

В.Т. Гудзенко, А.А. Вареничев, М.П. Громова

## ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ

**Аннотация.** Истощение запасов газа и нефти побуждает искать альтернативные источники углеводородов. Наиболее перспективными из них признаны месторождения газовых гидратов, в которых природный газ находится в виде твердого соединения с водой. Это своего рода «горючий лед», в котором молекулы метана надежно упакованы в ажурные ледяные клетки из молекул воды. Энергетический потенциал газогидратов на Земле, по мнению многих исследователей, как в России, так и за рубежом, превышает потенциал всех прочих (нефть, газ, уголь) горючих ископаемых вместе взятых. Экологический аспект обусловлен тем, что газогидраты рассматриваются как компонент геологической среды, весьма чувствительный к ее техногенным изменениям, что способствует усилению на Земле парникового эффекта при выделении метана из газогидратов в атмосферу в связи с антропогенным изменением климата. Газогидраты во всем мире содержат такое количество метана, которое на несколько порядков превышает количество метана, находящегося в атмосфере. Присутствие в атмосфере метана усиливает ее парниковый эффект. Газовые гидраты, существующие при температурах и давлениях, близких к условиям их разложения, представляют потенциальную экологическую опасность — в случае смещения теплового равновесия, освободившийся метан может внести весомый вклад в парниковый эффект

**Ключевые слова:** газовые гидраты, метан, углеводородное сырье, ресурсы, энергетический потенциал, вечная мерзлота, шельф, парниковый эффект, атмосфера.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-0-77-91

Газогидраты во всем мире содержат такое количество метана, которое на несколько порядков превышает количество метана, находящегося в атмосфере. Присутствие в атмосфере метана усиливает ее парниковый эффект. Метан является одним из газов, оказывающих наиболее вредное воздействие на климат. По мнению климатологов разложение гидратов в ледниковый период, при низком уровне моря, могло способствовать выделению метана в атмосферу и повышению ее температуры [1, 2].

Газовые гидраты, существующие при температурах и давлениях, близких к условиям их разложения, представляют потенциальную экологическую опасность — в случае смещения теплового равновесия освободившийся метан мо-

жет внести весомый вклад в парниковый эффект [3].

Парниковый эффект (ПЭ), тепличный эффект, оранжерейный эффект — эффект разогрева нижних слоев атмосферы, вызванный поглощением длинноволнового (инфракрасного) излучения земной поверхности, содержащимися в тропосфере парниковыми газами (ПГ). При отсутствии атмосферы и нулевом альбедо температура Земли (т.н. орбитальная температура) определялась бы только солнечной постоянной и составляла бы 5 °С. Наличие альбедо у Земли понижает температуру до –18 °С, а ПЭ составляет 160 Вт/м. Около 100 Вт/м определяется парами воды, содержание которых в атмосфере по объему составляет в среднем 0,3%. Примерно

Таблица 1

**Вклад некоторых стран мира в общемировую выброс парниковых газов****(в пересчете на CO<sub>2</sub>, в %) [4]****Contribution of some countries to global emission of greenhouse gases (in terms of CO<sub>2</sub>, %) [4]**

№ п/п	Источники загрязнения	Страны				
		Российская Федерация	США	Страны Западной Европы	Китай	Япония
1	Сжигание ископаемого топлива	8	22	20	10	4,5
2	Метан	6	20	20	6	2
3	Хлор-фтор-углероды	8	40	37	—	более 10

за 50 Вт/м ответствен диоксид углерода (CO<sub>2</sub>), содержание которого в атмосфере 0,03%. Оставшаяся часть ПЭ определяется метаном, двуокисью азота, озоном (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>) и рядом других газов, общее содержание которых не превосходит  $3 \cdot 10^{-4}\%$ . В настоящее время происходит увеличение концентрации ПГ в атмосфере за счет хозяйственной деятельности человека.

Основной источник ПГ — сжигание ископаемого топлива, которое обуславливает выбросы не только диоксида углерода, но почти всего их спектра, включая фторуглероды. Увеличение концентрации ПГ в атмосфере влечет за собой усиление ПЭ, которое должно выражаться в повышении среднеглобальной приповерхностной температуры (СПТ). Действительно, СПТ с середины XX в. увеличилась на 0,6–0,7 °С, хотя пока не удается выделить из этого прироста ту часть, которая обусловлена ПГ антропогенного происхождения. Существующие климатические модели дают представления о возможных изменениях СПТ при увеличении концентрации ПГ. Так, повышение концентрации ПГ в атмосфере, эквивалентное удвоению концентрации диоксида углерода, может привести к повышению СПТ на 1,5–4 °С (по разным моделям). Однако изменение климата из-за антропогенного роста концентрации ПГ не сводится к росту СПТ (глобальному потеплению), и не исключается,

что даже более существенным для человека может оказаться перераспределение влаги на поверхности планеты и увеличение различных погодных аномалий сезонного, годового и межгодового масштабов.

