КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Криосфера Земли, 2022, т. XXVI, № 5, с. 41–55 **https://www.sibran.ru**

ГАЗЫ И ГАЗОВЫЕ ГИДРАТЫ В КРИОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

УДК 551.345.3 DOI: 10.15372/KZ20220504

МЕТАН В МЕРЗЛЫХ И ОТТАИВАЮЩИХ ОТЛОЖЕНИЯХ ЗАПАДНОЙ АРКТИКИ

Н.А. Задорожная[1], Г.Е. Облогов[1,2], А.А. Васильев[1,2], И.Д. Стрелецкая[3], Г.В. Малкова[1,2], П.Б. Семенов[4], Б.Г. Ванштейн[4]

[1]*Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН,*
625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия; z.nataliia.95@gmail.com, oblogov@mail.ru
[2]*Тюменский государственный университет,*
625003, Тюмень, ул. Володарского, 6, Россия; al.a.vasiliev@gmail.com, galina_malk@mail.ru
[3]*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,*
119991, Москва, Ленинские горы 1, Россия; irinastrelets@gmail.com
[4]*Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана (ВНИИОкеангеология), 190121, Санкт-Петербург, Английский просп., 1, Россия; petborsem@gmail.com, vansh@peterlink.ru*

Приводятся результаты исследований содержания метана в породах слоя сезонного оттаивания и верхнего горизонта многолетнемерзлых пород в районе стационара Марре-Сале (западное побережье полуострова Ямал) и устья реки Печора. Проанализированы данные по содержанию метана в многолетнемерзлых четвертичных отложениях и подземных льдах разного генезиса и данные об эмиссии метана с поверхности доминантных ландшафтов типичной тундры Марре-Сале. Установлено, что наибольшее количество метана в породах в слое сезонного оттаивания и верхнем горизонте многолетнемерзлых пород характерно для заболоченных ландшафтов поймы и сильно увлажненных понижений на поверхности морской террасы. В хорошо дренированных ландшафтах метан в отложениях слоя сезонного оттаивания практически отсутствует. В породах верхней части мерзлоты содержание метана в 5–6 раз больше, чем в перекрывающем слое сезонного оттаивания. Показано, что большое количество метана (в среднем около 2 мл/кг) содержится в суглинисто-глинистых отложениях морского генезиса в основании разреза Марре-Сале, а также в пластовых льдах. Характер распределения метана в мерзлых породах и подземных льдах приближен к логнормальному. Значительные потоки метана (до 10.7 мг/(м^2·ч)) зафиксированы с заболоченных или сильно увлажненных поверхностей, занимающих 45–50 % площади типичной тундры.

Ключевые слова: *метан, многолетнемерзлые породы, переходный слой, подземные льды, эмиссия метана, Марре-Сале, устье реки Печора.*

METHANE IN FROZEN AND THAWING SEDIMENTS OF WESTERN RUSSIAN ARCTIC

N.A. Zadorozhnaya[1], G.E. Oblogov[1,2], A.A. Vasiliev[1,2], I.D. Streletskaya[3], G.V. Malkova[1,2], P.B. Semenov[4], B.G. Vanshtein[4]

[1]*Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre SB RAS,*
Malygina str. 86, Tyumen, 625026, Russia; z.nataliia.95@gmail.com
[2]*Tyumen State University, Volodarskogo str. 6, Tyumen, 625003, Russia*
[3]*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Cryolitology and Glaciology,*
Leninskie Gory 1, Moscow, 119991, Russia
[4]*All-Russia Scientific Research Institute of Geology and Mineral Resources of the World Ocean (VNIIOkeangeologia),*
Angliiskii prosp. 1, St. Petersburg, 190121, Russia

The results of studies of the methane content in the active layer and upper permafrost horizon in the areas of the Marre-Sale station (western Yamal Peninsula) and the Pechora River mouth are presented. Data on the methane content in Quaternary permafrost and ground ice of different geneses and data on methane emission from the surface of typical tundra in Marre-Sale are analyzed. The highest methane content in sediments of both the active layer and the upper permafrost is characteristic of boggy floodplains and waterlogged depressions on the surface of the marine terrace. In well-drained landscapes, methane is virtually absent in sediments of the active layer. In the upper permafrost, its content 5–6 times higher than in the overlying active layer. A large amount of methane (on average, about 2 mL/kg) is contained in loamy clay marine sediments at the base of the Marre-Sale section, as well as in the massive ice. The distribution of methane in permafrost and ground ice is close to a lognormal distribution. Significant methane flux (up to 10.7 mg/(m^2·h)) has been determined for highly moistened surfaces occupying about 45–50 % of the area of a typical tundra.

Key words: *methane, permafrost, transient layer, ground ice, methane emission, Marre-Sale, Pechora River mouth.*

ВВЕДЕНИЕ

Влияние парникового эффекта при прогнозировании изменения климата невозможно оценить без учета содержания в атмосфере парниковых газов, поступающих из природных источников. В многолетнемерзлых породах (ММП) содержатся огромные запасы парниковых газов [*Ривкина и др., 1992; Sturtevant et al., 2012; Christensen, 2014; Schuur et al., 2015; Euskirchen et al., 2017; Streletskaya et al., 2018; van Huissteden, 2020*]. Большое содержание газа в мерзлоте обусловлено достаточно высоким содержанием органического углерода в четвертичных отложениях Арктического региона, при микробном разложении которого происходит образование парниковых газов – метана CH_4 и углекислого газа CO_2. Метан имеет по меньшей мере 28-кратный потенциал глобального потепления относительно CO_2 (за 100 лет) [*IPCC, 2018*]. Продолжающееся потепление в Арктике [*IPCC, 2018*], вероятно, высвободит часть объема парниковых газов, в настоящий момент "законсервированных" в ММП и подземных льдах [*McCalley et al., 2014; Dean et al., 2018*].

Арктические экосистемы, прежде всего обводненные и заболоченные ландшафты, по разным оценкам, ежегодно выделяют от 8 до 29 Тг/год [*McGuire et al., 2012*], что соответствует примерно 10 % глобальных выбросов CH_4 с естественных водно-болотных угодий [*Ciais et al., 2013*]. Некоторые исследователи полагают, что современные оценки эмиссии CO_2 и CH_4, вызванные резким таянием мерзлоты, могут быть заниженными [*Anthony et al., 2018*]. Причиной служит увеличение эмиссии парниковых газов за счет расширения площади заболоченных территорий и термокарстовых озер, в которых органический углерод становится доступным для микробного разложения [*van Huissteden, 2020*]. Существует и противоположная точка зрения, что эмиссия парниковых газов при деградации мерзлоты не так велика и не может оказывать существенного влияния на изменение климата [*Anisimov, 2007*].

По генезису CH_4 разделяется на несколько групп: абиогенный, биогенный, термогенный и пирогенный. На исследуемой территории образуется главным образом биогенный CH_4 – конечный продукт разложения органического вещества метаногенными археями в анаэробных средах, таких как водонасыщенные почвы, болота, морские отложения [*Стрелецкая и др., 2018*]. В условиях типичных тундр биогенный CH_4 образуется в бескислородных условиях водонасыщенного слоя сезонного оттаивания и в таликовых зонах при наличии достаточного количества органического углерода в доступных формах [*Краев и др., 2013; Краев, Ривкина, 2017*].

Экспериментально установлено, что метаногенез в мерзлых породах не происходит [*Walz et al., 2017*], т. е. все количество выделенного из мерзлых пород метана образовалось до или во время промерзания и является характеристикой самих вмещающих пород. То же можно утверждать и для подземных льдов. Микробная активность в сезонноталом слое (СТС) продолжается до момента полного промерзания пород [*Sturtevant et al., 2012*]. Также было подтверждено, что понижение температуры пород уменьшает активность микробов, окисляющих метан в верхних горизонтах СТС [*Sachs et al., 2008*].

Полевые и экспериментальные наблюдения на северо-востоке Сибири показали, что биогенный метан имеет тенденцию накапливаться около нижней границы СТС [*Kraev et al., 2017*]. В некоторых случаях CH_4 при промерзании может смещаться (отжиматься) вниз в мерзлую толщу на первые метры, накапливаясь в литологических карманах.

Цель работы заключается в анализе фактических количественных данных по содержанию метана в породах СТС и четвертичных ММП, особенно верхнего горизонта мерзлоты (ВГМ) – переходного и промежуточного слоев по Ю.Л. Шуру [*French, Shur, 2010*], содержанию метана в подземных льдах, а также эмиссии метана с поверхности доминантных ландшафтов исследуемых районов западного сектора Российской Арктики.

РАЙОНЫ РАБОТ

На территориях геокриологических стационаров на западном побережье п-ова Ямал (Марре-Сале) и в устье Печоры проводятся исследования геологических, геокриологических, ландшафтных условий на протяжении многих лет [*Павлов и др., 2002; Каневский и др., 2005; Стрелецкая и др., 2009, 2018; Малкова, 2010*]. Авторами выполнены работы по определению содержания CH_4 в СТС, ММП, подземных льдах, получены данные об эмиссии метана с поверхности доминантных ландшафтов в районе Марре-Сале. Первичные данные по содержанию CH_4 в мерзлых и оттаивающих породах были получены для района устья р. Печора (рис. 1).

Стационар Марре-Сале

Территория геокриологического стационара Марре-Сале, расположенного рядом с одноименной метеостанцией, относится к зоне типичной тундры с морским арктическим климатом. По данным метеостанции Марре-Сале, среднегодовая температура воздуха ($T_в$) с 1961 по 1990 г. (период климатической нормы) составляла –8.5 °С. Самый холодный месяц – февраль со средней месячной $T_в$ = –22.7 °С, а самый теплый – июль с температурой 7.1 °С. Температура воздуха в последние десятилетия (примерно с 1970 г.) в Арктике повышается повсеместно. В среднем по региону она повысилась примерно на 2.8 °С, что близко к “жесткому” сценарию климатических изменений [*IPCC, 2018*].

