

## ГАЗЫ И ГАЗОВЫЕ ГИДРАТЫ В КРИОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

УДК 551.345.3

DOI: 10.15372/KZ20240105

EDN: TFEJYI

## ГАЗОВЫЕ ВОРОНКИ И МЕТАН В ОЗЕРНЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ЯМАЛА

Г.Е. Облогов<sup>1,\*</sup>, А.А. Васильев<sup>1</sup>, П.Т. Орехов<sup>1,2</sup>, А.С. Саввичев<sup>3</sup>, И.Д. Стрелецкая<sup>4</sup><sup>1</sup>Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, 625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия<sup>2</sup>Арктический научно-исследовательский стационар Института экологии растений и животных УрО РАН, 629400, Лабитнанги, ул. Зеленая Горка, 21, Россия<sup>3</sup>Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского ФИЦ Биотехнологии РАН, 119071, Москва, Ленинский просп., 33, стр. 2, Россия<sup>4</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия

\*Автор для контакта; e-mail: oblogov@mail.ru

Приводятся результаты изучения проявлений и размеров газовых воронок в озерах трех биоклиматических зон Ямала – северной (арктической), типичной и южной тундры. Установлено, что диаметр газовых воронок в озерах закономерно увеличивается от 1.9 м в северной тундре до 7.7 м в южной кустарниковой тундре. Газовые воронки занимают от 0.5 до 4.3 % мелководий озер. Содержание метана в озерных отложениях в два и более раз выше, чем в породах сезонноталого и переходного слоев доминантных ландшафтов. В зоне типичной тундры содержание метана в озерных отложениях обычно составляет около 7 мл/кг, но в отдельных случаях может достигать 18 мл/кг и более. Вероятно, именно в таких озерах с повышенным содержанием метана в донных отложениях происходят газовые выбросы и формируются газовые воронки. После дренирования (осушения) озер начинается промерзание озерных котловин (хасыреев) и формирование криогенного строения отложений. Через 8–10 лет после осушения озерных котловин продолжают сукцессионные изменения, формирование переходного слоя еще не завершено.

**Ключевые слова:** мерзлота, газовые воронки, покмарки, озера, Ямал, содержание метана в породах.**Ссылка для цитирования:** Облогов Г.Е., Васильев А.А., Орехов П.Т., Саввичев А.С., Стрелецкая И.Д. Газовые воронки и метан в озерных отложениях Ямала // Криосфера Земли, 2024, т. XXVIII, № 1, с. 50–61. DOI: 10.15372/KZ20240105. EDN: TFEJYI.

## POCKMARKS AND METHANE CONTENT IN THE LAKE SEDIMENTS OF YAMAL PENINSULA

G.E. Oblogov<sup>1,\*</sup>, A.A. Vasiliev<sup>1</sup>, P.T. Orekhov<sup>1,2</sup>, A.S. Savvichev<sup>3</sup>, I.D. Streletskaia<sup>4</sup><sup>1</sup>Earth Cryosphere Institute Tyumen Scientific Center of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Malygina St. 86, Tyumen, 625026, Russia<sup>2</sup>Arctic Research Station of the Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Zelenaya Gorka St. 21, Labytnangi, 629400, Russia<sup>3</sup>Winogradsky Institute of Microbiology of Federal Research Centre of Biotechnology of the Russian Academy of Sciences, Leninsky Prosp. 33, build. 2, Moscow, 119071, Russia<sup>4</sup>Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1, Moscow, 119991, Russia

\*Corresponding author; e-mail: oblogov@mail.ru

The results of studying the appearance and sizes of pockmarks in lakes of three bioclimatic zones of Yamal – northern (arctic), typical and southern tundra are presented. It has been established that the diameter of pockmarks in lakes naturally increases from 1.9 m in the northern tundra to 7.7 m in the southern shrub tundra. Pockmarks occupy from 0.5 to 4.3 % of the shallow waters of lakes. The content of methane in lake sediments is two or more times higher than in the sediments of the active and transitional layers of dominant landscapes. In a typical tundra zone, the methane content in lake sediments is usually about 7 mL/kg, but in some cases it can reach 18 mL/kg and more. Probably, it is in such lakes that gas emissions can occur and pockmarks can form. After the drainage (drying) of the lakes, the formation of lacustrine basins (khasyreys) and the forming of the cryogenic structure of the deposits begin. 8–10 years after the drainage of the lake basins, succession changes continue, the formation of the transition layer has not yet been completed.

**Keywords:** permafrost, pockmarks, lakes, Yamal, methane content in sediments.

## ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия проблема эмиссии метана ( $\text{CH}_4$ ) в связи с потеплением климата все-сторонне изучается [AMAP, 2015; Dean et al., 2018; IPCC, 2018]. Метан является активным парниковым газом с высоким потенциалом глобального потепления [IPCC, 2018]. Эмиссия с дневной поверхности в типичных и южных тундрах Арктики и Субарктики может быть серьезным источником поступления метана в атмосферу. Ежегодно в атмосферу с поверхности арктических экосистем выделяется  $\text{CH}_4$  от 8 до 29 Тг [McGuire et al., 2012; Chen et al., 2015], что составляет примерно 10 % глобальных выбросов метана от естественных водно-болотных угодий [Ciais et al., 2013; Saunois et al., 2020].

Метан, продуцирующийся в мерзлых и оттаивающих породах криолитозоны и эмитирующийся в атмосферу, имеет преимущественно биогенный генезис [Kraev et al., 2017; Streletskaia et al., 2018].

Поступление метана в атмосферу регулируется потоком  $\text{CH}_4$  в массиве пород снизу к дневной поверхности [Dean et al., 2018]. Отсюда следует, что эмиссия метана в атмосферу прямо зависит от его содержания в сезонноталом слое (СТС) и верхних горизонтах многолетнемерзлых пород (ММП). Настоящие исследования содержания и эмиссии метана в доминантных ландшафтах типичной и южной тундры подтвердили, что его эмиссия полностью контролируется ландшафтной структурой. Высокая эмиссия присуща ландшафтам болот (в том числе поймам), полосам стока поверхностных вод и озерным котловинам (хасыреям), в этих же ландшафтах наблюдается самое высокое содержание  $\text{CH}_4$  в породах СТС и верхних горизонтах ММП [Задорожная и др., 2022]. При повышении температуры воздуха должен возрастать метаболизм микроорганизмов приповерхностных пород, в частности метаногенов. На примере западного побережья Ямала действительно установлено повышение содержания метана в породах СТС при росте их температуры [Васильев и др., 2022].

Вклад озер в общий поток метана в атмосферу оценивается по-разному. О.А. Анисимов считает, что пузырьковый перенос метана с дна озер, особенно в прибрежной мелководной их части является мощным источником  $\text{CH}_4$  [Анисимов и др., 2020]. Прямые наблюдения за эмиссией  $\text{CH}_4$  из водной толщи озер показывают, что потоки метана незначительны [Сабреков и др., 2011; Glagolev et al., 2011]. Здесь нужно принимать во внимание, что наблюдения за потоками метана из озер методом изолированных камер проводятся в условиях, когда пузырьковые потоки  $\text{CH}_4$  со дна озера отсутствуют. Это связано с тем, что пузырьковые выбросы метана происходят импульсивно в течение короткого времени. Пока неясно даже, явля-

ются ли участки пузырьковых выбросов метана постоянными или они формируются каждый раз на другом месте. По косвенным данным А. Портнова, время “жизни” пузырьковых потоков в южной части Карского моря составляет часы и первые сутки [Portnov et al., 2013]. Пузырьковые выбросы формируют на дне морей специфические формы рельефа в виде преимущественно округлых воронок диаметром от 10–20 до 600 м и даже в 1000 м, иногда составляющих группы [Judd, Hovland, 2007]. В исследованиях эмиссии метана со дна арктических морей такие кратерообразные впадины называют покмарками (rockmarks). Очевидно, этот термин может применяться и к воронкам на дне озер (рис. 1), поскольку они образуются при схожих механизмах восходящей миграции флюидов (т. е. газа или жидкости), в результате высвобождения скопления газа. В обоих случаях, как в сипах из покмарок донных отложений морей, так и в сипах из озерных отложений, метан имеет главным образом биогенный генезис [Каллистов и др., 2019; Judd, Hovland, 2007; Savvichev et al., 2023].