Основной вклад в выброс ПГ, в частности CO<sub>2</sub>, сейчас вносят развитые страны, но основной прирост таких выбросов происходит в развивающихся государствах. Большую часть прироста выбросов CO<sub>2</sub> дают энергетика и транспорт. Вклад некоторых стран мира в общемировую выброс ПГ (в пересчете на CO<sub>2</sub>) иллюстрируется табл. 1.

Накопление ПГ в атмосфере свидетельствует о том, что нарушен естественный механизм регуляции окружающей среды и, следовательно, начался глобальный экологический кризис.

Проблема накопления ПГ в атмосфере и глобального изменения климата обусловила необходимость принятия в 1992 г. Рамочной конвенции по изменению климата (РКИК) и в 1997 г., в развитие РКИК, Киотского протокола, вступившего в силу в 2005 г. Снизить выброс ПГ можно путем использования альтернативной энергетики, снижением энергоемкости производства, снижением общей мощности хозяйства человека за счет рационализации его потребления. В XXI в. далеко не все страны — источники ПГ снижают их эмиссию, а в Китае и Индии она весьма существенно растет.

Оценка вклада парниковых газов в рост парникового эффекта характеризуется такими цифрами:

- диоксид углерода — 66%;
- фреоны — 8%;
- оксид азота — 3%;
- остальные газы — 5%.

При этом предполагается, что вклад водяного пара в рост ПЭ незначителен, это предположение нуждается в обосновании. При повышении концентрации парниковых газов до 400–500 ppm (частиц ПГ на 1 млн частиц воздуха), согласно некоторым модельным оценкам, возможно, произойдет повышение СПТ в среднем на 1–1,5 °С, а при концентрации 600–700 ppm — даже на 4–5 °С. Сильное потепление вызовет катастрофические изменения в биосфере, резко участятся засухи и наводнения начнется таяние ледников Антарктиды, Гренландии и горных массивов, поднимется уровень Мирового океана. К 2040 г. возможно повышение уровня океана на 20 см, а к 2100 г. — на 80 см. В результате могут быть затоплены приморские равнинные страны (в т.ч. такие густонаселенные как Бангладеш). На севере территории с многолетней мерзлотой возможно вытаивание ледяных толщ и образование на месте лесов озер. Для некоторых стран с холодным климатом (скандинавские, Канада, РФ) глобальное потепление сулит некоторое улучшение климатических условий для сельского хозяйства, но роль позитивного фактора может быть сведено на нет негативными (например, увеличение продолжительности сезона вегетации «подрезается» поздними весенними и ранними осенними заморозками, вероятность которых растет с усилением неустойчивости климата; эта неустойчивость обуславливает неблагоприятные изменения гидрорежима; серьезную угрозу будут представлять неконтролируемые вспышки размножения инвазионных вредителей, неизбежные при пере-

стройке экосистем; эта перестройка обязательно сопровождается и множеством других негативных следствий и т.п.). Из-за уменьшения количества осадков резко снизится производство зерна в североамериканских прериях, которые являются его главными производителями в глобальном масштабе. Катастрофические сценарии потепления вследствие роста ПЭ основаны на том, что оно вызовет процессы с положительной обратной связью, такие, когда потепление инициирует активизацию природных сил, которые будут усиливать свою причину, т.е. глобальное потепление. Например, с ростом СПТ будут нагреваться поверхностные воды океана, а следовательно, будет расти испарение, но, т.к. водяной пар служит главным парниковым газом, может начаться «разгоняющееся» потепление. Аналогично, может начаться высвобождение метана и углекислого газа из газогидратов и многолетнемерзлых пород, так что поток ПГ в атмосферу с потеплением возрастет по уже не зависящим от человека причинам [4].