Район относится к зоне сплошного распространения ММП. Глубина СТС, несмотря на относительно однородный песчано-супесчаный состав отложений верхней части разреза, меняется в широких пределах – от 0.3 до 2 м и более в зависимости от ландшафтных условий местности.

Ландшафтная структура стационара (рис. 2) репрезентативна для всей площади типичных тундр п-ова Ямал. Рассматриваемая территория расположена преимущественно на третьей морской террасе с высотами от 15 до 30 м над ур. моря. Поверхность террасы расчленена системами оврагов и логов стока поверхностных вод, а также глубокими (10–15 м) озерными котловинами. В северной части территории выделяется обширная область поймы р. Марре-Яха и области без растительного покрова – бечевники и морской пляж. Пойма разделяется на низкую с высотными отметками 0.1–0.5 м над уровнем реки, среднюю (0.5–1.5 м) и высокую (более 1.5 м). Пойма заозерена и заболочена. Озера занимают около 40 % площади поймы. На плоских участках между озерами доминируют комплексные валиково-полигональные травяно-моховые и кустарничково-травяно-моховые болота. Общая заозеренность составляет около 11 % рассматриваемой территории.

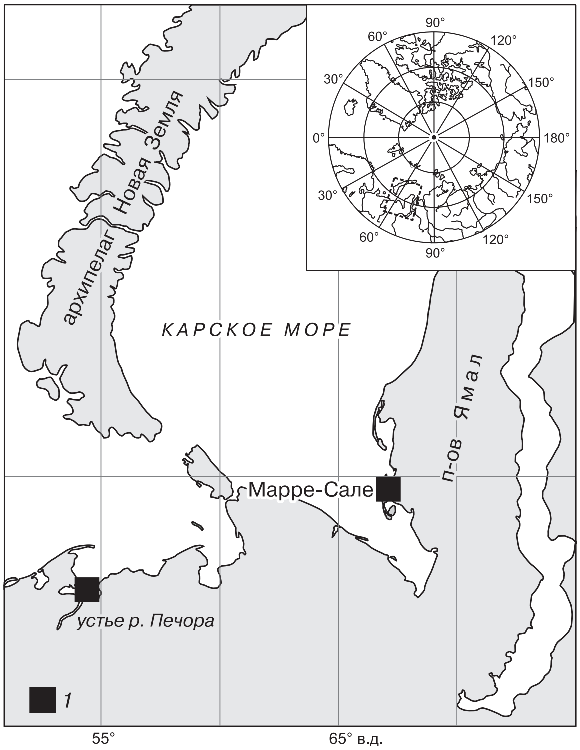

Рис. 1. Расположение ключевых участков.

1 – ключевой участок.

На поверхности террас доминируют слабо увлажненные (дренированные) полигональные травяно-кустарничково-лишайниковые тундры, приуроченные к дренированным межозерным перемычкам (точка отбора проб ВН6). Об активном спуске озер и заболачивании озерных котловин свидетельствуют широко распространенные травяно-моховые заболоченные озерные понижения (точка ВН44). Эти два типа ландшафтов вместе занимают преобладающую площадь поверхности террасы (около 57 % площади без учета площади озер). Другие типы ландшафтов почти равномерно занимают остальную площадь (см. рис. 2).

Для продуцирования метана в СТС важную роль играют условия увлажнения ландшафтов. По условиям увлажнения ландшафты в районе Марре-Сале можно разделить на четыре основных класса. К классу “дренированных тундр” относятся области песчаных раздувов с фрагментами тундровой растительности (точка ВН43) и дренированные полигональные тундры (точка ВН6). К классу “слабодренированных тундр” относятся

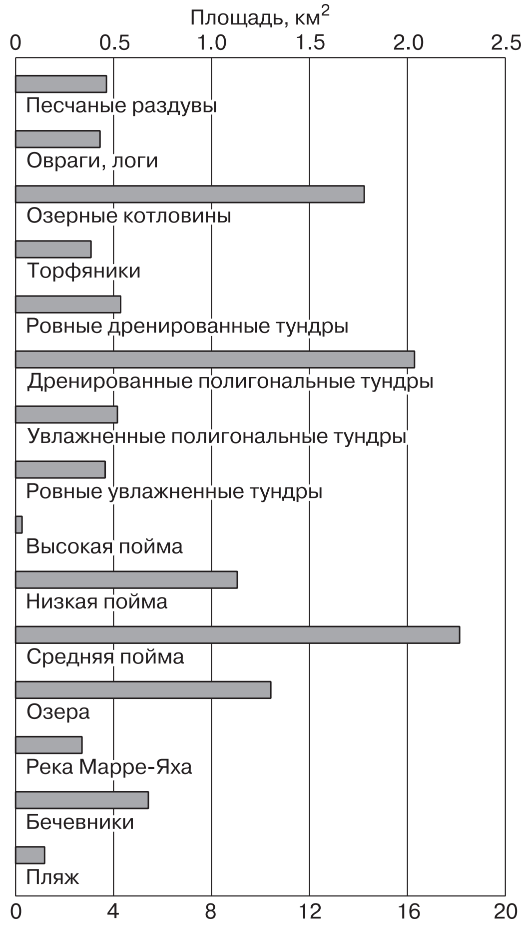

Рис. 2. Ландшафтная структура участка Марре-Сале.

ровные области с влажной поверхностью, покрытой травяно-кустарниково-лишайниковой растительностью (точка BH1), а также область высокой поймы р. Марре-Яха (точка SB06). К классу "влажных тундр" относятся плоские области увлажненных травяно-кустарничково-лишайниково-моховых тундр (точка BH3) и увлажненные полигональные тундры с травяно-кустарничково-лишайниково-моховым покровом, местами с небольшими неглубокими запрудами (точки BH2, BH2a). К классу "заболоченных тундр" относятся сильно увлажненные области оврагов и логов – ложбин стока поверхностных вод (точка BH4), области озерных понижений (точка BH44), заболоченные валиково-полигональные травяно-моховые и кустарничково-травяно-моховые области низкой (точка SB05) и средней (точка BH36) поймы р. Марре-Яха. Отдельно выделяется ландшафт плоских приподнятых торфяников с преобладанием кустарниково-лишайниково-моховой растительности.

Устье реки Печора

В европейской части России (Ненецкий автономный округ) работы проводились в пределах трех действующих геокриологических стационаров – Болванский, Кумжа и Кашин, расположенных в южно-тундровой подпровинции морских и аллювиальных аккумулятивных равнин.

Среднегодовая температура воздуха для периода климатической нормы (1961–1990 гг.) на ближайшей к району работ метеостанции Мыс Константиновский составляет −4.7 °С. Среднее значение $T_в$ за последние 15 лет составляет −2.7 °С. В 1998 г. наблюдалась самая низкая (−9.1 °С), а в 2013 г. самая высокая (−0.7 °С) среднегодовая температура воздуха за весь период наблюдений метеостанции с 1935 г. В последние 30 лет отмечается положительный тренд изменения $T_в$ (0.06 °С/год).

Стационар Болванский расположен в дельте р. Печора на южном берегу Печорской губы (бассейн Баренцева моря) в пределах пологохолмистой заозеренной третьей морской равнины с абсолютными отметками от 25 до 35 м. В ландшафтном строении стационара Болванский доминируют слабодренированные пятнисто-медальонные мохово-лишайниковые кустарничковые тундры, развитые на вершинах и склонах холмов. Разрез поверхностных отложений представлен морскими и прибрежно-морскими супесями и суглинками с прослоями и линзами пылеватых песков. В пределах полигональных торфяников и болот с поверхности залегает торф мощностью от 0.5 до 5 м. Территория стационара относится к области сплошного распространения мерзлоты. На участке мыс Болванский были опробованы два шурфа. Первый расположен на пологой увлажненной поверхности полигонального заболоченного торфяника (точка 20P4), второй – на пологой поверхности полигона между ложбинами в заболоченном торфянике (точка 20P6).

В 2009 г. в 50 км к западу от стационара Болванский организован геокриологический стационар Кашин. Он расположен в краевой части дельты Печоры на о. Кашин в Коровинской губе (на первой морской террасе, абс. отметки от 2 до 10 м). Остров Кашин сложен главным образом мерзлыми песками, на отдельных участках с поверхности залегает торф мощностью до 2 м. На о. Кашин были описаны и опробованы 1 шурф и 1 зачистка в стенке отступающего берега. Шурф пройден на пологонаклонной слабодренированной поверхности с кочковатым рельефом и лишайниковой растительностью (точка 20P3). Вторая точка расположена на фрагменте полигонального торфяника в пределах первой аллювиально-морской террасы высотой 1.6 м (точка 20P7).

В 7 км к югу от о. Кашин организована площадка Кумжа, расположенная между протоками в дельте р. Печора на останце первой аллювиальной террасы с абсолютными отметками 5–8 м. На данном участке опробовано два шурфа. Первый был заложен на слабоволнистой дренированной поверхности плоского торфяника с ерниково-лишайниковой растительностью, окруженного заболоченными понижениями с осокой (точка 20P1). Второй – в увлажненном понижении, в центральной части мочажины (спущенного термокарстового озера) с осоково-сфагновой растительностью (точка 20P2).

