

УДК 551.345; 550.46

СОДЕРЖАНИЕ И ЭМИССИЯ МЕТАНА В ТИПИЧНЫХ И ЮЖНЫХ ТУНДРАХ ЗАПАДНОЙ АРКТИКИ

© 2022 г. А. А. Васильев^{1,2}, академик РАН В. П. Мельников^{1,2}, Н. А. Задорожная¹,
Г. Е. Облогов^{1,2,*}, И. Д. Стрелецкая³, А. С. Саввичев⁴

Поступило 31.01.2022 г.

После доработки 16.03.2022 г.

Принято к публикации 28.03.2022 г.

Приведены результаты изучения эмиссии, содержания и изотопного состава метана в грунтах сезонно-талого слоя в зонах типичной и южной кустарниковой тундры Западной Арктики. Метан в грунтах сезонно-талого слоя имеет биогенное происхождение. Максимальные содержания метана наблюдаются в болотах и водосборных понижениях и составляют 1.11 ± 0.95 мгСН₄/кг при максимальном значении 4.6 мгСН₄/кг. В дренированных ландшафтах содержание метана существенно ниже. Для ландшафтов болот установлена высокая корреляция между содержанием метана в грунтах и суммой положительных температур воздуха. Потепление климата вызывает увеличение содержания метана в грунтах сезонно-талого слоя и его повышенную эмиссию. Градиентное распределение содержания метана и его изотопного состава в водонасыщенных и дренированных грунтах позволяет предположить существенный вклад диффузионного механизма транспорта метана к поверхности.

Ключевые слова: метан, эмиссия, изотопный состав, сезонно-талый слой, Западная Арктика

DOI: 10.31857/S2686739722070179

Проблема эмиссии метана в Арктике при потеплении климата относится к приоритетным в связи с потенциальным вовлечением метана, законсервированного в мерзлых породах, в глобальный оборот углерода ([7, 9] и др.). Выбросы метана, который имеет по меньшей мере 28-кратный потенциал глобального потепления (GWP) относительно СО₂ (100 лет) [7], при огромных площадях Арктической и Субарктической тундры, – это одна из серьезных причин увеличения парникового эффекта и изменения климата. Изучение условий накопления и переноса метана имеет не только теоретическое, но и практическое значение, поскольку выбросы метана могут быть причиной образования воронок газовых выбросов и пожаров. Протаивание многолетнемерзлых пород, содержащих значительное количество

метана [11], при потеплении климата неизбежно приведет к возрастанию эмиссии метана в атмосфере.

Многочисленные наблюдения в Арктике показывают, что повышение летних температур вызывает значительное увеличение эмиссии метана [6, 10]. Содержание метана в атмосфере определяется тремя факторами: продуцированием метана в почвах и грунтах сезонно-талого слоя, скоростью эмиссии и скоростью преобразования (окисления) метана в поверхностном слое почвы и атмосфере [5]. При повышении температуры воздуха можно ожидать, что содержание метана в почвах и грунтах сезонно-талого слоя (СТС) и, соответственно, эмиссия этого газа увеличатся.

Поэтому может быть выдвинута гипотеза, что при прочих равных условиях должно наблюдаться соответствие содержания метана в сезонно-талом слое и летней температуры воздуха и грунтов. Это принято в качестве рабочей гипотезы. Как следствие, вслед за широтным градиентом летних температур должен существовать градиент в содержании метана в грунтах СТС.

Метан в почвах и грунтах СТС имеет преимущественно биогенное происхождение и вырабатывается в результате деятельности метаногенных архей в анаэробных условиях [11]. Повышение содержания метана в СТС при возрастании температуры грунтов объясняется ускоренным метаболизмом метаногенных архей и изменением

¹Институт криосферы Земли Тюменского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук, Тюмень, Россия

²Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

³Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского Федерального исследовательского центра Биотехнологии Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: oblogov@mail.ru

их видового состава по мере повышения температуры среды [8].