Следующий по величине вклад в потепление вносит метан — основной неводный компонент природных газогидратов, концентрация которого в атмосфере примерно в 200 раз ниже, чем концентрация  $\text{CO}_2$ . Однако, во-первых, радиационная активность метана примерно в 21 раз выше, чем углекислого газа. Во-вторых, в ближайшие 50–60 лет ожидается удвоение его концентрации. В середине прошлого века парниковый эффект от метана составлял 6% по отношению к эффекту, даваемому углекислым газом, сейчас он составляет уже 10%, а через полвека достигнет 14%. Анализ воздуха, захватываемого полярными льдами, показывает, что современный прирост концентрации метана в атмосфере беспрецедентен за последние 160 тыс. лет. Источники этого прироста неясны. Весьма возможно, что одним из источников

служат наблюдаемые и скрытые выбросы метана при разложении природных газовых гидратов.

Во всяком случае, ясно одно — потепление происходит. Проблема, над которой сейчас задумывается все большее число исследователей, — когда и как отзовутся на это потепление крайне чувствительные к параметрам среды ГГ. Количество метана, которое таят в себе природные ГГ, в 3 тыс. раз превосходит его количество в атмосфере ( $(6-7) \times 10^{12} \text{ м}^3$ ). Освобождение этого парникового потенциала имело бы страшные последствия для человечества. Потепление может вызвать разложение гидратов, а освобождающийся при этом метан приведет к дальнейшему потеплению. Таким образом, может начаться самоускоряющийся процесс [4].

Имеющиеся на сегодня упрощенные оценки изменения температурных профилей земной коры приводят к следующим заключениям. Субмаринные ГГ, расположенные в пределах акватории Мирового океана, внутренних морей и озер, опасений пока не вызывают. При любом развитии событий они останутся стабильными по меньшей мере в ближайшую тысячу лет. Наибольшую опасность представляют гидраты, которые уже сейчас находятся в метастабильном состоянии (в зонах вечной мерзлоты). Особенно подвержены изменению климата газогидратные отложения континентальных арктических шельфов. Благодаря поднимающемуся уровню моря они омываются водами Северного Ледовитого океана и испытывают повышение поверхностных температур на  $10^\circ$  и более в последние 10 тыс. лет. Количество метана, освобождающегося из этого источника, уже сегодня составляет около  $5,6 \cdot 10^9 \text{ м}^3/\text{год}$ , то есть около 1% всех известных источников атмосферного метана. Для этого источника газовых гидратов критической является темпера-

тура  $-2-0^\circ \text{C}$ , выше которой перестает действовать эффект самоконсервации и начинается обвальное разложение газовых гидратов. Выдвинута интересная и достаточно хорошо аргументированная гипотеза, согласно которой периодические потепления и оледенения на Земле вызваны разложением и образованием газовых гидратов. В целом решение проблемы взаимосвязи климат — ГГ находится сегодня в зачаточном состоянии. Компьютерное моделирование не дает однозначного прогноза развития климата. Имеющиеся гипотезы весьма спорны, оценки приблизительны, расчеты дают большой разброс результатов.

ГГ — важное вещество приповерхностной геосферы. В отличие от большинства других это вещество крайне чувствительно к изменениям внешних параметров среды. Небольшое изменение температуры или давления может привести к превращению прочно сцементированных гидратосодержащих пород в разжиженную массу и к освобождению огромных количеств газа, делающего этот процесс необратимым. Инициаторы таких процессов могут быть самые разнообразные. Это вулканическая деятельность, понижение уровня Мирового океана, повышение температуры у основания зоны стабильности за счет продолжающегося процесса седиментации и, наконец, деятельность человека. В природе эти процессы наблюдаются и могут послужить разгадкой многих до сих пор непонятных явлений.

Газогидраты подвергают опасности основания прибрежных структур. С процессами диссоциации гидратов теперь связывают наблюдающиеся во многих районах Земли подводные оползни, осадочные блоки и обвалы. Этим же объясняют действие подводных грязевых вулканов в Каспийском море и прибрежье Панамы. Еще одно проявление гидратов — выбросы газа в окрестностях

острова Беннетта (Новосибирские острова) и в Охотском море. В последнем случае выбросы обусловлены газовым фонтаном, бьющим на глубине 770 м. Исследования с подводных обитаемых аппаратов «Пайсис» обнаружили в районе фонтана характерные формы аномального поля: провальные воронки и ямы, поддонные ниши и пещеры, целую систему сообщающихся гротов.

Однако пристальное внимание газовые гидраты привлекают не только в связи с использованием их как топлива и химического сырья, но и с обеспокоенностью тем, что в результате выделения метана в атмосферу, как при разработке газогидратных месторождений, так и при относительно небольших изменениях термодинамических (климатических) условий, близких к границе фазовой устойчивости газовых гидратов, неизбежно возникнут серьезные экологические и климатические проблемы. Одна из возможных и наиболее просматриваемая сегодня — глобальное потепление Земли, вызванное усилением парникового эффекта, так как удельное поглощение метаном теплового излучения Земли (радиационная активность) гораздо выше, чем у  $\text{CO}_2$ .