Для участков Кашин и Кумжа характерно островное распространение ММП. Средняя глубина СТС, по данным с площадок CALM R24 (Болванский) и R24A (Кашин), в последние годы достигает 1.0–1.2 м.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для определения содержания газового компонента в мерзлых и талых отложениях отбирались образцы пород объемом около 50 см^3, которые после взвешивания помещались в пластиковые шприцы объемом 150 мл. Дегазация образцов производилась методом Head Space [*Kampbell et al., 1989*]. В шприц закачивался высококонцентрированный солевой раствор NaCl и воздух известного объема (около 50 см^3). После полного оттаивания образца выделившийся из него газ перекачивался из шприца в герметичные стеклянные флаконы объемом 10 мл с резиновой пробкой. В таком виде пробы транспортировались в лабораторию ФГБУ ВНИИОкеангеология, где определение состава газов проводится методом газовой хроматографии на установке с пламенно-ионизационным детектором SHIMADZU GC 2014 (производство Японии).

Параллельно с отбором образцов для газового состава отбирались образцы на влажность пород по стандартной методике.

В конце июля – начале августа 2018, 2019, 2020 гг. в районе Марре-Сале были измерены удельные потоки CH_4 в пределах доминантных ландшафтов. Для измерений использовались герметичные кубические камеры размером 25 × 25 × 25 см из органического стекла. Внутри камер автоматически через каждые 10 мин вентиляторами перемешивался воздух в течение 15 с. Для измерения температуры возле камер были установлены двухканальные логгеры HOBO Pro v2 (производство США) с датчиками на поверхности (в слое растительного покрова) и на глубине 10 см. Погрешность измерений логгера составляет ±0.1 °C. Запись температуры происходила каждые 10 минут. Отбор проб газа после начала эксперимента происходил каждый час на протяжении 4 часов (т. е. пять измерений) с помощью пластикового шприца объемом 150 мл из центра камеры, после чего газ сразу перекачивался в герметичные стеклянные пробирки объемом 10 мл. Пробы анализировались в лаборатории ФГБУ ВНИИОкеангеология на вышеупомянутом приборе.

Удельные потоки CH_4 в дальнейшем были рассчитаны по значениям наклонов линейных трендов концентрации CH_4 в мг/(м^2·ч) с учетом изменения температуры и давления воздуха в течение эксперимента [*Глаголев и др., 2010*].

Данные по содержанию CH_4 в породах и льдах и по эмиссии CH_4 были проанализированы стандартными статистическими методами. Все данные были сортированы на группы по признаку геолого-генетической принадлежности либо по ландшафту места отбора пробы. Были рассчитаны средние, минимальные, максимальные значения, стандартные отклонения, медианы выборок. Результаты представлены на графиках, диаграммах и рисунках. На "бокс-плот"-диаграммах нижняя и верхняя грани прямоугольника ("ящика") соответствуют первому и третьему квартилю выборки. Перекрестия в каждом поле представляют собой среднее содержание метана. Концы "усов" – края статистически значимой выборки (нижний конец – разность первого квартиля и полутора межквартильных расстояний; верхний – сумма третьего квартиля и полутора межквартильных расстояний). Точками на "бокс-плот"-диаграмме показаны значения содержания или потока метана.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание метана в слое сезонного оттаивания и верхнем горизонте мерзлоты

Исследования содержания метана в СТС (независимо от мощности СТС в разные годы) и ВГМ (до глубины 3.6 м) в районе стационара Марре-Сале проводятся ежегодно с 2012 г. Для территории Марре-Сале в общей сложности было проанализировано 369 образцов, из которых 249 были в талом, а 120 в мерзлом состоянии. Для района устья р. Печора отобрано 42 образца (11 образцов в мерзлом, 31 в талом состоянии). Содержание метана в торфяниках, бечевниках р. Марре-Яха и на морском пляже не изучалось. Содержание метана в таких областях низкое за счет неблагоприятных условий для существенного метаногенеза [*Kwon et al., 2017*].

Строение разрезов отложений по данным неглубоких (до 3.6 м) скважин с отображением состава пород, суммарной весовой влажности и содержания метана в СТС и ВГМ в разные годы для территории стационара Марре-Сале представлены на рис. 3.

Несмотря на высокую изменчивость содержания метана в СТС, в целом наблюдается закономерное увеличение содержания CH_4 с глубиной. Это, вероятно, указывает на важную роль диффузионного механизма переноса метана к поверхности. В ВГМ количество метана всегда выше, чем в СТС. Наиболее высокое содержание метана как в СТС, так и в ВГМ характерно для наиболее заболоченных ландшафтов с преобладанием осоковой растительности. Диффузионный механизм распределения метана в СТС может указывать на сильное влияние метанотрофных бактерий, использующих метан в качестве единственного источника углерода и энергии. Как правило, аэробные слои, в которых развиваются метанотрофные бактерии, находятся над анаэробными зонами метаногенеза [*Whalen, Reeburgh, 1990*].

Статистические данные по содержанию CH_4 в СТС и ВГМ стационара Марре-Сале приведены на рис. 4. Видно, что содержание CH_4 значительно различается в зависимости от ландшафта. Отношение средних содержаний CH_4 в ландшафтах с максимальными содержаниями CH_4 к ландшафтам с минимальными содержаниями достигает 400. Различия в количестве метана существенны и в образцах из СТС, и в образцах из ВГМ.

В районе Марре-Сале наибольшее содержание метана в породах СТС отмечено на средней пойме реки (точка BH36) и составляет (1.59 ± 1.36) мл/кг при максимальном значении 6.55 мл/кг. Практически такие же значения получены и для низкой поймы (точка SB05), равные (1.57 ± 2.62) мл/кг, при максимальном 9.05 мл/кг. На основной поверхности третьей морской террасы наибольшее содержание метана в СТС получено для увлаженной поверхности лога (точка BH4), в среднем (1.54 ± 1.09) мл/кг при максимальном значении 3.93 мл/кг. Также высокие значения содержания метана в СТС отмечены в полигональной тундре (точки BH2, BH2a). Все остальные

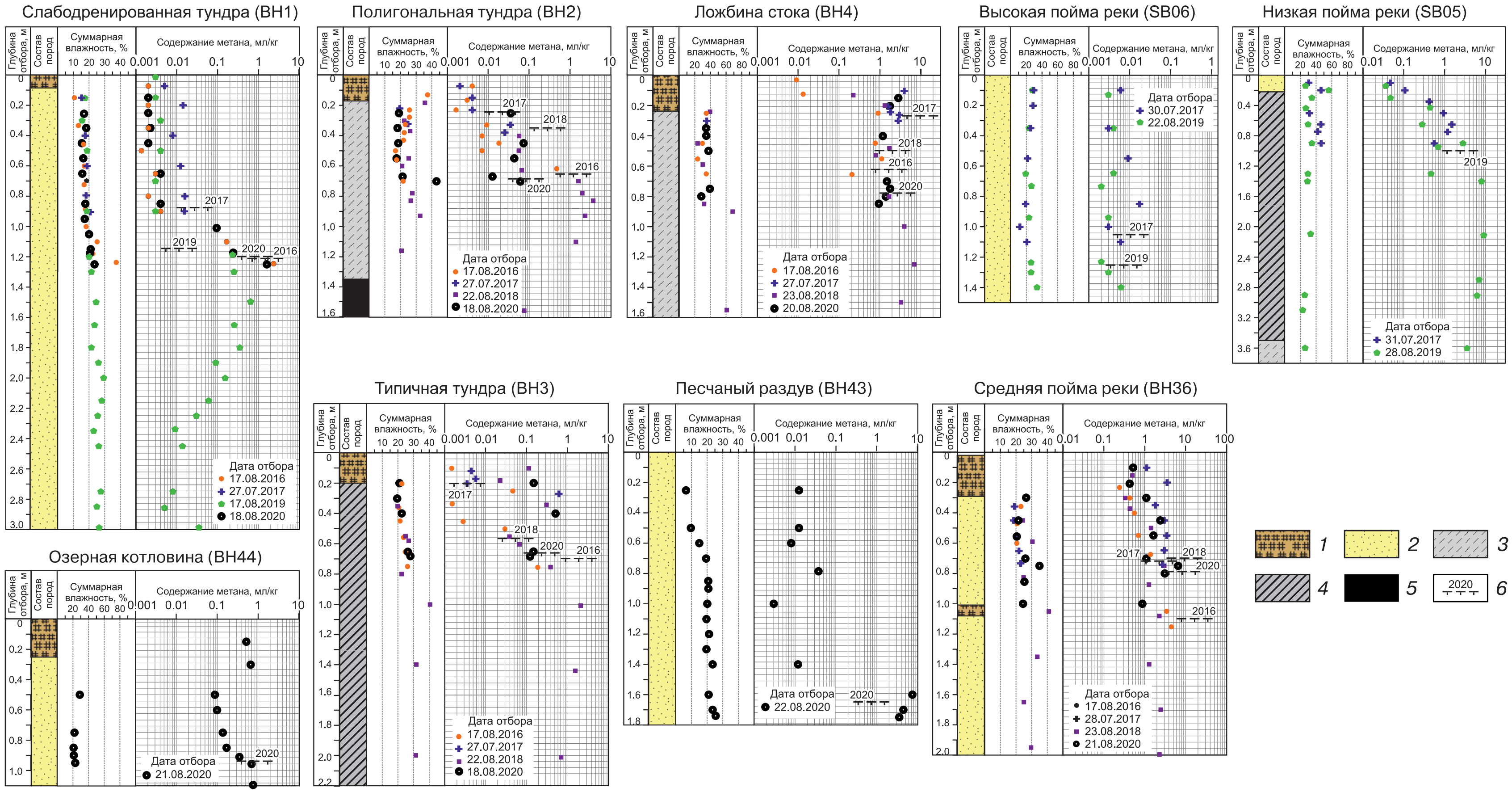

Рис. 3. Изменение содержания метана по глубине в разных типах ландшафтов района стационара Марре-Сале.

1 – торф; *2* – песок; *3* – супесь; *4* – суглинок; *5* – лед с минеральными примесями (предположительно полигонально-жильный лед); *6* – граница сезонноталого слоя на момент отбора проб и год отбора.

