

ГИДРАТООБРАЗОВАНИЕ

УДК 551.345.3

**ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ  
В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ТОЛЩАХ**

**В.С. Якушев**

*Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина,  
119991, Москва, Ленинский пр., 65, Россия; yakushev.v@gubkin.ru*

Обобщены известные сведения о происхождении углеводородных газов, встречающихся в толщах многолетнемерзлых пород. Выделены биохимический (микробный), катагенетический (термогенный) и угольный (сланцевый) типы внутримерзлотных газов. Приведена схема распространения внутримерзлотных газов различного генезиса на территории России.

*Метан, многолетнемерзлые толщи, генезис внутримерзлотного газа*

**GENETIC TYPES OF HYDROCARBON GASES IN PERMAFROST**

**V.S. Yakushev**

*Gubkin Russian State University of Oil and Gas,  
119991, Moscow, Leninskii pr., 65, Russia; yakushev.v@gubkin.ru*

Information on the genesis of intrapermafrost hydrocarbon gases is generalized. Biochemical (microbial), katagenic (thermogenic) and coalbed (shale) types of intrapermafrost gases are documented. General scheme of distribution of different types of permafrost hydrocarbon gases on the Russian territory is presented.

*Methane, permafrost strata, genesis of intrapermafrost gas*

**ВВЕДЕНИЕ**

В последнее время вопросу происхождения и распространения метана в многолетнемерзлых толщах и, прежде всего, в их приповерхностных слоях уделяется большое внимание со стороны климатологов, географов и геологов. Это связано с необходимостью оценки возможного вклада в парниковый эффект выделений метана и других парниковых газов из многолетнемерзлых пород (ММП) при их оттаивании. При этом обычно изучаются выделения приповерхностного биохимического (или болотного) газа. Однако данные глубинного разбуривания многолетнемерзлых толщ (ММТ) в различных регионах Арктики, включая подводные мерзлые толщи арктических морей, указывают на различное происхождение метана и других углеводородных газов в мерзлых толщах. От генезиса газов во многом зависит не только объем внутримерзлотных газовых скоплений, но и потенциальная угроза освоению арктических нефтяных, газовых и газоконденсатных залежей, находящихся под мерзлыми толщами. Вскрытие внутримерзлотного газового или газогидратного скопления при бурении скважин всегда приводит

к газопроявлениям различной интенсивности, имеющим иногда катастрофические последствия для скважины. В этой связи представляется целесообразным выделение и систематизация различных источников и генетических типов углеводородных газов в ММТ.

**БИОХИМИЧЕСКИЙ (БОЛОТНЫЙ) ГАЗ**

В середине XX в. перед началом интенсивного освоения нефтяных и газовых ресурсов в области распространения ММП многолетнемерзлые толщи рассматривались многими исследователями как непроницаемые для газов пласты осадочных пород, поровое пространство которых полностью или частично заполнено льдом. Это, в частности, позволило предполагать, что ММТ могут стать региональными покрывками для скоплений нефти и газа непосредственно под нижней границей мерзлой толщи [Вожов, 1984]. Исключение делалось для приповерхностных (в пределах сезонно-талого слоя) мелких скоплений болотного газа (метана) в заболоченных районах. Действительно, выделения горючих газов при проходке верхних

слоев ММП шурфами и неглубокими скважинами отмечались во многих регионах распространения ММП [Арэ, 1998]. Генерация газа здесь, как и в регионах, где отсутствуют ММП, связывалась ранее и связывается сейчас с процессами биохимической переработки органического вещества, захороненного при осадконакоплении. Примеры интенсивных, но кратковременных выделений приповерхностного биохимического газа при вскрытии промерзающих газовых карманов довольно многочисленны [Anthony et al., 2010].

Однако анализ изотопного состава углерода в метане, выделившемся при бурении более глубоких (до 500 м) скважин в районах распространения многолетнемерзлых осадочных пород (север Западной Сибири, север Канады), показал, что биохимический метан имеет гораздо большую глубину распространения, чем глубина сезонноталого слоя (СТС) или слоя нулевых годовых колебаний температуры (см. таблицу). Причем распространение биохимического метана отмечалось в мерзлых разрезах как эпигенетического типа промерзания, так и сингенетического, хотя в некоторых регионах [Краев и др., 2013] наблюдались высокие концентрации метана только в эпигенетически промерзших породах и практически полное отсутствие метана в сингенетических ММП.

