

УДК 551.345;550.46

СОДЕРЖАНИЕ И ЭМИССИЯ МЕТАНА В ДОМИНАНТНЫХ ЛАНДШАФТАХ ТИПИЧНОЙ ТУНДРЫ ЗАПАДНОГО ЯМАЛА

А. А. Васильев^{1,2,**}, академик РАН В. П. Мельников^{1,2},
П. Б. Семенов³, Г. Е. Облогов^{1,2,*}, И. Д. Стрелецкая⁴

Поступило 20.09.2018 г.

Определено содержание метана в доминантных ландшафтах типичной тундры Западного Ямала. Наиболее высокая концентрация метана в сезонно-талом слое присуща тундровым болотам, обводнённым днищам логов, оврагов и полигональным тундрам. В них концентрация метана до 5000 ppm, в остальных ландшафтах концентрация метана не превышает 300 ppm. Таким образом, только болота, полигональные тундры и днища логов, занимающие ~30–40% территории, — существенные источники метана в зоне типичной тундры. Выполнены измерения эмиссии метана в атмосферу. На пике летней эмиссии суточный поток метана в болотах до 14,4 мг/м² (20,3 мл/м²).

Ключевые слова: Западный Ямал, типичная тундра, метан, концентрация, эмиссия метана.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5652485188-92>

В связи с потеплением климата в литературе активно обсуждают проблему эмиссии метана в атмосферу за счёт деградации мерзлоты и её влияния на прогнозируемые климатические изменения [3, 4, 9]. Оценки возможных последствий выделения метана при деградации мерзлоты во многом расходятся. По мнению многих исследователей [6, 8], дополнительная эмиссия метана из протаивающих субаквальных многолетнемерзлых пород может быть серьёзным фактором изменения климата в Арктике. Напротив, по оценкам О.А. Анисимова [9], эмиссия метана за счёт деградации мерзлоты в континентальных условиях и на шельфе не может существенно влиять на климат. Столь разные оценки последствий дополнительной эмиссии метана из протаивающих мерзлых толщ в первую очередь связаны с недостаточной изученностью содержания метана в сезонно-талом слое и верхних горизонтах многолетнемерзлых пород, которые и являются источником эмиссии биогенного метана в атмосферу [1]. Продуцирование метана в сезонно-талом слое происходит при положительной температуре в анаэробных условиях при наличии достаточного

количества органического углерода в доступных формах. В засоленных отложениях метан может продуцироваться и при отрицательной температуре, выше температуры фазовых переходов [1].

Таким образом, цель работы — определить содержание метана в сезонно-талом слое и верхнем горизонте мерзлых пород в ландшафтах типичной тундры и экспериментально оценить пиковые значения потока метана в атмосферу. Исследования проводили в зоне типичной тундры в районе полярной станции Марре-Сале (Западный Ямал) на расчленённой поверхности третьей морской террасы. Участок исследований расположен в зоне сплошного распространения засоленных многолетнемерзлых пород. Мощность твёрдомёрзлой толщи до 90 м, среднегодовые температуры на глубине нулевых годовых амплитуд от –3,5 до –6,0 °С. В зависимости от типа ландшафтов глубина сезонного оттаивания 0,4–1,8 м. Дополнительно содержание и изотопный состав метана в сезонно-талом слое изучали на заболоченной низкой пойме р. Марре-Яха и морской лаиде.

Ландшафтная структура типичной тундры в районе Марре-Сале изучали на основе дешифрирования аэрофотоснимков масштаба 1:2000 и наземных маршрутных наблюдений. Доминантные ландшафты в ранге урочищ здесь, %: дренированные тундры (33), увлажнённые тундры (17), болота (16), овраги (11), дренированные песчаные поля (11), заболоченные полигональные тундры (9). Остальные ландшафты имеют подчинённое значение. Каждый тип ландшафтов в ранге урочища характеризуется специфическими морфологией, литогенной основой,

¹ Институт криосферы Земли Тюменского научного центра Сибирского отделения Российской Академии наук

² Тюменский государственный университет

³ Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана им. И.С. Грамберга, Санкт-Петербург

⁴ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

*E-mail: oblogov@mail.ru

**E-mail: al.a.vasiliev@gmail.com

составом пород сезонно-талого слоя, влажностным режимом, типом тундровых почв, растительностью, температурным режимом мерзлоты, глубиной сезонного оттаивания.