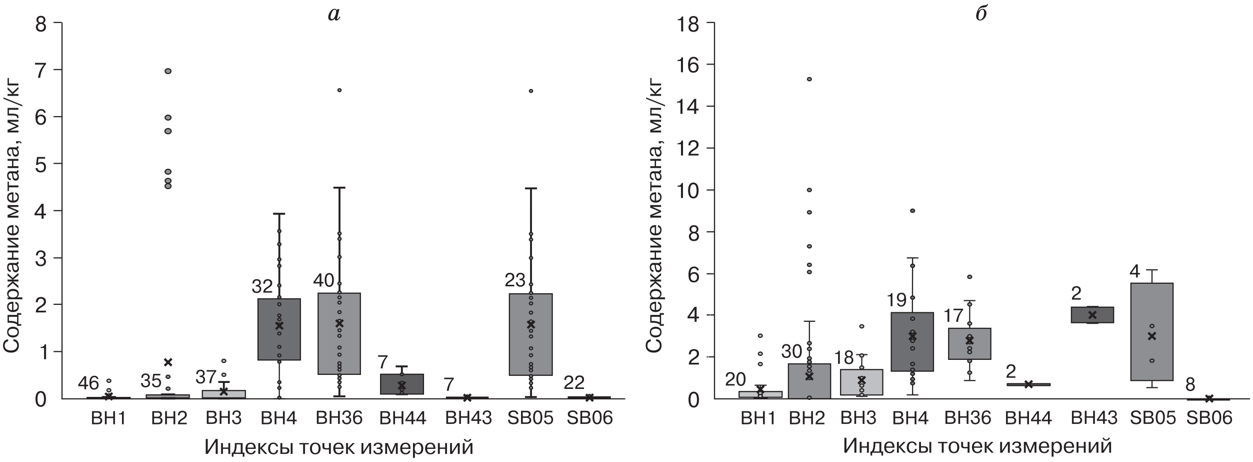

Рис. 4. “Бокс-плот”-диаграммы содержания метана в точках наблюдения на стационаре Марре-Сале в сезонноталых породах слоя сезонного оттаивания (*а*) и мерзлых породах верхнего горизонта мерзлоты (*б*).

Цифры – количество значений в выборках.

ландшафты характеризуются значительно меньшим содержанием метана в оттаивающих отложениях (см. рис. 4). В увлажненной области типичной тундры (точка BH3) среднее содержание метана составляло (0.13 ± 0.18) мл/кг, в точке BH44 (озерное понижение) равно (0.28 ± 0.23) мл/кг. В слое СТС влажной поверхности ровной тундры (точка BH1), дренированных ландшафтов песчаных полей (точка BH43) и высокой поймы р. Марре-Яха (точка SB06) содержание метана было менее 0.1 мл/кг. На основе полученных данных можно полагать, что существует определенная тенденция к увеличению содержания метана с ростом степени увлажненности поверхности ландшафта и влажности пород в СТС, но такая связь не является линейной и наблюдается не повсеместно.

Во всех случаях в слое ВГМ содержание метана больше, чем в СТС (см. рис. 4). Разница в пропорциональном соотношении между содержанием метана в ВГМ и СТС для различных типов ландшафтов существенна и составляет от 130–150 до 500–600 % и выше. Максимальные содержания метана наблюдаются вблизи кровли слоя ВГМ и на 0.3–0.5 м глубже максимально зафиксированной мощности СТС. Ниже по разрезу содержание метана постепенно понижается. Аналогичное распределение метана ранее было установлено для разрезов северо-востока Сибири [*Краев, Ривкина, 2017*].

В целом в слое ВГМ высокие содержания метана (более 2.7 мл/кг) получены для ландшафтов BH43, BH36, BH4, BH2a, SB05. Большее содержание метана в слое ВГМ получено главным образом для ландшафтов, в которых и в СТС наблюдалось высокое содержание метана. В единичном случае в точке BH43 (дренированная поверхность песчаного раздува) для подстилающих мерзлых отложений получены высокие значения содержания метана (среднее содержание метана (5.14 ± 1.9) мл/кг при максимальном значении 7.29 мл/кг), хотя в СТС содержание метана было исключительно низким. Вероятно, это можно объяснить высокой дренированностью верхнего горизонта песчаных отложений, что не обеспечивало анаэробных условий и образования метана.

В районе устья Печоры определение содержания CH_4 проводилось на участках в пределах нескольких ландшафтных структур (рис. 5).

Высокое содержание метана в районе устья р. Печора в талых породах СТС отмечено в точках 20P3 и 20P4, среднее содержание CH_4 составило (1.24 ± 1.08) мл/кг (максимум 2.5 мл/кг) и (1.1 ± 0.83) мл/кг (максимум 1.9 мл/кг) соответственно. В точке 20P2 среднее содержание метана в СТС составило (0.42 ± 0.2) мл/кг (максимум 0.67 мл/кг), в точке 20P6 в среднем (0.24 ± 0.19) мл/кг (максимум 0.41 мл/кг). На участках в точках 20P1 и 20P7 в СТС получены незначительные содержания CH_4 – менее 0.05 мл/кг. В приведенных данных, как и для территории Марре-Сале, отмечается некоторое увеличение количества CH_4 на более увлажненных ландшафтах по сравнению с дренированными поверхностями.

В ВГМ отбор пород в мерзлом состоянии производили в точках 20P3, 20P4, 20P6, 20P7. Для всех точек, кроме 20P3, получены более высокие значения содержания CH_4, чем в СТС. Максимальные значения получены для мерзлых пород в береговом уступе на о. Кашин (точка 20P7), в среднем содержание CH_4 составило

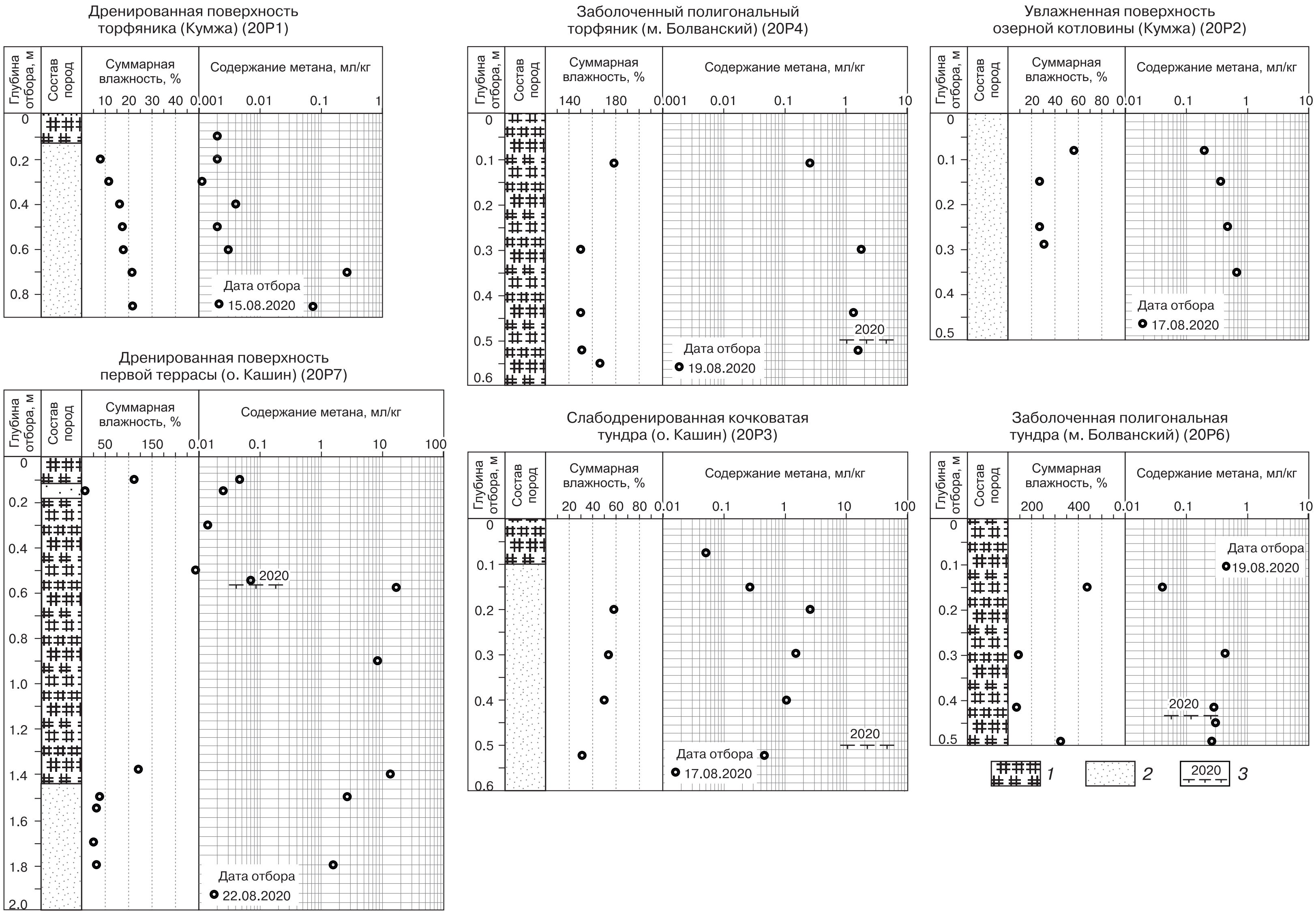

Рис. 5. Изменение содержания метана по глубине в разных типах ландшафтов в районе устья р. Печора.

1 – торф; *2* – песок; *3* – граница сезонноталого слоя на момент отбора проб и год отбора.