В соответствии с существующими представлениями в приповерхностных слоях криолитозоны биохимический метан накапливается интенсивно в СТС и медленно в толще ММП [Rivkina et al., 1998; Brouchkov, Fukuda, 2002]. Часто скопления биохимического метана образуются под сезонным ледяным покровом озер и глубоких болот [Anthony et al., 2010]. Биохимический метан может залегать как в рассеянном состоянии, так и в виде достаточно крупных скоплений, особенно при переходе в гидратное состояние в ММП [Ривкин, Левантовская, 2002]. Он распространен в промерзших осадочных толщах на больших площадях и представляет угрозу внезапных выбросов при бурении глубоких скважин и потенциальный источ-

ник энергоснабжения для небольших, удаленных от систем регионального энергоснабжения, поселений [Yakushev, Chuvilin, 2000]. Кроме того, он рассматривается как основной парниковый газ, который поступает в атмосферу в полярных областях [Walter et al., 2008; Wille et al., 2008].

### КАТАГЕНЕТИЧЕСКИЙ (ТЕРМОГЕННЫЙ) ГАЗ

Возможность существования в пределах ММП крупных скоплений природного газа до сих пор вызывает споры. Однако уже первый опыт глубокого бурения в нефтегазоносной области на побережье моря Лаптевых в 1940–1950-х гг. показал, что в толще ММП встречаются нефтегазоносные пласты [Калинко, 1959]. Так, установлено, что нефте- и газосодержащими являются свиты пермского и триасового возраста, находящиеся в криолитозоне. Были зафиксированы выходы газов из этих свит на дневную поверхность, обусловленные развитой складчатостью и значительной тектонической раздробленностью осадочного чехла. Нефте- и газопроявления приурочены к песчаникам, иногда пропитанным нефтью. Выходы газа обнаружены на дневной поверхности (в основном в мелководных озерах), а также в разведочных скважинах.

В районе Анабаро-Хатангского междуречья по скважинам Р-41 и К-426 отмечались газопроявления из средне- и верхнетриасовых туффитов и песчаников с глубин 70–120 м. По результатам опробования интервала 112–113 м по скважине Р-41 обнаружено, что дебиты газа могут быть весьма значительными и достигать 11 500 м<sup>3</sup>/сут. В то же время по скважине К-426 при испытании пласта на глубине 95 м дебит газа не превышал 120 м<sup>3</sup>/сут [Калинко, 1959]. Очевидно, что речь идет не о биохимическом газе, а о катагенетическом, соседствующем с нефтью. Причем скопления приходятся на пласты песчаников с достаточно хорошими коллекторскими свойствами, т. е. имело место промерзание обычных нефтегазоносных залежей. Сформированные в предыдущие эпохи обычные нефтегазоносные залежи или нефтегазоматеринские пласты подвергаются многолетнему эпигенетическому промерзанию. При этом в залежах со сложным составом углеводородов могут происходить процессы выпадения в жидкую фазу тяжелых углеводородов и соответствующее облегчение состава собственно газовой фазы, в которой будет доминировать метан с небольшими примесями его гомологов. Наблюдаются также процессы гидратообразования.

Другой механизм появления в пределах ММП глубинного, катагенетического газа – миграция по проницаемым зонам (разломам) или литологическим окнам. Ф.Э. Арэ [1998] представляет следующий возможный сценарий эмиссии глубинных газов в атмосферу. До формирования криолитозоны

**Изотопный состав углерода внутримерзлотного метана на севере Западной Сибири и Канады**

Номер скважины	Возраст отложений	Глубина высвобождения газа, м	$\delta^{13}\text{C}$ , ‰
<i>Дельта р. Маккензи [Dallimore, Collett, 1995]</i>			
92GSCTaglu	Неоген	57.0	-89.9
	Неоген	119.4	-78.8
	Неоген	167.5	-79.9
	Неоген	326.0	-78.0
	Неоген	354.0	-79.8
<i>П-ов Ямал, Бованенковское месторождение [Yakushev, Chuvilin, 2000]</i>			
51-P-1	Qm <sub>3</sub>	28–33	-73.9
51-P-1	Qm <sub>2</sub>	59–64	-74.6
52-P-2	Qm <sub>2</sub>	114–120	-70.4

происходила локальная разгрузка глубинных газовых залежей в гидро- и атмосферу через субвертикальные зоны трещиноватости и перекрывающие их рыхлые четвертичные отложения. Развитие криолитозоны законсервировало и остановило восходящие потоки газа. В многолетнемерзлых породах образовались полости, заполненные свободным газом или газогидратом. Эти полости должны концентрироваться преимущественно вдоль очагов бывшей разгрузки, например, в зоне разлома, сопряженной с таликовой зоной.