Для отбора образцов в каждом изучаемом ландшафте в 2016, 2017 гг. проходили узкие шурфы на всю мощность сезонно-талого слоя с заглублением в мерзлоту на 5–10 см. В 2016 г. опробование проводили в конце сезона оттаивания (третья декада августа), в 2017 г. — во второй—третьей декаде июля, что соответствует пику эмиссии метана в атмосферу. Из стенок шурфов методом режущего кольца отбирали цилиндрические образцы грунта объёмом 30 см³ и помещали в 150-миллиметровые шприцы. Дегазацию отобранных образцов выполняли методом “head space” [1]. Из шприцев пробы газа перекачивали в 20-миллиметровые стеклянные флаконы с водно-солевым затвором и в таком виде транспортировали в лабораторию. Все газовые пробы дублировали. Содержание метана в газовой фазе определяли в Институте физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН на газовом хроматографе ХПМ.4 (Россия) с плазменно-ионизационным детектором и в лаборатории ФГБУ “ВНИИокеангеология” на газовом хроматографе SHIMADZU GC. Всего отобрано 84 образца для определения содержания метана. Для 26 проб газа с высоким содержанием метана (> 0,1%) в Институте микробиологии РАН на изотопном масс-спектрометре определены значения изотопов $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$. Определение изотопов $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$ и значений изотопа водорода в метане $\text{D}(\text{CH}_4)$ в шести пробах газа проведено в лаборатории ISOLAB B.V. (Нидерланды).

Параллельно отбирали образцы для изучения гранулометрического состава, влажности, плотности, содержания органического углерода.

В конце июля 2017 г. были проведены измерения потоков метана в ландшафтах дренированной, увлажнённой, полигональной тундры, болоте, заболоченном днище оврага. Использовали статический камерный метод [7]. Образцы газа из камеры отбирали в начале установки камеры и каждый час в течение 3–4 ч. Концентрацию метана в газовых пробах также определяли в лаборатории ФГБУ “ВНИИокеангеология”. Одновременно в ходе наблюдений измеряли температуру на поверхности почвы и на глубине 10 см.

Анализ полученных данных показывает, что содержание метана в изученных ландшафтах типичной тундры меняется в очень широких пределах (рис. 1). В сезонно-талом слое дренированных и увлажнённых

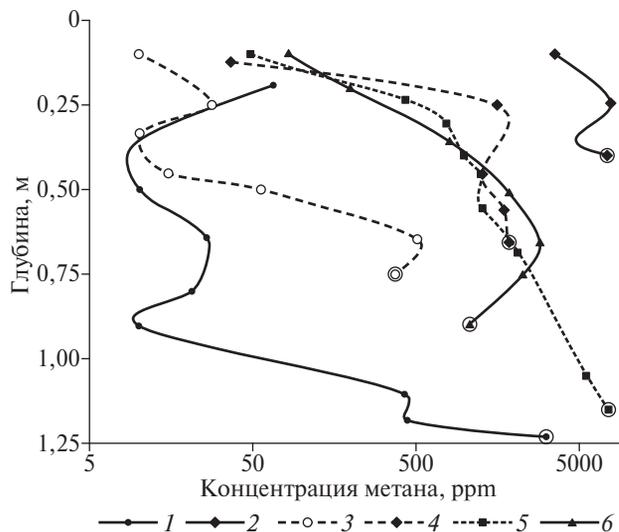


Рис. 1. Распределение концентраций метана по глубине в доминантных ландшафтах типичной тундры. 1 — дренированная тундра, 2 — полигональная заболоченная тундра, 3 — увлажнённая тундра, 4 — днище лога, 5 — болото, 6 — низкая пойма. Кружком обведены данные по пробам, отобранным в мёрзлых подстилающих породах.

