

В ЦЕНТРЕ ВНИМАНИЯ — МЕТАН

Причины повышенного внимания специалистов к состоянию и эволюции метаносферы хорошо известны: метан (CH_4) является вторым среди антропогенных парниковых газов по степени воздействия, в результате которого главным образом происходят изменения современного климата Земли. И хотя, согласно оценкам IPCC¹, вклад CH_4 в четыре раза меньше, чем у лидирующего по этому показателю углекислого газа CO_2 , именно метан считается наиболее перспективным элементом, способным эффективно помочь в противоборстве с наблюдаемым глобальным потеплением. Такой вывод подкрепляется целым рядом обстоятельств. Во-первых, молекулы CH_4 значительно (в 27–30 раз¹) эффективнее молекул CO_2 «работают» на нагрев, а больший суммарный вклад в глобальное потепление углекислого газа обусловлен лишь тем, что общее число молекул CO_2 в атмосфере примерно в 220 раз превосходит число молекул метана. Во-вторых, среднеглобальные атмосферные концентрации обоих газов продолжают расти, однако CH_4 делает это значительно быстрее, чем CO_2 : по сравнению с доиндустриальными уровнями они выросли в 2,64 и 1,50 раза соответственно. А это означает, что вклад метана в глобальное потепление со временем будет нарастать. В-третьих, атмосферное «время жизни» метана на порядок меньше, чем у CO_2 , как следствие, благотворного результата предпринимаемых акций, направленных на сокращение присутствия CH_4 в атмосфере, не придется ждать так долго, как в случае с CO_2 . Все это делает метан важнейшим объектом учета при выстраивании политики смягчения антропогенных изменений климата и адаптации к ним.

Изменения климата в Арктике проявляются наиболее значительно. С 1970-х годов температура приземного слоя воздуха увеличилась примерно на 3,1 °С, что в 3–4 раза превышает средний мировой показатель². Одновременно все чаще фиксируются уменьшение площади и толщины морского льда, таяние ледников и деградация многолетней мерзлоты, сокращение продолжительности снежного сезона, а в последнее время и увеличение числа лесных пожаров в теплый период. В свою очередь, вышеупомянутое повышение температуры прямо сказывается на интенсивности природных источников CH_4 в Арктике, что создает положительную обратную связь, усугубляющую здесь парниковый эффект. Неудивительно, что в такой ситуации «арктическому» метану в последние годы посвящено довольно много исследований, охватывающих самые разные аспекты.

Думается, «вести с арктических метановых полей» интересно читателю. Разумеется, невозможно охватить весь спектр работ, освещающих данную проблему³, поэтому имеет смысл остановиться лишь на некоторых из них: оценках источников CH_4 , его современных атмосферных концентрациях, региональной северной специфике.

Источники метана. Большая разнородность и неравномерность распределения по географическим зонам источников метана значительно осложняют их инвентаризацию⁴. Экспертные оценки строятся на двух подходах. Первый из них («снизу вверх», в англоязычной литературе: bottom-up approach) исходит исключительно из архива наблюдаемых данных измерений концентрации метана (при отсутствии таковых в каком-либо узле сетки пропуск заполняется данными из соседних регионов) с последующим решением обратной задачи восстановления потока метана по его концентрации. Во втором подходе («сверху вниз», top-down approach) данные измерений дополняются оптимизированными модельными оценками для регионов, в которых измерения отсутствуют. Результаты, полученные с использованием этих подходов, заметно разнятся, при этом второму подходу присущи меньшие погрешности и лучший баланс между источниками и стоками метана⁵. Предпринимаются усилия к улучшению согласования подходов, тем не менее погрешности этих экспертных оценок остаются значительными.

С некоей долей условности принято разделять источники метана на естественные и антропогенные. К первым относят потоки CH_4 с поверхности заболоченных территорий, пресноводных водоемов, океанической поверхности, а также метан, образующийся в колониях термитов и выделяемый при сжигании огромных объемов биомассы в результате пожаров. В число антропогенных источников входят потоки, попадающие в атмосферу при добыче ископаемого топлива, с мусорных свалок и при последующем сжигании бытовых отходов, очистке сточных вод, расширении сельскохозяйственных угодий (в том числе рисовых плантаций), при разведении крупного рогатого скота. В российских условиях преобладают эмиссии: естественная — из болот, тундры, открытых водоемов — и антропогенная, обусловленная газо-, нефте- и угледобычей.