Такой механизм миграции углеводородов в криолитозону из нижележащих нефтегазоконденсатных залежей, несомненно, возможен. На арктическом побережье Аляски в районе нефтяных месторождений Kuparuk River и Prudhoe Bay, где проводились специальные работы по разведке континентальных гидратосодержащих отложений, известны по крайней мере два крупных глубинных разлома, по которым, вероятно, происходит восходящая миграция углеводородов в зону стабильности газогидратов (ЗСГ) и в криолитозону. По данным изотопного анализа, в составе газа из гидратосодержащих горизонтов присутствуют как биохимический, так и глубинный, катагенетический газ. Возможно, катагенетический газ из газовой шапки нефтяных залежей мигрировал вдоль разломных зон в ЗСГ, где смешивался с биохимическим газом, выделившимся при разложении органического вещества, и при достижении достаточной концентрации переходил в гидратное состояние. Согласно другому сценарию, катагенетический и биохимический газы изначально смешивались и концентрировались вне интервала ЗСГ. Затем вследствие климатических изменений происходило охлаждение горных пород и появлялись благоприятные условия для формирования газогидратов [Collett, 1993]. При агградации мерзлой толщи часть газо- и гидратосодержащих интервалов оказалась в ее пределах.

Глубинный, катагенетический газ может оказаться в ММТ и в результате деятельности человека, поступая через негерметичные или аварийные скважины. С этой точки зрения представляется целесообразным рассмотреть опыт глушения разведочной скважины 118 в центральной части Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения на п-ове Ямал в 1984–1988 гг. [Якушев, 2009]. В ходе многолетнего фонтанирования газа по заколонному пространству аварийной скважины вокруг нее образовалась зона высокой загазованности криолитозоны. При этом разгрузка газа происходила как через гигантскую воронку, образовавшуюся вокруг устья аварийной скважины, так и через талики под озерами и водотоками на расстоянии до 1 км от скважины.

Через несколько дней после начала аварии, в июле 1984 г., газ сеноманской залежи стал посту-

пать по заколонному пространству, уходя вверх к околовольному кратеру и насыщая все вышележащие проницаемые пласты, особенно в верхней части разреза под 40–50-метровой покрывкой льдонасыщенных четвертичных пород. Основные вторичные залежи газа формировались в проницаемых слоях, в интервале глубин 40–60 и 100–120 м. По мере роста давления насыщения и в зависимости от проницаемости мерзлых пород газ распространялся латерально по площади, достиг территории рядом расположенного озера и речной долины с малой мощностью ММТ и таликами, где начал разгружаться на дневную поверхность с грифонообразованием различной интенсивности. С этого момента вторичные газовые залежи, вероятно, далее по площади не распространялись, так как их газ активно выходил на дневную поверхность.

Из приведенного описания очевидно, что вторичные залежи могут находиться в основном на глубинах 40–60 и 100–120 м, что в целом соответствует глубинам наиболее интенсивных проявлений биохимического газа из криолитозоны, установленным при более позднем бурении мерзлотно-параметрических скважин в различных частях Бованенковского месторождения [Якушев, 2009]. По-видимому, к этим интервалам глубин приурочены внутримерзлотные слои с коллекторскими свойствами. Последующее бурение разгрузочных скважин подтвердило активную миграцию газа к дневной поверхности именно с глубин более 50 м. Причем если на глубинах 40–60 м газопроявления были относительно слабыми, то на 100–120 м они носили характер прорыва с больших глубин (возможно, из сеноманской залежи). Поэтому в данном случае трудно определить генезис основной части газа (биохимический или глубинный, катагенетический) в ММП в районе аварийной скважины. Несомненным является наличие струйной миграции газа в слабодистых породах на глубинах 100–120 м.

