

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ МЕТАНА

В.М. Хазинс

Приведены общие характеристики геологических источников метана. Обосновывается газогидратная гипотеза формирования потока метана термокарстовых озер Арктики, позволяющая считать этот метан выделяющимся из геологического источника. Расчеты всплытия импульсных выбросов метана геологических источников по усовершенствованной методике продемонстрировали снижение по сравнению с более ранними расчетами объема метана, необходимого для достижения метаново-воздушным облаком тропопаузы, но этот объем все равно еще слишком велик, чтобы отнести его к наблюдаемым событиям.

Введение

Баланс метана в атмосфере определяется поступлением его из литосферы, стоком в атмосфере и поглощением почвой. Основным элементом, разрушающим метан и обеспечивающим до 85% его стока, является гидроксил (ОН). Разница между поступлением и стоком отражается в изменении полного содержания метана в атмосфере. В атмосфере метан не образуется [Брасье, Соломон, 1987]. В предыдущее столетие масса метана в атмосфере равномерно увеличивалась примерно на 1% в год, и в настоящее время составляет около 5 Гт. В промежутке между 2000 и 2005 гг. отмечается уменьшение прироста полной массы метана практически до нуля [IPCC, 2007].

Источники метана по большей части распределены на огромной территории (болота, рисовые поля, тундра и т.п.), что обеспечивает относительно медленное поступление метана с единицы площади. В результате метан вовлекается в циркуляционные потоки тропосферы и перемешивается с воздухом. Время жизни метана в атмосфере достигает почти десяти лет. Поэтому метан успевает хорошо перемешаться с воздухом и его концентрация в атмосфере почти постоянна, несколько уменьшаясь от высоких широт к низким в Северном полушарии.

В основном, метан генерируется метаногенными бактериями и поступает в атмосферу по мере его производства. Источники, выделяющие накопленный ранее метан в процессе дегазации Земли, получили название геологических источников. Метан подобных источников был запасен в стратиграфических ловушках или газогидратах, по большей части, в предшествующие геологические времена, но эти залежи могут пополняться и в настоящее время за счет притока метана из глубин Земли. По-видимому, до работы [Etiope, 2004], в которой геологическим источникам отводился 8,5% от полного потока метана, такие источники вообще не учитывались в балансе метана. С учетом того, что глобальный поток метана – примерно 600 Мт в год [IPCC, 2007], доля геологических источников составляет примерно 50 Мт в год и этот метан способен оказывать заметное влияние на климат в глобальном масштабе.

Значительная часть метана геологических источников выделяется в газовом потоке из более 1200 грязевых вулканов [Etiope, 2004]. В [Milkov et al., 2003] глобальный поток метана из грязевых вулканов оценивается в 33 Тг/год, из них ~15,9 Тг/год – в спокойном состоянии, ~17,1 Тг/год – в результате извержений. В [Etiope, 2004] приводится несколько меньшая величина глобального потока из грязевых вулканов – 5÷13 Тг/год. Наконец, в совместной работе [Etiope, Milkov, 2004] авторы сужают диапазон до 6÷9 Тг/год. Грязевые вулканы имеют широкий спектр размеров и могут достигать десятков километров в диаметре, сотен метров в высоту, и исторгать в процессе извержения до $5 \cdot 10^8$ м³ газа [Kopf, 2002].

Возможность выделения значительных объемов метана часто связывают с газогидратными залежами. Выбросы метана в виде плюмов из океанической коры достигают сотен метров по высоте и нескольких километров по ширине. В Охотском море вблизи Сахалина при исследовании газогидратных залежей обнаружен участок размером 200 км², на котором расположено более сорока вулканических круговых структур с диаметрами, достигающими 600 м и более [Shoji, 2005]. Однако роль газогидратных залежей, которыми усеяны океанические склоны, пока оценена не в полной мере. Основной аргумент, который сдерживает переоценку океанических источников, состоит в том, что пузырьки метана в процессе своей миграции к поверхности растворяются в воде и впоследствии окисляются. Действительно, согласно результатам теоретических расчетов [McGinnis et al., 2005] пузыри метана радиусом 1 см, поднимаясь на расстояние 200 м, теряют за счет растворения 85% метана. Пузыри меньшего размера на этом расстоянии растворяются полностью.