Сходными по происхождению и морфологии образования являются уникальные явления криолитозоны – “воронки газового выброса”, всесторонне изученные после обнаружения Ямальской “воронки” к югу от Бованенковского нефтегазо-конденсатного месторождения в июле 2014 г. [Лейбман, Плеханов, 2014; Кизяков и др., 2015; Богоявленский и др., 2017]. Их образование связано с залеганием с поверхности мерзлых отложений (и/или пластовых льдов), препятствующих относительно свободному выходу накопившегося объема газа в приповерхностных отложениях. В отличие от “воронки газового выброса” накопле-

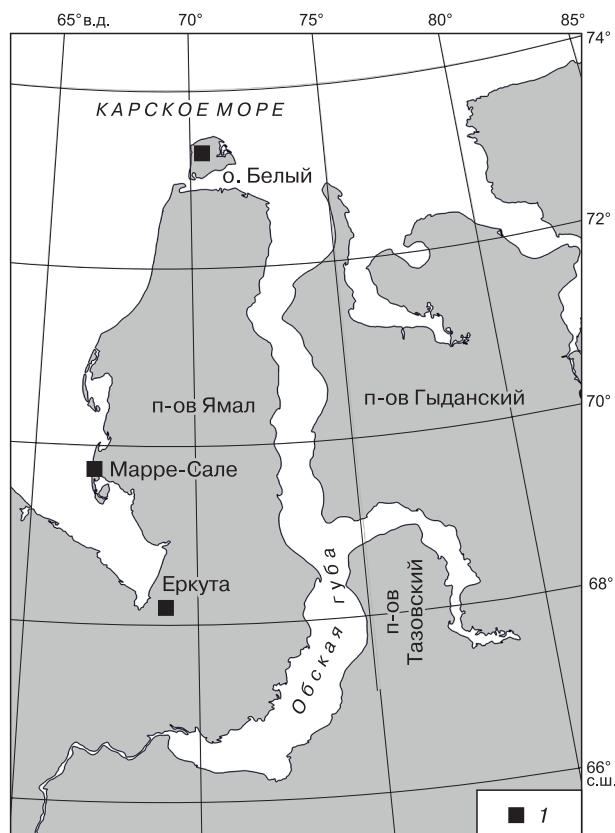


Рис. 1. Газовая воронка (покмарка) в отложениях спущенного озера.

Район стационара Еркута, Южный Ямал. Фото П.Т. Орехова.

ние газа происходит в субаквальных отложениях озер в талых нелитифицированных породах, и для выхода газа не требуется его большого количества под высоким давлением.

В процессе эволюции ландшафтов криолитозоны при климатических изменениях, неотектонических и криогенных процессах иногда происходит осушение озер и формирование хасыреев. После чего начинается освоение осушенных котловин растительностью, промерзание озерных отложений, перестройка микрорельефа, связанная с проявлением мерзлотных процессов, и образование новых специфичных урочищ. Исследования многолетней динамики озер в криолитозоне в условиях потепления климата [Jones et al., 2022] показали, что в области сплошного распространения ММП наблюдается примерное равенство озер, увеличивающихся по площади и спущенных. В области прерывистой мерзлоты отмечается сокращение площади озер и увеличение площадей заболоченных озерных котловин и хасыреев [Webb, Liljedahl, 2023]. Дренаживание озер, возможно, происходит за счет более быстрого формирования крупных таликов при потеплении климата [Farquharson et al., 2022].



**Рис. 2.** Карта-схема местоположения ключевых участков работ.

1 – районы работ.

Процесс образования подводных газовых воронок в озерах, их распространение в различных биоклиматических зонах и их морфология совершенно не изучены, но были зафиксированы многими исследователями [Кузин, 1992; Сизов, 2015; Богоявленский и др., 2016]. Почти нет данных по содержанию метана в озерных отложениях на дне озер и после их спуска в хасыреях [Dvornikov et al., 2019]. В связи с этим цель работы заключалась в изучении вероятных закономерностей проявлений газовых воронок озер, оценке их размеров и содержания метана в отложениях озерных котловин и хасыреев в биоклиматических зонах северной (арктической), типичной и южной тундры Ямала.

### РАЙОНЫ РАБОТ

Изучение распространения и морфологии газовых воронок в озерах проведено на трех участках (рис. 2), расположенных в различных биоклиматических зонах Ямала – северной (подзона С, по [Walker et al., 2009]), типичной (подзона D) и южной (подзона E) тундре. В подзоне северной тундры изучены озера в северо-западной части о. Белый, для типичной тундры выбран участок близ полярной станции Марре-Сале, а в южной тундре изучены озера в районе стационара Еркута.

Участок исследования на о. Белый расположен на поверхности первой морской террасы с высотными отметками 8–12 м в окрестностях метеостанции (м/с) им. М.В. Попова. Растительный покров является типичным для северных тундр и представлен маломощными лишайниками и мхами, в переувлажненных ландшафтах присутствуют осоки. Рельеф поверхности плоский, слабо расчлененный. Заозеренность территории составляет около 15 %. Морские отложения представлены засоленными мелко- и тонкозернистыми песками с сингенетическими полигонально-жильными льдами (ПЖЛ). Территория о. Белый приурочена к области сплошного распространения ММП. Среднегодовая температура многолетнемерзлых пород на первой террасе составляла  $-9.5^{\circ}\text{C}$  (1972 г.) и повышалась до  $-8.6^{\circ}\text{C}$  (1978 г.) и  $-7.1^{\circ}\text{C}$  (2009 г.). На морских лайдах среднегодовая температура многолетнемерзлых пород выше на  $1.0\text{--}1.5^{\circ}\text{C}$  [Васильчук, Васильчук, 2015]. Обычно в озерных котловинах среднегодовая температура выше, чем на основной поверхности, на  $1.0\text{--}1.5^{\circ}\text{C}$  за счет значительного накопления снежного покрова [Vasiliev et al., 2020]. Средняя глубина сезонного протаивания на площадке CALM R55A на песчаной поверхности в 2022 г. составила 123 см, на заболоченной супесчаной поверхности на площадке R55 равна 54 см.

На Западном Ямале исследования проводились в районе м/с Марре-Сале на поверхности морской террасы с абсолютными отметками местности 20–29 м. Растительный покров представлен



мхами, лишайниками, травами и осоками, также присутствуют кустарничковый (морозика, голубика и брусника) и кустарниковый ярус (ива). Поверхность террасы расчленена оврагами, логами и вложенными озерными котловинами. Заозеренность территории составляет около 12 % [Задорожная и др., 2022]. В геологическом строении третьей морской террасы выделяются два яруса. Верхний ярус представлен озерно-аллювиальными и эоловыми незасоленными песчаными и супесчаными отложениями голоценового (МИС 1) и сартанского возраста (МИС 2). Эти отложения вмещают сингенетические ПЖЛ. Ниже по разрезу залегают песчано-супесчано-суглинистые прибрежно-морские отложения каргинского возраста (МИС 3). Основание разреза слагают казанцевские (МИС 5) засоленные морские глины и суглинки. Часто разделить казанцевские и каргинские отложения невозможно, поэтому их объединяют в марресальскую свиту [Гатауллин, 1991]. Отложения МИС 3 и МИС 5 вмещают крупные залежи пластовых льдов. Район относится к области сплошного распространения ММП, мощность твердомерзлой толщи достигает 90 м, ниже залегают охлажденные породы, мощность которых не установлена. Среднегодовая температура ММП на водораздельной поверхности в этом районе повысилась с  $-6.5^{\circ}\text{C}$  (1979 г.) до  $-5.0^{\circ}\text{C}$  (2000 г.) и  $-4.0^{\circ}\text{C}$  (2022 г.). В озерных котловинах среднегодовая температура ММП выше на  $1.5\text{--}1.8^{\circ}\text{C}$  [Vasiliev et al., 2020]. Средняя глубина сезонного протаивания на песчаных поверхностях на площадке CALM R3 в 2022 г. составила около 180 см, на заболоченной поверхности равна 59 см.

