

УДК 548.562

DOI 10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art67

## СОДЕРЖАНИЕ И ГЕНЕЗИС МЕТАНА В МЕРЗЛЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ И ПОДЗЕМНЫХ ЛЬДАХ НА ПОБЕРЕЖЬЕ И ШЕЛЬФЕ КАРСКОГО МОРЯ

Стрелецкая И.Д.<sup>1</sup>, Ванштейн Б.Г.<sup>2</sup>, Васильев А.А.<sup>3,4</sup>, Облогов Г.Е.<sup>3,4</sup>

1 – МГУ им М.В. Ломоносова, географический факультет, 2 – ВНИИОкеангеология,

3 – ИКЗ ТюмНЦ СО РАН, 4 – ТюмГУ, E-mail: al.a.vasiliev@gmail.com

**Аннотация.** Рассмотрены результаты исследования содержания метана в средне- и позднелейстоценовых мерзлых отложениях в береговых разрезах и на шельфе Карского моря. Наиболее высокие концентрации метана присущи пластовым льдам и достигают 21000 ppm, в полигонально-жильных льдах максимальная концентрация метана не превышает 900 ppm. Для мерзлых отложений наиболее высокие концентрации метана характерны для морских позднелейстоценовых глин. Концентрация метана в них достигает 12200 ppm. В морских среднеплейстоценовых глинах концентрация метана составляет 3400 ppm. Изотопный состав метана в подземных льдах и мерзлых морских отложениях на побережье и шельфе Карского моря уверенно указывает на бактериальный генезис газа.

**Ключевые слова:** многолетнемерзлые отложения, подземные льды, метан, Карское море.

## CONTENT AND GENESIS OF FROST SEDIMENTS AND UNDERGROUND ICE METHANE OFFSHORE AND ONSHORE KARA SEA.

Streletskaya I.D.<sup>1</sup>, Vanshteyn B.G.<sup>2</sup>, Vasiliev A.A.<sup>3,4</sup>, Oblogov G.E.<sup>3,4</sup>

1 – Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 2 – VNIIOceanologiya,

3 – Earth Cryosphere Institute of RAS Siberian Branch Tyumen Science Center, 4 – Tyumen State University, E-mail: al.a.vasiliev@gmail.com

**Abstract.** The results of a study of the methane content in the Middle and Late Pleistocene frozen sediments in the coastal sections and on the Kara Sea shelf are considered. The highest concentrations of methane are inherent in reservoir ice and reach 21,000 ppm, in polygonal vein ice the maximum concentration of methane does not exceed 900 ppm. For frozen sediments, the highest concentrations of methane characterizing the marine Late Pleistocene clays. The concentration of methane in them reaches 12200 ppm. In marine Middle Pleistocene clays, methane concentration is 3400 ppm. The isotopic composition of methane in underground ice and frozen sea sediments on the coast and the Kara Sea shelf confidently indicates the bacterial genesis of gas.

**Keywords:** permafrost sediments, underground ice, methane, Kara Sea.

В последнее десятилетие проблема эмиссии метана при деградации многолетнемерзлых пород на шельфе арктических морей и континентальном обрамлении выдвинулась в ряд приоритетных, что обусловлено достаточно высокими запасами органического углерода и метана в мерзлых отложениях [1]. Однако оценки возможных последствий выделения метана при деградации мерзлоты во многом расходятся. По мнению Н.Е. Шаховой и И.П. Семилетова [2] дополнительная эмиссия метана из протаивающих субаквальных многолетнемерзлых пород может быть серьезным фактором изменения климата в Арктике. Напротив, по оценкам О.А. Анисимова [3], дополнительная эмиссия метана за счет деградации мерзлоты не может существенно повлиять на климат.

Содержание и генезис метана в мерзлых четвертичных отложениях и подземных льдах в целом изучено совершенно недостаточно, имеются лишь отдельные статьи, освещающие содержание метана в нескольких разрезах. Применительно к побережью Карского моря ситуация еще хуже. Систематизированные данные по метану практически отсутствуют. В опубликованных работах отмечаются различия в содержании метана в континентальных и морских отложениях. В континентальных отложениях ледового комплекса на северо-востоке России содержание метана низкое, или он полностью отсутствует [4]. Напротив, в морских отложениях и в озерных осадках содержание метана относительно высокое [5]. При этом отмечается, что газовые скопления приурочены к горизонтам, обогащенным органикой.