В РФ также наблюдается потепление и довольно существенное, заметно отличающееся по величине от среднеглобального. При росте температуры увеличивается размах отклонений практически всех гидрометеорологических показателей, что указывает на рост аномальных погодных явлений на территории. Российская Федерация по территории сопоставима с целым континентом, поэтому в ее крупных географических регионах есть существенные различия в ходе потепления — особенно заметно оно в Сибири. ПЭ, сопровождающийся повышением температуры и удлинением периодов с высокой температурой, увеличивает пожарную опасность и мо-

жет непосредственно влиять на здоровье и смертность населения РФ. Ярчайшее свидетельство этого — катастрофическое для Европейской части РФ лето 2010 г.

Мировое сообщество предпринимает усилия для предотвращения роста ПЭ, прежде всего посредством мер по уменьшению выброса в атмосферу диоксида углерода. Леса, болота, биота Мирового океана поглощают избыток диоксида углерода из атмосферы и депонируют его — запасают в толще отложений. Тем не менее, сосредоточив основное внимание на проблеме эмиссии индустриального углерода в атмосферу, мировое сообщество явно недостаточное внимание уделяет мерам по сокращению рубки лесов и увеличения их площади за счет искусственных посадок. Недооценивается и эмиссия диоксида углерода за счет землепользования и интенсивной вырубки лесов, хотя последняя по массе, на основе разных оценок, составляет не менее половины величины индустриальной эмиссии. Пока повышение концентрации ПГ в атмосфере продолжается, а усилия мирового сообщества в этом направлении имеют невысокую эффективность, не соответствующую масштабу угрозы, исходящей от глобальных климатических изменений [4].

Известно, что большая часть Мирового океана покрыта огромными газогидратными полями, под которыми находятся месторождения свободного газа. Эти зоны с глубинами моря 300—1800 м, с одной стороны, гигантский резерв природного газа, а с другой — грозят экологическими катастрофами и представляют реальную опасность в сейсмически активных зонах океана. Выбросы значительных объемов газа могут иметь катастрофический характер в случае, если растрескивание газогидратного панциря происходит стремительно. Такая воз-

можность может реализоваться в тектонических котловинах, которые быстро погружаются в условиях спрединга дна [6, 21].

В приполярных регионах, там, где наблюдаются отрицательные температуры вод, достигающие приблизительно до  $-1,7$  °С в приповерхностных водах, газогидраты могут существовать и при относительно низких давлениях, на небольших глубинах, находясь при этом в метастабильном состоянии. В этих случаях работает механизм самоконсервации, когда при разложении газогидрата он покрывается ледяной коркой, препятствующей дальнейшему разложению. Сейчас обычно предполагается, что ниже слоя газогидратов расположены скопления метана в свободном состоянии. Стоит, однако, заметить, что практически все запасы (около 99%) газогидратов образуют именно океанические. Это заставляет обратить на них самое пристальное внимание, тем более что современные прогнозы изменения климата в XXI в. дают уже такое возможное повышение температур, которое может затронуть существенную часть океанических газогидратов, находящихся сейчас в зоне стабильности.

Упругость газов и паров воды над газовыми гидратами значительно меньше, чем в свободном состоянии, и даже температура их замерзания понижена. Запасы природного газа в газогидратных залежах суши сопоставимы с запасами обычных газовых месторождений. А в осадках дна Мирового океана количество метана, заключенного в газогидратных залежах, во много раз превышает общие ресурсы всех других горючих ископаемых суши. По оценкам российских ученых, в глубоководных отложениях заключен почти 1 млрд км<sup>3</sup> газа. Глубоко под толщей океанских вод, возможно, хранятся громадные и до сих пор не используемые его запасы.

Известно, что вследствие притока тепла из недр температура в земной коре растет приблизительно на несколько градусов на каждые 100 м глубины (в спокойных участках океанической коры — на 2–3 °С, в активных — до 4–6 °С/100 м). В результате, несмотря на повышение давления с ростом глубины, температура в коре быстро становится слишком высокой для существования газогидратов. С учетом того, что температура глубоководных вод тоже составляет несколько градусов выше нуля по Цельсию (в среднем 3–4 °С), для разложения всех запасов океанических газогидратов необходимо прогреть глубоководные воды и верхний слой осадочной толщи, в котором они захоронены, приблизительно на 20 °С или даже несколько менее.