Существует два основных механизма движения метана в грунтах СТС – пузырьковый и диффузионный ([1] и др.). Очевидно, пузырьковый механизм реализуется при исключительно высоких влажностях грунтов, близких к водонасыщению. При неполном водонасыщении вклад диффузионного переноса метана от глубоких горизонтов грунтов к поверхности становится более существенным. Вероятно, что при пузырьковом механизме переноса в силу высоких скоростей переноса не будет наблюдаться закономерного изменения изотопного состава метана, или эти различия будут невелики, напротив, в случае диффузионного переноса должно наблюдаться ярко выраженное распределение изотопного состава по глубине. Возможен еще перенос метана растениями, но этот процесс и его вклад в общий перенос пока еще недостаточно изучены.

Изучение содержания, изотопного состава и эмиссии метана выполнялось на двух ключевых участках – в зоне типичной тундры в районе полярной станции Марре-Сале (Западный Ямал) и в зоне кустарниковой южной тундры в устье р. Печора.

Климатические условия определены по суточным данным метеостанций Марре-Сале и мыс Константиновский как ближайших к участкам работ. Повышение среднегодовой температуры в среднем по региону с 1970 по 2020 г. составило около 2.8°C, что близко к “жесткому” сценарию климатических изменений [7].

Ключевой участок Марре-Сале расположен на Западном Ямале в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород с среднегодовыми температурами пород –4.5...–2.4°C. Исследования проводятся на расчлененной поверхности третьей морской террасы с абсолютными отметками 15–30 м и участке речной поймы с отметками около 1–3 м. В ландшафтной структуре доминантными являются дренированные полигональные тундры, увлажненные полигональные тундры, озерные котловины и пойменные болота. Остальные тундровые ландшафты имеют подчиненное значение. Отметим, что полным водонасыщением грунтов характеризуются только болота.

В устье р. Печора наблюдения проводятся в районе мыса Болванский и на о. Кашин. Мыс Болванский относится к зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород с среднегодовыми температурами –0.2...–1.2°C, представляет собой типичную кустарниковую южную тундру на полого-холмистой поверхности третьей морской террасы с абсолютными отметками 25–35 м. В ландшафтном строении доминируют увлажненные пятнисто-медальонные кустарниковые тундры. К нижним частям склонов холмов

приурочены травяно-моховые ивняки. В озерных котловинах развиты комплексные осоково-мохово-лишайниковые болота.

Наблюдения на о. Кашин проводятся на поверхности первой морской террасы с абсолютными отметками 2–10 м. Район относится к зоне островного развития многолетнемерзлых пород с среднегодовыми температурами пород –0.2°C. В ландшафтной структуре преобладают увлажненные кустарниковые тундры, торфяники и дренированные кустарниковые тундры.

Наблюдения за эмиссией метана в доминантных ландшафтах проводились, начиная с 2017 г., в первой декаде августа общепринятым методом “стационарных камер”. Мы использовали прозрачные камеры размером 25 × 25 × 25 см, заглубленные в грунт на 3–5 см, что учитывалось при расчете эмиссии. Всего выполнено 26 четырехчасовых эксперимента при температуре поверхности тундр от 5.7 до 20.0°C. Параллельно проводился отбор проб грунтов ненарушенного сложения из керна мелких скважин и стенок шурфов.

Дегазация грунтовых образцов проводилась непосредственно после отбора известным методом “head space”. Методика отбора и дегазации описана ранее [11]. Образцы газа доставлялись в лабораторию ФГБУ ВНИИОкеангеология, где определение состава газов проводилось методом газовой хроматографии на установке с пламенно-ионизационным детектором “SHIMADZU” GC 2014 (производство Японии). Всего изучен газовый состав, включая содержание метана, для 280 образцов талых грунтов СТС в районе Марре-Сале и 31 образец грунта с устья р. Печора.

Измерение $\delta^{13}\text{C}$ метана проводилось с помощью газового хроматографа “Thermo Fisher Scientific”, США и масс-спектрометра Delta Plus, “Thermo Electron Corporation”, Германия, с использованием стандарта, калиброванного по VPDB. Точность определений $\pm 0.1\%$. [4]. Выполнено 39 измерений $\delta^{13}\text{C}$ метана.

