

УДК 551.345:550.46

МЕТАН В ПОДЗЕМНЫХ ЛЬДАХ И МЁРЗЛЫХ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ЗАПАДНОГО ЯМАЛА

© 2015 г. А. А. Васильев, И. Д. Стрелецкая,
академик РАН В. П. Мельников, Г. Е. Облогов

Поступило 01.04.2015 г.

Изучены содержание и генезис метана в подземных льдах и мерзлых четвертичных отложениях Западного Ямала. Минимальная концентрация метана в мерзлых отложениях характерна для песков и составляет менее 15–100 ppmV. Максимальная концентрация метана характерна для глин морского генезиса — до 3000 ppmV. Концентрация метана в полигонально-жильных льдах 100–700 ppmV, а в пластовых льдах — до 10000 ppmV. Высокое содержание метана в пластовых льдах объясняют миграцией метана из вмещающих отложений в ледяное тело при его формировании. Установлена связь концентрации метана в отложениях с содержанием органического углерода.

DOI: 10.7868/S0869565215350236

В последнее 10-летие проблема эмиссии метана (CH_4) при деградации мерзлых пород в континентальных и субаквальных условиях выдвинута в ряд приоритетных. Это связано с тем, что метан — примерно в 20 раз более эффективный парниковый газ по сравнению с CO_2 . Оценки возможных последствий выделения метана при деградации мерзлоты, в том числе при наиболее интенсивной струйной дегазации [4], во многом расходятся. По [10], дополнительная эмиссия метана из протаивающих субаквальных многолетнемерзлых пород может быть серьезным фактором изменения климата в Арктике. Напротив, по [1], эмиссия метана за счет деградации мерзлоты не может существенно повлиять на климат.

До сих пор метан в подземных льдах и мерзлых рыхлых отложениях различного генезиса изучен недостаточно. Есть публикации, посвященные анализу содержания метана в мерзлых отложениях преимущественно континентального генезиса [6, 9]. В последние годы особый интерес проявляется к генезису и распределению метана в мерзлых четвертичных морских отложениях, полигонально-жильных (ПЖЛ) и пластовых (ПЛ) льдах [3, 5].

Институт криосферы Земли
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Тюмень

Тюменский государственный нефтегазовый
университет

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

E-mail: irinastrelets@gmail.com

Тюменский научный центр
Сибирского отделения Российской Академии наук

Исследование содержания и генезиса метана было проведено на ключевом участке Марре-Сале на западном побережье Ямала. Параметры состояния криолитозоны, геологическое и криолито-логическое строение, палеогеографические условия данного участка [2, 7] типичны для Западного Ямала.

Район исследований расположен в зоне сплошного распространения низкотемпературных многолетнемерзлых пород. В геологическом разрезе (рис. 1) представлена нижняя суглинистая толща морского и прибрежно-морского генезиса. Предположительный возраст толщи — казанцевский ($m\Pi^1$) [2], ассоциирующийся с морской изотопной стадией (МИС 5). Видимых фрагментов органики в отложениях нет, но среднее содержание органического углерода ($C_{\text{орг}}$) в суглинках и глинах до 0.84%. На размытой поверхности морских и прибрежно-морских суглинков и глин (МИС 5) и песчано-суглинистых отложений (МИС 3) залегают супесчано-песчаные континентальные отложения сартанского (МИС 2) и голоценового (МИС 1) возраста. Континентальные супеси и пески — озерно-аллювиальные и болотные отложения с включениями органического материала в виде растительного детрита. Среднее содержание $C_{\text{орг}}$ 0.34%.