Одна из сложнейших инженерных проблем в условиях нестабильности газогидратных отложений на морском дне — эксплуатация месторождений, постройка нефтяных платформ и прокладка трубопровода. С подобной проблемой газовики столкнулись при прокладке газопровода Россия — Турция [6].

По [7] широкомасштабная разработка месторождений может вызвать подводные оползни и, как следствие, разрушительные приливные волны — цунами.

Как отмечают К.С. Басниев и А.П. Сухоненко (2010 г.) неконтролируемый выход в атмосферу метана может привести к ускорению глобального потепления на планете [8].

По мнению некоторых специалистов (В.С. Захаренко, 2011 г.) газогидраты в ряде случаев приходится рассматривать как нежелательное обстоятельство. Они могут привести к технологическим осложнениям при бурении и эксплуатации скважин на нефть и газ, сооружении плавучих платформ и т.п. Выбросы предположительно газогидратного газа наблюдались на территории Российской Федерации при морском разведочном бу-



рении в Печорском море (вблизи острова Колгуев).

При увеличении толщины осадков в море и погружении или уменьшении толщи мерзлоты гидрат метана распадется и на небольшой глубине образуется газовый резервуар, из которого газ может прорваться на поверхность. Такие взрывы действительно наблюдаются в тундре и иногда в морях. Катастрофический распад гидрата метана считается причиной позднепалеоценового термального максимума, геологического события, на границе палеоцена и эоцена, приведшего к вымиранию многих видов животных, изменению климата и седиментации.

Как известно, в высоких широтах Северной Атлантики происходят процесс опускания ко дну охлажденных вод и дальнейшее распространение их в глубинных слоях по всему Мировому океану, а на смену им, по поверхности, в Северную Атлантику приходят теплые воды из низких широт (к примеру, течение Гольфстрим). Таким образом, формируется современная межконтинентальная конвейерная лента, система океанических течений.

Существуют гипотезы многих исследователей о том, что потепление климата как раз вызовет разрушение центров формирования холодных глубинных вод Мирового океана, что замедлит, а то и вовсе прекратит работу таких течений, как Лабрадорское — переносящих холодную воду из высоких в низкие широты. В свою очередь это приведет к ослаблению либо полной остановке течений, подобных Гольфстриму, — переносящих теплую воду из низких широт в высокие.

Основные фундаментальные задачи в рамках проблемы газовых гидратов состоят сегодня в выяснении механизмов влияния газовых гидратов на климат Земли, окружающую среду и другие процессы, идущие в геосфере. Требуется уточнение ресурсов, ареалов распрост-

ранения, структуры и типов газогидратных залежей в земной коре. Необходимо определение условий образования и стабильности газогидратов в зависимости от температуры, давления, химического состава гидратообразующих компонентов и геологической обстановки, в которой они существуют [9].

В.А. Краюшкин отмечает, что ежегодно из недр Земли в атмосферу поступает  $100 \cdot 10^6$  т метана, что примерно соответствует  $150 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup> газа. По данным Е.Ф. Шнюкова, в настоящее время в пределах акватории Черного моря (за исключением экономической зоны Турции) насчитывается более 300 полей газовыделяющих структур. По расчетам В.Х. Геворкьян и О.Н. Сокур (2011 г.), только в пределах выявленных донных полей газовыделяющих структур западной и прикрымской частей Черного моря в водную толщу в год поступает около  $50 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup> газов преимущественно метана [10, 22].

По мнению Ю.И. Червяковой (2012 г.) для Западно-Арктического сектора РФ фактор экологического риска является доминирующим, что обусловлено следующими причинами:

- изменениями климата, способствующими изменению термобарических условий в поверхностных водах;
- сейсмической активности в молодых разломах и возобновлением тектонической активности в зонах старых разломов, что может спровоцировать локальные взрывы газовых гидратов (подводная окраина Западного Шпицбергена, пролив Стурфьорд);
- устойчивостью морского дна, в связи с перспективой построения трубопровода по дну Баренцева моря.

Тем не менее, несмотря на вышеуказанные проблемы, газовые гидраты следует рассматривать как экологически чистое топливо будущего, которое является стратегическими запасами страны.

Начиная с 2003 г., в России руководящим Документом Министерства природных ресурсов принято решение перспективные участки месторождений ГГ наносить на карту [11].