Сведения о геологических источниках непрерывно пополняются. Причем, как представляется, некоторые источники, рассматриваемые в настоящее время с точки зрения биологического генезиса метана, могут быть отнесены к геологическим. Ниже будет представлено обоснование гипотезы геологического происхождения метана в случае интенсивного выделения его из локальных источников термокарстовых озер высоких широт Северного полушария.

Учитывая положительную плавучесть метана, можно предположить, что в случае достаточно больших выбросов из геологических источников метан достигнет и преодолеет тропопаузу, не вовлекаясь в циркуляционные процессы. Метан в стратосфере является важным компонентом воздуха, так как влажность воздуха стратосферы незначительна, а метан может служить источником воды и других составляющих водородной группы (H, OH, HO₂ и т.д.) [Адушкин, Кудрявцев, Турунтаев, 2003].

Если метаново-воздушное облако поднимется до высот 20–30 км, то есть области локализации озонового слоя, то последующие реакции могут привести к нарушению динамического равновесия и локальному уменьшению концентрации озона. Этот вопрос был рассмотрен в работе [Хазинс, 2006], где показано, что лишь значительные объемы легких газов, превышающие $2 \cdot 10^9$ м³, способны проникнуть в стратосферу в результате их импульсного выброса из литосферы. Подобные выбросы можно отнести к уникальным событиям, связанных с разгрузкой наиболее мощных геологических источников.

Моделирование в работе [Хазинс, 2006] выполнено по методике [Затевахин, 1994] с постоянным числом Рейнольдса и на относительно грубых сетках, 4–8 счетных точек на радиус. Верификация результатов проводилась путем сравнения с расчетами по полумпирической модели всплытия термиком [Онуфриев, 1967], что свидетельствовало лишь о непротиворечивости результатов. Имеющаяся в настоящее время усовершенствованная методика [Хазинс, 2010], апробированная на сравнении с результатами эксперимента и расчетами других авторов, непосред-

ственно использовавших уравнения Навье–Стокса и достаточно сложные модели турбулентного переноса, позволяет пересмотреть полученные ранее результаты, что также нашло отражение в настоящей работе.

Газогидраты как источник интенсивного истечения метана из термокарстовых озер

В последние годы появился ряд публикаций (см. напр. [Walter et al., 2006; Walter et al., 2008; Zhuang et al., 2009]), в которых обращается внимание на роль термокарстовых озер высоких широт Северного Полушария в формировании потока метана континентальной Арктики. Согласно оценкам термокарстовые озера вносят значительный вклад в поток метана, до 30–35 Тг метана в год. Оценка основана на наблюдениях за локальными областями на поверхности ряда термокарстовых озер, где интенсивное истечение метана имеет пузырьковый характер. По мнению авторов, высокая эмиссия метана из термокарстовых озер обеспечивается биогенной генерацией метана из органики, запасенной в субарктической зоне вечной мерзлоты в плейстоценовую эпоху (от 1,8 млн лет тому назад до 11,5 тыс лет, то есть до конца последнего ледникового периода). Пузырьки метана формируются в глубоких слоях талика под термокарстовым озером и в процессе миграции собираются в стратиграфических вертикальных каналах малого сечения и выделяются в водоем. Достигая поверхности озера, пузырьки метана либо уходят в атмосферу, либо накапливаются в ледяном покрове. При достаточно мощном потоке пузырьки метана, имеющие положительную температуру, даже зимой создают постоянно существующие проталины, через которые метан поступает в атмосферу.

Всесезонно действующие локальные источники на поверхности озер – наблюдательный факт, помогающий объяснить некоторые неопределенности сезонного потока метана в Арктике. Осенью, в сентябре–октябре, в течение нескольких недель фиксируется залповое увеличение потока метана, превышающее даже максимум июльского потока [Masteranov et al., 2008]. К этому времени года температура поверхности почвы падает ниже нуля и метаногенные бактерии прекращают свою деятельность. Термокарстовые озера могут быть тем источником, который обеспечивает залповую эмиссию, если учесть, что к рассматриваемому времени в Арктике генерация гидроксидов, определяемая температурой воздуха, практически прекращается и сток метана становится малым. Однако этот вопрос требует более тщательного изучения.