Таким образом, подтверждается предположение о том, что высокольдистые покровные отложения (например, верхние 40–50 м на Бованенковском месторождении) являются практически непроницаемыми для газа. Это отчасти подтверждает гипотезу о приповерхностном льдонасыщенном слое ММТ как о площадной покрывке-ловушке для мигрирующего снизу газа. Однако нижележащие слои криолитозоны, имеющие меньшую льдистость и включающие проницаемые песчаные прослои, не являются препятствием для латеральной миграции газа в ММТ. Очевидно, что данная авария привела к формированию техногенных скоплений сеноманского газа в интервале ММТ.

### УГОЛЬНЫЙ ГАЗ

Особый случай внутримерзлотных газовых скоплений – скопления угольных газов. Они наб-

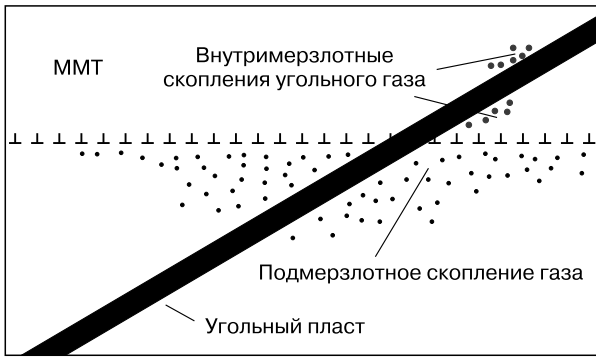


Рис. 1. Скопления угляного газа в области распространения ММП.

людаются в районах распространения угленосных бассейнов, когда формирующаяся многолетнемерзлая толща предотвращает выветривание верхнего интервала угленосных отложений (рис. 1). В качестве примера можно привести работу [Хворостина, 1985], где рассматриваются газопроявления из угленосных пластов и их газоносность в

пределах криолитозоны в Южно-Якутском угленосном бассейне. Среди особенностей газогенерации в криолитозоне угленосных бассейнов следует отметить присутствие в газе (помимо метана) азота, углекислого газа и водорода. Причем концентрация водорода может достигать 34 % при обычном фоне 1–5 %. Метановая зона может начинаться уже с глубин менее 100 м, в отличие от угленосных бассейнов вне криолитозоны, где она начинается с глубин 500–600 м. Содержание углекислого газа обычно не превышает 5 %, но иногда достигает 20 %. Азот присутствует практически повсеместно в количествах от 2 % (глубины более 200 м) до 92 % (5–20 м).

Подобные исследования на Аркагалинской площади в Зырянском бассейне на Северо-Востоке России также показали, что присутствие толщ мерзлых пород резко сокращает зону метанового выветривания, а верхние слои криолитозоны содержат метан в повышенных количествах [Хрюкин, 1978]. Аналогичные газовые скопления могут иметь место при промерзании толщ газоносных сланцев, но описания подобного явления пока не встречены.

