

ИСТОЧНИКИ МЕТАНА В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ

В.В. Адушкин, В.П. Кудрявцев

На основе анализа данных наземных, морских и спутниковых измерений были выявлены особенности генерации метана в атмосфере в различных регионах Арктики, обладающих различным потенциалом метаногенеза. Установлено, что мощность источников метана не включённых в официальные таблицы ИРСС составляет более 250 Тг/год. Сезонные изменения потоков метана в арктической зоне объясняют наличие устойчивого осенне-зимнего максимума концентрации метана. Сделан вывод о том, что источниками, поддерживающими значительную эмиссию метана в СП в осенне-зимний период являются водно-болотные угодья, озёра и эмиссия метана в континентальной и морской частях Арктики, обусловленная таянием многолетнемерзлых грунтов.

Введение

Интерес к метановому циклу в природных системах литосферы, гидросферы и атмосферы обусловлен двумя основными причинами. Метан является важным источником энергии для обеспечения жизнедеятельности человека. Кроме того метан оказывает существенное влияние на радиационный баланс атмосферы. По степени влияния на радиационный баланс атмосферы и развитие парникового эффекта метан является третьим по значимости (после паров воды и двуокиси углерода) парниковым газом. До недавнего времени вклад метана в общий парниковый эффект составлял около 0,8 °С [Монин и др., 2000]. Но благодаря его способности поглощать инфракрасное излучение, большей, чем у углекислого газа в 21 раз (на единицу массы), а также быстрому росту содержания в атмосфере, его влияние заметно возрастает. Согласно современным представлениям, доля метана в приросте средней глобальной температуры атмосферы составляет 13–15% от суммарного парникового эффекта, а изменения средней глобальной температуры атмосферы обусловлено усилением парникового эффекта и, в частности, увеличением в ней концентрации метана. К 2007 году радиационный форсинг от повышения его концентрации составил 0,5 Вт/м², то есть треть от радиационного форсинга углекислого газа (1,5 Вт/м²) [ИРСС, 2007]. Поэтому причинам изменения концентрации метана уделяется много внимания. Тем не менее, некоторые вопросы, связанные с распределением метана в атмосфере и его влиянием на климатическую систему, все еще освещены слабо.

Для того чтобы понять причины изменения концентрации метана, быстрый рост его содержания в атмосфере, необходимо оценить вклад Арктического шельфа в глобальный поток метана. Необходимо ответить на вопросы, почему концентрация метана в северном полушарии (СП) с увеличением широты монотонно возрастает, а её максимум находится не над средними широтами СП, на которые приходится основная антропогенная активность, а над Арктическим регионом; за счет каких источников наблюдается значительное увеличение массы метана в атмосфере СП в осенне-зимней период.

Последние результаты наблюдений показывают, что его масса возрастает приблизительно на 20 Тг в год. Однозначных представлений о причинах возрастания концентрации метана в атмосфере в настоящее время нет. Для того чтобы понять причины такого поведения концентрации метана в атмосфере, необходимо знать вид и мощность его источников. Оценки мощности источников, представленных в отчёте IPCC-2007, указывают величину ~582 Тг/год [IPCC, 2007]. При этом, в атмосферу СП поступает ~75%, от общего потока метана [Fung et al., 1991], то есть из 582 Тг/год традиционных источников на долю СП приходится менее 450 Тг/год. Проведённые в работах [Адушкин и др., 2010; 2013] расчёты и анализ закономерностей поведения концентрации и массы метана в полусферах Земли показали, что глобальный поток метана с поверхности литосферы и океана в атмосферу СП должен составлять не менее 530 Тг/год, то есть в СП существует дефицит скорости поступления метана в атмосферу порядка 80 Тг/год.

В настоящее время количество и мощность источников метана, вносящих вклад в его бюджет в атмосфере, продолжает пополняться. Тем не менее, многие источники метана до сих пор не включены в официальные таблицы [IPCC, 2007]. В предлагаемой работе, по литературным данным, проводится анализ и оценка мощности источников метана, регистрируемых в различных экспериментах и не включённых в официальные таблицы IPCC.