Как отмечается в работе [12], до недавнего времени существовало несколько гипотез, направленных на объяснение причин резких климатических изменений, имевших место на нашей планете. Одна из таких гипотез была предложена Kennett с соавторами и получила название «газгидратная пушка» (clathrate gun hypothesis). Смысл этой гипотезы состоял в том, что изменение термического режима донных метановых гидратов при смене климатических эпох могло привести к массивным выбросам метана в атмосферу планеты, что в свою очередь привело бы к резким климатическим изменениям и даже коллапсу биосферы. Основной проблемой этой гипотезы была сложность в объяснении двух фактов: не ясен механизм дестабилизации донных гидратов, поскольку установлено, что океанические газогидраты могут сохранять стабильность в широком диапазоне температур и давлений; не очевидны явления, которые позволяют избежать окисления метана, поступающего в водную толщу, с учетом того, что основным условием формирования океанических гидратов является глубина водного столба более 700 м.

С другой стороны, в климатической «кухне» нашей планеты Арктическому региону всегда отводилась исключительная роль холодильника, призванного запускать термохалинный конвейер Мирового океана. Возможная роль Арктики в глобальном цикле углерода и ее вклад в парниковый эффект планеты даже не рассматривались. И это невзирая на тот факт, что почвы и осадки Арктического региона хранят более 30% мировых запасов углерода и что мобильность

этих запасов связана со стабильностью многолетних мерзлых толщ, которая определяется термическим режимом климатической эпохи (ледниковой либо межледниковой). Само название этих климатических эпох должно было послужить подсказкой для осознания того факта, что смена термических режимов при переходе от холодной эпохи к теплой, в первую очередь, будет оказывать влияние на наиболее чувствительную часть геосферы, а именно — на криосферу. При этом наиболее значительные изменения термического режима прослеживаются именно в Арктическом регионе, и именно в межледниковые эпохи в атмосфере Арктического региона регистрируется так называемый атмосферный максимум метана. Он выражается в том, что концентрации метана в атмосфере Арктики самые высокие на планете и в среднем на 10% выше, чем в атмосфере Антарктики [12].

По информации [13], выделение газов может приводить к сбоям в работе акустических систем, эхолотов, разуплотнению воды и к иным негативным последствиям. В результате на дне могут формироваться газовые воронки — депрессии кратерообразной формы в донных отложениях. Иногда они образуют обширные поля. Эти явления были открыты около восточного побережья Канады в 1970 г., их диаметр достигает 1500 м, а глубина 150 м. Очевидно, что любая инженерно-техническая деятельность (установка буровых платформ, работа аппаратов на дне и пр.) в районах развития газовых воронок требует предварительного тщательного анализа геологической ситуации. Газогидратные горизонты могут инициировать газовые факелы, а также приводить к дестабилизации склонов. В свою очередь, сход оползня нарушает установившееся равновесие температура — давление, что способствует внезапному выбросу газа



или даже всплыванию верхних частей осадочного чехла. Изменения уровня океана по тем или иным причинам могут также вызвать резкую «разгрузку» метана в атмосферу, что чревато катастрофическими последствиями, для биосферы на планетарном уровне.

По оценкам специалистов [14, 23] (2013 г.), интенсивное таяние метаногидратов способно вызвать условия не только декомпрессии, но и нагревания. И в последнем факторе таится, возможно, серьезная угроза планетарного масштаба. Массированный выход метана в атмосферу — опасность для климата значительно больше, чем антропогенные выбросы углекислого газа.

По данным NASA изменения климата в Арктике уже привели к интенсификации таяния кристаллогидратов в слоях вечной мерзлоты. При атмосферном давлении для устойчивости гидрата метана нужна температура около  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Замеры со спутника AQUA в период с января 2009 г. по январь 2013 г. показали, что содержание метана в арктическом воздухе возрастало в среднем на 10–20 ppb (молекулярных частиц на миллиард) каждый год.

Национальный центр снежной и ледовой информации США (US National Snow and Ice Data Center) оценивает содержание углерода в арктической вечной мерзлоте в 1400 гигатонн, включая 1000 гигатонн в кристаллогидратах метана. Для сравнения: деятельность человечества за все время его существования привела к выбросу в атмосферу 880 гигатонн углерода.

Так называемый едомный комплекс (едома) субарктических равнин Северо-Восточной Сибири уже считается одним из основных источников парниковых газов. Сейчас выход углерода метана, ежегодно высвобождающегося при таянии едомы, оценивается в 4 мегатонны. Антон Вакс из Оксфордского универси-

тета предсказывает, что таяние вечной мерзлоты и содержащихся в ней гидратов метана примет катастрофические масштабы при повышении среднегодовых температур воздуха в Арктике на  $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Обеспокоенные угрозой глобального масштаба, специалисты NASA начали в прошлом году программу отслеживания концентраций углерода в Арктике (Carbon in Arctic Reservoirs Vulnerability Experiment или CARVE) с помощью аэро съемки. В ней принимают участие 11 научных организаций США, Канады и Австралии. В прошлом году им удалось обнаружить зоны аномального выделения метана из вечной мерзлоты на Аляске.