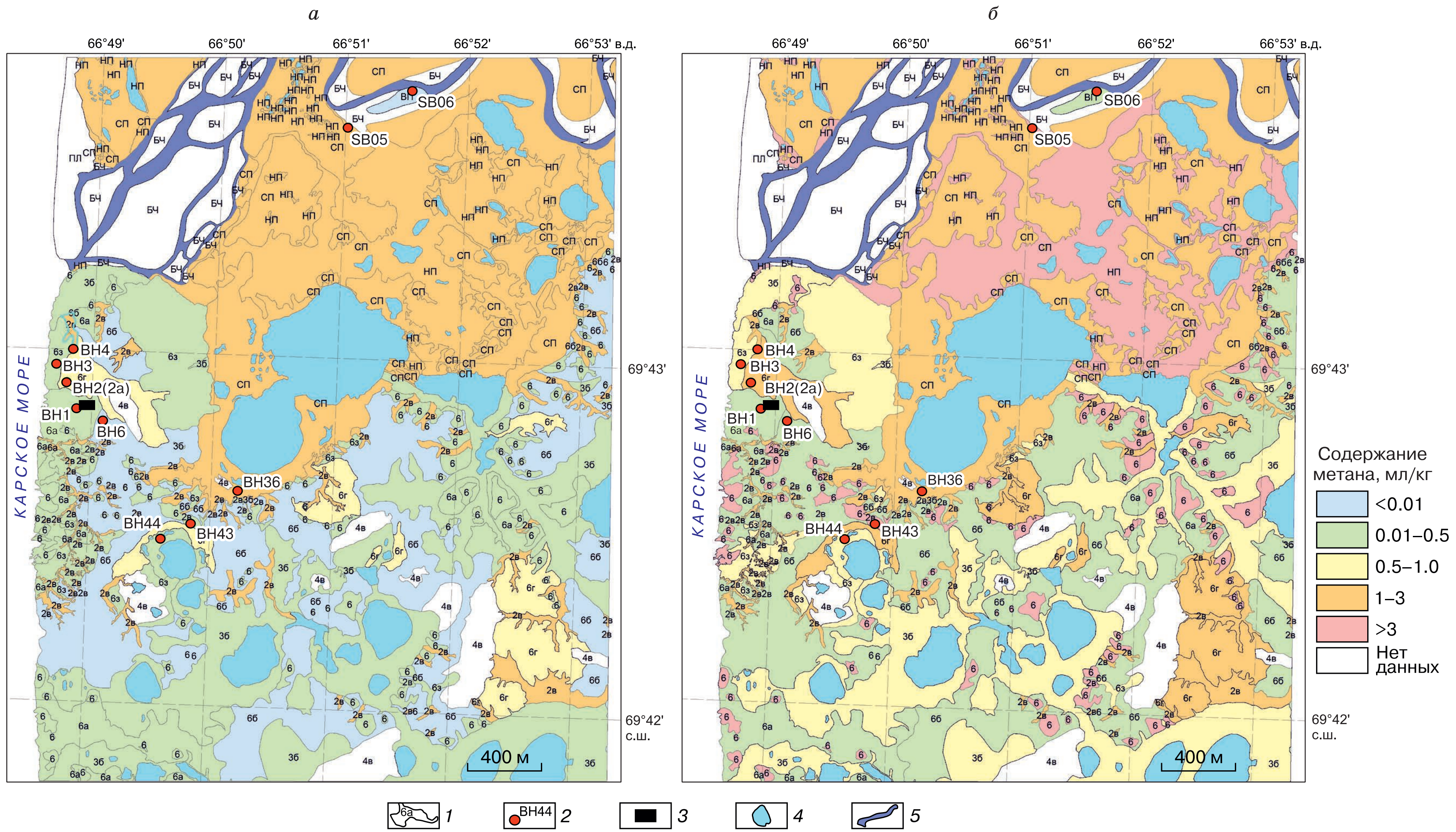

Рис. 6. Карты среднего содержания метана в доминантных ландшафтах района Марре-Сале в талых породах слоя сезонного оттаивания (*а*) и мерзлых породах слоя верхнего горизонта мерзлоты (*б*).

1 – граница и индекс ландшафта (2в – овраги, лога стока поверхностных вод, 3б – озерные понижения, 4в – торфяники, 6 – песчаные раздувы, 6а – дренированные ровные тундры, 6б – полигональные дренированные тундры, 6г – полигональные заболоченные тундры, 6з – ровные увлажненные тундры, НП – низкая пойма, СП – средняя пойма, ВП – высокая пойма, ПЛ – область морского пляжа, БЧ – непокрытые растительностью области между поймой и урезом моря (бечевники)); *2* – точка опробования и ее индекс; *3* – метеостанция Марре-Сале; *4* – озера; *5* – река Марре-Яха.

(8.15 ± 6.14) мл/кг (максимум 15.78 мл/кг). В точке 20Р4 в слое ВГМ содержание CH_4 составило 1.68 мл/кг, в точке 20Р3 – 0.46 мл/кг, в точке 20Р6 – 0.3 мл/кг.

Для отображения пространственного распределения содержания метана в породах СТС и ВГМ для района стационара Марре-Сале составлены карты (рис. 6). Для построения карт содержания метана в СТС и ВГМ была использована ландшафтная карта района исследования, построенная ранее [*Oblogov et al., 2020*]. Для отображения содержания метана в породах осредненные данные в точках были отсортированы на пять неравных градаций и показаны цветовой палитрой.

Составленные карты наглядно иллюстрируют пространственное распределение содержания метана в СТС и подстилающих верхних горизонтах мерзлоты и позволяют оценить количество метана, который будет эмитироваться в атмосферу при разных сценариях климатического потепления и деградации мерзлоты в условиях типичной тундры.

Метан в многолетнемерзлых породах и подземных льдах района Марре-Сале

Данные по содержанию метана в четвертичных ММП и подземных льдах района Марре-Сале были получены в результате изучения обрывистых склонов морского берега высотой от 10 до 30 м (рис. 7) [*Каневский и др., 2005; Стрелецкая и др., 2009, 2018*].

В верхней части разреза с поверхности обнажаются мелко- и тонкозернистые аллювиальные пески голоценового возраста (aIV). В них содержание CH_4 наименьшее среди всех геологических разностей, в среднем всего (0.08 ± 0.1) мл/кг, полученный максимум составляет 0.35 мл/кг.

Под песками залегают континентальные пылеватые слоистые супеси и пески озерно-болотного (lbIII^4) или прибрежно-морского (amIII$^{3-4}$) генезиса, в которых содержание CH_4 на порядок выше, чем в перекрывающих голоценовых песках. Максимальное значение составляет 3.81 мл/кг, в среднем (0.87 ± 1.13) мл/кг.

Супесчано-песчаные отложения (amIII$^{3-4}$) образованы в пределах обширной заозерной приморской равнины [*Стрелецкая и др., 2009*]. В данных отложениях наблюдается высокая вариативность содержания CH_4, максимум значений достигает 6.75 мл/кг, однако в среднем составляет (0.46 ± 1.16) мл/кг.

В основании разреза залегают глины и суглинки с прослоями песков поздненеоплейстоценового возраста (mIII^1) морского и прибрежно-морского генезиса. Суглинисто-глинистые отложения содержат наибольшее количество CH_4. Среднее содержание составляет (1.94 ± 1.62) мл/кг, максимум равен 6.77 мл/кг.

Отложения amIII$^{3-4}$ в центральной части разреза вмещают субгоризонтальные линзы и прослои стекловидного льда с волнообразными изгибами и единичными минеральными включениями. Прослои чистого льда видимой мощностью от первых сантиметров до 1.5 м (в среднем 0.2–0.5 м) чередуются с песчаными (супесчаными) прослоями. Во льду содержатся неравномерно распределенные пузырьки диаметром 1–2 мм округлой либо слабо вытянутой формы, газ в которых находится под давлением. Толща песчаных отложений amIII$^{3-4}$ с включениями линз и прослоев льда визуально воспринимается как единый ледогрунтовый горизонт и объединена в горизонт пластового льда первого типа (ПЛ 1). В линзах льда содержится значительное количество метана. В среднем содержание метана составило (0.98 ± 3.25) мл/кг. В единичном образце линзы льда в отложениях amIII$^{3-4}$ получен абсолютный максимум из всех отобранных образцов по всем геолого-генетическим разностям, составляющий 23.29 мл/кг.

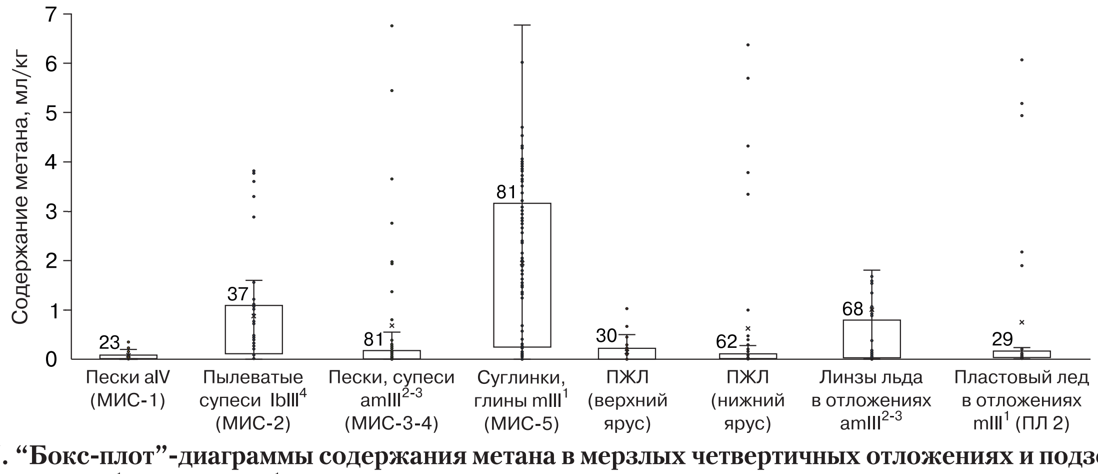

Рис. 7. “Бокс-плот”-диаграммы содержания метана в мерзлых четвертичных отложениях и подземных льдах участка берегового обрыва района Марре-Сале.