Характеристики источников метана в Арктике

Наземные измерения метана вблизи поверхности Земли не многочисленны. Регулярные измерения проводятся в глобальной сети наблюдений за парниковыми газами. Она включает данные четырех стационаров, градиентные наблюдения на восьми специализированных вышках высотой порядка 300 м, а также результаты анализа периодических проб воздуха, отбираемых вакуумированными флягами. В Арктике регулярные измерения метана проводятся в четырех пунктах: Тикси и Терриберка в России; Бэрроу на севере Аляски и Алерт на канадском острове Элсмир в 817 км от Северного полюса. Данные этих наблюдений за период 2002–2012 годы собраны и систематизированы исследовательской группой NOAA, результаты представлены на интернет портале [<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/>], а до 2002 года в работах [Steele et al., 2003; Dlugokencky et al., 2003].

Используя результаты измерений концентрации метана в 1984–2002 годы в различных регионах мира, нами были рассчитаны широтные зависимости средне-годовых значений концентрации CH_4 , которые представлены на рис. 1. Аналогичные зависимости средне-годовых значений концентрации CH_4 за период с 2002 по 2012 годы, но по более обширному банку данных [<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/>] представлены в работе [Анисимов и др., 2015]. Прослеженные по меридиональному разрезу от Южного до Северного полюсов пространственные изменения

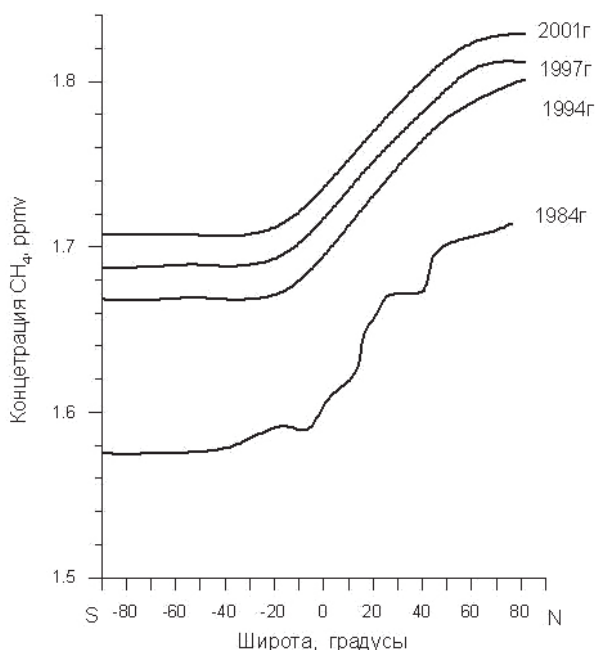


Рис. 1. Широтная зависимость концентрации метана

содержания метана в атмосфере за указанный период показывают, что в СП (континентальном) на высоких широтах заметно возрастание концентрации метана. В южном полушарии, в основном занятом океаном, концентрация метана практически не зависит от широты и равна – 1,7 ppmv.

Наибольшие концентрации в приземном слое воздуха наблюдаются на высоких широтах СП. В работе [Володин, 2015] в численных экспериментах с климатической моделью INMCM4 исследовано влияние и роль источников метана в высоких широтах СП на межполушарную асимметрию его концентрации. В качестве причин межполушарного различия рассматривалась возможность расположения источников метана преимущественно в СП, однако вопрос о том, какой именно должен быть источник метана и какова его мощность, в работе не исследовались.

В настоящее время мало изученным вопросом остается эмиссия метана в континентальной и морской частях Арктики, обусловленная многолетним таянием мерзлых грунтов. Согласно различным оценкам поток метана из почвы высоких северных широт составляет 31–106 Тг/год. Область их распространения занимает в СП около 24% суши, в том числе около 63% территории России. В [Zhuang, et al., 2009] поток метана из почвы на широтах выше 50 градусов оценивается в 36 Тг/год. Согласно современным представлениям верхний трехметровый слой арктических почв всего СП содержит около 750 Гт углерода [Schuur et al., 2008]. Около 450 Гт углерода содержат многолетние мерзлые переувлажненные торфяники (болота) [Gorham, 1991; McGuire et al., 2009; Tarnocai et al., 2009]. В дельтах крупных арктических рек, в отложениях ниже 3 м может содержаться еще 250 Гт [Schuur et al., 2008]. Суммирование приведенных оценок указывает на то, что общее содержание почвенного углерода в Арктике может достигать 1850 Гт [Hugelius et al., 2012; Kuhry et al., 2009; Tarnocai et al., 2009].