Антропогенная деятельность (в основном добыча и распределение ископаемого топлива) в высоких северных широтах вносит свой вклад в глобальный баланс метана, расчетное количество которого колеблется от 2 до 18 Тг/год.^{5,6} Эмиссия из антропогенных

¹ IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [V. Masson-Delmotte et al.(eds.)]. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2021. 2391 p.

² AMAP Arctic Climate Change Update 2021: Key Trends and Impacts. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Tromsø, Norway, 2021. viii + 148 p.

³ Более полное освещение проблемы содержится в недавно вышедшем обзоре: Киселев А.А. Метан в средних и высоких северных широтах. Исследования 2018–2023 гг. // Труды ГГО. 2023. Вып. 608. С. 7–52.

⁴ Напомню, что химическим путем метан не образуется, поэтому его содержание в атмосфере полностью определяется потоками CH_4 с земной поверхности.

⁵ Saunio M. et al. The Global Methane Budget 2000–2017 // Earth System Science Data. 2020. Vol. 12. P. 1561–1623.

⁶ Тг – Тераграмм. 1 Тг = 10¹² г.

источников с территории Российской Федерации, по данным Национального кадастра антропогенных выбросов-2023, показана на рис. 1.

Следует подчеркнуть, что представленные на рис. 1 значения соответствуют оценке антропогенной эмиссии со всей российской территории, не только арктической. Однако, принимая во внимание, что они практически целиком обусловлены энергетическим сектором экономики, а большинство газо- и нефтедобывающих предприятий находятся на севере страны, рис. 1 является вполне показательной иллюстрацией.

Долгое время основой упор делался на оценках антропогенных источников CH_4 , но в последнее время больше внимания уделяется оценкам его естественных источников. Доля естественных источников в глобальном бюджете метана за 2008–2017 годы оценивается (в рамках подхода «сверху вниз») примерно в 38 % (218 Тг/год из 576 Тг/год). На пояс 60–90° с. ш. приходится 7,3 % глобальных естественных источников¹.

Мониторинг содержания метана. Несмотря на то, что наблюдения CH_4 в северных высоких широтах были расширены с начала 2000-х годов, нынешние стационарные сети остаются ограниченными, в результате чего огромные территории не охвачены из-за трудностей с проведением измерений в таких удаленных районах. Мониторинг концентрации CH_4 ведется на нескольких десятках арктических и субарктических станций, в том числе трех российских: Териберка, Тикси и Новый Порт. Две первые (Териберка и Тикси) можно рассматривать как фоновые, а Новый Порт на полуострове Ямал — в качестве станции, данные измерений на которой позволяют контролировать техногенные выбросы парниковых газов на близко расположенных месторождения природного газа и нефти. Важно также и то, что станции Новый Порт и Тикси находятся в зоне сплошной многолетней мерзлоты с множеством небольших термокарстовых озер, накладывающей отпечаток на формирование поля концентрации метана.

Динамика концентрации CH_4 на российских станциях, а также на американской фоновой станции Барроу показана на рис. 2.

В Докладе об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год отмечается: «Тенденция повышенного роста CH_4 начала проявляться с 2019 г., в котором на станции Тикси регистрировались высокие значения концентрации в период максимума природной эмиссии (август-сентябрь). В 2020 г. значения CH_4 на этой станции оставались высокими до конца года и эта тенденция начала прослеживаться на станции Териберка. В 2022 г. зафиксировано сильное увеличение концентрации метана на станции Териберка (20 млрд⁻¹/год) и снижение прироста на станции Тикси, при этом уровень концентрации CH_4 на этих двух станциях сравнялся». Не лишне отметить интенсивный прирост эмиссии метана в арктическом регионе: долго-

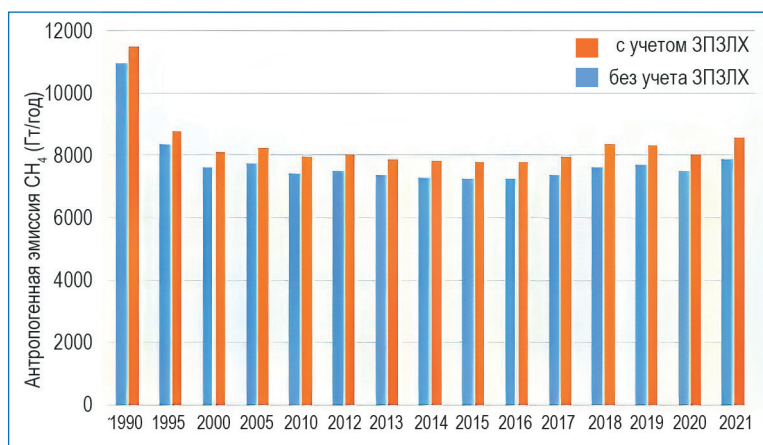


Рис. 1. Эмиссия из антропогенных источников с территории Российской Федерации в период 1990–2021 годов с учетом и без учета землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства (ЗИЗЛХ) по данным Национального кадастра антропогенных выбросов