Наблюдения за эмиссией метана проводились с 2017 по 2021 г. и позволили проследить влияние температуры поверхности на величину потоков метана в разных ландшафтных условиях. На рис. 1 приведены результаты измерений в контрастных по степени увлажнения ландшафтах типичной тундры. Наблюдениями охвачен температурный диапазон от 5.7 до 20°C. Здесь и далее на всех рисунках приведен коэффициент детерминации R^2 .

Как следует из рис. 1, при температуре около 5–7°C, которая соответствует климатической норме (1961–1990 гг.), удельные потоки метана даже с поверхности болот не превышают 0.5 мг $\text{CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$, в дренированных ландшафтах поток метана при этой температуре близок к нулю. Повышение температуры до 20°C приводит к возрастанию

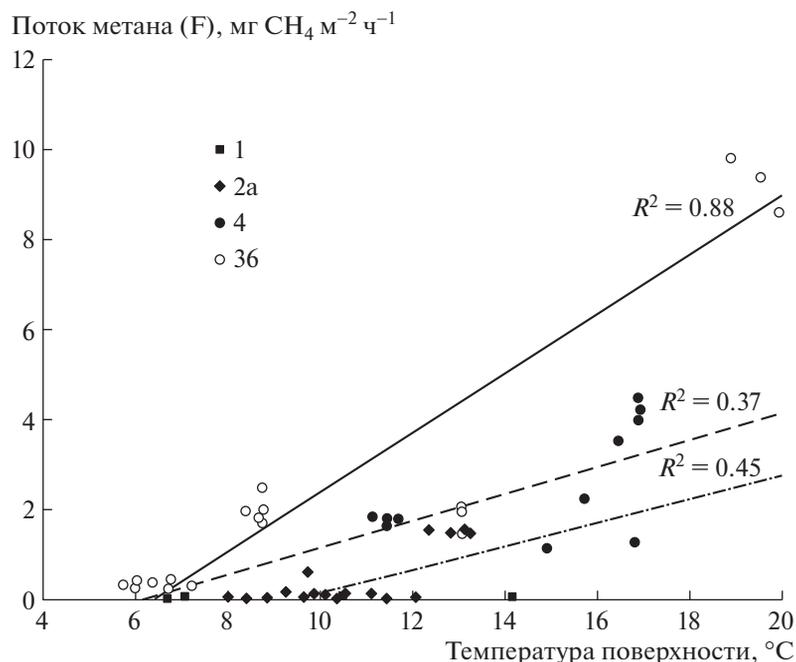


Рис. 1. Зависимость удельных потоков метана от температуры подстилающей поверхности для доминантных ландшафтов типичной тундры. В легенде номера площадок: 1 – дренированная тундра, 2a – увлажненная полигональная тундра, 4 – полоса стока, 36 – пойменное болото. Линии трендов: сплошная линия – болото (36), штриховая линия – водосборное понижение (4), штрихпунктирная линия – увлажненная полигональная тундра (2a), линия тренда для дренированной тундры (1) совпадает с горизонтальной осью.

удельных потоков в болотах до $9.1 \text{ мг CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$, в полосах стока – до $4 \text{ мг CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$, полигональных тундрах до $2.8 \text{ мг CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$. Дренированные ландшафты характеризуются околонулевыми потоками метана даже при высокой температуре поверхности.

Содержание метана пород СТС в Марре-Сале очень сильно меняется в зависимости от ландшафтных условий. Наибольшее содержание метана в СТС отмечено в пойменных болотах, здесь содержание метана составило $1.11 \pm 0.95 \text{ мг CH}_4/\text{кг}$ при максимальном значении $3.19 \text{ мг CH}_4/\text{кг}$. На основной поверхности третьей морской террасы наибольшее содержание метана отмечается для водосборных понижений и логов. Содержание метана здесь составило $1.13 \pm 0.76 \text{ мг CH}_4/\text{кг}$ при максимальном значении $2.75 \text{ мг CH}_4/\text{кг}$. Также сравнительно высокие значения содержания метана в СТС отмечены в увлажненной полигональной тундре – до $0.3 \text{ мг CH}_4/\text{кг}$. В дренированных ландшафтах содержание метана составляет менее $0.1 \text{ мг CH}_4/\text{кг}$.