Предложенная биогенная гипотеза, согласно которой метан образуется в результате деятельности метаногенных бактерий в анаэробных условиях глубоких слоев таликов, расположенных под термокарстовыми озерами и богатых углеродом, недостаточно обоснована. Согласно [Заварзин, Васильева, 1998] интенсивность метаногенеза имеет максимальное значение в верхних горизонтах осадков, снижаясь с глубиной. Кроме того, при низких температурах происходит существенное подавление метаногенов. Производство значительных объемов метана в условиях подавленного метаногенеза требует более глубокого обоснования.

Альтернативным источником метана могут быть газогидратные залежи внутри зоны вечной мерзлоты, в которой, начиная с глубин порядка 200 м и ниже, термодинамические условия не препятствуют образованию газогидратов на стадии формирования мерзлого слоя почвы. Существование непромерзающего озера с положительной температурой у дна приводит к образованию талика, в котором

с глубиной температура падает до нуля. Ниже талика температура грунта отрицательная, но в достаточно толстом слое под таликом значения температуры выше, чем на тех же глубинах слоя вечной мерзлоты, не возмущенной тепловым воздействием озера. Повышение температуры в области локализации газогидратов, если таковые имеются в слое вечной мерзлоты, может привести к их дестабилизации.

Основную информацию о тепловом режиме в мерзлотных почвах приносит численное решение уравнения теплопроводности с внутренней фазовой границей. Трудность связана с описанием характеристик мерзлого грунта. Результаты численного моделирования приведены в ряде работ ([Ling and Zhang, 2004; Nicolsky and Shakhova, 2010]).

Газогидраты существуют в определенном диапазоне температур и давлений. На рис. 1 кривой 1 отмечена граница области стабильности газогидратов в континентальных областях зоны вечной мерзлоты (по данным [Collett, 1994]). Воспользуемся результатами расчета теплового режима под термокарстовым озером радиуса 400 м и глубины 2,5 м со среднегодовой температурой у дна 2°C [Ling and Zhang, 2004]. В расчетах предполагалось, что среднегодовая температура поверхности -9°C , а глубина зоны вечной мерзлоты – 400 м, то есть в зоне вечной мерзлоты рассматриваемого региона температура линейно растет от -9°C на поверхности до 0°C на глубине 400 м (рис. 1, кривая 2). С увеличением глубины геотермический градиент выбирался равным $4^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$.

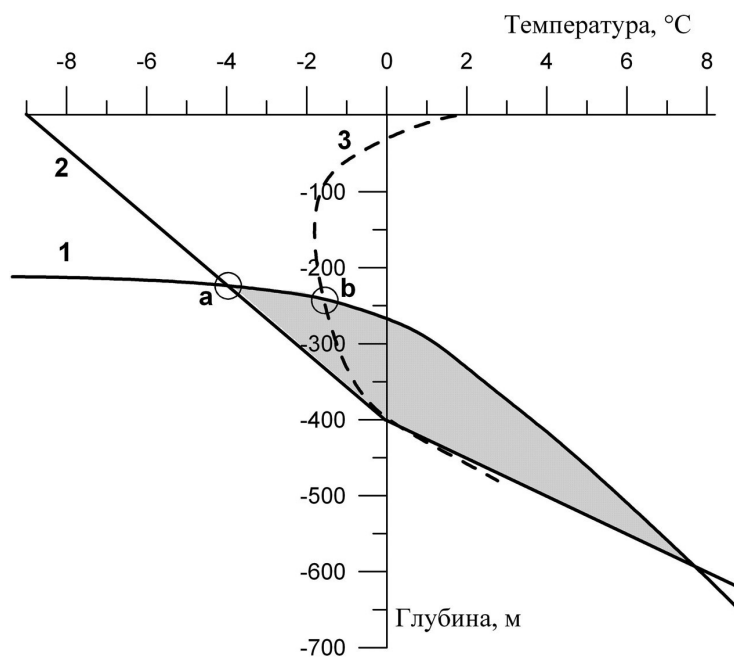


Рис. 1. Граница зоны стабильности газогидратов (1) и температурный режим области вечной мерзлоты вне озера (2) и по оси озера (3)

Рассчитанное в [Ling and Zhang, 2004] и восстановленное в настоящей работе по изолиниям, распределение температуры по глубине вдоль вертикальной оси в центре озера через 3000 лет после его образования отражено на рис. 1 кривой 3.