Криолито-логическое строение разреза в Марре-Сале хорошо изучено [2, 7]. В разрезе выделены ПЖЛ голоценового и сартанского возраста, ПЛ представлены двумя типами. Первый тип (на рис. 1, I) приурочен к контакту морской и континентальной толщ. Лед содержит много песчаных и супесчаных включений, более или менее

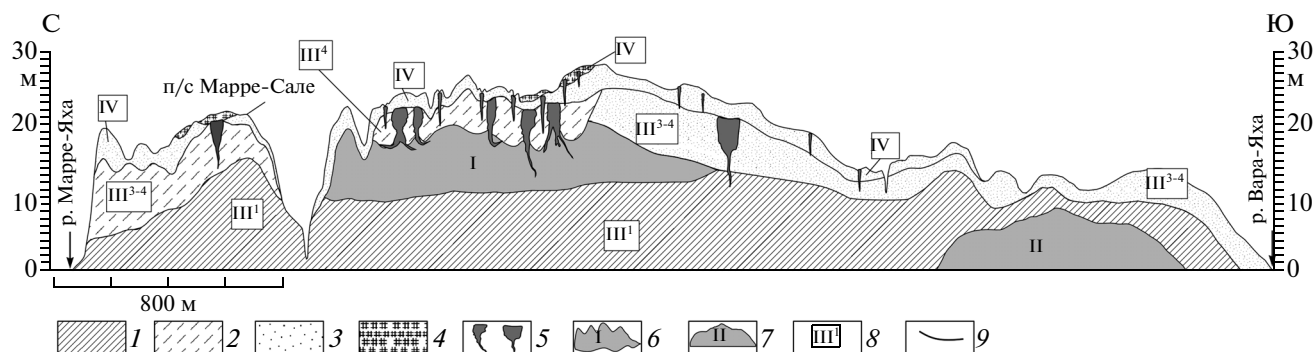


Рис. 1. Геологическое строение обнажения в Марре-Сале. 1 – глины и суглинки, 2 – супеси, 3 – пески, 4 – торф, 5 – ПЖЛ, 6, 7 – ПЛ первого и второго типов, 8 – геологические индексы, 9 – геологические границы.

равномерно рассеянных в толще льда. Визуально этот тип ПЛ воспринимается как ледогрунт, в массиве которого встречаются прослои чистого льда. Нижние концы сартанских ледяных жил часто внедряются в ледогрунт. Второй тип ПЛ (на рис. 1, II) залегает внутри суглинистой толщи морского генезиса. Здесь лед слоистый, представлен чередованием чистого стекловидного льда и прослоев, обогащенных включениями глинистого материала.

При изучении разреза мы в первом случае отбирали образцы льда изометричной формы массой около 1 кг для последующего определения содержания в них метана. Извлечению газов из монолитов льда и пород предшествовало измельчение льда на мельнице Retsch при отрицательной температуре до размерности менее 0.25 мм. Масса проб, подготовленных для определения метана, не менее 200 г. Дегазацию диспергированного льда проводили с помощью установки СУ-ОК-ДГ, в которой применяется динамический принцип извлечения газов. Он основан на распылении воды, содержащей извлекаемые газы, до субмикронного уровня с одновременным созданием высокого разрежения в зоне распыления. Объем газа, получаемого из 200–300 г льда, до 10–33 мл в зависимости от газонасыщенности образца. Наиболее газонасыщенными оказались образцы из ПЛ, а меньше всего газа извлекали из мерзлых песков. Определение компонентного состава газов проводили методом газовой хроматографии на установке с плазменно-ионизационным детектором SHIMADZU 2014.

Для образцов с высоким содержанием метана в Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН на изотопном масс-спектрометре (в конфигурации GC-C-IRMS) определены значения изотопов $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$ (8 определений). Определение значений изотопа водорода в метане D vs. smow из пузырьков льда по 6 образцам проведено в лаборатории ISOLAB B.V. (Нидерланды).

Во втором случае отбирали образцы мерзлых отложений и льда массой около 150 г. Непосредственно в полевых условиях образцы доводили до цилиндрической формы массой примерно 50 г и помещали в 150-миллиметровые шприцы. Мерзлые образцы были дегазированы непосредственно в шприцах, а газ собран методом “head space” [8]. Содержание метана определено в Институте физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН на газовом хроматографе ХПМ.4 с плазменно-ионизационным детектором.