На Южном Ямале изучение газовых воронок проведено в районе стационара Еркута Института экологии растений и животных УрО РАН на поверхности второй морской террасы с абсолютными отметками 15–20 м. Растительный покров характерен для южной кустарниковой тундры и представлен травяно-мохово-лишайниковыми ассоциациями. Кустарники ивы достигают высоты 1.0–1.5 м. Поверхность морской террасы плоская, слабо расчлененная. Заозеренность территории превышает 20 %. Четвертичные отложения морской террасы представлены почти исключительно мелкозернистыми незасоленными песками. Район относится к территории сплошного распространения ММП, однако в поймах рек формируются сравнительно глубокие несквозные талики. Среднегодовая температура ММП в этом районе на водоразделе была измерена только в 1979 г. и составила  $-5.5^{\circ}\text{C}$  [Chuvilin et al., 2020]. По аналогии с темпами повышения температуры ММП на о. Белый и Марре-Сале современная среднегодовая температура ММП здесь ожидается около  $-2.5\text{--}-3.5^{\circ}\text{C}$ . В озерных котловинах среднегодовая температура ММП в этом районе

выше примерно на  $1.5^{\circ}\text{C}$ . Средняя глубина сезонного протаивания на увлажненной песчаной поверхности на площадке CALM R58 в 2022 г. составила 101 см.

Таким образом, участки исследования охватывают биоклиматические зоны северной, типичной и южной кустарниковой тундры. Заозеренность территории меняется от 12 % в районе Марре-Сале до более 20 % в районе Еркуты. В геокриологическом отношении все участки наблюдений расположены в области сплошного распространения ММП, диапазон среднегодовых температур ММП составил от  $-7.0$  до  $-2.5^{\circ}\text{C}$ . Следует отметить, что по наблюдениям А.В. Павлова [2008] в районе Марре-Сале среднегодовая температура отложений на дне озер при глубине менее 1 м выше среднегодовой температуры воздуха на  $6\text{--}8^{\circ}\text{C}$  и составляет  $0\text{--}+3.7^{\circ}\text{C}$ . Под всеми исследованными озерами существуют несквозные талики. С поверхности отложения сильнольдистые и содержат ПЖЛ, а в разрезах четвертичных отложений Еркуты и Марре-Сале встречаются пластовые льды.

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование подводных воронок в озерах основано на их идентификации по космоснимкам и аэрофотоснимкам с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), статистическом анализе их размеров, формы, характера распределения в пространстве. Первичная идентификация воронок осуществлялась посредством визуального поиска перспективных озер в онлайн-сервисе Яндекс.Карты [<http://yandex.ru/maps>, 2023] на базе снимков со спутников WorldView-2, IKONOS, Landsat-7, Sentinel, SPOT-1-5 и др. Были выявлены озера с обширной мелководной частью, в которых предполагалось наличие воронок. На выбранных ключевых участках в полевых условиях была произведена съемка местности с БПЛА. В районе о. Белый съемка осуществлялась с использованием комплекса Геоскан 201 Геодезия (производство Геоскан, Россия) с высоты 500 м. В остальных районах использовался съемочный квадрокоптер DJI Mavic 2 Pro (производство Dajiang Innovation Technology Co., Китай). В районе Марре-Сале съемка производилась с высоты 500 м, в районе Еркуты – с 330 м.

Пространственное разрешение камер БПЛА позволило идентифицировать объекты размером до 0.5 м. Полученные снимки были подвергнуты геометрической коррекции и преобразованию в картографическую проекцию UTM (WGS-84) в программном комплексе ArcGIS (производство ESRI, США). Для более детального визуального определения воронок производилась цвето-гамма-коррекция снимков. Были дешифрованы бровки озер, области подводных поднятий до глубин



около 2 м, все вероятные области газовых воронок. На основе полученных площадных данных рассчитаны основные статистические показатели размеров, площадей распространения, характер распределения размеров воронок. Расчет размеров воронок производился на основе данных о площади воронок при допущении их абсолютно круглой формы. Для оценки пространственного распределения воронок на рассматриваемой площади озер был использован инструмент пакета ArcGIS – “среднее ближайшее соседство” (average nearest neighbor). Данный инструмент позволил измерить расстояние между центрами соседних воронок и усреднить эти расстояния. Если среднее расстояние получилось меньше среднего для гипотетического случайного распределения (коэффициент Nearest Neighbor Ratio (NNR) менее 1), такое распределение объектов считается кластеризованным (объекты объединены в локальные группы). Если NNR более 1 – распределение случайное, либо равномерное.

Содержание метана в отложениях озерных котловин было детально определено в районе типичной тундры Марре-Сале. Из пород слоя сезонного оттаивания и верхнего горизонта мерзлых пород были отобраны образцы максимально ненарушенного строения. Отбор проб ненарушенного сложения производился вручную буровой ложкой диаметром 76 мм. Образцы пород в хасырее отбирались режущим кольцом в стенках семи шурфов, пройденных до кровли мерзлых пород с углублением в ММП для отбора мерзлого образца либо до максимально возможной глубины в СТС. Образцы ручным способом доводились до цилиндрической формы объемом около 50 см<sup>3</sup>, взвешивались с точностью 0.01 г и помещались в пластиковые шприцы Жане объемом 150 мл. В каждой точке отбора описывались особенности микрорельефа, состав растительности, обводненность поверхности, литологический состав пород. Определялась суммарная влажность пород через каждые 10 см по стандартной методике. Дегазация образцов проводилась в полевых условиях методом Head-Space [Alperin, Reeburgh, 1985; Kampbell et al., 1989]. Пробы газа из газовой смеси в шприцах (объемом около 50 мл) закачивались в стеклянные флаконы емкостью 10 мл и затем транспортировались в лаборатории. Анализ концентрации метана был произведен методом газовой хроматографии в Институте микробиологии

им. С.Н. Виноградского ФИЦ Биотехнологии РАН (Москва) на установке с пламенно-ионизационным детектором Кристалл-2000М (производство Хроматэк, Россия). Точность определения концентрации метана составляет  $\pm 5\%$  от измеряемой величины.

### Изменение климатических условий полуострова Ямал

Северная часть Ямала относится к территории с морским арктическим климатом, центральная часть полуострова характеризуется морским субарктическим климатом, в южной части климат умеренно континентальный. В соответствии с широтной зональностью на полуострове наблюдается возрастание среднегодовых температур воздуха с севера на юг. Меняются также и другие климатические характеристики. Для оценок содержания и эмиссии метана имеют значение температура воздуха и продолжительность теплого периода, в течение которого происходит продуцирование метана. Потепление климата на Ямале наблюдается с 1970-х гг. и протекает в среднем со скоростью 0.05 °C/год. Анализ пространственных изменений показал, что на Ямале с 1970 по 2020 г. наблюдалось смещение изолиний среднегодовой температуры воздуха примерно на 80–100 км к северо-востоку [Малкова и др., 2018].

В табл. 1 приведены значения среднегодовой температуры воздуха и продолжительности теплого сезона за период климатической нормы (1961–1990 гг.) и для сравнительно холодного 2021 года и теплого 2022 года для трех метеостанций Ямала. В районах о. Белый и Марре-Сале работы проводились в непосредственной близости от метеостанций, а климатические характеристики для Еркута взяты по данным м/с Салехард, расположенной примерно в 100 км к югу от участка наблюдений.

Как следует из табл. 1, наблюдается устойчивое повышение среднегодовых температур воздуха в направлении с севера на юг. По климатической норме разница между температурой на о. Белый и в Салехарде составляет 4.6 °C, в 2021 г. она была 3.2 °C, а в 2022 г. уже 3.0 °C. По данным табл. 1 можно предположить уменьшение темпа повышения среднегодовых температур воздуха по мере потепления климата. Однако для подтверждения этого явления необходим более детальный анализ климатических данных.

