

МЕТАН В ПОКРОВНОМ СЛОЕ ЛАНДШАФТОВ ТИПИЧНОЙ ТУНДРЫ МАРРЕ-САЛЕ (ЗАПАДНЫЙ ЯМАЛ)

¹Волкова Н.В., ^{2,3}Облогов Г.Е., ²Задорожная Н.А., ¹Стрелецкая И.Д., ^{2,3}Васильев А.А.

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия; volkova142@gmail.com

²Институт криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН, Тюмень, Россия

³Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

Приведены основные результаты исследований содержания метана в покровном слое в районе полярной станции Марре-Сале на западном побережье полуострова Ямал. Проанализированы данные по концентрациям метана в сезонно-талом (СТС) и переходном слое доминантных ландшафтов типичной тундры. Установлено, что максимальное содержание метана в сезонно-талом слое наблюдается в обводненных и заболоченных ландшафтах поймы и сильно увлажненных понижений на поверхности морской террасы. В хорошо дренированных ландшафтах метан практически отсутствует. В переходном слое содержание метана примерно в 5-6 раз больше, чем в перекрывающем его слое сезонного оттаивания. В связи с этим переходный слой мерзлой толщи следует рассматривать как значительный потенциальный источник метана, который будет вовлечен в оборот парниковых газов в атмосфере в случае оттаивания многолетнемерзлых пород.

Ключевые слова: метан, многолетнемерзлые породы, переходный слой, эмиссия метана, Марре-Сале

Арктика – один из крупнейших регионов воспроизводящих, аккумулирующих и эмитирующих в атмосферу метан (CH_4). Здесь повсеместно распространены многолетнемерзлые породы, которые служат естественным водонепроницаемым слоем, что отражается в заболачивании территорий и обеспечивает наличие анаэробных условий, необходимых для жизнедеятельности метаногенных микроорганизмов. Внимание исследователей обращено, главным образом, к проблеме эмиссии метана при деградации мерзлоты, так как CH_4 является наиболее активным парниковым газом. Он поглощает инфракрасное излучение атмосферы примерно в 25 раз эффективнее, углекислый газ. В многолетнемерзлых породах и подземных льдах различного генезиса законсервированы огромные запасы парниковых газов [Schuur et al., 2015]. Высокое содержания газа в мерзлоте обусловлено достаточно высокими запасами органического углерода, при микробном разложении которого происходит образование парниковых газов. Глобальное потепление климата [IPCC, 2018] приводит к деградации мерзлоты и, вероятно, затронет часть объемов парниковых газов, в настоящий момент находящиеся в «законсервированном» состоянии. Однако, до сих пор содержание метана в мерзлых и оттаивающих четвертичных отложениях различного генезиса изучено недостаточно [Васильев и др., 2015, 2019]. Поэтому особый интерес представляет количество, генезис и распределение метана в мерзлых и