В многочисленных исследованиях было показано, что современное изменение температуры Земли может привести к высвобождению части накопленного почвен-

ного углерода и увеличению эмиссии метана за счет многолетнего таяния мерзлых грунтов и, как следствие, увеличению его концентрации в атмосфере. В последние три десятилетия температура в Арктике существенно возросла. В Сибири и на Чукотке в период 1976–2012 годов температура росла со скоростью 0,8–1,2 °C за 10 лет [Доклад об особенностях климата, 2013], то есть за указанный период среднегодовая температура в Сибири повысилась на 3–4 градуса. Потепление в зоне вечной мерзлоты сопровождается увеличением мощности сезонно-талого слоя, в результате чего ранее законсервированный почвенный углерод может участвовать в газообмене и проникать в атмосферу в форме метана.

В последние годы зафиксировано значительное увеличение потока метана в тундре в момент начала промерзания грунта. При промерзании грунта до глубин 5–15 см наблюдалось увеличение потока метана в атмосферу более чем на порядок по сравнению с потоком в летнее время. Результаты подобных наблюдений потока метана в тундре представлены на рис. 2 [Mastepanov et al., 2008]. Увеличение потока в осенне-зимние периоды в зоне вечной мерзлоты Арктики до последнего времени оставалось мало изученным, что связано с трудностями систематической работы в условиях зимней Арктики.

В течение последних нескольких лет появился ряд работ, в которых на основе экспериментальных исследований пересматривается роль термокарстовых озёр в формировании глобального потока метана [Zhuang et al., 2009; Mastepanov et al., 2008; Walter et al., 2008; Walter et al., 2007a,b]. Несмотря на широкую распространённость термокарстовых озёр (в некоторых северных регионах озёра занимают 22–48% территории [Walter et al., 2007a]), поток метана из этих озёр не учитывался при моделировании глобального распределения атмосферного бюджета метана. При этом необходимо отметить, что эмиссия метана из озёр Швеции и Канады в работе [Bastviken et al., 2004] определяется как 8–48 Тг/год. Представленные в работе [Walter et al., 2007a] результаты экстраполяции измеренных потоков метана из 16 озёр Сибири и Аляски на площадь всех северных озёр дают величину

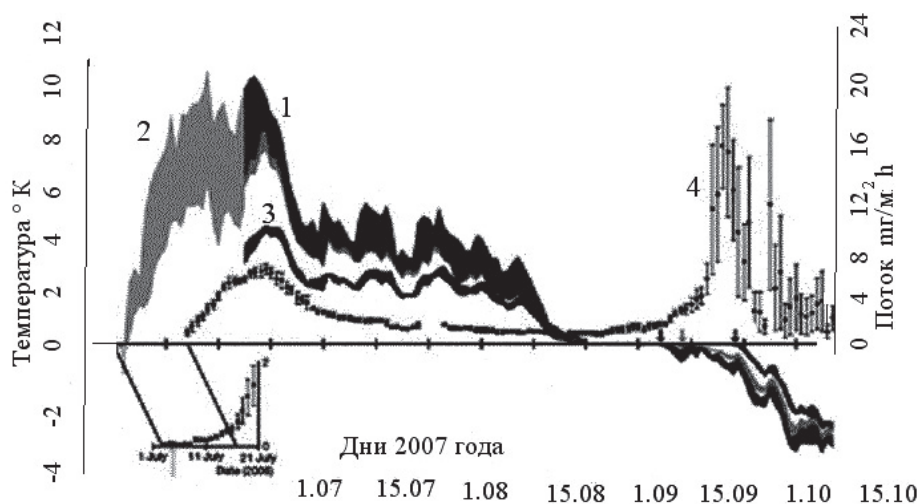


Рис. 2. Сезонная зависимость температуры грунта в тундре и эмиссии метана. 1, 2, 3 – температура грунта на глубине 5, 10 и 15 см, соответственно; 4 – поток метана в атмосферу в $\text{mg CH}_4/\text{m}^2 \text{ h}$ [Mastepanov, 2008]

порядка $24,2 \pm 10,5$ Тг/год. По оценкам [Walter et al., 2007a] полное таяние зон вечной мерзлоты Сибири позволило бы выделяться 49 Гт метана, то есть в арктической зоне вечной мерзлоты существует значительный, потенциально возможный источник метана.