Таблица 1. Климатические характеристики районов исследований

Метеостанция	Среднегодовая температура воздуха, °C			Продолжительность теплого периода, дни		
	1961–1990 гг.	2021 г.	2022 г.	1961–1990 гг.	2021 г.	2022 г.
о. Белый	–11.2	–8.8	–5.9	111	120	128
Марре-Сале	–8.4	–7.1	–4.0	120	131	137
Еркута	–6.6	–5.6	–2.9	128	136	140

По мере потепления климата с 1970 по 2020 г. возрастает продолжительность теплого периода на о. Белый и Марре-Сале на 17 дней, в районе Салехарда – на 12 дней. Увеличение продолжительности теплого периода происходит преимущественно за счет более позднего осеннего перехода от положительных температур к отрицательным.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### Размеры и распространение газовых воронок

На каждом участке наблюдений по снимкам БПЛА выбрано по одному озеру с наибольшим числом газовых воронок. Координаты выбранных озер: о. Белый – 73°19' с.ш., 70°16' в.д.; Марре-Сале – 69°42' с.ш., 66°51' в.д.; Еркута – 68°11' с.ш., 68°43' в.д. На рис. 3 приведены фрагменты снимков с БПЛА изученных озер с воронками. Газовые воронки преимущественно расположены в мелководной зоне озер. Не исключено, что воронки могут присутствовать и в более приглубых частях озер, но примененный метод исследования не позволяет проследить их из-за непрозрачности большого слоя воды. Хотя можно отметить, что преобладает мнение о наличии воронок только в мелководной части [Анисимов и др., 2020].

Измерение площади воронок и их диаметров выполнено для всех трех участков. На о. Белый число дешифрованных воронок составило 101, в Марре-Сале – 150, в районе Еркуты – 94. Стати-

стические показатели площади и размеров газовых воронок приведены в табл. 2.

Достаточное количество измерений размеров воронок позволило построить кривые распределения встречаемости воронок по размерам (рис. 4).

Из табл. 2 и рис. 4 следует, что размеры воронок в разных биоклиматических зонах сильно отличаются друг от друга. В северной (арктической) тундре преобладают воронки диаметром около 1.5 м, их встречаемость составляет около 50 %, воронок с диаметром более 4 м не встречено. Средний диаметр воронок в этом регионе равен  $(1.9 \pm 0.8)$  м. В типичной тундре наибольшая встречаемость характерна для воронок с диаметром около 4 м и составляет более 40 %. Средний диаметр воронок возрастает до  $(4.1 \pm 1.7)$  м. Наибольшие воронки обнаружены в районе стационара Еркута, здесь преобладающий диаметр воронок составляет около 8 м, их встречаемость более 35.5 %. Средний диаметр воронок достигает  $(7.7 \pm 2.2)$  м. Таким образом, результаты изучения размеров газовых воронок дают основания утверждать, что по мере перехода от биоклиматической зоны северной тундры к южной кустарниковой тундре наблюдается 4-кратное увеличение диаметров воронок с 1.9 до 7.7 м. Это, вероятно, связано в первую очередь с более высокой продуктивностью метаногенеза в условиях более высоких температур озерных отложений. Кроме того,

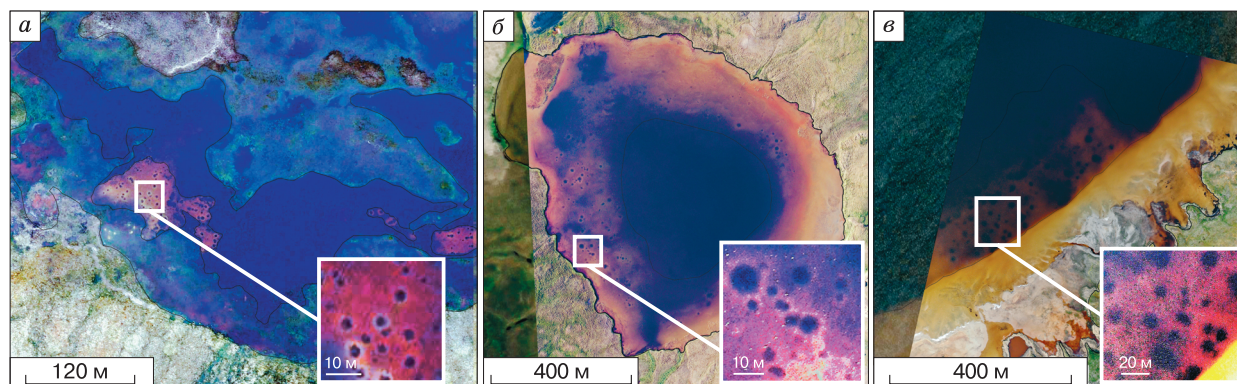
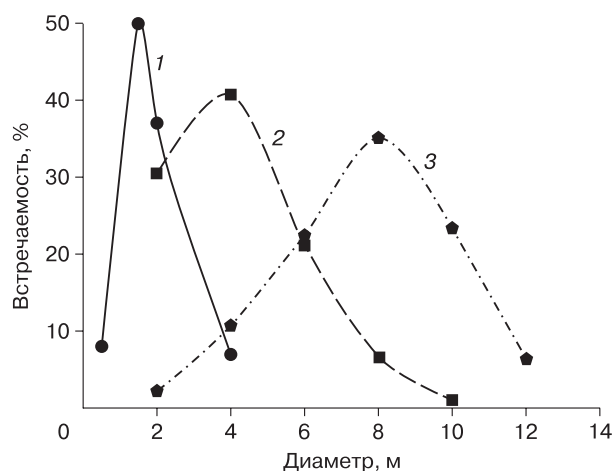


Рис. 3. Снимки БПЛА озера (части озера) с газовыми воронками с выделенными фрагментами увеличенного масштаба и корреktированной цветоконтрастной передачи в районе:

а – о. Белый; б – стационар Марре-Сале; в – стационар Еркута. Прямоугольником выделена область фрагмента снимка.

Таблица 2. Статистические показатели площади и размеров газовых воронок озер ключевых участков

Метеостанция	Площадь воронок, м <sup>2</sup>					Диаметр воронок, м				
	мин.	макс.	сред.	медиана	станд. отклонение	мин.	макс.	сред.	медиана	станд. отклонение
О. Белый	0.5	23.9	3.4	2.6	3.0	0.8	5.5	1.9	1.8	0.8
Марре-Сале	1.6	77.2	15.4	10.8	13.4	1.4	9.9	4.1	3.7	1.7
Еркута	5.2	117.7	50.7	45.6	27.1	2.6	12.2	7.7	7.6	2.2



**Рис. 4. Кривые распределения диаметров газовых воронок озер ключевых участков.**

1 – о. Белый, 2 – Марре-Сале, 3 – Еркута.

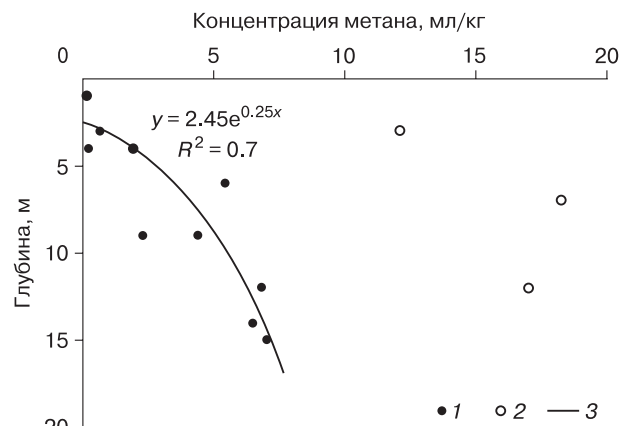
известно, что при повышении температуры среды меняется видовой состав метаногенных архей с ускоренным метаболизмом [McCalley et al., 2014].

Все обнаруженные газовые воронки приурочены к мелководной части озер. Пространственное распределение воронок на изученных ключевых участках озер оказалось различным. Коэффициент NNR для рассматриваемой части озера в районе о. Белый равен 1.07. Среднее расстояние между двумя соседними воронками составило около 5 м. В районе Марре-Сале коэффициент  $NNR = 0.66$ , что указывает на объединение воронок в отдельные локальные группы. При этом среднее расстояние между двумя соседними воронками составило около 19 м. В районе Еркута в рассматриваемой части озера коэффициент  $NNR = 1.24$ , что указывает на случайное распределение. Среднее расстояние между двумя соседними воронками здесь около 21 м.

Суммарная площадь воронок по отношению к общей площади мелководной части составила 4 % на о. Белый, 0.5 % в районе Марре-Сале и 4.3 % в районе Еркуты.