Изучение содержания и генезиса метана в подземных льдах и мерзлых отложениях проведено на четырех ключевых участках (рис. 1). В геологическом отношении два участка Марре-Сале (Западный Ямал) и Сопочная Карга (Западный Таймыр) представлены комплексами позднечетвертичных отложений морского и континентального генезиса с крупными залежами подземных льдов, которые являются типичными для побережья Карского моря. Третий участок – мыс Салемал (100 км к СВ от Салехарда), сложен типичными среднеплейстоценовыми глинами. Содержание метана в мерзлых позднечетвертичных глинах на шельфе Карского моря было определено по пробам, поднятым гравитационной трубкой в районе Университетского поднятия.

Таким образом, оценка содержания метана и его генезис выполнена для геологических разрезов на шельфе и в прибрежной области, охватывающих четвертичное время от среднего плейстоцена до голоцена.

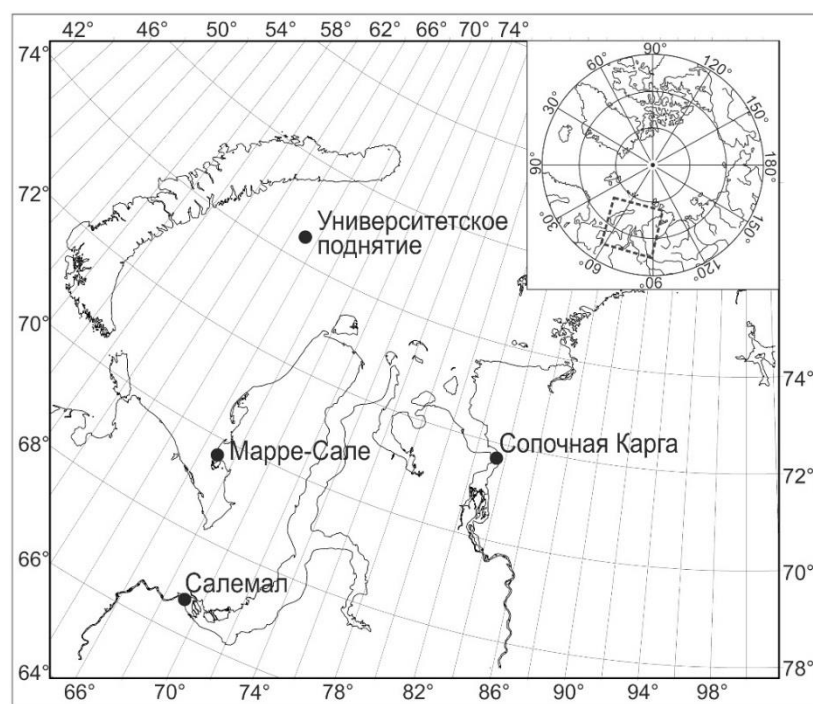


Рис. 1. Схема расположения участков, для которых проведено изучение метана в подземных льдах и мерзлых отложениях

Мерзлые образцы для выделения газовой компоненты с последующим определением в ней содержания метана и его гомологов были взяты из разновозрастных мерзлых отложений, жильных и пластовых льдов. Всего отобрано около 300 мерзлых образцов.

В зависимости от размера ледяной жилы отбирались от 4 до 7 монолитов по горизонтальным и вертикальным профилям, и 3–4 монолита из вмещающих жилу отложений. Из пластовых льдов в различных точках залежей отбирались 6–10 монолитов с визуальной разной концентрацией газовых включений. Мерзлые вмещающие отложения опробовались в естественных обнажениях по вертикальным сечениям через 1–1,5 м, но не менее двух образцов из каждой литологической разности. На Университетском поднятии на метан опробовался мерзлый керн, поднятый гравитационной трубкой.

В полевых условиях отбирались образцы мерзлых отложений и льда. Образцы доводились до цилиндрической формы массой  $50 \pm 1$  г и помещались в 150 л шприцы. Образцы мерзлых отложений были дегазированы методом «Head space» [6]. Все газовые

пробы дублировались. Содержание метана в газовой фазе определялось в лаборатории ФГБУ «ВНИИОкеангеология» на газовом хроматографе SHIMADZU GC 2014 и лаборатории геологического факультета МГУ.

Для тринадцати проб газа с высоким содержанием метана (более 0,5%) в Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН на изотопном масс-спектрометре (в конфигурации GC-C-IRMS) определены значения изотопов  $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$ . Изотопный состав метана в шести пробах газа определен в лаборатории геологического факультета МГУ. Определение изотопов  $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$  и значений изотопа водорода в метане D ( $\text{CH}_4$ ) в шести пробах газа, отобранного из льда, проведено в лаборатории ISOLAB V.V. (Нидерланды).