В районе Печоры также максимальные содержания метана наблюдаются в болотах, до $3.2 \text{ мг CH}_4/\text{кг}$. В дренированных ландшафтах содержание метана такое же низкое, как и в Марре-Сале.

На рис. 2 приведено типичное распределение содержания метана в почвах и породах СТС ландшафтов болот для Марре-Сале и устья р. Печора.

В качестве первого приближения приведены линейные тренды. Аналогичные распределения содержания метана наблюдаются во всех типах ландшафтов, включая и дренированные.

Как видно из рис. 2, для обоих случаев характерно высокоградиентное распределение содержания метана по глубине. От поверхности к основанию СТС содержание метана возрастает на два порядка. Это позволяет предположить существенный вклад диффузионного механизма в вертикальный перенос метана. А. Vrouchkov и М. Fukuda оценивают величину коэффициента диффузии метана для талых супесчаных грунтов Центральной Якутии в 10^{-5} – $10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$ [1]. Схожая точка зрения на роль диффузионного механизма в перенос метана в арктических ландшафтах разной дренированности высказана М. Vgumell и соавт. [2]. По их мнению, вклад диффузионного механизма в транспорт метана тем выше, чем более дренированы грунты. Сравнительно невысокие коэффициенты корреляции на рис. 2 объясняются высокой изменчивостью содержания метана в грунтовых разрезах. Обращает на себя внимание, что данные по Печоре в целом демонстрируют более высокое содержание метана по сравнению с Марре-Сале. Вероятно, это связано с более высокими температурами почв и грунтов в районе Печоры.

Полученные данные по метану в разных условиях позволяют оценить влияние температуры на

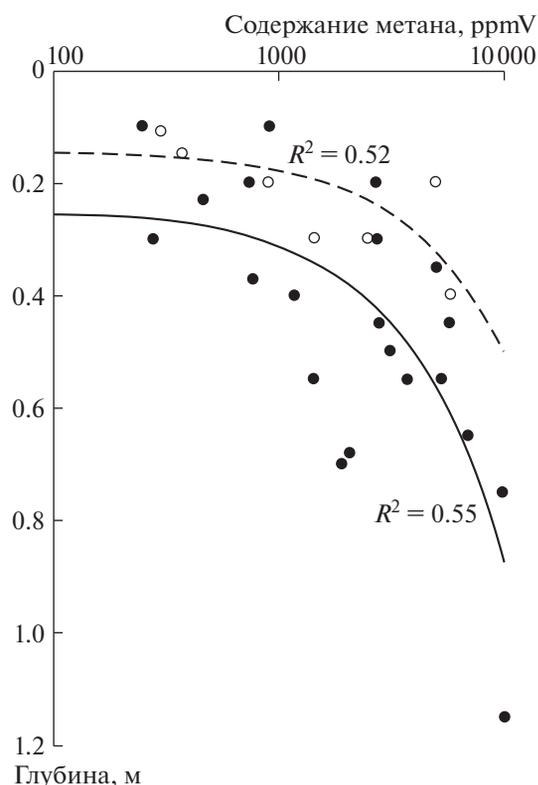


Рис. 2. Типичные распределения содержания метана по глубине в СТС. Сплошные кружочки и линия – Марре-Сале, прозрачные кружочки и прерывистая линия – устье р. Печора.

его содержание в СТС. На рис. 3 приведено содержание метана в доминантных ландшафтах типичной и южной тундры в зависимости от суммы положительных температур воздуха на момент опробования, которая в данном случае выступает мерой тепла, поступающего в грунт. Каждая точка на графике представляет собой средневзвешенное

(с учетом неравномерности сетки опробования) значение из 4–10 проб.

Южные и типичные тундры обладают разными наборами зональных ландшафтов, поэтому прямое сравнение будет не совсем корректным. Однако возможно сравнение по аazonальным ландшафтам, которые присутствуют в обеих биоклиматических зонах. Такими аazonальными ландшафтами являются болота и торфяники. Изучение содержания метана в торфяниках не проводилось из-за их незначительной площади в пределах исследуемых биоклиматических зон. Для болот (рис. 3) существует явная положительная связь между суммой положительных температур воздуха и содержанием метана в грунтах СТС, что подтверждает выдвинутую гипотезу о повышении содержания метана в СТС при потеплении климата. Коэффициент детерминации составляет 0.75, а общий тренд для региона, рассчитанный для всей совокупности данных, составляет всего 0.22, однако это объясняется не столько низким влиянием положительных температур, сколько высокой естественной изменчивостью содержания метана в грунтах от ландшафта к ландшафту.

