 56-62.
8. YUrganov L. N., Leifer A., Vadakkepuliymbatta S. Priznaki uskorenija vozrastaniya koncentracii metana v atmosfere posle 2014 goda: sputnikovyje dannye dlya Arktiki // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. – T.14 №5, 2017. – S. 248-258.
9. Yurganov L., Muller-Kager F., Leifer I. Methane increase over the Barents and Kara seas after the autumn pycnocline breakdown: satellite observations // Advances in Polar Science. – Vol. 30 №4, 2019 – P. 382-390.
10. IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, Second Assessment Report: Climate Change // Cambridge University Press, 1995. – P. 1-572.
11. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Kosmach D. Anomalies of methane in the atmosphere over the East Siberian shelf: Is there any sign of methane leakage from shallow shelf hydrates? // Geophysical Research Abstracts, EGU General Assembly 2008, 10, EGU2008-A-01526.
12. Antonov K. L., Poddubnyj V. A. i dr. Nekotorye itogi monitoringa parnikovyyh gazov v arkticheskom regione Rossii // Arktika: ekologiya i ekonomika, № 1 (29), 2018. – S. 56-67.
13. Platt S. M., Eckhardt S., Ferre B., et al. Methane at Svalbard and over the European Arctic ocean // Atmospheric Chemistry and Physics. – Vol. 18(23), 2018 – P. 17207-17224.
14. James, R. H., Bousquet, P., Leifer, I. et al. Effects of climate change on methane emissions from seafloor sediments in the Arctic Ocean: A review // Limnology and Oceanography. – Vol. 61, 2016. – P. 283-299.
15. Miller S., Miller C., Commane R., et al. A multi-year estimate of methane fluxes in Alaska from CARVE atmospheric observations // Global Biogeochemical Cycles. – Vol. 30, 2016. – P. 1441-1453.
16. Thompson, R. L., Sasakawa, M., Machida, T. et al. Methane fluxes in the high northern latitudes for 2005-2013 estimated using a Bayesian atmospheric inversion // Atmospheric Chemistry and Physics. – Vol. 17, 2017. – P. 3553-3572.
17. Clearbaux C. et al. Monitoring of atmospheric composition using the thermal infrared IASI/MetOp sounder // Atmospheric Chemistry and Physics. – Vol. 9, 2009 – P. 6041-6054.
18. Schepers D., Guerlet S., Butz A. et al. Methane retrievals from Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT) shortwave infrared measurements: Performance comparison of proxy and physics retrieval algorithms // Journal of Geophysical Research D: Atmospheres. – Vol.117, 2012. – P. 1-14.
19. Daniel D. Jacob, Xiong Liu et al. Satellite observations of atmospheric methane and their value for quantifying methane emissions // Atmospheric Chemistry and Physics. – Vol. 16, 2016 – P. 14371-14396.
20. Khalil, M.A.K. and R.A. Rasmussen. Sources, sinks, and seasonal cycles of atmospheric methane // Journal of Geophysical Research. – Vol. 88(C9), 1983. – P. 5131-5144.
21. R. E. Fisher, et al. Arctic methane sources: Isotopic evidence for atmospheric inputs // Geophysical Research Letters. – Vol. 38, 2011. – P. 1-6.
22. Thibaud Thonat, Marielle Saunio, Phillipe Bousquet, et al. Detectability of Arctic methane sources at

six sites performing continuous atmospheric measurements // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – Vol. 17, 2017. – P. 8371-8394.

23. Donatella Zona, Beniamino Giolice et al. Cold season emissions dominate the Arctic tundra methane budget // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. – Vol. 113 (1), 2016. – P. 40-45.

24. Repina I. A., Aniferov A. A., Artamonov A. YU. Metan v atmosfere Arktiki po dannym distancionnogo zondirovaniya, prizemnyh izmerenij i modelirovaniya // *Materialy III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Prikladnye aspekty geologii, geofiziki i geoekologii s ispol'zovaniem sovremennyh informacionnyh tekhnologij»*, 2015. – S. 191-199.

25. Starodubtsev V. S., Solovyev V. S. Methane measurements at Polar Geocosmophysical Observatory “Tixie” // *Proceedings of 2nd International conference «Global warming and the human-nature dimension in Siberia: social adaptation to the changes of the terrestrial ecosystem, with an emphasis on water environments» and 7th Annual International Workshop “C/H₂O/Energy balance and climate over boreal and arctic regions with special emphasis on eastern Eurassia”*, 2013. – P. 112-114.

26. Starodubcev V. C., Solov'ev V. S. Issledovanie variacij metana v prizemnom sloe vozduha po nablyudeniya na st. Tiksi // *Prirodopol'zovanie v Arktike: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya. Sbornik nauchnyh trudov I mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. – YAkutsk: Izdatel'stvo: Severo-Vostochnyj Federal'nyj universitet, 2015. – S. 533-541.

27. Xiaozhen Xiong, Chris Barnet, Eric Maddy, Colm Sweeney, Xingpin Liu, Lihang Zhou and Mitch Goldberg. Characterization and validation of methane products from the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) // *Journal of Geophysical Research*. – Vol. 113, 2008. – P. 1-14.

28. YUrganov L. N., Lejfer A., Lund Majr K. Sezonnaya i mezhhodovaya izmenchivost' atmosfernogo metana nad moryami Severnogo Ledovitogo okeana po sputnikovym dannym // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, T. 13. № 2, 2016. – S. 107-119.