#### Метан в озерных отложениях

Данных по содержанию метана в отложениях подозерных таликов исключительно мало. Анализ содержаний  $CH_4$  в илистых современных отложениях озер на Центральном Ямале был проведен группой исследователей под руководством М.О. Лейбман и А.Ю. Хомутова [Savvichev et al., 2021]. Ими были отобраны образцы придонного ила со дна четырех озер и определено содержание метана в полужидких донных осадках. Плотность донных осадков изменялась от  $1100 \text{ кг/м}^3$  в приповерхностной части до  $1300 \text{ кг/м}^3$  в более глубо-



**Рис. 5. Распределение концентраций метана по глубине для донных илов в озерах Центрального Ямала (по данным [Savvichev et al., 2021]).**

1 – в озерах 010, 002, 004; 2 – в озере 003; 3 – кривая аппроксимация по экспоненциальной функции.

ких горизонтах. Опробование выполнено на глубину до 15 см от поверхности дна. Результаты приведены в табличной форме. По этим данным построено распределение содержания метана по глубине в донных илах. Поскольку данные по трем озерам оказались очень близки, они были объединены в одну группу. Содержания  $CH_4$  в четвертом озере сильно отличались от первой группы, поэтому значения приведены отдельно (рис. 5).

В качестве функции аппроксимации для первой группы выбрана экспонента, для озера 003 (нумерация озер дана по [Savvichev et al., 2021]) проведение линии аппроксимации не имеет смысла (здесь имеются только три точки).

Как видно из рис. 5, в первой группе озер наблюдается распределение концентрации  $CH_4$  по глубине, характерное для диффузионного механизма переноса метана от более глубоких горизонтов к поверхности дна озера. Вблизи поверхности озер концентрация метана близка к нулю, на глубине около 15 см она достигает 7 мл/кг. В донных отложениях озера 003 концентрация метана намного выше и достигает 18.3 мл/кг. Содержания метана в донных отложениях озер в первой группе и особенно в озере 003 значительно превышают фоновые содержания  $CH_4$  в породах сезонноталого и переходного слоев всех типах доминантных ландшафтов типичной тундры. Там содержание метана не превышает 4.5 мл/кг, а обычные значения 2–4 мл/кг [Задорожная и др., 2022]. По данным [Yang et al., 2023], средняя концентрация метана в озерных отложениях на п-ове Быковский (Северная Якутия) достигает 25 мл/кг. Вероятно, высокие содержания метана в озере 003 и озере на п-ове Быковский свидетельствуют о возможности реализации пузырькового механизма переноса ме-





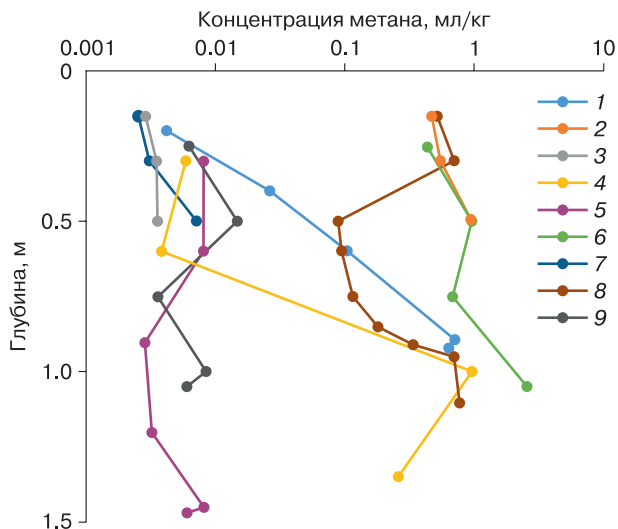
**Рис. 6. Растительность на дне спущенного в 2013 г. озера по состоянию на 2021 г.**

Район Марре-Сале. Фото К.А. Никитина.

тана с глубины к поверхности дна озер и формирования газовых воронок. В любом случае, можно констатировать, что концентрация  $\text{CH}_4$  в озерных отложениях существенно выше по сравнению с отложениями СТС во всех доминантных ландшафтах. Это связано с более высоким уровнем метаболизма и продуцирования метана анаэробными археями при повышенной температуре среды.

Изучение содержания метана в отложениях осушенной озерной котловины (хасырея) проводилось в районе Марре-Сале. Здесь небольшое озеро диаметром около 200 м ( $69^\circ 41'$  с.ш.,  $66^\circ 48'$  в.д.) и глубиной не более 2 м, расположенное вблизи берега Карского моря на поверхности третьей морской террасы, было дренировано вследствие продвижения оврага, развивающегося по полигонально-жильным льдам от берега к озеру. В 2012 г. граница оврага достигла озера, и за 2012–2013 гг. произошел спуск озера. Осушенная котловина сразу же начала осваиваться пионерной растительностью, и к 2021 г. сформировались растительные ассоциации, отвечающие условиям увлажнения отложений (рис. 6).

Микрорельеф озерной котловины еще не сформировался окончательно, присутствуют хорошо дренированные приподнятые участки и, напротив, переувлажненные и заболоченные понижения. Сохранились небольшие обводненные озёрки, следов газовых воронок не обнаружено. На более дренированных участках формируется преимущественно мохово-травянистый покров, на заболоченных участках – мохово-пушицевый. Породы, слагающие озерную котловину, представлены мелкозернистыми песками и супесями. Собственно, озерные отложения мощностью менее 1 м отличаются от коренных прибрежно-морских пес-



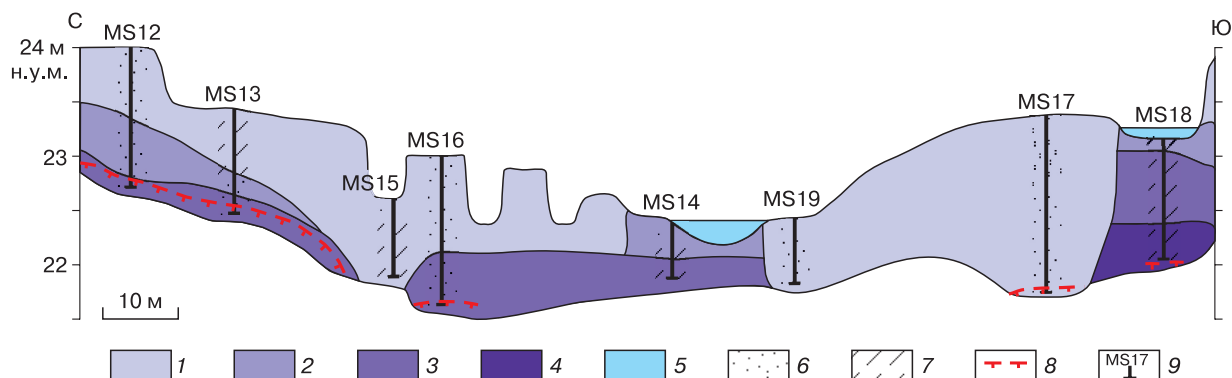
**Рис. 7. Концентрация метана в озерных отложениях в районе Марре-Сале.**

Номера шурфов: 1 – 21MS13, 2 – 21MS14, 3 – 21MS15, 4 – 21MS16, 5 – 21MS17, 6 – 21MS18, 7 – 21MS19, 8 – 20MS11, 9 – 21MS5.

ков более дисперсным составом (до тяжелых супесей) и более коричневым цветом за счет высокого содержания органического вещества. Подстилающие пески имеют желтовато-серый цвет. Граница между ними достаточно четкая.

В августе 2021 г. через озерную котловину был пройден профиль шурфами на всю глубину сезонноталого слоя, местами с заглублением в мерзлое основание. Всего здесь было пройдено и опробовано восемь шурфов. Результаты определения содержания метана в породах хасырея приведены на рис. 7. На нем представлены также данные опробования содержания метана в отдельно расположенной области ( $69^\circ 42'$  с.ш.,  $66^\circ 49'$  в.д.) в ландшафте озерной котловины на заболоченном (20MS11) и дренированном (21MS5) участках.

На рис. 7 отчетливо видно разделение значений концентрации метана на две группы. К первой группе относятся грунты с низкими концентрациями метана (на графике слева), такие концентрации 0.005–0.03 мл/кг присущи дренированным пескам на приподнятых участках рельефа. Концентрации  $\text{CH}_4$  здесь исключительно низкие и не отличаются от концентраций на дренированных песчаных ландшафтах вне озера [Задорожная и др., 2022]. На обводненных и заболоченных участках концентрация метана существенно выше (на графике справа) и достигает 1 мл/кг, в одном случае она даже составила 2.5 мл/кг. В обоих случаях содержание метана примерно соответствует его концентрациям в аналогичных ландшафтах основной поверхности и контролируется условиями увлажнения.