Выполненное представительное опробование позволяет достоверно оценить содержание метана в мерзлых отложениях и подземных льдах. В среднеплейстоценовых мерзлых глинах среднее содержание метана составляет 1800 ppm. Наибольшие средние значения содержания метана присущи морским глинистым позднеплейстоценовым отложениям и составляют 4300 ppm, при абсолютных максимальных значениях 12300 ppm. В позднеплейстоценовых континентальных песчаных и супесчаных мерзлых отложениях содержание метана не превышает 200–300 ppm. Наименьшие содержания метана в газовой компоненте характерны для современных (голоценовых) не мерзлых морских осадках на шельфе Карского моря. Концентрация метана в них варьирует от 10 до 50 ppm.

В полигонально-жильных льдах содержание метана, как правило, невысокое и меняется в пределах 300–400 ppm. Пластовые льды характеризуются крайне высокой изменчивостью содержания метана – от 100 до 23000 ppm, это объясняется неоднородностью концентрации газовых включений (пузырьков) в ледяных телах. Среднее содержание метана в пластовых льдах изменяется в пределах 2000 – 6000 ppm. При этом наблюдается явная закономерность повышения концентрации метана на участках пластовых льдов, вложенных в глинистые вмещающие отложения и снижения концентрации метана в пластовых льдах, перекрытых песчаными осадками. Это обусловлено миграцией (вытеснением) метана из вмещающих отложений в формирующееся ледяное тело при промерзании обогащенной метаном глинистой толщи. Вытеснение газовых включений от фронта промерзания в промерзающую толщу совершенно аналогично хорошо известному процессу вытеснению солей.

При продуцировании метана во вмещающих отложениях важное значение имеет общее содержание органического углерода, который лимитирует в них метаногенез. Последнее наиболее четко проявлено на графике зависимости концентрации метана в газовой компоненте вмещающих отложений от содержания общего органического углерода (рис. 2). Как видно на рис. 2, при содержании общего органического углерода менее 1,1% обнаруживается значимая положительная корреляция с содержанием общего органического углерода. В то время как, при высоких содержаниях органического углерода (более 1,1%) он перестает быть лимитирующим фактором метаногенеза.

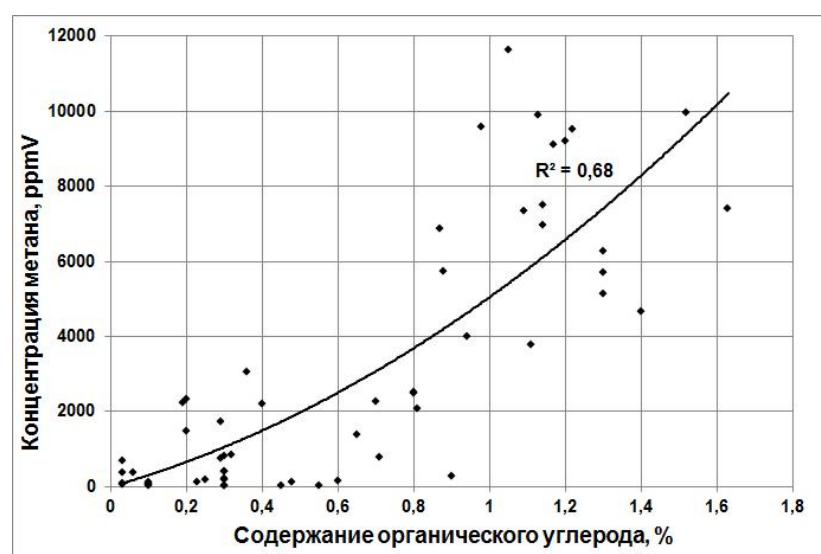


Рис. 2. Корреляция между концентрацией метана и содержанием органического углерода

Изотопный состав  $\delta^{13}\text{C}$  ( $\text{CH}_4$ ) определен в 25 образцах подземных льдов и мерзлых вмещающих отложений, а значения изотопа водорода ( $\text{D}$  ( $\text{CH}_4$ )) для 6 образцов, отобранных на ключевом участке Марре-Сале. Отметим, что для атмосферного метана значения  $\delta^{13}\text{C}$  ( $\text{CH}_4$ ) и  $\text{D}$  ( $\text{CH}_4$ ) составляют  $-54,5\text{‰}$  и  $-145,0\text{‰}$ , соответственно [7]. Результаты изотопно-спектрометрического анализа метана однозначно свидетельствуют о его бактериальном генезисе (рис. 3) [8]. Значения  $\delta^{13}\text{C}$  ( $\text{CH}_4$ ) меняются в пределах  $-62\text{‰}$  ÷  $-74\text{‰}$ . Значения  $\text{D}$  ( $\text{CH}_4$ ) изменяются от  $-259\text{‰}$  до  $-330\text{‰}$ . Среднее значение  $\delta^{13}\text{C}$  ( $\text{CH}_4$ ) составляет  $-68,6\text{‰}$ , стандартное отклонение  $\pm 7,3\text{‰}$ . При этом и подземным льдам и вмещающим мерзлым отложениям присущи одинаковые показатели изотопного состава метана, что подтверждает единый механизм метаногенеза в них.