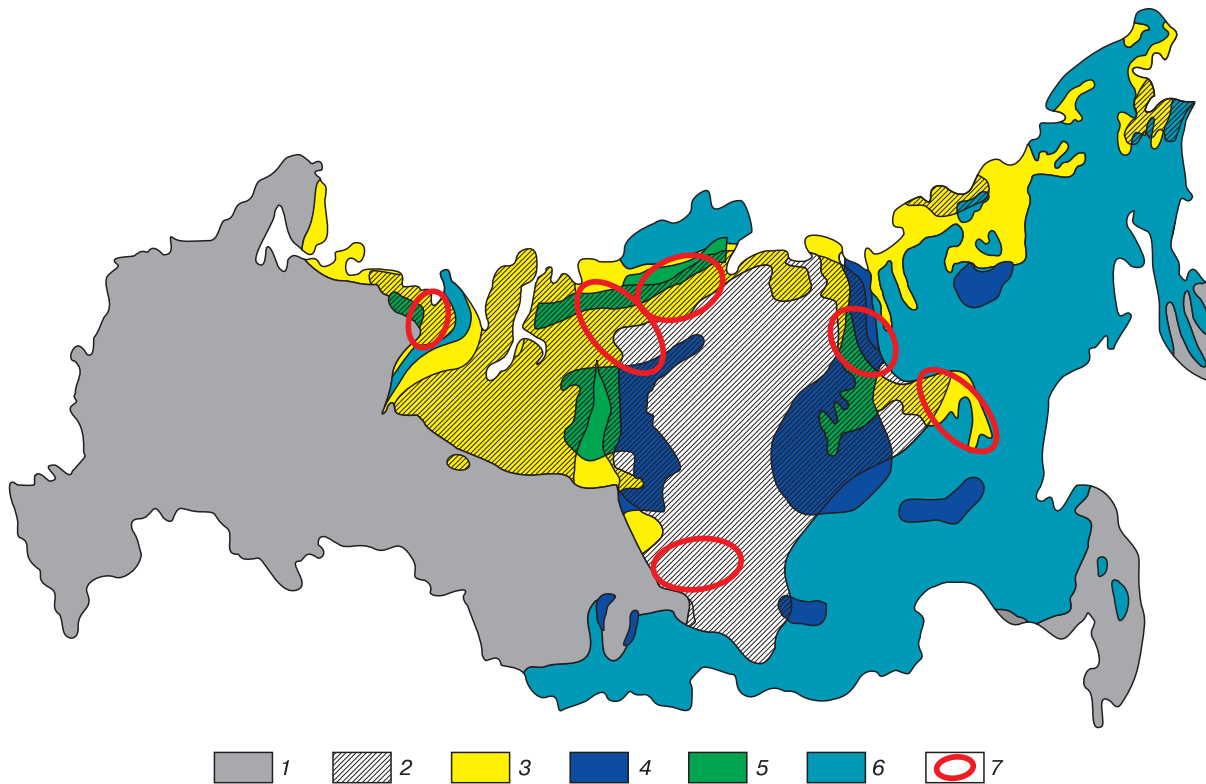


Рис. 2. Схема распространения внутримерзлотных газов различного генезиса на территории России (по [Якушев, 2007], с дополнениями).

1 – область отсутствия ММП; 2 – область распространения глубинного катагенетического газа; 3 – область распространения биохимического газа в пределах арктических равнин; 4 – область распространения угляного газа; 5 – область совместного распространения угляного и биохимического газов; 6 – область распространения биохимического газа в межгорных впадинах; 7 – предположительные районы распространения сланцевого газа.

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ РАЗЛИЧНОГО ГЕНЕЗИСА В ММТ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

Для того чтобы провести районирование области распространения криолитозоны в России по генезису газа внутримерзлотных газовых и газогидратных скоплений, на геокриологическую карту России были наложены схемы нефтегазоносных и угленосных бассейнов. Оставшаяся часть территории приходится либо на равнины с четвертичным покровом, где распространены внутримерзлотные скопления биохимического газа, либо на орогенные пояса, где скопления биохимического газа могут встречаться в рыхлых отложениях межгорных впадин. В результате была получена схема распространения внутримерзлотных газов различного генезиса (рис. 2) [Якушев, 2007].

### ВЫВОДЫ

Проведенные исследования генезиса, условий миграции и аккумуляции внутримерзлотных газов позволяют сделать следующие выводы.

1. Наиболее распространенным в ММТ является метан биохимического генезиса. Его образование связано с микробиальной переработкой органического вещества в пределах СТС в летнее время и с более медленной переработкой захоронной органики непосредственно в толще ММП. Его концентрирование в отдельные скопления может происходить вследствие промерзания газосодержащих пород и “выдавливания” водогазовой смеси в проницаемые талые и мерзлые пропластки или в трещины гидроразрыва, создаваемые давлением всестороннего промерзания. При объемном промерзании внутри замкнутых “карманов” могут создаваться давления, превышающие давления гидратообразования, и происходить частичный переход газа в гидратное состояние. Формированию скоплений биохимического газа способствует засоленность пород криолитозоны, что повышает мобильность воды и создает более благоприятные условия для вытеснения ее газом. Однако чаще всего скопления биохимического метана относительно невелики, но многочисленны и рассеяны по большой площади.

2. В регионах распространения нефтегазоносных бассейнов возможно попадание в ММТ глубинных, катагенетических углеводородных газов. Скопления таких газов могут иметь следующее происхождение:

а) в результате эпигенетического промерзания массивов горных пород, содержащих обычные залежи нефти и газа;

б) вследствие миграции газа снизу по проницаемым зонам (разломы, литологические окна, талики) и образования скоплений в проницаемых слоях ММТ;

в) в результате формирования техногенных залежей в интервале ММТ вследствие перетока по стволам аварийных скважин. Этот газ может смешиваться или даже замещать биохимический газ в пластах-коллекторах внутри ММТ.