Изотопный состав углерода метана закономерно меняется по глубине. В качестве примера на рис. 4 приведено изменение $\delta^{13}\text{C}$ метана по глубине для ландшафтов болот.

Как следует из рис. 4, наблюдается хорошо выраженная сепарация метана по изотопному составу в толще пород СТС. В верхних горизонтах СТС метан характеризуется более тяжелым изотопным составом углерода по сравнению с более низкими горизонтами. При этом, несмотря на недостаток данных, метан в районе Печоры обладает более тяжелым изотопным составом по сравнению с Марре-Сале. Похожие распределения изотопно-

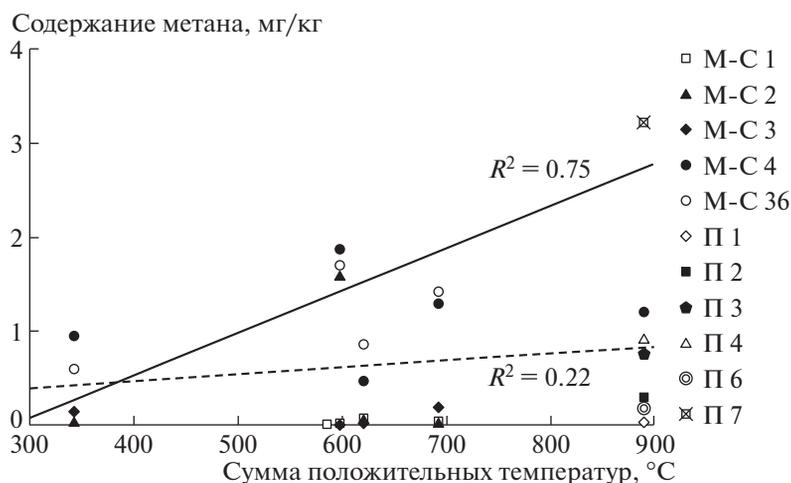


Рис. 3. Соотношение между содержанием метана в СТС и суммой положительных температур в доминантных ландшафтах. Сплошная прямая линия – тренд для ландшафтов болот, прерывистая линия – общий региональный тренд. Индексом М-С обозначены площадки отбора проб в Марре-Сале, индексом П – в районе устья Печоры.

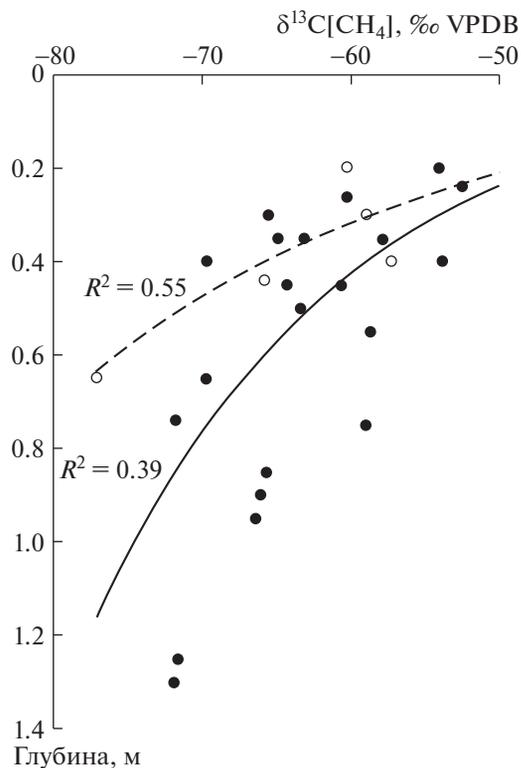


Рис. 4. Изменение изотопного состава углерода метана по глубине в ландшафтах болот. Условные обозначения те же, что на рис. 2.