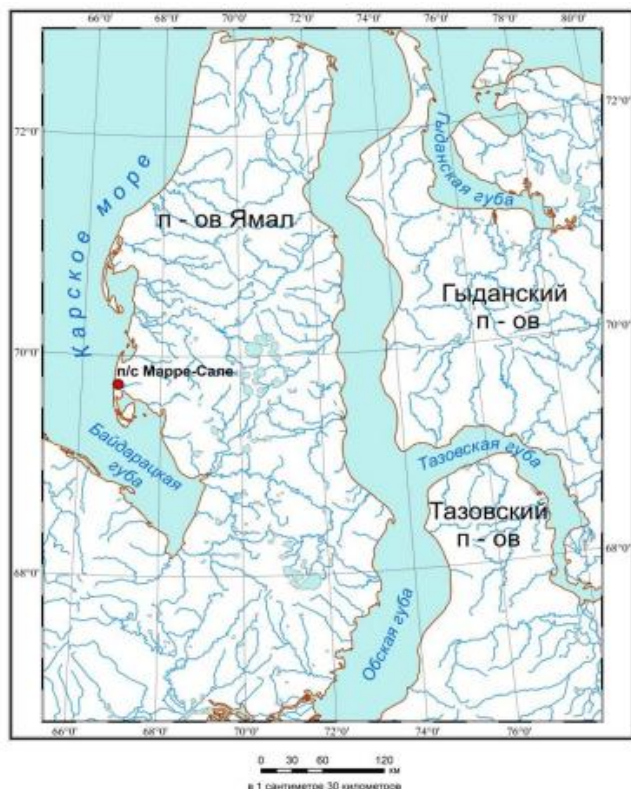


Рис.1. Местоположение района исследования

сезонно-талых отложениях в пределах различных ландшафтов. Значительное количество метана не только поступает в атмосферу, но и может сохраняться в мерзлых породах в течение долгого времени. В горизонтах, которые оттаивают не ежегодно, метан накапливается и «консервируется». Стоит отметить, что с увеличением глубины частота оттаивания уменьшается: от одного раза в несколько лет до одного раза в сотни лет в зависимости от повторяемости экстремально теплых сезонов. Таким образом, метан может накапливаться и сохраняться в мерзлой толще [Краев, Ривкина, 2017]. Особый интерес представляет количественная оценка содержания метана в переходном слое криолитозоны, то есть слое, который оттаивает только в особенно теплые годы. Содержание метана зависит от условий накопления и преобразования (промерзания-оттаивания) породы, которые регламентируют условия жизнедеятельности метаногенных микроорганизмов и сохранность метана в породе. В связи с этим были проведены наблюдения по определению содержания метана в деятельном и переходном слое вечной мерзлоты в доминантных ландшафтах в районе геокриологического стационара Марре-Сале.

Стационар Марре-Сале находится на западном побережье полуострова Ямал (Рис. 1). Территория относится к зоне типичной тундры с морским арктическим климатом. Климат района характеризуется продолжительным периодом с отрицательными температурами воздуха. Среднегодовая T_v в Марре-Сале в 2020г. составила $-1,5$ °С. В среднем по региону с 1970 г. T_v повысилась примерно на $2,8$ °С, что близко к «жесткому» сценарию климатических изменений [IPCC, 2018]. Мерзлота в районе исследования имеет двухслойное строение, где верхний с поверхности слой до глубины около 90 м [Дубровин, Крицук, 2010] представлен твердомёрзлыми породами, а нижний – породами в пластичном состоянии. Среднегодовая температура пород на глубине нулевых годовых амплитуд изменяется в зависимости от ландшафтных условий от $-3,5$ до $-6,0$ °С. В зависимости от типа ландшафта глубина сезонного оттаивания меняется от 0,4 до 2,2 м.

На территории стационара проводятся ежегодные мониторинговые геокриологические работы – наблюдения за температурным режимом мерзлоты, за глубиной сезонного оттаивания, криогенными процессами и др. Исследования содержания метана в слое сезонного оттаивания (СТС) и верхней части разреза многолетнемерзлых пород проводятся с 2012 года ежегодно. Всего за это время было отобрано более 450 образцов, из которых около 280 в талом состоянии из СТС.

Ландшафтная структура территории (Табл.1, Рис. 2) репрезентативна для всей площади типичных тундр полуострова Ямал. Территория стационара расположена преимущественно на третьей морской террасе с высотами 15-30 м над уровнем моря. Поверхность террасы расчленена системами оврагов, а также озерными котловинами. В северной части выделяется обширная область поймы реки Марре-Яха. Пойма сильно заозёрена и заболочена. Озера занимают около 40 % площади поймы. Общая заозеренность рассматриваемой территории составляет около 11 %. На поверхности террасы преобладают слабо увлажнённые полигональные тундры и области озерных понижений, которые в сумме занимают около 57 % площади территорий без учёта площади озер. Другие типы ландшафтов приблизительно равномерно занимают остальную площадь. Все выделенные типы ландшафтов разделяются по степени увлажнённости верхнего слоя почв. В контексте метанообразования, параметр увлажнённости (обводнённости) ландшафтов является первостепенным, так как определяют степень анаэробности, что крайне важно для метаногенных микроорганизмов.

Отбор образцов объемом около 50 см³ для определения содержания метана производился либо из керна неглубоких (до 3 м) скважин, либо из шурфов глубиной до кровли мерзлых отложений с отбором образцов из СТС и верхней части мерзлых пород. После взвешивания образцы помещались в пластиковые шприцы объемом 150 мл. Дегазация производилась методом «HeadSpace» [Alperin, 1985] с использованием высококонцентрированного соляного раствора NaCl и воздуха известного объема (около 50 см³).