ных тундр и песчаных полей содержание метана 5–300 ppm. В обводнённых и заболоченных ландшафтах полигональной тундры, болотах, U-образных днищах логов, оврагов содержание метана в сезонно-талом слое до 1500–5000 ppm. Ясно, что ландшафты с низким содержанием метана не могут служить более или менее заметным источником эмиссии метана в атмосферу. Напротив, ландшафты с высокими содержаниями метана — существенные источники эмиссии. Учитывая ландшафтную структуру, можно заключить, что только ~30–40% территории типичной тундры — источники эмиссии метана в атмосферу.

Обращает на себя внимание увеличение содержания метана с глубиной. При этом максимальные содержания характерны для мёрзлых пород, слагающих промежуточный слой, непосредственно под тальми породами. Это наблюдается во всех типах ландшафтов. Повышенное содержание метана в породах промежуточного слоя, вероятно, можно объяснить вытеснением метана от фронта фазовых переходов при осеннем промерзании сезонно-талого слоя и последующей консервацией вытесненного метана в промежуточном слое. Такое же характерное распределение метана с повышенным содержанием метана в промежуточном слое наблюдали в районе Колымы в совершенно других климатических, геокриологических, ландшафтных условиях [5]. Вероятно, этот эффект проявлен повсеместно.

Анализ изотопного состава метана из сезонно-талого слоя показывает, что он характеризуется более тяжёлым изотопным составом по сравнению с мёрзлыми толщами. Средняя величина $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$ для метана сезонно-талого слоя по 26 образцам $-63,6\text{‰}$, стандартное отклонение $\pm 5,6\text{‰}$, в то время как в мёрзлых породах $-68,6\text{‰}$ и $\pm 7,3\text{‰}$ соответственно [2]. Изменение изотопного состава метана по глубине представлено на рис. 2. Как видно из рисунка, наблюдается закономерное утяжеление изотопного состава с глубиной с приближением к изотопному составу метана в мёрзлых толщах. Это позволяет утверждать, что в процессе эмиссии метана из сезонно-талого слоя в атмосферу происходит фракционирование газа. В первую очередь за счёт большей подвижности в атмосферу эмитирует метан с более лёгким изотопным составом, а в сезонно-талом слое остаётся метан с более тяжёлым изотопным составом. Из этого следует, что более тяжёлый изотопный состав метана в сезонно-талом слое не может однозначно свидетельствовать о проникновении глубинного метана в сезонно-талый слой. Несмотря на некоторые изменения в изотопном составе метана в сезонно-талом слое вследствие фракционирования, несомненно, метан имеет бактериальный генезис и вырабатывается анаэробными бактериями. Это подтверждает и изотопный состав метана $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$ и $\text{D}(\text{CH}_4)$, который позволяет уверенно отнести метан к бактериальному, а также тем обстоятельством, что высокие содержания метана наблюдаются только в обводнённых ландшафтах с анаэробными условиями. Таким образом, метан в мёрзлых отложениях и в сезонно-талом слое имеет бактериальный генезис [2].

Определение эмиссии метана из сезонно-талого слоя проведено в третьей декаде июля 2017 г., кото-

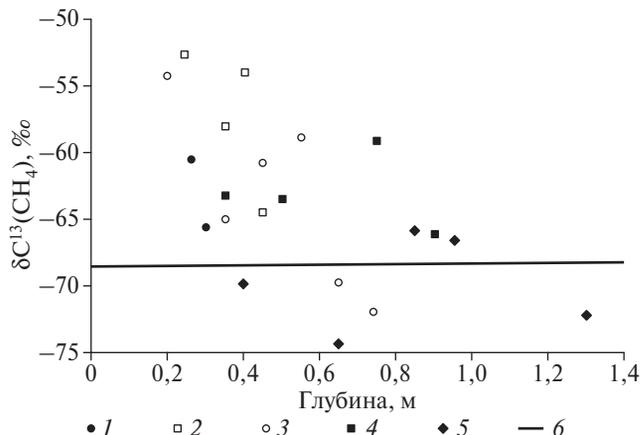


Рис. 2. Распределение значений $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$ по глубине. 1 — днище лога, 2 — увлажнённая тундра, 3 — болото, 4 — низкая пойма, 5 — морская лайда, 6 — среднее значение $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$ для многолетнемёрзлых пород.