Всего отобрано 44 образца подземных льдов и 31 образец мерзлых вмещающих льды отложений. Часть образцов дублировали, и содержание метана определено обоими методами. Сравнение полученных данных показало, что с учетом исключительно высокой естественной вариации содержания газовых включений во льду и мерзлых вмещающих отложениях двумя разными методами получены вполне сопоставимые результаты. Как правило, разница в концентрации метана не превышает 2–4 раза, что можно считать допустимым в связи с большой изменчивостью содержания газа. Иногда совпадение было полным.

Для мерзлых вмещающих льды отложений из этих же образцов параллельно определяли содержание органического углерода путем мокрого химического сжигания по методу Кнопа [11].

Анализ изотопного состава метана в пробах льда показал, что по соотношению $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$ и D vs. smow метан продуцировался в процессе жизнедеятельности анаэробных бактерий. По изотопному составу метан в подземных льдах и мерзлых вмещающих отложениях весьма далек от атмосферного метана и метана из продуктивных пластов сеномана и неокома в Западной Сибири.

Обобщенные результаты определения концентрации метана в подземных льдах приведены в табл. 1. Минимальная концентрация метана присуща голоценовым ПЖЛ, в среднем менее 100 ppmV. В неоплейстоценовых ПЖЛ концентрация в среднем до 700 ppmV. Для сравнения от-

Таблица 1. Концентрация метана (ppmV) в подземных льдах

Генезис и возраст льда	ПЖЛ голоценовые, МИС 1 (10)*			ПЖЛ неоплейстоценовые, МИС 2 (15)			ПЛ I типа (15)			ПЛ II типа (4)		
	Среднее	Макс.	Мин.	Среднее	Макс.	Мин.	Среднее	Макс.	Мин.	Среднее	Макс.	Мин.
Динамический метод (32)	95	227	17	680	4461	26	6197	17113	26	6117	23352	160
Метод “head space” (12)	96	346	3	105	357	3	10084	12292	7877	—	—	—

Примечание. * В скобках количество образцов.

Таблица 2. Концентрация метана (ppmV) в мерзлых вмещающих льды отложениях

Возраст	МИС 1			МИС 2			МИС 2–3			МИС 5		
Генезис	Болотный, озерно-аллювиальный, эоловый			Озерно-аллювиальный			Прибрежно-морской			Морской, прибрежно-морской		
Состав	Пески (6)*			Пески, супеси (7)			Пески, супеси, суглинки (10)			Глины, суглинки (8)		
CH ₄	Среднее	Макс.	Мин.	Среднее	Макс.	Мин.	Среднее	Макс.	Мин.	Среднее	Макс.	Мин.
Динамический метод (7)	—	—	—	115	217	14	3329	5248	104	1682	2215	1148
Метод “head space” (24)	68	212	18	186	460	15	1009	1969	97	2884	5515	585

Примечание. * В скобках количество образцов.

метим, что в атмосферном воздухе концентрация метана составляет около 1,8, а в глетчерном льду Антарктиды — 0,3–0,7 ppmV. Таким образом, сравнительно высокие концентрации метана в ПЖЛ могут быть объяснены его продуцированием непосредственно в ПЖЛ или попаданием с талой водой. Возможность метаногенеза во льдах и мерзлых отложениях при отрицательной температуре за счет жизнедеятельности анаэробных бактерий высказывали ранее [3], наши исследования подтверждают эту точку зрения.

В пластовых льдах обоих типов концентрация метана на порядок выше, чем в ПЖЛ, — до 10000 ppmV. Столь высокие концентрации метана не могут быть объяснены даже и метаногенезом анаэробных бактерий во льду. Вероятно, высокое содержание метана в ПЛ — результат его миграции из вмещающих пород и концентрирования в ледяном теле. Исключительно высокое содержание метана в пластовых льдах убедительно подтверждает их неатмосферное, но внутри-рунтово происхождение.