Табл. 1. Доминантные типы ландшафтов территории стационара Марре-Сале и содержание метана в верхних горизонтах пород.

Тип ландшафта	Степень увлажненности ландшафта	Номер точки отбора проб	Площадь ландшафта, км ²	Процент от общей площади и территории, %	Средняя глубина оттаивания (2010-2020 г.), см	Содержание метана в талых породах слоя СТС (сред /макс/мин), мл[CH ₄]/кг	Содержание метана в мерзлых породах ВГМ (сред /макс/мин), мл[CH ₄]/кг
Песчаные раздувы	сухой	43	0,42	3,7	141	0,014/0,037/0,003	5,139/7,291/3,677
Овраги, лога	заболоченный	4	0,39	3,4	61	1,544/3,933/0	3,004/8,970/0,211
Озерные котловины	заболоченный	44	1,63	14,2	99	0,286/0,683/0,088	0,733/0,774/0,692
Торфяники	слабо дренированный	-	0,35	3,1	54	-	-
Ровные дренированные тундры	слабо дренированный	1	0,47	4,2	123	0,042/0,379/0	0,468/3,018/0,005
Дренированные полигональные тундры	сухой	6	1,87	16,4	130	0,004/0,008/0,002	0,024
Увлажненные полигональные тундры	слабо дренированный	2, 2а	0,47	4,2	71	0,896/5,632/0	3,117/15,355/0
Ровные увлажненные тундры	слабо дренированный	3	0,41	3,6	74	0,127/0,798/0	0,837/ 3,399/0,054
Высокая пойма	сухой	6	0,02	0,2	-	0,008/0,024/0,002	0,011/0,020/0,003
Низкая пойма	заболоченный	5	1,04	9,1	-	1,577/9,046/0,009	3,013/6,186/0,551
Средняя пойма	заболоченный	36	2,07	18,2	89	1,591/6,556/0,042	2,762/5,821/0,893

Выделившийся из образца газ перекачивался в герметичные стеклянные флаконы объемом 10 мл с резиновой пробкой. Определение содержания метана проводилось методом газовой хроматографии на установке с пламенно-ионизационным детектором SHIMADZU GC 2014 в лаборатории ФГБУ ВНИИОкеангеология (г. Санкт-Петербург). Параллельно отбирались образцы пород на определение гранулометрического состава, влажности (льдистости) и содержания органического углерода. Результаты заносились в единую базу данных, пересчитывались и сортировались по различным параметрам. Содержание метана в торфяниках, бечевниках и морском пляже не изучалось.

Полученные данные показали существенные различия как в количестве метана, содержащегося в образцах пород из СТС, так и в образцах переходного слоя мерзлоты. В целом, наблюдается закономерное уменьшение содержания метана от более глубоких горизонтов к поверхности. Это, вероятно, указывает на важную роль диффузного механизма переноса метана. В мерзлых породах содержание метана выше, чем в СТС. Наиболее высокие концентрации метана как в талых грунтах СТС, так и в мерзлых породах переходного слоя характерны для заболоченных ландшафтов с преобладанием осоковой растительности.

Наибольшее среднее содержание метана в СТС отмечено для территории низкой и средней поймы реки – около 1,6 мл[CH₄]/кг при максимальном значении 9,05 мл[CH₄]/кг. В пределах морской террасы наибольшее среднее содержание метана в СТС получено для увлажненной поверхности лога. Среднее содержание метана составило здесь около 1,5 мл[CH₄]/кг при максимальном значении 3,93 мл[CH₄]/кг. Также высокие значения содержания метана в СТС отмечены для увлажненной поверхности полигональной тундры. Остальные

ландшафты характеризуются значительно меньшим содержанием метана в слое сезонного протаивания.