Область дестабилизации гидратов расположена по глубине между точками *a* и *b* и ее толщина порядка 10 м. Несмотря на некоторую приблизительность анализа, вариация использованных данных не приведет к существенному изменению толщины зоны дестабилизации и 10 м можно считать вполне разумным значением. В результате на глубинах порядка 200 м в слое толщиной примерно 10 м создаются условия для дестабилизации газогидратов, если они там существуют. Объем реализующегося метана значительно превышает объем газогидратов и, следовательно, метан находится под избыточным давлением. При наличии системы трещин не исключено поступление этого метана в талик. О существовании транспортной сети, обеспечивающей движение углеводородов внутри мерзлоты, свидетельствуют съемки внутри мерзлого грунта (песчаник, гравий) на Барроу [Шахова, Сергиенко, Семилетов, 2009].

Таким образом, газогидратная гипотеза формирования потока метана термокарстовых озер, как представляется, имеет право на существование, из чего следует, что эти источники могут рассматриваться как геологические.

Площадь термокарстовых озер в период глобального потепления, которое в арктическом регионе оценивается в 3,5° С за последние 100 лет [IPCC, 2007], растет, что стимулирует предположение о росте потока метана вследствие действия описанного механизма и, как следствие, о существовании положительной обратной связи [Walter et al., 2006] между изменением климата и потоком метана из термокарстовых озер. Однако, даже если площадь термокарстовых озер увеличивается, отклик в потоке метана, поступающего из образовавшегося в настоящее время термокарстового озера, следует ожидать лишь в отдаленном будущем, так как характерное время развития достаточно глубокого талика, являющегося основным источником метана согласно биогенной гипотезе [Walter et al., 2006, Walter et al., 2008], или время развития температурной аномалии вблизи границы зоны устойчивости газогидратов составляет 1000 лет и более [Ling and Zhang, 2004; Nicolsky and Shakhova, 2010]. По этой же причине следует критически относиться к подсчету глобального потока метана из термокарстовых озер, так как среди них могут быть молодые, что вряд ли учитывалось при оценке потока метана. Более того, настоящее потепление не является чем-то экстраординарным для Арктической зоны, близкое по изменению температуры потепление наблюдалось в период с 1920 по 1950 гг., и это не вызвало каких-то заметных изменений в потоке метана [Richter-Mengel et al., 2006].

Всплытие в атмосфере метана при импульсном выделении его из литосферы

Как отмечалось выше, геологические источники метана в результате импульсной разгрузки могут выбрасывать в атмосферу значительные объемы газа, достигающие, по крайней мере, $5 \cdot 10^8$ м³, а, возможно, и много большие. Ограничимся случаем быстрого выброса метана из Земли, то есть предположим, что время выброса метана много меньше характерного времени всплытия метана в атмосфере. В этих условиях можно считать, что в начальный момент метан занимает сферический объем у поверхности Земли. Такой режим истечения представляется наиболее эффективным с точки зрения достижения максимальной высоты подъема при заданной массе метана, так как в процессе истечения нет подмешивания окружающего воздуха. Таким образом, можно оценить минимальный объем выброса метана, при котором прорыв тропопаузы произойдет. Если этот объем окажется сравнимым с поступле-

нием метана из каких-либо известных источников, то это может служить основанием для проведения более глубоких исследований с учетом процесса выброса.