Тем не менее, анализ пространственно–временного распределения концентрации метана показывает, что водно-болотных и озёрных источников явно недостаточно для объяснения устойчивости зимнего максимума концентрации метана в атмосфере высоких широт [Адушкин и др., 2013; Шахова и др., 2009a], хотя они и вносят заметный вклад в бюджет атмосферного метана. Известно [<http://www.cmdl.noaa.gov/ccdd/insitu.html>], что станция атмосферного мониторинга на Барроу (Аляска, США) ежегодно регистрирует повышенные концентрации метана в атмосфере, максимумы которых приходятся на осенне-зимний сезон, когда наземная продукция CH_4 арктического региона постепенно прекращается. Следовательно, должен существовать источник, поддерживающий высокую эмиссию метана в осенне-зимний период, который и обеспечивает высокие концентрации метана на высоких широтах СП в это время.

Сведения об увеличении вклада различных источников метана в полный поток продолжают пополняться. Биогеохимические исследования, проводимые в последние годы на шельфе Тихоокеанского сектора Арктики сотрудниками Тихоокеанского океанологического института ДВО РАН и Международного арктического научного центра Университета Аляска Фэрбэнкс, заставляют изменить наши представления о роли арктического шельфа в формировании глобального бюджета метана.

В результате проведенных исследований были получены данные [Сергиенко и др., 2012; Шахова и др., 2009a; Shakhova et al., 2005; Shakhova et al., 2009], которые говорят о возможной эмиссии метана из мощного глубинного источника на арктическом шельфе. Экспедиционные работы на шельфе Тихоокеанского сектора Арктики выявили шлейфы высокого содержания растворенного метана, что может быть связано с деградацией субаквальной мерзлоты, а также с разрушением газогидратов [Шахова и др., 2009a; Шахова и др., 2007a; Шахова и др., 2007b; Shakhova et al., 2007; Shakhova et al., 2008]. Установлено, что придонный слой вод в отдельных исследованных районах перенасыщен метаном относительно его содержания в атмосфере высоких широт СП в 22–30 раз, а поверхностные воды – до 700–2700%. Это свидетельствует о существенном вкладе шельфовых вод в качестве источника метана в атмосферу. Проведённые измерения также показали, что в поверхностном и придонном слоях Восточно-Сибирского моря и моря Лаптевых выделяются районы аномально высоких концентраций растворённого метана, которые пространственно коррелированы с разломными структурами на дне морей [Шахова и др., 2009b; Шахова и др., 2007a]. При проведении экспедиционных работ в приповерхностном слое атмосферы в этих районах были зафиксированы и протяжённые аномалии концентрации метана в воздухе (до 4–8 ppmv).

В море Лаптевых были зарегистрированы многочисленные метановые пузыри, аккумулированные под льдом. В районе полыней это ведет к его разгрузке в атмосферу, а во время разрушения ледового покрова возможен залповый выброс в атмосферу значительных масс метана. Эмиссия метана в форме огромных факелов была обнаружена в Охотском [Obzhairov et al., 2004] и Восточно-Сибирском морях [Шахова и др., 2009a]. Результаты регистрации многочисленных метановых пузырей в море Лаптевых представлены на рис. 3. На правой панели рисунка представлен разрез глубины шельфа моря Лаптевых на широте $76,25\text{--}77,75^\circ$ вдоль долготы

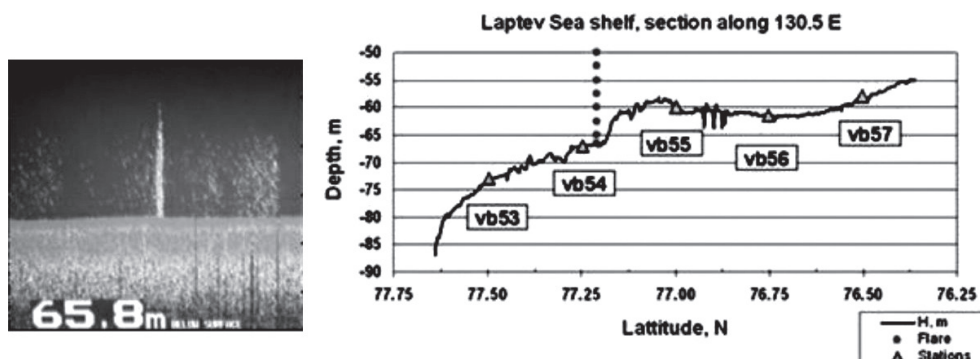


Рис. 3. Метановые пузыри, наблюдаемые на шельфе в море Лаптевых [Шахова и др., 2009b]

130,5°E, на левой панели – многочисленные выбросы метана. Видно, что на широте 77,25 градусов (шельф моря Лаптевых) с глубины 65,8 метров происходит выброс в атмосферу значительных масс метана в виде пузырей.