3. В районах распространения угольных и сланцевых толщ в интервале ММТ могут быть встречены скопления угольного или сланцевого газа, сформированные как до промерзания разреза, так и после промерзания. Причем в последнем случае формирование льдонасыщенной покрывки над этими толщами перекрывает зону выветривания и способствует образованию скоплений газа с глубины в первые десятки метров.

Исследования проведены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения проектной части государственного задания в сфере научной деятельности (№ 13.290.2014/К).

### Литература

- Арз Ф.Э.** Проблема эмиссии глубинных газов в атмосферу // Криосфера Земли, 1998, т. II, № 4, с. 42–50.
- Вожов В.И.** Многолетнемерзлые породы – новый тип флюидоупора // Породы-коллекторы нефтегазоносных отложений Сибири. Новосибирск, СНИИГГиМС, 1984, с. 78–87.
- Калинко М.К.** История геологического развития и перспективы нефтегазоносности Хатангской впадины / М.К. Калинко. Л., Гостоптехиздат, 1959, 358 с.
- Краев Г.Н., Шульце Э.Д., Ривкина Е.М.** Криогенез как фактор распределения метана в горизонтах мерзлых пород // Докл. РАН, 2013, т. 451, № 6, с. 684–687.
- Ривкин Ф.М., Левантовская Н.П.** Динамика подрусловых таликов и формирование газовых гидратов // Криосфера Земли, 2002, т. VI, № 2, с. 36–42.
- Хворостина А.А.** Газоносность угольных пластов Денисовского месторождения // Новые угленосные районы Южно-Якутского бассейна. М., ВСЕГЕИ, 1985, с. 104–107.
- Хрюкин В.Т.** Метаноносность угольных пластов Аркалинского каменноугольного месторождения // Изв. вузов. Геология и разведка, 1978, № 4, с. 168–170.
- Якушев В.С.** Ресурсы и перспективы освоения нетрадиционных источников газа в России / В.С. Якушев, Е.В. Перлова, В.А. Истомин и др. М., ООО “ИРЦ Газпром”, 2007, 151 с.
- Якушев В.С.** Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне / В.С. Якушев. М., ВНИИГАЗ, 2009, 192 с.
- Anthony K.M.W., Vas D.A., Brosius L. et al.** Estimating methane emissions from northern lakes using icebubble surveys // Limnology and Oceanography: Methods, 2010, vol. 8, No. NOV, p. 592–609.
- Brouchkov A., Fukuda M.** Preliminary measurements on methane content in permafrost, Central Yakutia, and some experimental data // Permafrost and Periglacial Processes, 2002, vol. 13, No. 3, p. 187–197.
- Collett T.S.** Natural gas hydrates of the Prudhoe Bay and Kuparuk River area, North Slope, Alaska // Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol., 1993, vol. 77, No. 5, p. 793–812.

**Dallimore S.R., Collett T.S.** Intrapermafrost gas hydrates from a deep core hole in the Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada // *Geology*, 1995, vol. 23, No. 6, p. 527–530.

**Rivkina E., Gilichinsky D., Wagener S., Tiedje J., McGrath J.** Biogeochemical activity of anaerobic microorganisms from buried permafrost sediments // *Geomicrobiol. J.*, 1998, vol. 15, No. 3, p. 187–193.

**Walter K.M., Chanton J.P., Chapin F.S., Schuur E.A.G., Zimov S.A.** Methane production and bubble emissions from

Arctic lakes: Isotopic implications for source pathways and ages // *J. Geophys. Res.*, 2008, vol. 113, G00A08.

**Wille C., Kutzbach L., Sachs T., Wagner D., Pfeiffer E.-M.** Methane emission from Siberian Arctic polygonal tundra: Eddy covariance measurements and modeling // *Global Change Biol.*, 2008, vol. 14, No. 6, p. 1395–1408.

**Yakushev V., Chuvilin E.** Natural gas and gas hydrate accumulations within permafrost in Russia // *Cold Regions Sci. and Technol.*, 2000, vol. 31, p. 189–197.

*Поступила в редакцию  
16 сентября 2014 г.*