Отметим, что исследование сходимости решения в [Хазинс, 2010] показало, что в расчетах должно использоваться не менее 30 точек на радиус. В представленных расчетах использовано 32 точки на радиус. Поля концентрации служат в настоящем расчете только для визуализации течения, и концентрация в начальный момент равна 1 внутри метанового пузыря и 0 в остальной области. В качестве распределения газодинамических параметров по высоте невозмущенной атмосферы использовались таблицы для стандартной атмосферы [Таблицы, 1974] с высотой тропопаузы 11 км. Задача рассмотрена в осесимметричной постановке.

Расчеты продемонстрировали как качественное, так и количественное отличие результатов. На рис. 2 представлены характеристики течения в поздние моменты времени, когда поднимающееся тороидальное облако, сформированное в результате вихревого перемешивания воздуха и метана, близко к положению зависания. На стадии всплытия ($t = 4$ мин) формируется компактное тороидальное облако, как в распределении концентраций, так и скоростей, в отличие от [Хазинс, 2006], где облако сохраняло грибовидную форму почти до момента зависания. К этому времени еще имеется область с относительной плотностью меньше 1, и облако продолжает всплывать. В то же время в верхней части облака формируется область повышенной (по сравнению с окружающим воздухом) плотности, которая начинает тормозить всплытие. В результате облако достигает положения зависания. Поля течения на этой стадии представлены в момент $t = 5,8$ мин. Здесь явно видна направленная вниз струя, но движение в вихре сохранило направление в отличие от [Хазинс, 2006].

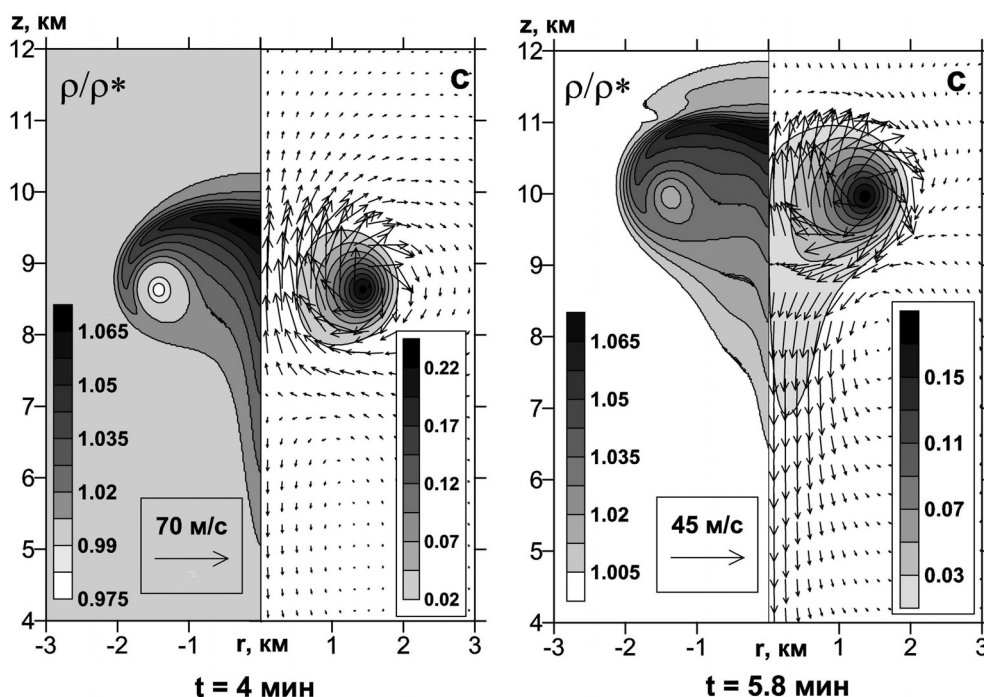


Рис. 2. Распределения относительной плотности ρ/ρ^* , концентрации c и скорости в плоскости (r, z) , в различные моменты времени при всплытии пузыря метана с $r_0 = 600$ м.