**Рис. 8. Схематический разрез пространственного распределения метана в отложениях хасырея в районе Марре-Сале.**

1–4 – содержание метана в породе (мл/кг): 1 – от 0 до 0.1; 2 – от 0.1 до 0.5; 3 – от 0.5 до 1.0; 4 – более 1; 5 – вода; 6, 7: литологический состав отложений: 6 – песок, 7 – супесь; 8 – граница подошвы сезонноталого слоя, 9 – местоположение и номер шурфа.

Детальное изучение содержания метана в породах СТС и подстилающих мерзлых отложениях на пройденном профиле дает возможность оценить пространственное распределение содержания  $\text{CH}_4$  в разрезе озерных отложений хасырея (рис. 8). На рис. 8 для лучшей иллюстрации выбрана неравномерная шкала концентраций метана.

Формирование окончательного ландшафтного облика хасырея еще не завершено, происходит сглаживание рельефа, перестроение гидрологического режима, освоение поверхности различными растительными ассоциациями. Поэтому можно считать, что и распределение метана в разрезе полностью не сформировалось. В краевых частях хасырея хорошо выражена слоистая структура распределения метана, для которой характерно низкое содержание  $\text{CH}_4$  в приповерхностных слоях отложений. С глубиной содержание метана возрастает. Нижний мерзлый горизонт, у подошвы слоя сезонного протаивания, с самым высоким содержанием метана до 2.5 мл/кг можно трактовать как переходный слой [French, Shur, 2010], в котором содержание  $\text{CH}_4$  в 2–5 раз выше, чем в верхних горизонтах.

В центральной части хасырея слоистое распределение содержания метана наблюдается только под остаточным озерком, в других частях в центре хасырея слоистого распределения нет. Можно предполагать, что за прошедшие 8–10 лет после осушения озера переходный слой еще не сформировался.

### ВЫВОДЫ

Проведенные исследования на о. Белый, в районе Марре-Сале и стационаре Еркута позволяют сделать некоторые выводы о закономерностях проявления газовых воронок и распределении содержания метана в озерных отложениях Ямала.

Изучено проявление и размеры газовых воронок в озерах в трех биоклиматических зонах Ямала – северной, типичной и южной тундрах. Установлено, что диаметры газовых воронок в среднем закономерно увеличиваются от 1.9 м в северной тундре до 7.7 м в южной кустарниковой тундре вслед за повышением температуры воздуха. Авторы полагают, что это связано с интенсивным продуцированием метана за счет ускоренного метаболизма метаногенных архей при более высоких температурах озерных отложений на юге изученного региона по сравнению с севером.

Все воронки приурочены к мелководной части озер. Распределение воронок по площади озер различное – в озере вблизи Марре-Сале воронки образуют локальные скопления, в озерах в районе о. Белый и стационара Еркута их распределение не закономерное.

Воронки занимают от 0.5 до 4.3 % площади мелководий.

В озерных отложениях содержание метана в два и более раз выше, чем в отложениях сезонноталого и переходного слоев доминантных ландшафтов типичных тундр. Это подтверждает более высокий уровень метаногенеза в озерах по сравнению с сушей. Скорее всего, в озерах с очень высоким содержанием  $\text{CH}_4$  в озерных отложениях и может реализовываться пузырьковый механизм выбросов метана и формирование газовых воронок.

Содержание метана в меняющихся ландшафтных условиях недавно образовавшихся и промерзающих хасыреев характеризуется сильной изменчивостью. На примере района Марре-Сале установлено, что за 8–10 лет, прошедших после осушения озера, продолжают сукцессионные изменения и формирование переходного слоя.

**Благодарности.** Авторы благодарны рецензентам и редакторам журнала за работу по улучшению качества статьи.

Работа выполнена в рамках государственного задания рег. № НИОКТР 121041600043-4 “Закономерности формирования и деградации субаквальных и прибрежно-морских мерзлых пород в морях Западного сектора Российской Арктики” и при поддержке Научного центра изучения Арктики (г. Салехард).

## Литература

- Анисимов О.А., Зимов С.А., Володин Е.М. и др. Эмиссия метана в криолитозоне России и оценка ее воздействия на глобальный климат // Метеорология и гидрология, 2020, № 5, с. 131–143.
- Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Никонов Р.А. Результаты аэрокосмических и экспедиционных исследований крупных выбросов газа на Ямале в районе Бованенковского месторождения // Арктика: экология и экономика, 2017, № 3 (27), с. 4–17. – <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2017-3-4-17>
- Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Никонов Р.А. и др. Дистанционное выявление участков поверхностных газопроявлений и газовых выбросов в Арктике: полуостров Ямал // Арктика: экология и экономика, 2016, № 3 (23), с. 4–15.
- Васильев А.А., Мельников В.П., Задорожная Н.А. и др. Содержание и эмиссия метана в типичных и южных тундрах Западной Арктики // Докл. РАН. Науки о Земле, 2022, т. 505, № 1, с. 114–119. – <https://doi.org/10.31857/S2686739722070179>
- Васильчук А.К., Васильчук Ю.К. Инженерно-геологические и геохимические условия полигональных ландшафтов острова Белый (Карское море) // Инж. геология, 2015, № 1, с. 50–65.
- Гатауллин В.Н. Марресальская свита Западного Ямала – отложения дельты пра-Оби // Бюл. Комиссии по изучению Четвертичного периода. М., Наука, 1991, № 60, с. 53–61.
- Задорожная Н.А., Облогов Г.Е., Васильев А.А. и др. Метан в мерзлых и оттаивающих отложениях западной Арктики // Криосфера Земли, 2022, т. XXVI, № 5, с. 41–55. – <https://doi.org/10.15372/KZ20220504>
- Калистова А.Ю., Саввичев А.С., Русанов И.И. и др. Термокарстовые озера – экосистемы с интенсивными микробными процессами цикла метана // Микробиология, 2019, т. 88, № 6, с. 631–644. – <https://doi.org/10.1134/S0026365619060041>
- Кизяков А.И., Соношкин А.В., Лейбман М.О. и др. Геоморфологические условия образования воронки газового выброса и динамика этой формы на Центральном Ямале // Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 2, с. 15–25.
- Кузин И.Л. О природе аномальных озер – показателей скоплений углеводородов в глубоких горизонтах осадочного чехла // Проблемы оценки новых зон нефтегазонакопления в основных продуктивных толщах Западной Сибири. СПб., ВНИГРИ, 1992, с. 129–137.
- Лейбман М.О., Плеханов А.В. Ямальская воронка газового выброса: результаты предварительного обследования // Холод. ОК: науч.-популярн. журн., 2014, № 2 (12), с. 9–15.
- Малкова Г.В., Коростелев Ю.В., Садуртдинов М.Р. и др. Современные климатические изменения и температурный режим многолетнемерзлых пород Европейского Севера // Сб. докл. расширенного заседания Науч. совета по криологии Земли РАН “Актуальные проблемы геофизиологии” (Москва, 15–16 мая 2018 г.). М., Унив. книга, 2018, т. 1, с. 98–104.
- Павлов А.В. Мониторинг криолитозоны. Новосибирск, Акад. изд-во “Гео”, 2008, 229 с.
- Сабреков А.Ф., Глаголев М.В., Клепцова И.Е. и др. Вклад мерзлотных бугров в эмиссию метана из болот тундры Западной Сибири // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата, 2011, т. 2, № 2 (4), с. 1–11.
- Сизов О.С. Дистанционный анализ последствий поверхностных газопроявлений на севере Западной Сибири // Геоматика, 2015, № 1, с. 53–68.
- Alperin M.J., Reece W.S. Inhibition experiments on anaerobic methane oxidation // Appl. Environ. Microbiol., 1985, vol. 50, No. 4, p. 940–945. – <https://doi.org/10.1128/AEM.50.4.940-945.1985>
- AMAP Assessment 2015: Methane as an Arctic climate forcer. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway. 139 p.
- Chen X., Bohn T.J., Lettenmaier D.P. Model estimates of climate controls on pan-Arctic wetland methane emissions // Biogeosciences, 2015, vol. 12, p. 6259–6277. – <https://doi.org/10.5194/bg-12-6259-2015>
- Chuvilin E., Stanilovskaya J., Titovsky A. et al. A gas-emission crater in the Erkuta River Valley, Yamal peninsula: characteristics and potential formation model // Geosciences, 2020, vol. 10, No. 5, 170. – <https://doi.org/10.3390/geosciences10050170>
- Ciais P., Sabine C., Bala G. et al. Carbon and other biogeochemical cycles // Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, N.Y. Cambridge Univ. Press, 2013, p. 465–570.
- Dean J.F., Middelburg J.J., Röckmann T. et al. Methane feedbacks to the global climate system in a warmer world // Rev. Geophys., 2018, vol. 56, No. 1, p. 207–250. – <https://doi.org/10.1002/2017RG000559>
- Dvornikov Y.A., Leibman M.O., Khomutov A.V. et al. Gas-emission craters of the Yamal and Gydan peninsulas: A proposed mechanism for lake genesis and development of permafrost landscapes // Permafrost. Periglac. Process., 2019, vol. 30, No. 3, p. 146–162. – <https://doi.org/10.1002/ppp.2014>
- Farquharson L.M., Romanovsky V.E., Kholodov A. et al. Sub-aerial talik formation observed across the discontinuous permafrost zone of Alaska // Nat. Geoscience, 2022, vol. 15, p. 475–481. – <https://doi.org/10.1038/s41561-022-00952-z>
- French H., Shur Y. The principles of cryostratigraphy // Earth Sci. Rev., 2010, vol. 101, No. 3–4, p. 190–206. – <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.04.002>
- Glagolev M., Kleptsova I., Filippov I. et al. Regional methane emission from West Siberia mire landscapes // Environ. Res. Lett., 2011, vol. 6, 045214. – <https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/4/045214>
- IPCC, 2018: Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty / V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner et al. (eds.). Cambridge, N.Y., Cambridge Univ. Press, 616 p. – <https://doi.org/10.1017/9781009157940>