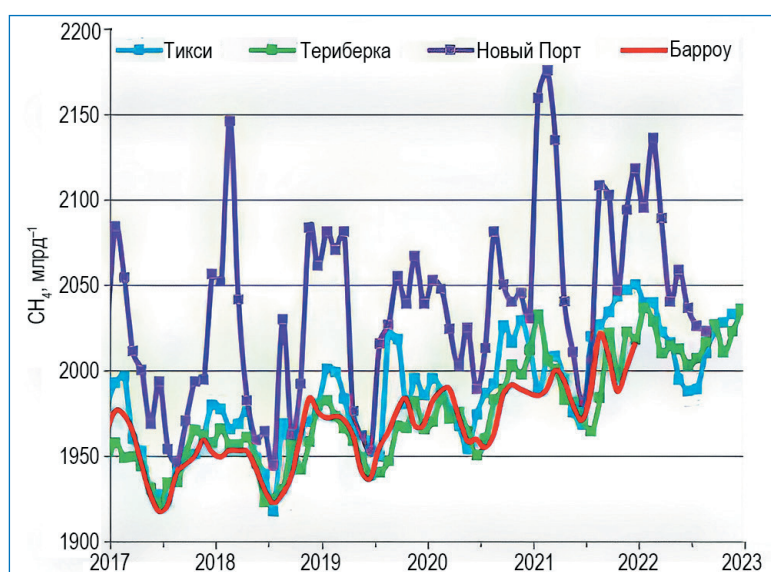


Рис. 2. Приземная концентрация CH_4 по измерениям на трех российских станциях и станции Барроу

временный тренд концентрации CH_4 , определенный по десятилетнему ряду наблюдений на станциях Териберка и Тикси, составляет 11,5–11,7 млрд⁻¹, что превышает его среднеглобальные значения, равные 9,2 млрд⁻¹. В то же время существенны местоположение и региональные особенности станций. Так, высокие концентрации метана, зафиксированные на станции Новый Порт, — прямое следствие наличия поблизости газо- и нефтедобывающих предприятий. А, например, более низкие, чем на станциях Тикси и Барроу, концентрации метана на островной станции Алерт (Канада) определяются ее географическим положением и особенностями процессов газообмена².

Результаты мониторинга парниковых газов, включая CO_2 и CH_4 , полученные в ходе проходившего вдоль сибирского арктического побережья комплексного эксперимента по измерению состава тропосферы с борта самолета-лаборатории «Оптик Ту-134» в период с 4 по 17 сентября 2020 года, представлены в работах Б. Бе-

¹ Saunio M. et al. The Global Methane Budget 2000–2017 // Earth System Science Data. 2020. Vol. 12. P. 1561–1623.

² Стародубцев В.С. Исследование вариаций концентрации метана и углекислого газа в Арктической зоне // Вестник Северо-Восточного федерального университета. 2018. № 3 (65). С. 80–88.