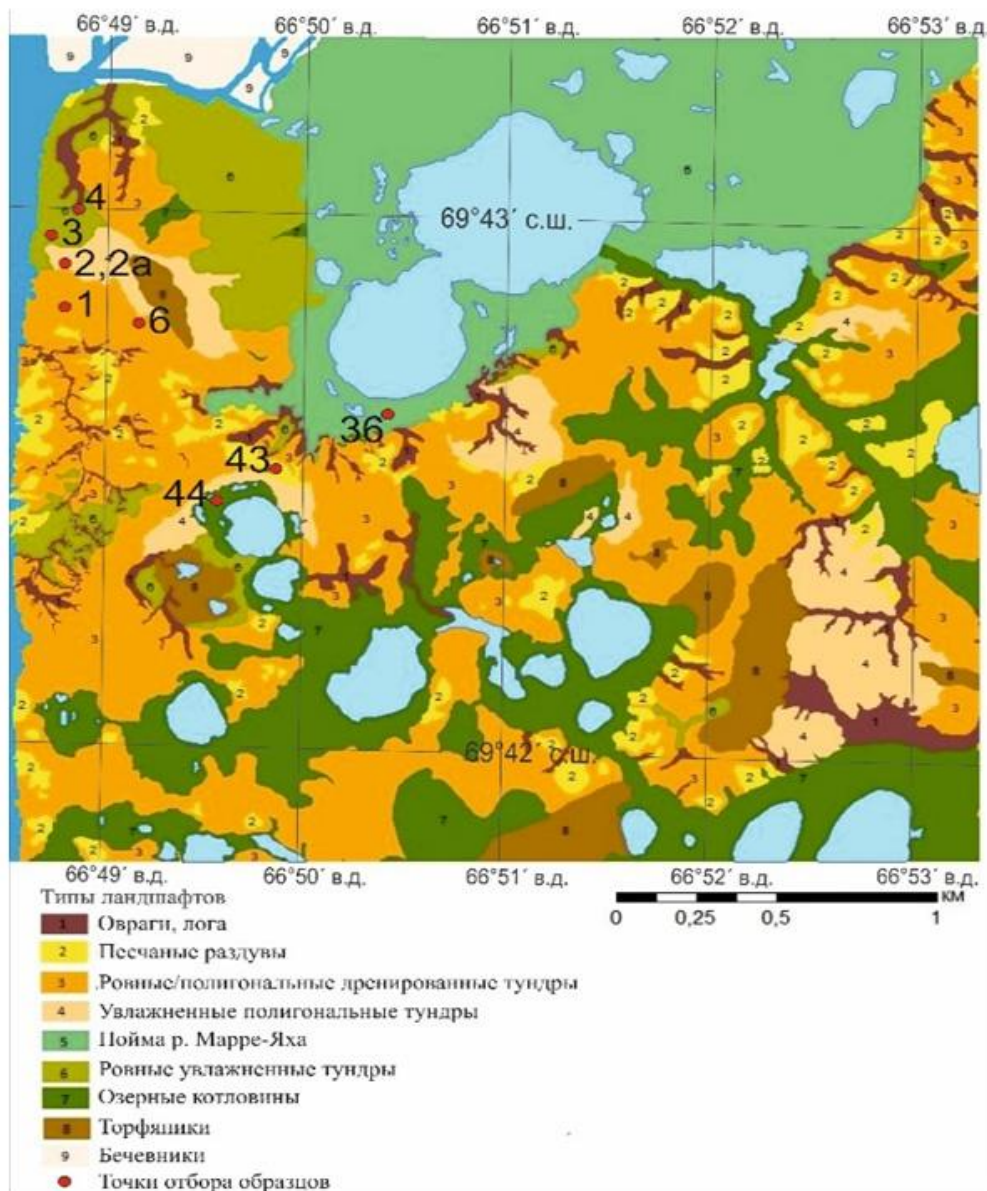


Рис.2. Ландшафтная карта территории Марре-Сале и точки отбора проб

В переходном слое, находящимся непосредственно под тальми породами, во всех ландшафтах содержание метана больше, чем в СТС. Разница в пропорциональном соотношении существенная и составляет от 130-150% до 500-600% и выше. Высокие средние содержания метана (более 2,7 мл[CH₄]/кг) в верхней части мерзлых пород получены в озерных котловинах, в оврагах и логах, на средней и низкой пойме реки. Большие содержания в мерзлых образцах получены для ландшафтов, в которых и в тальных отложениях СТС наблюдались высокие значения содержания метана. Исходя из полученных данных, найдена определенная тенденция к увеличению содержания метана с увеличением степени увлажненности поверхности ландшафта и влажности пород, но такая корреляция не является линейной и наблюдается не повсеместно.

Таким образом, в результате проведенных исследований в районе типичной тундры на территории геокриологического стационара Марре-Сале (западное побережье п-ова Ямал) получены статистически достоверные данные по содержанию метана в талой части слоя

сезонного оттаивания и в подстилающем его слое верхнего горизонта многолетнемерзлых пород.