Такие зоны, по заверениям американцев, существуют и вдоль российского побережья Северного Ледовитого океана. Особенно интенсивное таяние вечной мерзлоты может происходить в Восточно-Сибирском море — как раз там, где «Газпром» рассчитывает организовать совместное предприятие с «Роснефтью» по разведке и добыче углеводородного сырья на шельфе. Выход метана на поверхность за пределами скважин может осложнить работы в этом районе [14].

По сообщению А.И. Яковлева с сотрудниками (2013 г.), глобальная дегазация Земли снабжает геофлюидами атмосферу, гидросферу и литосферу, участвуя в образовании слоя «горючего льда» — метаногидрата толщиной от 3 м (Центральноамериканский желоб) или 40–50 м (Калифорнийский залив) до 1000 м и более (Черное море), и расположенных на 93% площади Мирового океана. Залегая в плейстоцен-современных осадках Мирового океана, газогидратный (клатратный) слой содержит не менее 113 сотен квадриллионов кубометров метана, иначе говоря, 8,5 квадриллионов тонн метанового углерода. Запасы некарбонатного углерода распределяются следующим образом (табл. 2).

Таблица 2

**Распределение запасов некарбонатного углерода, млрд [1]**  
**Noncarbonate carbon reserves, Bt [1]**

№ п/п	Область биосферы	Содержание углерода
1	Морская биота	3
2	Атмосфера	3
3	Детритное ОВ	60
4	Торф	500
5	Биота суши	830
6	ОВ, растворенное в воде	980
7	ОВ почв	1400
8	Извлекаемые и неизвлекаемые ископаемые топлива (нефть, природный газ, уголь)	5000

Суммарный запас составляет 8,8 трлн т.

По материалам [15, 16] общий поток метана из Охотского моря в атмосферу составляет  $9,6 \cdot 10^{11}$  г  $\text{CH}_4$  в год, что может способствовать усилению парникового эффекта.

По геофизическим данным, распространение газогидратов превышает половину площади Охотского моря. Мощность слоя осадков, содержащих газовые гидраты, составляет 300–400 м.

В последние пять лет, благодаря сотрудничеству с научно-исследовательским центром морской геологии «ГЕОМАР» (Германия), был выполнен большой объем газогеохимических исследований в Охотском море, направленных на изучение потоков метана из донных отложений в воду и из воды в атмосферу. Эти работы являлись составной частью международной программы «Глобальные процессы изменения климата». Основной их целью были оценка потока метана в атмосферу в Охотском море, выяснение возможной сезонной и годовой изменчивости субмаринной разгрузки метана и образуемых им газогеохимических полей, а также определение источников метана.

Одной из основных причин роста содержания метана в атмосфере считается антропогенный источник. Однако в на-

стоящее время исследователи обнаруживают все большее количество участков субмаринной разгрузки метана, масштабы которой еще окончательно не определены.

Рядом специалистов отмечается, что активность природных геологических явлений не стабильна. Существуют периоды сейсмотектонических активизаций определенных участков литосферы, в результате которых высвобождаются большие количества природных газов, которые поступают в толщи вод и атмосферу. Источниками метана при этом могут быть нефтегазосодержащие породы, нефтегазовые залежи и газовые гидраты.

По данным С.М. Аксельрода (2014 г.), технологии извлечения метана, основанные на диссоциации газогидратов, обладают, с точки зрения экологии, существенными недостатками. При всех способах диссоциации газогидратов на каждый миллион куб. футов метана выделяется 2500 баррелей воды и, главное, меняется структура коллектора, то есть снижается его механическая прочность. Это явление в условиях эксплуатации морских месторождений газогидратов представляет серьезную опасность, так как вызванная диссоциацией газогидратов дестабилизация дна океа-

на может повлечь за собой подводные оползни и, как следствие, аварии буровых установок и донных сооружений.

Радикально избежать подобных осложнений возможно только при условии, что выделение метана из газогидрата не будет приводить к нарушению механической прочности пород, содержащих газогидрат. Выполнение этого условия стало возможным благодаря предложению выделять из газогидрата метан путем замещения его углекислым газом — двуокисью углерода ( $\text{CO}_2$ ). При такой реакции не происходит выделения воды, так как вместо метаногидрата в порах коллектора образуется гидрат двуокиси углерода, вследствие чего механическая прочность пород не изменяется.