рое соответствует максимальным (пиковым) потокам метана в атмосферу. Характеристики ландшафтов и условия проведения наблюдений приведены в табл. 1.

В качестве иллюстрации на рис. 3 приведена динамика изменения концентрации метана во времени в стационарных камерах для трёх контрастных по уровню эмиссии метана ландшафтов: болото с высокой эмиссией, днище лога со средней эмиссией, дренированная тундра с нулевой эмиссией. Данные о скорости накопления метана во времени в стационарных камерах при известных площади и объёме камер позволяют рассчитать потоки метана.

Измерения показали, что максимальный поток метана в атмосферу наблюдается в ландшафтах болот — $14,4 \pm 3,55 \text{ мг/м}^2 \cdot \text{сут}$ ($20,3 \pm 5,07 \text{ мл/м}^2 \cdot \text{сут}$). В обводнённых днищах оврагов и логов поток метана составил $3,1 \pm 0,89 \text{ мг/м}^2 \cdot \text{сут}$ ($4,43 \pm 1,27 \text{ мл/м}^2 \cdot \text{сут}$). Однократное измерение потока метана в заболочен-

Таблица 1. Характеристика условий измерения потоков метана

	Дренированные тундры (33%)*	Увлажнённые тундры (17%)	Болота (16%)	Овраги и логи (11%)	Песчаные поля (11%)	Заболоченные полигональные тундры (9%)
Состав	Супесь	Суглинок	Супесь	Супесь	Песок	Суглинок
Глубина сезонного оттаивания, м	1,2	0,7	0,7	0,6	1,8	0,4
Объёмная влажность, %	30,3	36,4	48,2	47,2	25,6	46,4
Температура поверхности, °C	6–7	7–9	7–8	6–8	8–9	7–9
Содержание органического углерода, %	0,45	1,26	0,68	4,5	0,34	1,12
Среднее содержание метана в сезонно-талом слое, ppm	121	328	2200	1590	86	5846
Концентрация метана в воздухе над поверхностью, ppm	2,1	2,2	4,02	3,82	—	6,67

Примечание. В скобках доли ландшафтов к общей площади.

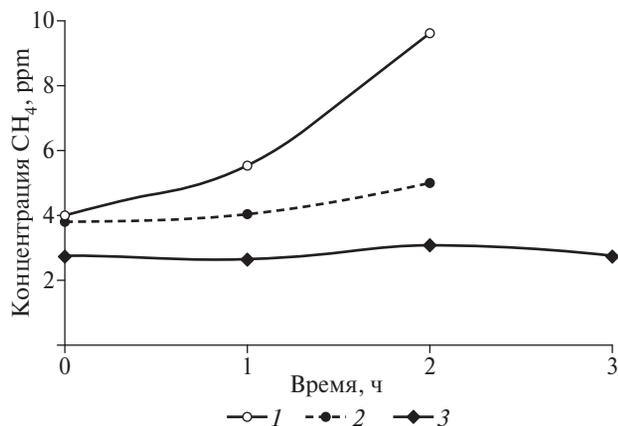


Рис. 3. Изменение концентрации метана во времени в статической камере. 1 — болото, 2 — днище лога, 3 — дренированная тундра.

ной полигональной тундре показало, что в этом типе ландшафтов поток может достигать $100 \text{ мг/м}^2 \cdot \text{сут}$, однако повторные измерения не были проведены, поэтому подтвердить достоверность этой оценки пока не удалось. В остальных типах ландшафтов потоки метана в атмосферу пренебрежимо малы. Таким образом, потоки метана в типичных тундрах Западного Ямала примерно в 1,5–2,0 раза меньше, чем в тундрах Аляски [4].