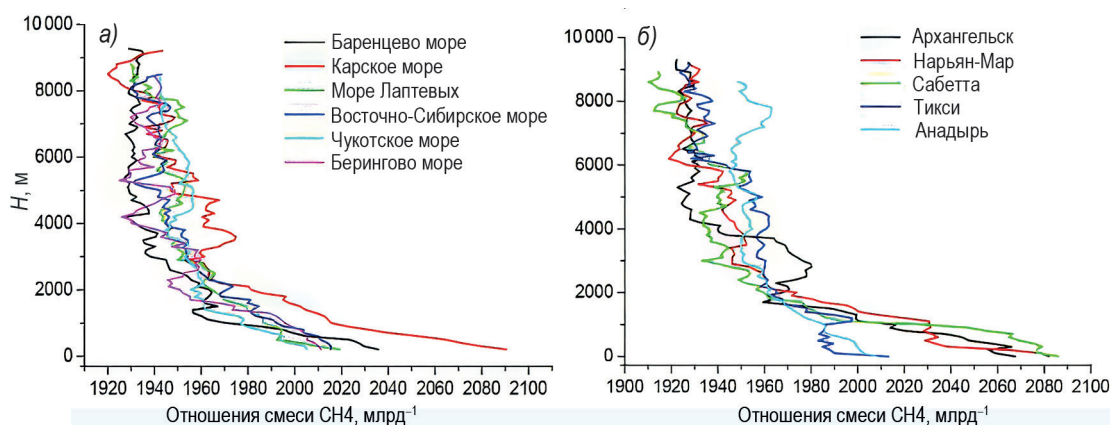


Рис. 3. Вертикальные профили отношения смеси метана (млрд⁻¹) над водной поверхностью (а) и прибрежной сушей (б) (Belan¹)

лана и др.¹, О. Антохиной и др.², К. Нарбо³. Эти данные позволили смоделировать относительные вклады основных антропогенных и естественных источников CH₄ в пограничном слое и в свободной тропосфере (рис. 3).

Можно отметить привлечение научно-исследовательских судов с целью проведения комплексных наблюдений за концентрациями метана: судна «Академик М.А. Лаврентьев» в сентябре–ноябре 2016 года в морях Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском, а также в северной части Тихого океана и Японском море⁴ и ледокола «Оден» летом 2014 года в Северном Ледовитом океане у берегов Северной Сибири и Аляски⁵ и др.

Метан на переувлажненных территориях. Вклад эмиссии с переувлажненных территорий в поясе 30–90° с. ш., являющейся наиболее важным источником неопределенности в балансе метана, достигает около 80 % суммарной эмиссии из естественных источников⁶. По оценкам⁷, сделанным с помощью двух биогеохимических моделей, общие выбросы метана из панарктической зоны составляли в течение 2000–2015 годов 35,81 Тг/год, из которых на водно-болотные угодья и пресноводные водоемы приходится 21,38 Тг/год и 14,45 Тг/год соответственно. Отмечается, что выбросы из водно-болотных угодий более чувствительны к изменениям площади ландшафта, чем выбросы от пресноводных водоемов, при этом выбросы последних в большей степени зависят от температуры, чем от осадков.

Т. Бао с соавторами⁸ синтезировали около 9000 камерных измерений CH₄ в течение вегетационного периода на 83 участках в панарктических регионах. В результате были выделены пространственные вариации выбросов CH₄, соответствующие неоднородности окружающей среды по типам водно-болотных угодий (fens, marshes, bogs, swamps).

Авиационные наблюдения CH₄ были проведены над Аляской в течение вегетационных периодов 2012–2014 годов в рамках эксперимента по изучению уязвимости арктического резервуара углерода (CARVE). Их анализ показал, что эмиссия CH₄ из тундрового региона превосходила половину общего баланса, несмотря на то что он составлял только 18 % от общей площади поверхности.⁹

По мнению Дж. Дина с соавторами¹⁰, обобщающих и объединяющих биологическую, геохимическую и физически ориентированную литературу по климатической обратной связи с CH₄, водно-болотные угодья будут формировать большую часть климатической обратной связи CH₄ до 2100 года. За пределами этого временного интервала могут стать более важными выбросы CH₄ из морских и пресноводных систем и многолетней мерзлоты.

Метан в многолетней мерзлоте. В зоне многолетней мерзлоты находится примерно 2/3 российской территории. В условиях, когда потепление в средних и высоких северных широтах происходит в 2–3 раза интенсивнее, чем в глобальном масштабе, деградация мерзлых грунтов, содержащих значительную массу CO₂ и CH₄, представляет серьезную угрозу. Однако дело не ограничивается тем, что эта дополнительная масса парниковых газов поступит в атмосферу. Ситуация усугубляется резким ростом аварийности построенной на многолетней мерзлоте инфраструктуры, необходимостью больших затрат при обустройстве новой инфраструктуры, которая потребуется уже в ближайшей перспективе для организации Северного морского пути и освоения Арктики, потенциальным вскрытием вросших в мерзлый грунт могильников.

Почвы в северной циркумполярной области многолетней мерзлоты содержат от 1460 до 1600 Пг орга-

¹ Belan B.D. et al. Integrated airborne investigation of the air composition over the Russian sector of the Arctic // Atmospheric Measurement Techniques. 2022. Vol. 15. No. 13. P. 3941–3967.

² Антохина О.Ю. и др. Состав воздуха над Российским сектором Арктики. 1. Метан // Оптика атмосферы и океана. 2023. Т. 36. № 2. С. 100–110.