Морские исследования ДВО РАН в Арктике показали, что эмиссия метана в атмосферу только на мелководном шельфе Тихоокеанского сектора Арктики превышает 90 Тг в год (экстраполяция была проведена более чем по 5000 измерениям) [Шахова и др., 2009a], что составляет более 20% ежегодной эмиссии метана в атмосферу всего СП. Это объясняется тем, что подводная мерзлота мелководной части шельфа уже не играет роль запорного клапана залежей метана [Шахова и др., 2009a].

Несмотря на большое количество работ, указывающих на необходимость учёта вклада нетрадиционных источников в глобальный цикл метана, по-прежнему при инвентаризации источники метана учтены ещё не в достаточно полной мере [IPCC, 2007]. Отметим, что представленные в работе оценки потоков метана подтверждаются результатами натурных наблюдений в СП. Потоки метана, не учтённые в официальных данных IPCC, представлены в Таблице.

Таблица

**Потоки метана от источников,
не включённых в официальные таблицы IPCC**

Источники метана	Поток, Тг/год	Литература
Зона вечной мерзлоты	36	[Zhuang et al., 2009]
Озёра Сибири, Аляски	24,2±10,5	[Walter et al., 2007a]
Озёра Швеции, Канады	8–48	[Bastviken, 2004]
Шельф Тих. Арктики	90	[Шахова др., 2009a]
Добыча нефти	45	[Kvenvolden et al., 2001]
Добыча газа	35	[Etiope, 2004]
Грязевые вулканы	9–33	[Milkov et al., 2003]
Итого	247–311	

Таким образом, не учтённые в официальных таблицах IPCC потоки метана составляют более 250 Тг/год. Совместно с традиционными источниками (450 Тг/год) полный поток метана в северном полушарии должен составлять более 700 Тг/год.

Заключение

Представленные в работе результаты анализа позволяют сделать важные выводы о величине и динамике изменения атмосферной концентрации метана над различными регионами СП. Результаты анализа проясняют пространственно-временную структуру поля атмосферного метана в СП.

Рассмотрение сезонного изменения потоков метана в Арктической зоне объясняет наличие устойчивого осенне-зимнего максимума концентрации метана. Источниками, поддерживающими значительную эмиссию метана в осенне-зимний период на высоких широтах СП, являются водно-болотные угодья, озёра и эмиссия метана в континентальной и морской частях Арктики, обусловленная многолетним таянием мерзлых грунтов. Важную роль в формировании глобального бюджета метана в северном полушарии играет его эмиссия из мощного глубинного источника на арктическом шельфе.

Литература

Адушкин В.В., Кудрявцев В.П. Глобальный поток метана в атмосферу и его сезонные вариации // Физика Земли. Известия РАН. 2010. Т. 46. №4. С. 350–357.

Адушкин В.В., Кудрявцев В.П. Оценка глобального потока метана в атмосферу и его сезонных вариаций // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 2. С. 144–152.

Анисимов О.А., Кокорев В.А. Сравнительный анализ наземных, морских и спутниковых измерений метана в нижней атмосфере российской части Арктики в условиях изменений климата // Исследование Земли из космоса. 2015. № 2, с. 20–33.

Володин Е.М. Влияние источников метана в высоких широтах северного полушария на межполушарную асимметрию его концентрации на климат // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 3. С. 287–294.

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2012 год // Под ред. А.И. Бедрицкого и др. М.: Росгидромет, 2013. 83 с.

Сергиенко В.И., Дударев О.В., Дмитриевский Н.Н. и др. 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.

Монин А.С., Шишков Ю.А. Климат как проблема физики // УФН, 2000, т. 170, № 4.