**Jones B.M., Grosse G., Farquharson L.M. et al.** Lake and drained lake basin systems in lowland permafrost regions // *Nat. Rev. Earth & Environ.*, 2022, No. 3, p. 85–98. – <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00238-9>

**Judd A., Hovland M.** Seabed fluid flow around the world // *Seabed Fluid Flow: The Impact on Geology, Biology and the Marine Environment*. Cambridge, Cambridge Univ. Press, 2007, p. 45–133. – <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535918.005>

**Kampbell D.H., Wilson J.T., Vandegrift S.A.** Dissolved oxygen and methane in water by a GC Headspace Equilibration Technique // *Int. J. Environ. Analytic. Chemistry*, 1989, vol. 36, No. 4, p. 249–257. – <https://doi.org/10.1080/03067318908026878>

**Kraev G., Schulze E., Yurova A. et al.** Cryogenic displacement and accumulation of biogenic methane in frozen soils // *Atmosphere*, 2017, vol. 8, No. 6, 105. – <https://doi.org/10.3390/atmos8060105>

**McCalley C., Woodcroft B., Hodgkins S. et al.** Methane dynamics regulated by microbial community response to permafrost thaw // *Nature*, 2014, vol. 514 (7523), p. 478–481. – <https://doi.org/10.1038/nature13798>

**McGuire A.D., Christensen T.R., Hayes D. et al.** An assessment of the carbon balance of Arctic tundra: comparisons among observations, process models, and atmospheric inversions // *Biogeosciences*, 2012, vol. 9, No. 8, p. 3185–3204. – <https://doi.org/10.5194/bg-9-3185-2012>

**Portnov A., Smith A.J., Mienert J. et al.** Offshore permafrost decay and massive seabed methane escape in water depths >20 m at the South Kara Sea shelf // *Geophys. Res. Lett.*, 2013, vol. 40, No. 15, p. 3962–3967. – <https://doi.org/10.1002/grl.50735>

**Saunio M., Stavert A.R., Poulteret B. et al.** The Global Methane Budget 2000–2017 // *Earth Syst. Sci. Data*, 2020, vol. 12, No. 3, p. 1561–1623. – <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>

**Savvichev A., Rusanov I., Dvornikov Yu. et al.** The water column of the Yamal tundra lakes as a microbial filter preventing methane emission // *Biogeosciences*, 2021, vol. 18, No. 9, p. 2791–2807. – <https://doi.org/10.5194/bg-18-2791-2021>

**Savvichev A.S., Rusanov I.I., Kadnikov V.V. et al.** Biogeochemical activity of methane-related microbial communities in bottom sediments of cold seeps of the Laptev Sea // *Microorganisms*, 2023, vol. 11, No. 2, 250. – <https://doi.org/10.3390/microorganisms11020250>

**Streletskaia I.D., Vasiliev A.A., Oblogov G.E. et al.** Methane content in ground ice and sediments of the Kara Sea coast // *Geosciences*, 2018, vol. 8, No. 12, 434. – <https://doi.org/10.3390/geosciences8120434>

**Vasiliev A.A., Drozdov D.S., Gravis A.G. et al.** Permafrost degradation in the Western Russian Arctic // *Environ. Res. Lett.*, 2020, vol. 4, No. 15, 045001. – <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6f12>

**Walker D.A., Reynolds M.K., Daniëls F.J.A. et al.** The Circumpolar Arctic Vegetation Map // *J. Veget. Sci.*, 2009, vol. 16, No. 3, p. 267–282.

**Webb E.E., Liljedahl A.K.** Diminishing lake area across the northern permafrost zone // *Nat. Geoscience*, 2023, vol. 16, p. 202–209. – <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01128-z>

**Yang S., Anthony S.E., Jenrich M. et al.** Microbial methane cycling in sediments of Arctic thermokarst lagoons // *Global Change Biol.*, 2023, vol. 29, No. 10, p. 2714–2731. – <https://doi.org/10.1111/gcb.16649>

**URL:** <http://yandex.ru/maps> (дата обращения: 01.05.2023).

## References

Anisimov O.A., Zimov S.A., Volodin E.M. Methane emission in the permafrost zone of Russia and assessment of its impact on the global climate. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology], 2020, No. 5, p. 131–143 (in Russian).

Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V., Nikonov R.A. Results of aerospace and expeditionary studies of large gas emissions on the Yamal near the Bovanenkovskoye field. *Arktika: ekologiya i ekonomika* [Arctic: ecology and economy], 2017, No. 3 (27), p. 4–17. – <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2017-3-4-17> (in Russian).

Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V., Nikonov R.A. et al. Remote detection of areas of surface gas manifestations and gas emissions in the Arctic: the Yamal Peninsula. *Arktika: ekologiya i ekonomika* [Arctic: ecology and economy], 2016, No. 3 (23), p. 4–15 (in Russian).

Vasiliev A.A., Melnikov V.P., Zadorozhnaya N.A. Methane content and emission in typical and southern tundras of the Western Arctic. *Doklady Rossijskoj akademii nauk. Nauki o Zemle* [Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences], 2022, No. 505 (1), p. 114–119. – <https://doi.org/10.31857/S2686739722070179> (in Russian).

Vasilchuk A.K., Vasilchuk Yu.K. Engineering-geological and geochemical conditions of polygonal landscapes of Bely Island (Kara Sea). *Inzhenernaya geologiya* [Engineering Geology], 2015, No. 1, p. 50–65 (in Russian).

Gataullin V.N. Marresal Formation of the Western Yamal – deposits of the Pra-Ob delta. *Byulleten' komissii po izucheniyu Chetvertichnogo perioda* [Bulletin of the commission for the study of the Quaternary period], 1991, No. 60, p. 53–61 (in Russian).

Zadorozhnaya N.A., Oblogov G.E., Vasiliev A.A. et al. Methane in frozen and thawing sediments of Western Russian Arctic. *Earth's Cryosphere*, 2022, vol. XXVI, No. 5, p. 35–47.

Kallistova A.Yu., Savvichev A.S., Rusanov I.I. et al. Thermokarst lakes are ecosystems with intensive microbial processes of the methane cycle. *Mikrobiologiya* [Microbiology], 2019, No. 88 (6), p. 631–644. – <https://doi.org/10.1134/S0026365619060041> (in Russian).

Kizyakov A.I., Sonyushkin A.V., Leibman M.O. et al. Geomorphological conditions of the gas-emission crater and its dynamics in Central Yamal. *Earth's Cryosphere*, 2015, vol. XIX, No. 2, p. 13–22.