Цифры – количество значений в выборках.

Массивная залежь пластового льда второго типа (ПЛ 2) вскрывается в 3.0–3.5 км южнее полярной станции в суглинисто-глинистых отложениях mIII[1]. Видимая мощность более 8 м, нижняя часть уходит под уровень моря. Лед в объеме практически чистый, стекловидный, однако встречаются области со значительными примесями минеральных включений (в основном глинистой и пылеватой фракций) в виде взвеси. Лед включает мелкие пузырьки газа и их скопления, распределенные крайне неравномерно. Газ в пузырьках находится под давлением. Среднее содержание метана в образцах ПЛ 2 составило (0.76 ± 1.69) мл/кг, максимум достигает 6.07 мл/кг.

В разрезе выделяются две генерации повторно-жильных льдов (ПЖЛ). Голоценовые ПЖЛ верхнего яруса имеют четкую клиновидную форму, часто надстраивают нижний ярус более древних жил. Жилы шириной поверху 0.5–1.2 м и высотой 1.0–3.5 м образуют решетку со стороной полигона 6–8 м. Образованы по сингенетическому типу роста, на что указывает относительно высокая льдистость вмещающих песков и торфа. Лед жил содержит многочисленные вертикально ориентированные пузырьки газа размером до 3 мм. Среднее содержание метана в образцах ПЖЛ голоценового возраста составило (0.15 ± 0.24) мл/кг, максимум 1.03 мл/кг.

Крупные ПЖЛ нижнего яруса начали формироваться в конце МИС-3 и продолжили активный рост в МИС-2 [*Forman et al., 2002*]. Жилы шириной поверху 1.5–4.0 м и высотой до 10 м образуют решетку со стороной полигона 10–20 м. ПЖЛ сингенетического типа, на что указывает, в частности, периодически встречающаяся поясковая криотекстура вмещающих отложений. Хвосты жил в центральной части участка берегового обрыва входят в массив ПЛ 1, при этом ветвятся и изгибаются в различных направлениях. Лед жил прозрачный с тонкими вертикально ориентированными прослоями минеральных включений песчано-пылеватой фракции. Многочисленные пузырьки газа размером 0.1–2.0 мм вытянуты во льду вертикально. Среднее содержание метана в образцах ПЖЛ плейстоценового возраста составило (0.63 ± 1.89) мл/кг, максимум 11.11 мл/кг.

Содержания CH_4 в пределах одной геолого-генетической разности могут различаться на несколько порядков в зависимости от конкретного места отбора пробы. Это прежде всего актуально для пластовых льдов района, где в образцах, отобранных в пределах нескольких десятков сантиметров друг от друга, получены совершенно разные значения. Распределения содержания CH_4 в мерзлых четвертичных отложениях и подземных льдах в районе Марре-Сале приведены на рис. 8.

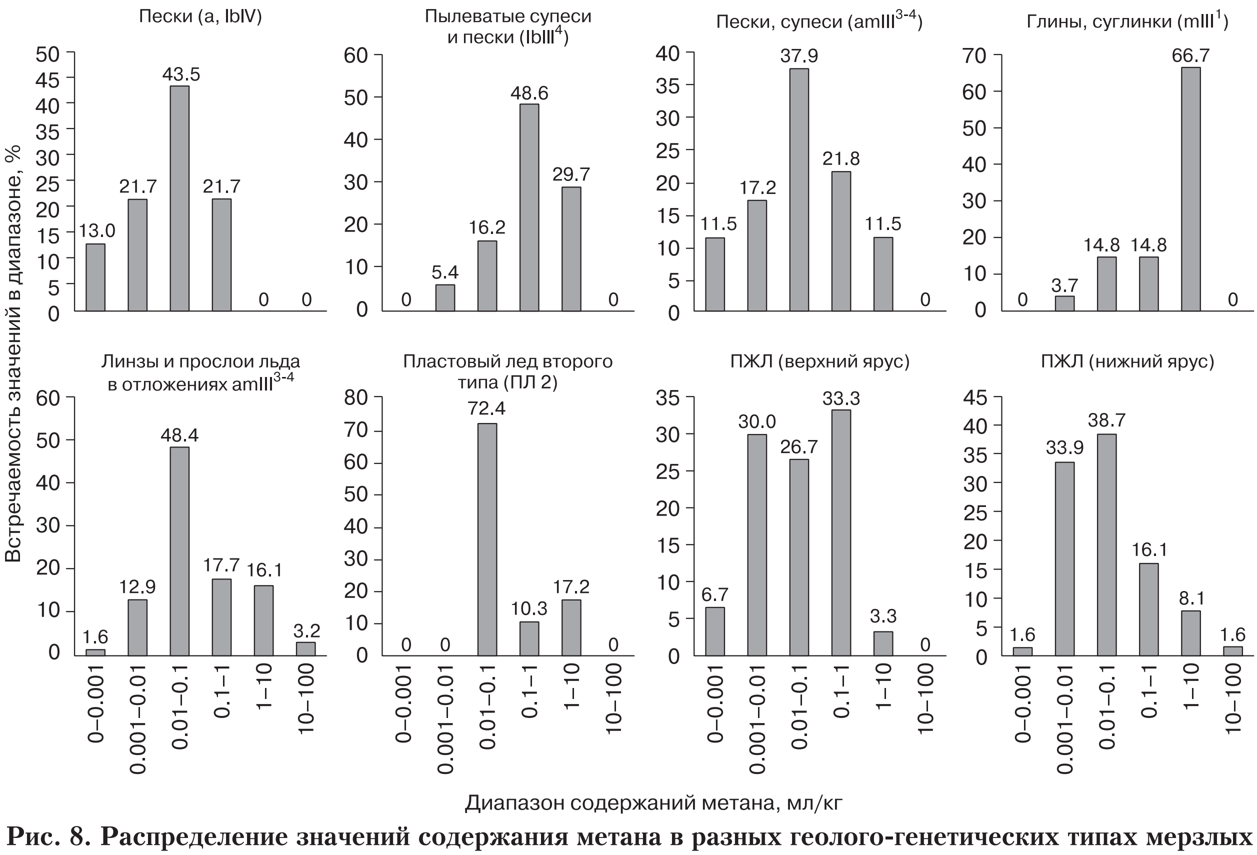

Рис. 8. Распределение значений содержания метана в разных геолого-генетических типах мерзлых пород и подземных льдов в районе Марре-Сале.

Видно, что в большинстве рассматриваемых геолого-генетических разностей характер распределения CH_4 приближен к логнормальному. При этом в основном максимум значений наблюдается в диапазоне 0.01–0.10 мл/кг. Значимые отклонения от логнормального распределения наблюдаются лишь для морских суглинисто-глинистых отложений mIII[1], где есть выраженное преобладание значений в диапазоне 1–10 мл/кг, и для значений ПЛ 2, где преобладание относится к диапазону 0.01–0.10 мл/кг.

Полученные данные свидетельствуют об очень высокой изменчивости содержания метана в четвертичных ММП и подземных льдах. Тем не менее для каждого геолого-генетического типа характерны собственные показатели содержания метана, свидетельствующие о влиянии условий формирования и промерзания на содержание метана. Таким образом, метан может выступать дополнительным индикатором для геокриологического расчленения мерзлых толщ.

Эмиссия метана с поверхности доминантных ландшафтов Марре-Сале

Измерения удельных потоков CH_4 в атмосферу (эмиссия метана) проводились на территории Марре-Сале в конце июля–начале августа в 2018, 2019, 2020 гг. на 9 ключевых точках (BH1, BH2, BH2a, BH3, BH4, BH36, BH44, SB05, SB06) в пределах 8 доминантных ландшафтов. Измерения не проведены лишь в пределах ландшафтов торфяников, дренированной поверхности песчаных раздувов, на бечевниках р. Марре-Яха, морском пляже. Для подобных типов ландшафтов ранее было установлено практически полное отсутствие потоков метана [*Kwon et al., 2017*].

Всего было проведено 26 четырехчасовых эксперимента при температуре поверхности от 5.7 до 20.0 °С. Результаты измерений представлены на рис. 9.

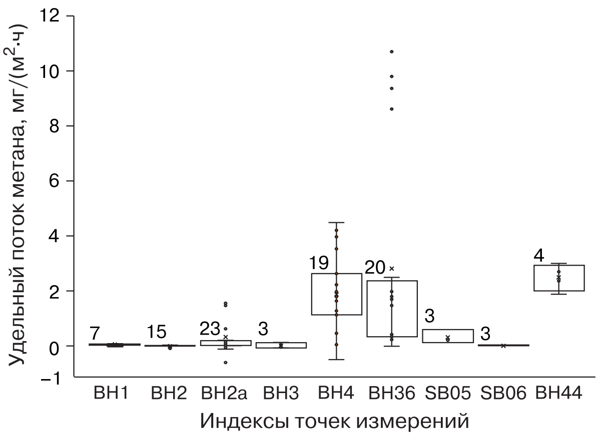

Рис. 9. "Бокс-плот"-диаграммы удельного потока метана с доминантных ландшафтов района Марре-Сале.

Цифры – количество значений в выборках.