В мерзлых породах переходного слоя содержание метана до 5-6 раз больше, чем в перекрывающем СТС (в среднем более 3 мл[CH₄]/кг). Высокие содержания метана в мерзлых отложениях получены для ландшафтов, в которых и в талых отложениях СТС наблюдались большие концентрации метана. Максимум концентрации в переходном слое можно объяснить тем, что при осеннем промерзании талых пород происходит вытеснение метана от фронта промерзания к нижележащим слоям. Метан аккумулируется, а затем консервируется до того момента, пока в какой-то из сезонов мощность СТС не превысит глубину оттаивания предыдущих лет.

Из-за высокого содержания метана, переходный слой мерзлой толщи следует рассматривать как значительный потенциальный источник метана, который будет вовлечен в оборот парниковых газов в атмосфере в случае оттаивания многолетнемерзлых пород.

Исследование выполнено в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова "Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды» и ГЗ «Эволюция криосферы при изменении климата и антропогенном воздействии» № 121051100164, также при поддержке Российского научного фонда, грант 22-27-00181.

ЛИТЕРАТУРА

Васильев А.А., Мельников В.П., Семенов П.Б., Облогов Г.Е., Стрелецкая И.Д. Содержание и эмиссия метана в доминантных ландшафтах типичной тундры Западного Ямала // Доклады Академии наук. 2019. Т. 485. № 1. С. 88-92. doi:0.31857/S0869-5652485188-92

Васильев А.А., Стрелецкая И.Д., Мельников В.П., Облогов Г.Е. Метан в подземных льдах и мёрзлых четвертичных отложениях Западного Ямала // Доклады Академии наук. 2015. Т. 465. № 5. С. 604-607. doi: 10.7868/S0869565215350236

Дубровин В.А., Крицук Л.Н. Результаты изучения температурного режима мерзлой толщи района Марре-Сале на полуострове Ямал // Инженерная геология. 2010. № 3. С. 68-74.

Краев Г.Н., Ривкина Е.М. Накопление метана в промерзающих и мерзлых почвах криолитозоны // Arctic Environmental Research. 2017. Т. 17. № 3. С. 173–184. doi:10.17238/issn2541-8416.2017.17.3.173

Alperin M.J., Reeburgh W.S. Inhibition experiments on anaerobic methane oxidation // Appl. Environ. Microbiol. 1985. Vol. 50. P. 940-945. doi:10.1128/AEM.50.4.940-945.1985

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 [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press.

Schuur E.A.G., McGuire A.D., Schädel C., Grosse G., Harden J.W., Hayes D.J., Hugelius G., Koven C.D., Kuhry P., Lawrence D.M., Natali S.M., Olefeldt D., Romanovsky V.E., Schaefer K., Turetsky M.R., Treat C.C., Vonk J.E. Climate change and the permafrost carbon feedback // Nature. 2015. Vol. 520. P. 171-179. doi:10.1038/nature14338.

METHANE IN THE COVER LAYER OF LANDSCAPES OF THE TYPICAL MARRE-SALE TUNDRA (WESTERN YAMAL)

¹*Volkova N.V.*, ^{2,3}*Oblogov G.E.*, ²*Zadorozhnaya N.A.*, ¹*Streletskaya I.D.*, ^{2,3}*Vasiliev A.A.*

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow;

² Institute of the Earth's Cryosphere of Tyumen Scientific Center of SB RAS, Tyumen

³ Tyumen State University, Tyumen

The main results of studies of the methane content in the cover layer in the area of the Marre-Sale polar station on the western coast of the Yamal Peninsula are presented. The data on methane concentrations in the sediments of active layer (AL) and transit layer of dominant landscapes of typical tundra are analyzed. It has been established that the maximum methane content in the sediments of active layer is observed in the flooded and swampy landscapes of the floodplain and in highly humidified depressions on the surface of the sea terrace. In well-drained landscapes, methane is practically absent. In the transit layer, the methane content is approximately 5-6 times higher than in the overlying seasonal thawing layer. In this regard, the transit layer of permafrost should be considered as a significant potential source of methane, which will be involved in the turnover of greenhouse gases in the atmosphere in the event of thawing of permafrost.

Keywords: methane, permafrost, transit layer, methane emission, Marre-Sale