го состава были получены и для ландшафтов с неводонасыщенными породами.

Сепарация метана по глубине объясняется утяжелением изотопного состава при переносе метана к поверхности, сопровождаемым микробным окислением. Известно, что при потреблении метана метанотрофными бактериями в окислительной среде, так же как микробным сообществом архей и бактерий (АОМ) в анаэробных условиях, преимущественно используется “легкий” $^{12}\text{C}\text{H}_4$ метан [3, 12]. Углерод органического вещества биомассы, так же, как и углерод CO_2 и карбонатов наследуют “легкий” изотоп. При этом в остаточном метане увеличивается содержание “тяжелого” изотопа ($^{13}\text{C}-\text{CH}_4$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наблюдения за эмиссией метана, проведенные в диапазоне температур $5.7-20.0^\circ\text{C}$, показали возрастание удельного потока метана в атмосферу в болотах с 0.5 до $9.1 \text{ мг CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$, полосах стока — до $4 \text{ мг CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$, полигональных тундрах до $2.8 \text{ мг CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$. Дренированные ландшафты характеризуются околонулевыми потоками метана даже при высокой температуре поверхности. Полученные зависимости позволяют оценить эмиссию метана в биоклиматических зо-

нах типичной и южной тундры Западной Арктики при потеплении климата с учетом ландшафтной структуры. Ключевыми источниками эмиссии метана в типичной и южной тундрах при потеплении климата являются болота, водосборные понижения и лога, в меньшей степени — увлажненные полигональные тундры.

Наиболее высокие содержания метана наблюдаются в грунтах болот и достигают $4.59 \text{ мг CH}_4/\text{кг}$. Промежуточными значениями содержания характеризуются ландшафты водосборных понижений и логов (до $2.75 \text{ мг CH}_4/\text{кг}$), в увлажненных полигональных тундрах содержание метана составляет $0.3 \text{ мг CH}_4/\text{кг}$. В дренированных ландшафтах содержание метана не превышает $0.1 \text{ мг CH}_4/\text{кг}$. Содержание метана по глубине характеризуется высоко градиентным распределением как в водонасыщенных, так и в неводонасыщенных грунтах. Установлена тесная положительная связь между суммой положительных температур и содержанием метана в грунтах для ландшафтов болот. Общий региональный тренд влияния потепления на содержание метана в грунтах характеризуется низким коэффициентом корреляции.

Исследование изотопного состава углерода метана показали его закономерное изменение по глубине. Верхние горизонты сезонно-талого слоя характеризуются более тяжелым изотопным составом по сравнению с глубокими горизонтами. Такое разделение изотопного состава объясняется утяжелением изотопного состава при переносе метана к поверхности, сопровождаемым микробным окислением.