Kuzin I.L. On the nature of anomalous lakes – indicators of hydrocarbon accumulations in the deep horizons of the sedimentary cover. In: *Proc. of Problems of assessing new zones of oil and gas accumulation in the main product strata of Western Siberia*. St. Petersburg, VNIGRI, 1992, p. 129–137 (in Russian).

Leibman M.O., Plekhanov A.V. Yamal gas outlet funnel: results of a preliminary survey. *Holod'OK: nauchno-populyarnyj zhurnal* [Kholod'OK: popular scientific journal], 2014, No. 2 (12), p. 9–15 (in Russian).

Malkova G.V., Korostelev Yu.V., Sadurtdinov M.R. et al. Modern climatic changes and temperature regime of permafrost rocks of the European North. In: *Proc. of Collection of reports of the extended meeting of the Scientific Council on Earth Cryology of the Russian Academy of Sciences "Actual problems of geocryology"* (Moscow, May 15–16, 2018). Moscow, Univ. kniga, 2018, No. 1, p. 98–104 (in Russian).

Pavlov A.V. Monitoring kriolitozony [Permafrost monitoring]. Novosibirsk, Acad. Publ. House "Geo", 2008, 229 p. (in Russian).

Sabrekov A.F., Glagolev M.V., Kleptsova I.E. Contribution of permafrost mounds to methane emission from the swamps of the

- tundra of Western Siberia. *Dinamika okruzhayushchej sredy i global'nye izmeneniya klimata* [Dynamics of the environment and global climate change], 2011, vol. 2, No. 2 (4), p. 1–11 (in Russian).
- Sizov O.S. Remote analysis of the consequences of surface gas shows in the north of Western Siberia. *Geomatika* [Geomatics], 2015, No. 1, p. 53–68 (in Russian).
- Alperin M.J., Reeburgh W.S. Inhibition experiments on anaerobic methane oxidation. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1985, vol. 50, No. 4, p. 940–945. – <https://doi.org/10.1128/AEM.50.4.940-945.1985>
- AMAP Assessment 2015: Methane as an Arctic climate forcer. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway. 139 p.
- Chen X., Bohn T.J., Lettenmaier D.P. Model estimates of climate controls on pan-Arctic wetland methane emissions. *Biogeosciences*, 2015, No. 12, p. 6259–6277. – <https://doi.org/10.5194/bg-12-6259-2015>
- Chuvilin E., Stanilovskaya J., Titovsky A. et al. A gas-emission crater in the Erkuta River Valley, Yamal peninsula: characteristics and potential formation model. *Geosciences*, 2020, vol. 10, No. 5, 170. – <https://doi.org/10.3390/geosciences10050170>
- Ciais P., Sabine C., Bala G. et al. Carbon and other biogeochemical cycles. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, N.Y. Cambridge University Press, 2013, p. 465–570.
- Dean J.F., Middelburg J.J., Röckmann T. et al. Methane feedbacks to the global climate system in a warmer world. *Rev. Geophys.*, 2018, vol. 56, No. 1, p. 207–250. – <https://doi.org/10.1002/2017RG000559>
- Dvornikov Y.A., Leibman M.O., Khomutov A.V. et al. Gas-emission craters of the Yamal and Gydan peninsulas: A proposed mechanism for lake genesis and development of permafrost landscapes. *Permafr. Periglac. Process.*, 2019, vol. 30, No. 3, p. 146–162. – <https://doi.org/10.1002/ppp.2014>
- Farquharson L.M., Romanovsky V.E., Kholodov A. et al. Sub-aerial talik formation observed across the discontinuous permafrost zone of Alaska. *Nat. Geoscience*, 2022, vol. 15, p. 475–481. – <https://doi.org/10.1038/s41561-022-00952-z>
- French H., Shur Y. The principles of cryostratigraphy. *Earth Sci. Rev.*, 2010, vol. 101, No. 3–4, p. 190–206. – <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.04.002>
- Glagolev M., Kleptsova I., Filippov I. et al. Regional methane emission from West Siberia mire landscapes. *Environ. Res. Lett.*, 2011, vol. 6, 045214. – <https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/4/045214>
- IPCC, 2018: Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty / V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner et al. (eds.). Cambridge, N.Y., Cambridge Univ. Press, 616 p. – <https://doi.org/10.1017/9781009157940>
- Jones B.M., Grosse G., Farquharson L.M. et al. Lake and drained lake basin systems in lowland permafrost regions. *Nat. Rev. Earth & Environ.*, 2022, No. 3, p. 85–98. – <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00238-9>
- Judd A., Hovland M. Seabed fluid flow around the world. In: *Seabed Fluid Flow: The Impact on Geology, Biology and the Marine Environment*. Cambridge, Cambridge Univ. Press., 2007, p. 45–133. – <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535918.005>
- Kampbell D.H., Wilson J.T., Vandegrift S.A. Dissolved oxygen and methane in water by a GC Headspace Equilibration Technique. *Int. J. Environ. Analytic. Chemistry*, 1989, vol. 36, No. 4, p. 249–257. – <https://doi.org/10.1080/03067318908026878>
- Kraev G., Schulze E., Yurova A. et al. Cryogenic displacement and accumulation of biogenic methane in frozen soils. *Atmosphere*, 2017, vol. 8, No. 6, 105. – <https://doi.org/10.3390/atmos8060105>
- McCalley C., Woodcroft B., Hodgkins S. et al. Methane dynamics regulated by microbial community response to permafrost thaw. *Nature*, 2014, vol. 514 (7523), p. 478–481. – <https://doi.org/10.1038/nature13798>
- McGuire A.D., Christensen T.R., Hayes D. et al. An assessment of the carbon balance of Arctic tundra: comparisons among observations, process models, and atmospheric inversions. *Biogeosciences*, 2012, vol. 9, No. 8, p. 3185–3204. – <https://doi.org/10.5194/bg-9-3185-2012>
- Portnov A., Smith A.J., Mienert J. et al. Offshore permafrost decay and massive seabed methane escape in water depths >20 m at the South Kara Sea shelf. *Geophys. Res. Lett.*, 2013, vol. 40, No. 15, p. 3962–3967. – <https://doi.org/10.1002/grl.50735>
- Saunio M., Stavert A.R., Poulteret B. et al. The Global Methane Budget 2000–2017. *Earth Syst. Sci. Data*, 2020, No. 12, p. 1561–1623. – <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>
- Savvichev A., Rusanov I., Dvornikov Yu. et al. The water column of the Yamal tundra lakes as a microbial filter preventing methane emission. *Biogeosciences*, 2021, 18, p. 2791–2807. – <https://doi.org/10.5194/bg-18-2791-2021>
- Savvichev A.S., Rusanov I.I., Kadnikov V.V. et al. Biogeochemical activity of methane-related microbial communities in bottom sediments of cold seeps of the Laptev Sea. *Microorganisms*, 2023, vol. 11, No. 2, 250. – <https://doi.org/10.3390/microorganisms11020250>
- Streletskaia I.D., Vasiliev A.A., Oblogov G.E. et al. Methane content in ground ice and sediments of the Kara Sea coast. *Geosciences*, 2018, vol. 8, No. 12, 434. – <https://doi.org/10.3390/geosciences8120434>
- Vasiliev A.A., Drozdov D.S., Gravis A.G. et al. Permafrost degradation in the Western Russian Arctic. *Environ. Res. Lett.*, 2020, vol. 15, No. 4, 045001. – <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6f12>
- Walker D.A., Reynolds M.K., Daniëls F.J.A. et al. The Circumpolar Arctic Vegetation Map. *J. Veget. Sci.*, 2009, vol. 16, No. 3, p. 267–282. – <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2005.tb02365.x>
- Webb E.E., Liljedahl A.K. Diminishing lake area across the northern permafrost zone. *Nature Geoscience*, 2023, vol. 16, p. 202–209. – <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01128-z>
- Yang S., Anthony S.E., Jenrich M. et al. Microbial methane cycling in sediments of Arctic thermokarst lagoons. *Global Change Biol.*, 2023, vol. 29, No. 10, p. 2714–2731. – <https://doi.org/10.1111/gcb.16649>
- URL: <http://yandex.ru/maps> (last visited: 01.05.2023).

Поступила в редакцию 28 марта 2023 г.,  
после доработки – 31 мая 2023 г.,  
принята к публикации 7 декабря 2023 г.