Шахова Н.Е., Сергиенко В.И., Семилетов И.П. Вклад восточно-сибирского шельфа в современный цикл метана // Вестник РАН. 2009а. Т. 79. № 6. С. 507–518.

Шахова Н.Е., Семилетов И.П., Салюк А.Н. и др. Аномалии метана в приводном слое атмосферы на шельфе восточносибирской Арктики // ДАН. 2007а. Т. 414. № 6. С. 819–823.

Шахова Н.Е., Семилетов И.П., Бельчева Н.А. Великие сибирские реки как источники метана на Арктическом шельфе // ДАН. 2007б. № 5 Т. 414. С. 683–686.

Шахова Н.Е., Никольский Д.Ю., Семилетов И.П. О современном состоянии подвальной мерзлоты на Восточносибирском шельфе: тестирование результатов моделирования данными натурных наблюдений // ДАН. 2009b. Т. 429. № 4. С. 541–544.

Bastviken D., Cole J., Pace M., Tranvik L. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate // *Global Biogeochem. Cycles*. 2004. V. 18. GB4009, doi:10.1029/2004GB002238.

Dlugokencky E.J. et al. Atmospheric methane levels off: Temporary pause or a new steady-state? // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. P. 1992–1994.

Fung I.J., John J. et al. Three-dimensional model synthesis of the global methane cycle // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. № D7. P. 13033–13065.

Gorham E. Northern peatlands: Role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming // *Ecol. Appl.* 1991. № 2. P. 182–195.

Hugelius G., Tarnocai C., Broll G., Canadell J.G., Kuhry P., Swanson D.K. The northern circumpolar soil carbon data base: 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.

IPCC 2007. *Climate Change 2007 // The Physical Science Basis*. Cambridge Univ. Press, Cambridge UK and New York, USA.

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.

Mastepanov M., Sigsgaard C., Dlugokencky E.J. et al. Large tundra methane burst during onset of freezing // *Nature*. 2008. V. 456. P. 628–630. [Электронный ресурс]. <http://www.nature.com/news/2008/081203/full/news.2008.1275.html>.

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.

Obzhairov A., Shakhov R., Salyuk A. et al. Relations between methane venting, geological structure and seismotectonics in the Okhotsk Sea // *Geo-Mar. Lett.* 2004. V. 24. P. 135–139.

Shakhova N., Semiletov I. First results of monitoring of methane release from the East Siberian Arctic Shelf (ESAS): achievements and gaps // *NIOZ Methane. Workshop*, p. 18–20. 2008.

Shakhova N., Semiletov I., Panteleev G. The distribution of methane on the Siberian Arctic shelves: Implications for the marine methane cycle // *Geophysical. Res. Lett.* 2005. V. 32. P. L09601.

Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A. et al. Methane release on the Arctic East Siberian shelf // *Geophys. Res. Abstracts*. 2007. V. 9. P. 01071–01072.

Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A. Kosmach D. hydrates? GU General Assembly 2008 // *Geophysical Research Abstracts*. 2008. No. 10. EGU2008-A-01526.

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.

Steele L.P., Krummel P.B., Langenfelds R.L. Atmospheric CH₄ concentrations derived from flask samples collected at South Pole, at Mawson, at Macquarie Island, at Cape Grim, at Cape Ferguson, at Mauna Loa, at Estevan Point, at Shetland Island, at Alert. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Aspendale, Victoria, Australia. 2003 / [http://cdiac.ornl.gov/ftp/d81021/CH₄](http://cdiac.ornl.gov/ftp/d81021/CH4).

Tarnocai, 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.

Walter K.M., Chanton J.P., Chapin F.S. III. et al. Methane production and bubble emissions from arctic lakes: Isotopic implications for source pathways and ages // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. G00A08. P. 1–16.

Walter K.M., Smith L.C., Chapin F.S. III. Methane bubbling from northern lakes: present and future contributions to the global methane budget // *Phil. Trans. R. Soc. A*. 2007a. V. 365. P. 1657–1676.

Walter K.M., Edwards M.E., Grosse G. et al. Thermokarst lakes as a source of atmospheric CH₄ during the last deglaciation // *Science*. 2007b. V. 318. P. 633–636.

Zhuang Q., Melack J.M., Zimov S. et al. Global methane emissions from wetlands, rice paddies, and lakes // *Eos*. 2009. V. 90. No. 5. P. 37–38.