³ Narbaud C. et al. Disentangling methane and carbon dioxide sources and transport across the Russian Arctic from aircraft measurements // Atmospheric Chemistry and Physics. 2023. Vol. 23. P. 2293–2314.

⁴ Pankratova N. et al. Evidence of atmospheric response to methane emission from the East Siberian Arctic Shelf // Geography, Environment, Sustainability. 2018. Vol. 11. No. 1. P. 85–92.

⁵ Berchet A. et al. Using ship-borne observations of methane isotopic ratio in the Arctic Ocean to understand methane sources in the Arctic // Atmospheric Chemistry and Physics. 2020. Vol. 20. No. 6. P. 3987–3998.

⁶ Saunio M. et al. The Global Methane Budget 2000–2017 // Earth System Science Data. 2020. Vol. 12. P. 1561–1623.

⁷ Liu X., Zhuang Q. Methane emissions from Arctic landscapes during 2000–2015: An analysis with land and lake biogeochemistry models // Biogeosciences. 2022.

⁸ Bao T., Jia G., Xu X. Wetland Heterogeneity Determines Methane Emissions: A Pan-Arctic Synthesis // Environmental Science & Technology. 2021. Vol. 55. No. 14. P. 10152–10163.

⁹ Hartery S. et al. Estimating regional-scale methane flux and budgets using CARVE aircraft measurements over Alaska // Atmospheric Chemistry and Physics. 2018. Vol. 18. No. 1. P. 185–202.

¹⁰ Dean J.F. et al. Methane feedbacks to the global climate system in a warmer world // Reviews of Geophysics. 2018. Vol. 56. P. 207–250.

нического углерода, что почти в два раза больше, чем в атмосфере, и примерно на порядок больше, чем в растительной биомассе (55 Пг углерода)¹, древесном опаде (16 Пг углерода) и подстилке (29 Пг углерода) в бореальных и тундровых биомассах вместе взятых².

Эмиссия метана существенно зависит от состояния мерзлого грунта на различных участках, поэтому трудно делать какие-либо обобщения и «сложить мозаику», исходя из малочисленных дискретных экспедиционных исследований. Пока же идет накопление информации. В работе Н. Рёзгера с соавторами³ на основе наиболее полного набора данных о потоках метана в Арктике сообщается о тенденции увеличения выбросов метана в первые летние месяцы (июнь и июль) на участке многолетней мерзлоты в дельте реки Лены. Наряду с повышением температуры воздуха на $0,3 \pm 0,1$ °C/год выбросы метана в июне и июле увеличились примерно на $1,9 \pm 0,7$ %/год с 2004 года. Результаты исследований содержания метана в почвах деятельного слоя и многолетней мерзлоты, а также данные по эмиссии метана в атмосферу в доминирующих ландшафтах типичных тундр западного побережья Ямала представлены в работе Г. Облогова с соавторами⁴.

Обсуждается появление ранее неизвестных процессов в криолитозоне — образования воронок в результате выбросов газа. Изучению таких воронок — ловушек, в которых газ поднимается по каналам, имеющим тектоническое происхождение или связанным с деградацией многолетней мерзлоты, — посвящена работа Г. Краева с соавторами⁵.

Метан в газгидратах. Гидраты метана представляют собой похожую на лед субстанцию — смесь воды и метана, существующую при температурах не выше 20 °C и давлениях не ниже 3–5 МПа в покрытых водой осадочных породах на глубине 300–500 м. Считается, что 99 % гидратов в глобальном масштабе сконцентрировано на континентальном шельфе. До сих пор существует большая неопределенность в общем объеме газогидратов, а также в том, насколько они чувствительны к потеплению климата.

Дж. Этиопе с соавторами⁶ оценили минимальную глобальную общую эмиссию подводных просачиваний в размере 3,9 Тг/год, суммируя опубликованные оценки региональных выбросов для 15 выявленных областей (более 7 Тг/год при экстраполяции на районы, в которых измерения не производились). Аналогичная оценка⁷ морских геологических выбросов составляет 5–10 Тг/год.

В недавно опубликованной работе Д. Йонга⁸ представлены концентрация CH_4 и естественное содержание радиоуглерода в метане, растворенном в толще воды, от морского дна до поверхности моря в местах просачивания вдоль атлантической и тихоокеанской окраин США. Измерения не выявили признаков просачивания CH_4 , достигающего поверхностных вод, когда глубина водной толщи превышает 430 ± 90 м, он полностью растворяется на большой глубине и перерабатывается бактериями.