Градиентное распределение содержания метана во всех типах ландшафтов от водонасыщенных до дренированных, закономерное утяжеление изотопного состава углерода метана от глубоких горизонтов к поверхности, по нашему мнению, свидетельствуют о существенной роли диффузионного переноса метана, особенно в неводонасыщенных грунтах.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны рецензенту М.В. Глаголеву за высказанные замечания и рекомендации, способствовавшие улучшению работы.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант 22-27-00181. Изотопные исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Brouchkov A., Fukuda M.* Preliminary Measurements on Methane Content in Permafrost, Central Yakutia, and some Experimental Data // *Permafrost Periglac. Process.* 2002. V. 13. P. 187–197. <https://doi.org/10.1002/ppp.422>
2. *Brummell M.E., Farrell R.E., Siciliano S.D.* Greenhouse Gas Soil Production and Surface Fluxes at a High Arctic Polar Oasis // *Soil Biology & Biochemistry.* 2012. V. 52. P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.03.019>
3. *Coffin R.B., Hamdan L.J., Smith J.P., Rose P.S., Plummer R.E., Yoza B., Pecher I., Montgomery M.T.* Contribution of Vertical Methane Flux to Shallow Sediment Carbon Pools across Porangahau Ridge, New Zealand // *Energies.* 2014. V. 7. P. 5332–5356. <https://doi.org/10.3390/en7085332>
4. *Cooper L.W., Savvichev A.S., Grebmeier J.M.* Abundance and Production Rates Heterotrophic Bacterioplankton in the Context of Sediment and Water Column Processes in the Chukchi Sea // *Oceanography.* 2015. V. 28. № 3. P. 84–99. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2015.59>
5. *Dean J.F., Middelburg J.J., Röckmann T., Aerts R., Blauw L.G., Egger M.* Methane Feedbacks to the Global Climate System in a Warmer World // *Reviews of Geophysics.* 2018. No 56. P. 207–250. <https://doi.org/10.1002/2017RG000559>
6. *Euskirchen E.S., Bret-Harte M.S., Shaver G.R., Edgar C.W., Romanovsky V.E.* Long-Term Release of Carbon Dioxide from Arctic Tundra Ecosystems in Alaska // *Ecosystems.* 2017. V. 20. P. 960–974. <https://doi.org/10.1007/s10021-016-0085-9>
7. IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1535 p.
8. *McCalley C., Woodcroft B., Hodgkins S., Wehr R., Kim E., et al.* Methane Dynamics Regulated by Microbial Community Response to Permafrost Thaw // *Nature.* 2014. V. 514. P. 478–481. <https://doi.org/10.1038/nature13798>
9. *Melnikov V.P., Osipov V.I., Brouchkov A.V., et al.* Climate Warming and Permafrost Thaw in the Russian Arctic: Potential Economic Impacts on Public Infrastructure by 2050 // *Natural Hazards.* 2022. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05179-6>
10. *Oblogov G.E., Vasiliev A.A., Streletskaya I.D., Zadorozhnaya N.A., Kuznetsova A.O., Kanevskiy M.Z., Semenov P.B.* Methane Content and Emission in the Permafrost Landscapes of Western Yamal, Russian Arctic // *Geosciences.* 2020. V. 10. No 10. 412. <https://doi.org/10.3390/geosciences10100412>
11. *Streletskaya I.D., Vasiliev A.A., Oblogov G.E., Streletskiy D.A.* Methane Content in Ground Ice and Sediments of the Kara Sea Coast // *Geosciences.* 2018. V. 8. No 12. 434. <https://doi.org/10.3390/geosciences8120434>
12. *Treude T., Orphan V., Knittel K., Gieseke A., House C.H., Boetius A.* Consumption of Methane and CO₂ by Methanotrophic Microbial Mats from Gas Seeps of the Anoxic Black Sea // *Appl. Environ. Microbiol.* 2007. V. 73. № 7. P. 2271–2283. <https://doi.org/10.1128/AEM.02685-06>

METHANE CONCENTRATION AND EMISSION IN TYPICAL AND SOUTHERN TUNDRAS OF THE WESTERN RUSSIAN ARCTIC

A. A. Vasiliev^{a,b}, Academician of the RAS V. P. Melnikov^{a,b}, N. A. Zadorozhnaya^a,
G. E. Oblogov^{a,b,#}, I. D. Streletskaya^c, and A. S. Savvichev^d

^a*Institute of Earth's Cryosphere, Tyumen Scientific Center, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tyumen, Russian Federation*

^b*Tyumen State University, Tyumen, Russian Federation*

^c*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

^d*Winogradsky Institute of Microbiology Research Center of Biotechnology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[#]*E-mail: oblogov@mail.ru*

In this paper, we present the results of our study of the emission, content, and isotopic composition of methane in soils of the active layer in the zones of typical and southern shrubby tundra of the Western Russian Arctic. Methane in soils of the active layer is of biogenic origin. Maximum methane contents have been measured in bogs and catchment depressions and are 1.11 ± 0.95 mg CH₄/kg with a maximum value of 4.6 mg CH₄/kg. In well-drained landscapes, the methane content is significantly lower. For bog landscapes, a strong correlation between methane contents in the soils and sums of positive air temperatures has been determined. Climate warming causes an increase in the methane content in soils of the active layer and higher methane emission. The gradient distribution of methane content and its isotopic composition in water-saturated and drained soils indicates a significant contribution of the diffusion mechanism to the methane transport towards the surface.

Keywords: methane, emission, isotopic composition, active layer, Western Russian Arctic