Отчетливо выделяется несколько типов ландшафтов с высокими положительными значениями удельных потоков метана. Это заболоченная поверхность поймы реки (точки BH36, SB05), заболоченное понижение стока поверхностных вод (точка BH4), заболоченная поверхность озерной котловины (точка BH44), сильно увлажненная поверхность полигонального понижения (точка BH2a). Максимальное значение удельного потока метана получено в точке BH36 и составило 10.7 мг/(м^2·ч) при температуре поверхности 20.0 °С. В точке BH4 наибольшее значение потока метана составило 4.5 мг/(м^2·ч) при температуре поверхности 16.9 °С, в точке BH44 эти значения составляют 2.99 мг/(м^2·ч) и 17.1 °С соответственно. Наибольшее значение потока метана в точке BH2a (1.5 мг/(м^2·ч)) получено при температуре поверхности 13.1 °С. В остальных точках значения удельного потока всегда менее 0.1 мг/(м^2·ч). Примерно такие же потоки метана были измерены ранее в различных экосистемах Аляски в зоне сплошного распространения ММП [*Euskirchen et al., 2017*].

На графике соотношений удельных потоков метана и температуры поверхности, измеренной

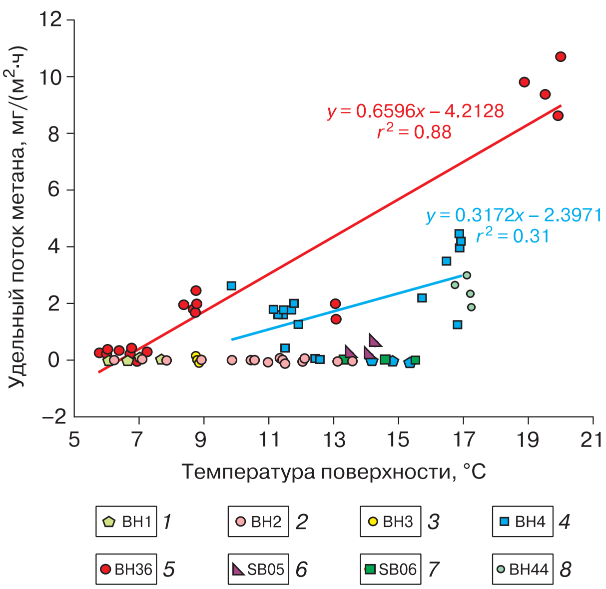

Рис. 10. Соотношение удельных потоков метана и температуры поверхности возле точек измерений в доминантных ландшафтах района Марре-Сале.

1–*8* – точка измерений и ее индекс в ландшафте: *1* – дренированная ровная тундра, *2* – полигональная дренированная тундра, *3* – ровная увлажненная тундра, *4* – ложбина стока поверхностных вод (лог), *5* – средняя пойма реки, *6* – низкая пойма реки, *7* – высокая пойма реки, *8* – озерное понижение. Для некоторых рядов данных представлены линейные тренды.

возле камеры в момент отбора проб, отчетливо прослеживается тенденция возрастания потоков метана при увеличении температуры поверхности (рис. 10). Наилучшим образом это выражено для ландшафтов с большими значениями потока метана. В частности, в точке ВН36 можно выделить три диапазона температур, при которых были проведены измерения. При температуре поверхности от 5.7 до 7.2 °С наблюдался наименьший поток метана, близкий нулю или отрицательный. При температуре поверхности около 8–9 °С значения потока метана ощутимо выросли и составили от 1.68 до 2.47 мг/(м^2·ч). Наибольший поток метана 8.6–10.7 мг/(м^2·ч) в точке ВН36 был получен при температуре от 18.8 до 20.0 °С.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований в Марре-Сале и устье р. Печора получены новые статистически достоверные данные по содержанию метана в талой части слоя сезонного оттаивания и в подстилающем верхнем горизонте ММП (переходном и промежуточном слоях мерзлоты).

В Марре-Сале наибольшее содержание метана в СТС было зафиксировано на заболоченных ландшафтах средней и низкой поймы. Среднее содержание метана составило (1.59 ± 1.36) и (1.57 ± 2.62) мл/кг соответственно. Для третьей морской террасы высокое содержание метана в СТС получено в заболоченном понижении стока поверхностных вод (логе) и на поверхности полигональной тундры. В хорошо дренированных ландшафтах (дренированная поверхность типичной тундры, песчаные раздувы и др.) отмечено наименьшее содержание метана в СТС. Закономерное увеличение содержания CH_4 с глубиной в СТС, вероятно, указывает на важную роль диффузионного механизма переноса метана к поверхности.

В породах ВГМ содержание метана до 5–6 раз больше, чем в СТС (в среднем 3 мл/кг). Большое содержание метана в слое ВГМ получено главным образом для ландшафтов, в которых и в СТС наблюдалось высокое содержание метана. Повышенное содержание CH_4 в слое ВГМ объясняется проникновением метана в нижележащие слои во время осеннего промерзания СТС.

Из-за высокого содержания метана переходную зону мерзлоты следует рассматривать как значительный потенциальный источник метана, который будет вовлечен в оборот парниковых газов в атмосфере в случае деградации ММП.

Проведен анализ содержания и распределения метана в различных геолого-генетических типах четвертичных ММП и подземных льдах различного генезиса в районе Марре-Сале. Установлено, что наибольшее количество метана содержится в суглинисто-глинистых отложениях морского генезиса (mIII^1) (в среднем около 2 мл/кг, максимум 6.77 мл/кг), залегающих в основании разреза и составляющих большую часть объема пород, обнажающихся в береговом разрезе. Также высокие значения содержания метана установлены для подземных льдов района. В прослоях и линзах стекловидного льда, залегающих в аллювиально-морских (прибрежно-морских) супесчано-песчаных отложениях (amIII$^{3-4}$) получен абсолютный максимум содержания метана 23.29 мл/кг, хотя в среднем в данном типе льдов его содержание не превышает 1 мл/кг. Показано, что содержание метана в пределах одной геолого-генетической разности может различаться на несколько порядков в зависимости от места отбора пробы. Характер распределения метана для большинства выделенных геолого-генетических типов мерзлых пород и подземных льдов приближен к логнормальному.

Определены пиковые значения удельных потоков метана в атмосферу с поверхностей ландшафтов типичной тундры в районе Марре-Сале. Устойчивые значительные потоки наблюдались для участков заболоченной поверхности низкой и средней поймы, заболоченных понижений стока поверхностных вод, заболоченных поверхностей озерных котловин, сильно увлажненных поверхностей полигональных понижений. Максимальное значение потока метана (10.7 мг/(м^2·ч)) получено на средней пойме при температуре поверхности около 20.0 °С. На поверхностях слабо увлажненных и дренированных ландшафтов значения удельного потока метана всегда менее 0.1 мг/(м^2·ч). Учитывая ландшафтную структуру района Марре-Сале, источниками существенной эмиссии метана являются 45–50 % территории.

Благодарности. *Работа выполнена при поддержке РНФ (грант 22-27-00181). Криолитологические исследования проведены в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды” и госзадания “Эволюция криосферы при изменении климата и антропогенном воздействии” № 121051100164.*

Литература

Глаголев М.В. Измерение газообмена на границе почва/атмосфера / М.В. Глаголев, А.Ф. Сабреков, В.С. Казанцев. Томск, Изд-во Том. гос. пед. ун-та, 2010, 96 с.

Каневский М.З., Стрелецкая И.Д., Васильев А.А. Закономерности формирования криогенного строения четвертичных отложений Западного Ямала (на примере района Марре-Сале) // Криосфера Земли, 2005, т. IX, № 3, с. 16–27.

Краев Г.Н., Ривкина Е.М. Накопление метана в промерзающих и мерзлых почвах криолитозоны // Arctic Environ. Res., 2017, vol. 17, No. 3, p. 173–184.

Краев Г.Н., Шульце Э.-Д., Ривкина Е.М. Криогенез как фактор распределения метана в горизонтах мерзлых пород // Докл. РАН, 2013, т. 451, № 6, с. 684–687.

Малкова Г.В. Мониторинг среднегодовой температуры пород на стационаре Болванский // Криосфера Земли, 2010, т. XIV, № 3, с. 3–14.

Павлов А.В., Ананьева Г.В., Дроздов Д.С. и др. Мониторинг сезонноталого слоя и температуры мерзлого грунта на Севере России // Криосфера Земли, 2002, т. VI, № 4, с. 30–39.

Ривкина Е.М., Самаркин В.А., Гиличинский Д.А. Метан в многолетнемерзлых породах Колымо-Индигирской низменности // Докл. РАН, 1992, т. 323, № 3, с. 559–562.

Стрелецкая И.Д., Васильев А.А., Облогов Г.Е. и др. Метан в подземных льдах и мерзлых отложениях на побережье и шельфе Карского моря // Лед и снег, 2018, т. 58, № 1, с. 65–77.

Стрелецкая И.Д., Шполянская Н.А., Крицук Л.Н. и др. Кайнозойские отложения Западного Ямала и проблема их генезиса // Вестн. МГУ. Сер. 5. География, 2009, № 3, с. 50–57.

Anisimov O.A. Potential feedback of thawing permafrost to the global climate system through methane emission // Environ. Res. Lett., 2007, vol. 2, p. 1–7.

Anthony K.W., von Deimling T.S., Nitze I. et al. 21st-century modeled permafrost carbon emissions accelerated by abrupt thaw beneath lakes // Nature Communications, 2018, vol. 9 (3262), p. 1–11.

Christensen T.R. Understand Arctic methane variability // Nature, 2014, vol. 509, p. 279–281.

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 / T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner et al. (Eds.). Cambridge, New York, 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, p. 207–250.

Euskirchen E.S., Bret-Harte M.S., Shaver G.R. et al. Long-term release of carbon dioxide from Arctic Tundra Ecosystems in Alaska // Ecosystems, 2017, vol. 20, p. 960–974.

Forman S.L., Ingolfsson O., Gataullin V. et al. Late Quaternary stratigraphy, glacial limits and paleoenvironments of Maresale area, western Yamal Peninsula, Russia // Quatern. Res., 2002, vol. 21, p. 1–12.

French H., Shur Y. The principles of cryostratigraphy // Earth-Sci. Rev., 2010, vol. 101, No. 3–4, p. 190–206.