В относительно мелководных арктических морях залежи гидратов располагаются на меньшей глубине. В этой связи значительный интерес вызывают исследования евразийского шельфа и, в частности, Восточно-Сибирского арктического шельфа (ВСАШ) — самого широкого и мелководного шельфа в Мировом океане. Изучению термического состояния системы подводных деградирующей многолетней мерзлоты и гидратов ВСАШ и связанного с ней выброса CH_4 посвящена работа Е. Чувилина с соавторами⁹. Б. Торнтон с коллегами¹⁰ оценивают эмиссию с ВСАШ в 3 Тг/год. В то же время наблюдения выбросов CH_4 с борта научно-исследовательского судна в сентябре 2012–2017 годов в регионе ВСАШ, сочетаясь с результатами моделирования⁵, показали, что средняя интенсивность выбросов метана составила $0,58 \pm 0,47$ Тг/год¹¹, что намного меньше ранее опубликованных оценок. Согласно работе Дж. Дина¹², значительных выбросов CH_4 в атмосферу в результате диссоциации метаногидратов в ближайшее время не ожидается.

Еще несколько слов в заключение. Расширение рамок исследований стало возможным главным образом благодаря прогрессу в области вычислительных ресурсов, а с ними развитию математических моделей. Моделирование, подкрепляемое данными мониторинга (в том числе активно развивающегося спутникового), является основным средством изучения метаносферы. По существу, большая часть приведенной выше информации прямо или косвенно получена с использованием математических моделей различной степени детализации и учета тех или иных природных процессов. В первую очередь это относится к экспертным оценкам глобальных и локальных потоков в атмосферу.

Очевидно, всестороннее интенсивное изучение метаносферы будет продолжаться, поскольку до сих пор остается много пробелов в наших знаниях, существует необходимость в совершенствовании технических и теоретических методов получения, обработки и анализа информации, в разработке мер, направленных на смягчение последствий изменений климата и адаптацию к ним, в учете возможностей и потребностей для экономического развития.

А.А. Киселев (ГГО им. А.И. Воейкова)

¹ Пг – Петаграмм. 1 Пг = 10^{15} г.

² Schuur E.A.G. et al. Permafrost and Climate Change: Carbon Cycle Feedbacks From the Warming Arctic // *Annual Review of Environment and Resources*. 2022. Vol. 47. P. 343–371.

³ Rössger N., Sachs T., Wille C., Boike J., Kutzbach L. Seasonal increase of methane emissions linked to warming in Siberian tundra // *Nature Climate Change*. 2022. Vol. 12. P. 1031–1036.

⁴ Oblogov G.E. et al. Methane Content and Emission in the Permafrost Landscapes of Western Yamal, Russian Arctic // *Geosciences*. 2020. Vol. 10. Issue 10. 21 p.

⁵ Kraev G. et al. Methane in Gas Shows from Boreholes in Epigenetic Permafrost of Siberian Arctic // *Geosciences*. 2019. Vol. 9. No. 2. 17 p.

⁶ Etiop G. et al. Gridded maps of geological methane emissions and their isotopic signature // *Earth System Science Data*. 2019. Vol. 11. P. 1–22.

⁷ Saunio M. et al. The Global Methane Budget 2000–2017 // *Earth System Science Data*. 2020. Vol. 12. P. 1561–1623.

⁸ Joung D. et al. Negligible atmospheric release of methane from decomposing hydrates in mid-latitude oceans // *Nature Geoscience*. 2022. Vol. 15. P. 885–891.

⁹ Chuvilin E. et al. In-situ temperatures and thermal properties of the East Siberian Arctic shelf sediments: Key input for understanding the dynamics of subsea permafrost // *Marine and Petroleum Geology*. 2022. Vol. 138. P. 105550.

¹⁰ Thornton B.F. et al. Shipborne eddy covariance observations of methane fluxes constrain Arctic sea emissions // *Science Advances*. 2020. Vol. 6.

¹¹ Tohjima Y. et al. Estimation of CH_4 emissions from the East Siberian Arctic Shelf based on atmospheric observations aboard the R/V Mirai during fall cruises from 2012 to 2017 // *Polar Science*. 2021. Vol. 27. 100571.

¹² Dean J.F. et al. Methane feedbacks to the global climate system in a warmer world // *Reviews of Geophysics*. 2018. Vol. 56. P. 207–250.