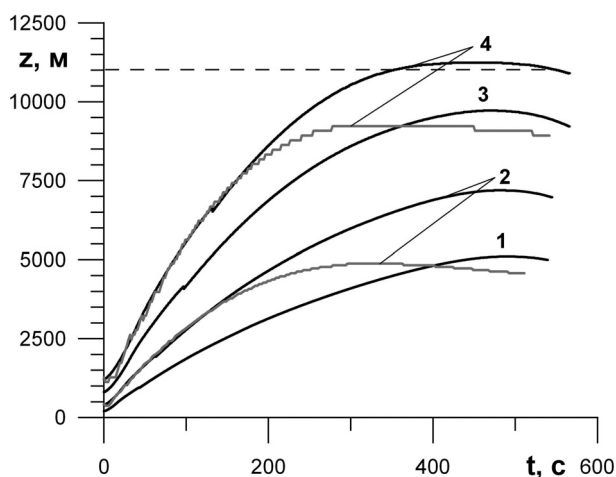


Рис. 3. Динамика всплытия пузыря метана в зависимости от начального радиуса пузыря r_0 . Кривые 1–4 соответствуют $r_0 = 100$ м, 200 м, 400 м и 600 м.

На рис. 3 приведена динамика всплытия пузырей метана различных размеров. Серые линии – результаты [Хазинс, 2006], темные – настоящий расчет. Как видно имеется существенное различие по высоте всплытия, достигающее 30–50% при одном и том же радиусе пузыря метана. Тропопауза достигается пузырем с радиусом 600 м, в отличие от 800 м в [Хазинс, 2006]. Такое отличие в радиусах приводит к уменьшению примерно вдвое объема метана в пузыре, но этого слишком мало, чтобы отменить выводы [Хазинс, 2006], согласно которым объем такого пузыря (10^9 м³) слишком велик для исследованных импульсных выбросов метана.

Заключение

Обе гипотезы происхождения метана в интенсивных пузырьковых плюмах термокарстовых озер недостаточно обоснованы. Производство значительных объемов метана в условиях подавленного метаногенеза вызывает сомнение. В то же время и существование газогидратных залежей в толще мерзлого грунта не имеет пока экспериментального подтверждения. Обоснование любой из гипотез возможно по мере пополнения знаний о процессах в мерзлых грунтах.

Интересно отметить, что высокие потоки метана наблюдаются не только из термокарстовых озер, но и из некоторых мелководных районов шельфа Арктического региона, например, из мелководного шельфа моря Лаптевых [Shakhova et al., 2010]. Так как дно шельфа по большей части остается в мерзлом состоянии со времени трансгрессии океана после конца ледникового периода [Nicolisky and Shakhova, 2010], то в этом случае тоже можно применить газгидратную гипотезу. Согласно [Shakhova et al., 2010] полный поток метана в Западно-Сибирском арктическом шельфе составляет 6,3–9,7 Мт/год. Правда, в работе [Шахова, Сергиенко, Семилетов, 2009] приведена цифра на порядок больше – 90 Мт/год, но обоснование столь разительно отличной оценки, практически, отсутствует.

Некоторые геологические источники метана в результате импульсной разгрузки могут выбрасывать в атмосферу значительные объемы газа, достигающие, по крайней мере, $5 \cdot 10^8$ м³, а, возможно, и много большие. Расчеты всплытия метана по усовершенствованной методике продемонстрировали снижение по сравнению с более ранними расчетами объема метана, необходимого для достижения метаново-

воздушным облаком тропопаузы, но этот объем все равно еще слишком велик, чтобы его отнести к наблюдаемым событиям.

Работа выполнена в рамках Программы № 7 ОНЗ РАН.