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, New York, Cambridge Univ. Press, 616 pp.

Kampbell D.H., Wilson J.T., Vandegrift S.A. Dissolved oxygen and methane in water by a GC Headspace Equilibration Technique // Intern. J. Environ. Analytic. Chemistry, 1989, vol. 36, No. 4, p. 249–257.

Kraev G., Schulze E.-D., Yurova A. et al. Cryogenic displacement and accumulation of biogenic methane in frozen soils // Atmosphere, 2017, vol. 8, No. 6, p. 105.

Kwon M.J., Beuli F., Ilie I. et al. Plants, microorganisms, and soil temperatures contribute to a decrease in methane fluxes on a drained Arctic floodplain // Glob. Chang. Biol., 2017, vol. 23, p. 2396–2412.

McCalley C., Woodcroft B., Hodgkins S. et al. Methane dynamics regulated by microbial community response to permafrost thaw // Nature, 2014, vol. 514, p. 478–481.

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, p. 3185–3204.

Oblogov G.E., Vasiliev A.A., Streletskaya I.D. et al. Methane content and emission in the permafrost landscapes of Western Yamal, Russian Arctic // Geosciences, 2020, vol. 10, No. 10, p. 412.

Sachs T., Giebels M., Wille C. et al. Methane emission from Siberian wet polygonal tundra on multiple spatial scales: Vertical flux measurements by closed chambers and eddy covariance, Samoylov Island, Lena River Delta // Proc. of the 9th Intern. Conf. on Permafrost (Fairbanks, 29 June – 3 July 2008). Fairbanks, Alaska, USA, 2008, p. 1549–1554.

Schuur E.A.G., McGuire A.D., Schädel C. et al. Climate change and the permafrost carbon feedback // Nature, 2015, vol. 520, p. 171–179.

Streletskaya 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 (12), p. 434.

Sturtevant C.S., Oechel W.C., Zona D. et al. Soil moisture control over autumn season methane flux, Arctic Coastal Plain of Alaska // Biogeosciences, 2012, vol. 9, p. 1423–1440.

van Huissteden J. Thawing Permafrost: Permafrost Carbon in a Warming Arctic. Springer Nature Switzerland AG, Cham, Switzerland, 2020, 508 p.

Walz J., Knoblauch C., Böhme L. et al. Regulation of soil organic matter decomposition in permafrost affected Siberian tundra soils – Impact of oxygen availability, freezing and thawing, temperature, and labile organic matter // Soil Biology and Biochemistry, 2017, vol. 110, p. 34–43.

Whalen S., Reeburgh W. Consumption of atmospheric methane by tundra soils // Nature, 1990, vol. 346, p. 160–162.

References

Glagolev M.V., Sabrekov A.F., Kazantsev V.S. Izmerenie gazoobmena na granice pochva/atmosfera [Measurement of gas exchange at the soil / atmosphere boundary]. Tomsk, Tomsk State Pedagogical Univ. Publ. House, 2010, 96 p. (in Russian).

Kanevsky M.Z., Streletskaya I.D., Vasiliev A.A. Formation of cryogenic structure of Quaternary sediments in Western Yamal (by the example of Marre-Sale area). Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2005, vol. IX, No. 3, p. 16–27 (in Russian).

Kraev G.N., Rivkina E.M. Accumulation of methane in freezing and frozen soils of the permafrost zone. Arctic Environ. Res., 2017, vol. 17, No. 3, p. 173–184. DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.3.173 (in Russian).

Kraev G.N., Schulze E.-D., Rivkina E.M. Cryogenesis as a factor in the distribution of methane in frozen horizons. Doklady Akademii nauk [Academy of Sciences Reports], 2013, vol. 451, No. 6, p. 684–687 (in Russian).

Malkova G.V. Mean-annual ground temperature monitoring on the steady-state-station "Bolvansky". Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2010, vol. XIV, No. 3, p. 3–14 (in Russian).

Pavlov A.V., Anan'eva G.V., Drozdov D.S. et al. Monitoring of active layer and the temperature of frozen grounds in the north of Russia. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2002, vol. VI, No. 4, p. 30–39 (in Russian).

Rivkina E.M., Samarkin V.A., Gilichinskiy D.A. Methane in permafrost of the Kolyma-Indigirskaya lowland. Doklady RAS [Russian Academy Sciences Reports], 1992, vol. 323, No. 3, p. 559–562 (in Russian).

Streletskaya I.D., Shpolyanskaya N.A., Kritsuk L.N. et al. Cenozoic deposits of Western Yamal and the problem of their genesis. Vestnik MGU. Seriya 5. Geografiya [Moscow State University Bulletin. Series 5. Geography], 2009, No. 3, p. 50–57 (in Russian).

Streletskaya I.D., Vasiliev A.A., Oblogov G.E. et al. Methane in underground ice and frozen sediments on the coast and shelf of the Kara Sea. Led i Sneg [Ice and Snow], 2018, vol. 58, No. 1, p. 65–77. DOI: 10.15356/2076-6734-2018-1-65-77 (in Russian).

Anisimov O.A. Potential feedback of thawing permafrost to the global climate system through methane emission. Environ. Res. Lett., 2007, vol. 2, p. 1–7. DOI: 10.1088/1748-9326/2/4/045016.

Anthony K.W., von Deimling T.S., Nitze I. et al. 21st-century modeled permafrost carbon emissions accelerated by abrupt thaw beneath lakes. Nature Communications, 2018, vol. 9 (3262), p. 1–11. DOI: 10.1038/s41467-018-05738-9.

Christensen T.R. Understand Arctic methane variability. Nature, 2014, vol. 509, p. 279–281. DOI: 10.1038/509279a.

Ciais P., Sabine hC., 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 / T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner et al. (Eds.). Cambridge, New York, 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, p. 207–250. DOI: 10.1002/2017RG000559.

Euskirchen E.S., Bret-Harte M.S., Shaver G.R. et al. Long-Term Release of Carbon Dioxide from Arctic Tundra Ecosystems in Alaska. Ecosystems, 2017, vol. 20, p. 960–974. DOI: 10.1007/s10021-016-0085-9.

Forman S.L., Ingolfsson O., Gataullin V. et al. Late Quaternary stratigraphy, glacial limits and paleoenvironments of Maresale area, western Yamal Peninsula, Russia. Quatern. Res., 2002, vol. 21, p. 1–12.

French H., Shur Y. The principles of cryostratigraphy. Earth-Sci. Rev., 2010, vol. 101, No. 3–4, p. 190-206. DOI: 10.1016/j.earscirev.2010.04.002.

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, New York, Cambridge Univ. Press, 616 p. DOI: 10.1017/9781009157940.

Kampbell D.H., Wilson J.T., Vandegrift S.A. Dissolved oxygen and methane in water by a GC Headspace Equilibration Technique. Intern. J. Environ. Analytic. Chemistry, 1989, vol. 36 (4), p. 249–257. DOI: 10.1080/03067318908026878.

Kraev G., Schulze E.-D., Yurova A. et al. Cryogenic displacement and accumulation of biogenic methane in frozen soils. Atmosphere, 2017, vol. 8, No. 6, p. 105. DOI: 10.3390/atmos8060105.

Kwon M.J., Beuli F., Ilie I. et al. Plants, microorganisms, and soil temperatures contribute to a decrease in methane fluxes on a drained Arctic floodplain. Glob. Chang. Biol. 2017, vol. 23, p. 2396–2412. DOI: 10.1111/gcb.13558.

McCalley C., Woodcroft B., Hodgkins S. et al. Methane dynamics regulated by microbial community response to permafrost thaw. Nature, 2014, vol. 514, p. 478–481. DOI: 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, p. 3185–3204. DOI: 10.5194/bg-9-3185-2012.

Oblogov G.E., Vasiliev A.A., Streletskaya I.D. et al. Methane content and emission in the permafrost landscapes of Western Yamal, Russian Arctic. Geosciences, 2020, vol. 10, No. 10, p. 412. DOI: 10.3390/geosciences10100412.

Sachs T., Giebels M., Wille C. et al. Methane emission from Siberian wet polygonal tundra on multiple spatial scales: Vertical flux measurements by closed chambers and eddy covariance, Samoylov Island, Lena River Delta. In: Proc. of the 9th Intern. Conf. on Permafrost (Fairbanks, Alaska, 29 June – 3 July, 2008), Fairbanks, 2008, p. 1549–1554.

Schuur E.A.G., McGuire A.D., Schädel C. et al. Climate change and the permafrost carbon feedback. Nature, 2015, vol. 520, p. 171–179. DOI: 10.1038/nature14338.

Streletskaya 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 (12), p. 434. DOI: 10.3390/geosciences8120434.

Sturtevant C.S., Oechel W.C., Zona D. et al. Soil moisture control over autumn season methane flux, Arctic Coastal Plain of Alaska. Biogeosciences, 2012, vol. 9, p. 1423–1440. DOI: 10.5194/bg-9-1423-2012.

van Huissteden J. Thawing Permafrost: Permafrost Carbon in a Warming Arctic. Springer Nature Switzerland AG, Cham, Switzerland, 2020, 508 p. DOI: 10.1007/978-3-030-31379-1.

Walz J., Knoblauch C., Böhme L. et al. Regulation of soil organic matter decomposition in permafrost affected Siberian tundra soils – Impact of oxygen availability, freezing and thawing, temperature, and labile organic matter. Soil Biology and Biochemistry, 2017, vol. 110, p. 34–43. DOI: 10.1016/j.soilbio.2017.03.001.

Whalen S., Reeburgh W. Consumption of atmospheric methane by tundra soils. Nature, 1990, vol. 346, p. 160–162. DOI: 10.1038/346160a0.

Поступила в редакцию 20 декабря 2021 г.,
после доработки – 25 мая 2022 г.,
принята к публикации 13 сентября 2022 г.