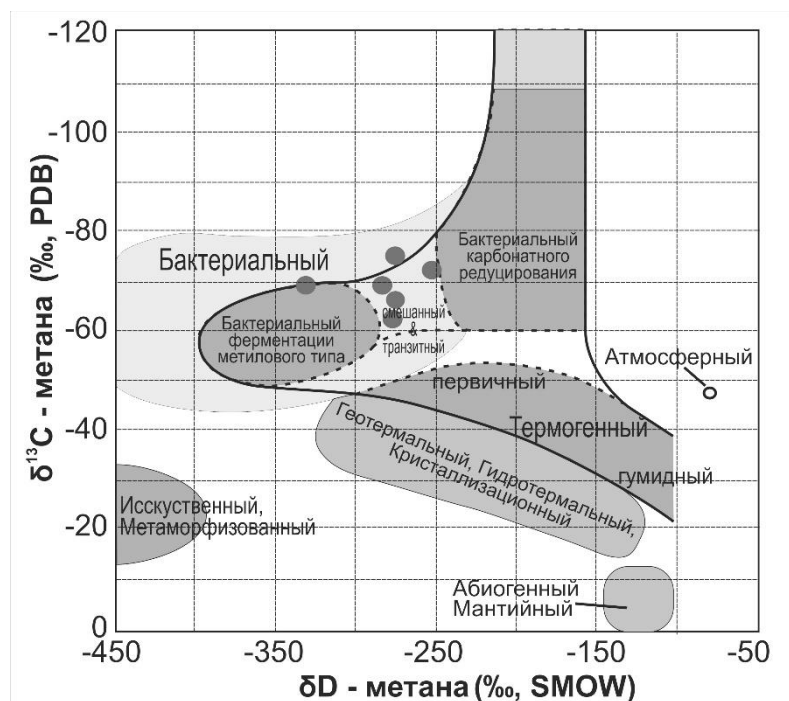


Рис. 3. Значения изотопного состава метана (черные точки), содержащегося в воздушных пузырьках пластовых льдов I и II типа на CD-диаграмме Витикара [8]

Таким образом, на основании массового опробования опорных разрезов средне – и позднеплейстоценовых мерзлых отложений и подземных льдов получены статистически обоснованные величины содержания в них метана. Установлена контролирующая роль содержания органического углерода в процессе метаногенеза. Подтвержден бактериальный генезис метана в мерзлых отложениях и подземных льдах на шельфе и континентальном обрамлении Карского моря.

*Исследования выполнены при поддержке РФФИ (грант 16-05-00612) и частичной поддержке Государственного задания по теме «Изменение криосферы Земли под влиянием природных факторов и техногенеза» НИР АААА-А16-116032810095-6. Изучение состояния многолетнемерзлых пород проведено в рамках гранта РФФИ № 16-17-00102.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Schuur E.A.G., Mcguire A.D., Schadel 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, 520. P. 171–179.
2. Shakhova, N., Semiletov I., Salyuk A., Yusupov V., Kosmach D., Gustafsson Ö. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic shelf // Science. 2010, 327. P. 1246–1250.

3. *Streletskiy D.A., Anisimov O.A., Vasiliev A.A.* Permafrost Degradation // Snow and Ice-Related Hazards, Risks and Disasters. Elsevier. 2014, Chapter 10. P. 303–344.
4. *Ривкина Е.М., Гиличинский Д.А., Федоров-Давыдов Д.Г., Ривкин Ф.М., Щербакова В.М.* Закономерности распределения парниковых газов в вечномёрзлых породах. //Материалы Первой конференции геокриологов России. М.: МГУ. 1996. Т. 4. С. 157–162.
5. *Ривкин Ф.М.* О распределении метана в мерзлых породах на территории Бованенковского газоконденсатного месторождения на полуострове Ямал. //Итоги фундаментальных исследований Криосферы Земли в Арктике и Субарктике. Новосибирск: Наука. 1997. С. 168–173.
6. *Alperin M.J., Reeburgh W.S.* Inhibition experiments on anaerobic methane oxidation //Appl. Environ. Microbiol. 1985. V. 50. P. 940–945.
7. *Bock J., Martinerie P., Witrant E., Chappellaz J.* Atmospheric impacts and ice core imprints of a methane pulse from clathrates // Earth and Planetary Science Letters. 2012. V. 349–350. P. 98–108.
8. *Whiticar M.J.* Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane // Chemical Geology. 1999. №161. P. 291–314.