Литература

- Адушкин В.В., Кудрявцев В.П., Турунтаев С.Б.* Глобальный поток метана в межгеосферном газообмене // ДАН. 2003. Т. 391. № 6. С. 813–816.
- Брасье Г., Соломон С.* Аэрономия средней атмосферы. Л.: Гидрометеиздат. 1987. 413 с.
- Заварзин Г.А., Васильева Л.В.* Цикл метана на территории России / НТП «Глобальные изменения природной среды и климата». Москва. ISBN 5-201-11941-7. 1998. С. 202–230.
- Затевахин М.А. и др.* Численное моделирование процесса всплытия системы высокотемпературных турбулентных термиков в неоднородной сжимаемой атмосфере // ТВТ. 1994. Т. 32. № 1. С. 44–56.
- Онуфриев А.Т.* Теория движения вихревого кольца под действием силы тяжести. Подъем облака атомного взрыва // ПМТФ. 1967. № 2. С. 3–15.
- Таблицы стандартной атмосферы. ГОСТ 4401–48. М.: Стандартизация, 1974. 68 с.
- Хазинс В.М.* Всплытие в атмосфере метана при импульсном выделении его из литосферы // Известия РАН. ФАО. 2006. Т. 42. № 4. С. 514–523.
- Хазинс В.М.* Метод крупных вихрей в задачах всплытия высокотемпературных термиков в стратифицированной атмосфере // ТВТ. 2010. Т. 48. № 3. С. 424–432.
- Шахова Н.Е., Сергиенко В.И., Семилетов И.П.* Вклад Восточно-Сибирского шельфа в современный цикл метана // Вестник Российской Академии Наук. 2009. Т. 79. № 6. С. 507–518.
- Collett T.S.* Permafrost-associated gas hydrate accumulations / International Conference on Natural Gas Hydrates. Annals of the New York Academy of Science. V. 715. 1994. P. 247–269.
- Etiope G.* New directions: GEM – Geologic Emission of Methane, the missing source in the atmospheric methane budget // Atmospheric Environment. 2004. № 38. P. 3099–3100.
- Etiope G., Milkov A.* New estimates of global methane flux from onshore and shallow submarine mud volcanoes to the atmosphere. // Environmental Geology. 2004.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change / Cambridge, United Kingdom and New-York, NY, USA. 2007.
- Kopf A.J.* Significance of mud volcanism // Review of Geophysics. 2002. V 40. № 2. P. 2-1–2-52.
- Ling F, Zhang T.* Modeling study of talik freeze-up and permafrost response under drained thaw lakes on the Alaskan Arctic Coastal Plain // JGR, 2004. V. 109, № D01111, doi:10.1029/2003JD003886.
- Mastepanov M., Sigsgaard C., Dlugogensky E.J. et al.* Large tundra methaneburst during onset freezing // Nature, Letters. 2008. V. 456. № 4, pp. 628–630.
- McGinnis D.F., Wüest A., Shubert C.J. et al.* Upward flux of methane in the Black Sea: Does it reach the atmosphere? / Proceeding of the 4th International Symposium on Environmental Hydraulics, Hong Kong, 2004. 2005. Publisher: Taylor & Francis Group, London. P. 423–429.
- Milkov A.V., Sassen R., Apanasovich T.V.* Global gas flux from mud volcanoes: A significant source of fossil methane in the atmosphere and the ocean // Geophysical Research Letter. 2003. V. 3. № 2. P. 9-1–9-4.
- Nicolsky D, Shakhova N.* Modeling sub-sea permafrost in the East Siberian Arctic Shelf: the Diminry Laptev Strait // Environ. Res. Lett. 2010. V. 5, № 1. doi: 10.1088/1748-9326/5/1/015006.

Richter-Mengel J., Overland J., Proshutinsky A. et al. State of the Arctic / Report of NOAA. 2006. <http://www.pmel.noaa.gov/pubs/PDF/rich2952/rich2952.pdf>.

Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A. et al. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf // *Science*. 2010. V. 327. P. 1246–1250.

Shoji H., Minami H., Hachikubo A., et al. Hydrate-bearing structures in the sea of Okhotsk // *EOS*. 2005. V. 86. № 2. P. 13, 18.

Walter K.M., Zimov S.A., Chanton J.P. et al. Methane bubbling from Siberian thaw lakes as a possible feedback to climate warming. // *Nature*. 2006. V. 443. P. 71–75.

Walter K.M., Chanton J.P., Chapin III F.S. et al. Methane production and bubble emissions from arctic lakes: Isotopic implications for source pathways and ages. // *JGR*. 2008. V. 113, G00A08. P. 1–16.

Zhuang Q., Melack J.M., Zimjov K.M. et al. Global methane emission from wetlands, rice paddies, and lakes. // *EOS*. 2009. V. 90, № 5. P. 37–44.