Результаты определения концентрации метана во вмещающих мерзлых отложениях приведены в

табл. 2. Минимальные концентрации метана характерны для песков и в среднем составляют 70–200 ppmV. Максимальные концентрации метана присущи супесчаным и глинистым отложениям, а средние концентрации в них достигают 1000–3000 ppmV. Поскольку лабильный органический углерод — источник питания анаэробных бактерий, продуцирующих метан, можно предположить, что при низких содержаниях он лимитирует метаногенез во вмещающих отложениях. Для проверки этого предположения была построена зависимость концентрации метана от содержания органического углерода (рис. 2).

Как видно из рисунка, обнаруживается явное увеличение концентрации метана при возрастании содержания органического углерода. Очевидно, что при высоких содержаниях органического углерода он перестает быть лимитирующим фактором метаногенеза.

Таким образом, выполненные исследования позволили количественно охарактеризовать содержание и генезис метана в подземных льдах и мерзлых вмещающих подземный лед отложениях Западного Ямала. Впервые установлены исклю-

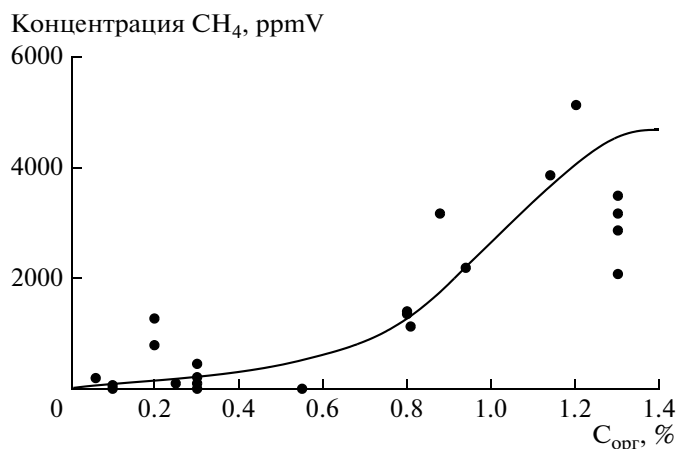


Рис. 2. Зависимость концентрации метана от содержания органического углерода в мерзлых вмещающих льдах отложениях.

чительно высокие концентрации метана в ПЛ и мерзлых отложениях морского генезиса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов О.А., Борзенкова И.И., Лавров С.А., Стрельченко Ю.Г. // Лед и снег. 2012. № 2 (118). С. 97–105.
2. Каневский М.З., Стрелецкая И.Д., Васильев А.А. // Криосфера Земли. 2005. Т. IX (3). С. 16–27.
3. Леин А.Ю., Лейбман М.О., Саввичев А.С., Миллер Ю.М., Пименов Н.В. // Геохимия. 2003. № 10. С. 1084–1104.
4. Мельников В.П., Спесивцев В.И., Куликов В.Н. В сб.: Итоги фундаментальных исследований криосферы Земли в Арктике и Субарктике. Новосибирск: Наука, 1997. С. 259–269.
5. Ривкин Ф.М. В сб.: Итоги фундаментальных исследований криосферы Земли в Арктике и Субарктике. Новосибирск: Наука, 1997. С. 168–173.
6. Ривкина Е.М., Краев Г.Н., Кривушин К.В., Лауринавичюс К.С., Федоров-Давыдов Д.Г., Холодов А.Л., Щербакова В.А., Гиличинский Д.А. // Криосфера Земли. 2006. Т. X. № 3. С. 23–41.
7. Стрелецкая И.Д., Каневский М.З., Васильев А.А. Пластовые льды в дислоцированных четвертичных отложениях западного Ямала // Криосфера Земли. 2006. Т. X. № 2. С. 68–78.
8. Alperin M.J., Reeburgh W.S. // Appl. Environ. Microbiol. 1985. V. 50. P. 940–945.
9. Moorman B.J., Michel F.A., Wilson A.T. Proc. VII Intern. Conf. on Permafrost. Yellowknife, 1998. P. 757–761.
10. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Yusupov V., Kosmach D., Gustafsson Ö. // Science. 2010. V. 327. P. 1246–1250.
11. Streletskaia I.D., Vasiliev A.A., Vanstein B.G. // Arctic, Antarctic, and Alpine Res. 2009. V. 41. №. 1. P. 79–87.