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы.

Содержание метана в сезонно-талом слое доминантных ландшафтов типичных тундр отличается на порядки. В заболоченных полигональных тундрах, болотах, днищах оврагов, логов концентрация метана до 1600–5000 ppm, в то время как в дренированных, увлажнённых тундрах и песчаных полях концентрация метана не более 90–300 ppm.

В типичной тундре Западного Ямала только ~30–40% территории можно считать существенными источниками эмиссии метана в атмосферу.

В процессе эмиссии метана в атмосферу происходит естественное фракционирование метана по изотопному составу. В сезонно-талом слое на-

капливаются более тяжёлые изотопы по сравнению с изотопным составом метана в подстилающих мёрзлых породах.

Максимальные потоки метана в атмосферу в болотах и днищах оврагов, логов, пиковые значения до $14,4 \pm 3,55$ и $3,1 \pm 0,89 \text{ мг/м}^2 \cdot \text{сут}$ соответственно. Измеренные потоки метана в типичных тундрах Западного Ямала примерно вдвое ниже, чем на Аляске.

Источники финансирования. Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ 18–05–60004, ландшафтная структура типичных тундр изучена в рамках гранта РФФИ 18–55–11005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев А.А., Мельников В.П., Стрелецкая И.Д., Облогов Г.Е. // ДАН. 2017. Т. 476. № 2. С. 213–216.
2. Стрелецкая И.Д., Васильев А.А., Облогов Г.Е., Семенов П.Б., Ванштейн Б.Г., Ривкина Е.М. // Лед и снег. 2018. Т. 58. № 1. С. 65–77.
3. AMAP Assessment 2015. Methane as an Arctic Climate Forcer. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo, 2015. P. 139.
4. Euskirchen E.S., Bret-Harte M.S., Shaver G.R., Edgar C.W., Romanovsky V.E. // Ecosystems. 2017. V. 20. P. 960–974. DOI: 10.1007/s10021-016-0085-9.
5. Kraev G., Schulze E.-D., Kholodov A., Chuvilin E., Rivkina E. // Atmosphere. 2017. V. 8. № 6. DOI: 10.3390/atmos8060105.
6. McGuire A.D., Christensen T.R., Hayes D., Heroult A., Euskirchen E.S., Kimball J.S., Koven C., Lafleur P., Miller P.A., Oechel W., Peylin P., Williams M., Yi Y. // Biogeosciences. 2012. V. 9. P. 3185–3204.
7. Nozhevnikova A., Glagolev M., Nekrasova V., Einola J., Sormunen K., Rintala J. // Water Sci. Technol. 2003. V. 48. № 4. P. 45–52.
8. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Yusupov V., Kosmach D., Gustafsson Ö. // Science. 2010. V. 327. P. 1246–1250.
9. Streletskiy D., Anisimov O., Vasiliev A. Permafrost Degradation. In: Snow and Ice-Related Hazards, Risks and Disasters. N.Y.: Elsevier, 2014. P. 303–343.

METHANE CONCENTRATION AND EMISSION IN DOMINANT LANDSCAPES OF TYPICAL TUNDRA OF WESTERN YAMAL

**A. A. Vasiliev, Academician of the RAS V. P. Melnikov, P. B. Semenov,
G. E. Oblogov, I. D. Streletskaya**

Received September 20, 2019

Methane concentration in dominant landscapes of typical tundra of Western Yamal has been measured. The highest methane content in the active layer was measured in tundra bogs, wet gully bottoms, and polygonal tundra. Within these landscapes, methane concentration reaches 5000 ppm, while in other landscapes it does not exceed 300 ppm. Thus, only bogs, polygonal tundra, and gully bottoms, which occupy approximately 30–40% of the area, are the main sources of methane emission in the typical tundra zone. Measurements of methane emission to the atmosphere have been performed. During the summer maximum of emission, daily methane flux in bogs reaches 14.4 mg/m² (20.3 ml/m²).

Keywords: Western Yamal, typical tundra, methane, concentration, methane emission.