В силу узкого диапазона температуры и давления, в котором обеспечивается термодинамическая стабильность метаногидратов, незначительные нарушения этих условий, а также механические воздействия на залежь могут привести к спонтанному выделению метана из газогидратов в атмосферу или в водную среду. Выделение метана в атмосферу увеличивает парниковый эффект, причем в 20 раз сильнее, чем углекислый газ. Увеличение концентрации метана в воде океанов и морей может повлиять на экосистему бассейнов. В связи с этим ряд лабораторий США, спонсируемых правительственными организациями, изучают естественные причины, способные нарушить стабильность газогидратов и, как следствие, выделение метана. В рамках этих исследований разрабатываются и системы мониторинга содержания метана в атмосфере и водных бассейнах. Бурение и эксплуатация залежей газогидратов на больших площадях тоже может в какой-то степени дестабилизировать газогидраты и привести к выделению метана. Пока этот вопрос еще детально не изучался, поэтому при проведении пробной промышленной разработки место-

рождений газогидратов в районах, где будет проводиться бурение или иные операции, по-видимому, потребуется организовать контроль содержания метана в атмосфере и в воде.

Разработка месторождений метаногидратов с использованием реакции обмена в определенной степени пересекается с проблемой уменьшения содержания углекислого газа в атмосфере. Одним из вариантов решения этой проблемы является закачка в недра углекислого газа, выделяемого промышленными предприятиями, в частности тепловыми электростанциями. Когда добыча метана из газогидратов перейдет из стадии опытных работ в стадию промышленной эксплуатации, технология разработки метаногидратов путем введения в пласты двуокиси углерода сможет частично способствовать решению этой экологической проблемы [17].

Большинство специалистов, занимающихся проблемой газовых гидратов, и в частности, технологиями разработки их залежей, рассматривают этот процесс потенциально экологически опасным. Однако существуют и другие точки зрения. Так, по данным А.М. Мастепанова (2014 г.), руководитель исследовательской программы компании Hydrate Energy International (HEI) Майкл Макс (Michael Max) считает, что газогидраты — единственное экологически безопасное для добычи углеводородное сырье на арктическом шельфе, поэтому для сохранения природы региона следует добывать именно их.

«Это самые экологически безопасные углеводороды, поскольку риски для окружающей среды практически отсутствуют... самая большая проблема — стоимость их транспортировки», — сообщил Макс РИА Новости в кулуарах конференции Arctic Frontiers (Арктические рубежи) в городе Тромсе. По его словам, в связи с этим в Арктике предпочтительно переи-

ти на добычу газогидратов, чтобы сохранить хрупкие экосистемы региона. Глубина залегания газогидратов нигде не превышает 1 км (для сравнения, наиболее глубокая морская нефтяная скважина достигает примерно 9 км). Установки для первичной обработки метаногидратов нужно устанавливать на дне, затем процесс извлечения и транспортировка соответствуют технологиям, принятым для работы с обычным природным газом. Беспокойство экологов относительно потенциальных выбросов метана в атмосферу, которые так же вероятны при извлечении газогидратов, как разливы нефти при ее добыче, практически беспочвенно, считает эксперт. По его мнению, такие выбросы не окажут существенного воздействия на арктический климат. «Если (в процессе добычи) что-то пойдет не так, это не принесет никакого вреда окружающей среде, а выбросы метана в атмосферу далеко не сравнятся с объемами метана, производимыми, к примеру, северными оленями в процессе жизнедеятельности», — сказал он [18].

По мнению В.С. Якушева (2007 г.), несмотря на значительные объемы газа, природные гидраты не представляют собой опасности с точки зрения значительных выбросов метана при изменении климата [19].

Активными противниками разработки газогидратов выступают, прежде всего, экологи. В частности, эксперты из Всемирного фонда дикой природы (WWF) и других природоохранных организаций неоднократно высказывали свои озабоченности по поводу планов масштабной добычи метана из залежей метангидрата в связи с первыми экспериментами

в этой области, проведенными в 2007–2008 гг. на месторождении Маллик (Канада), в начале 2012 г. на Северном склоне Аляски (США) и в марте 2013 г. из гидратных отложений желоба Нанкай (Япония). В частности, WWF предупреждает, что метан относится к парниковым газам, а локальное повышение его концентрации в океане может привести к росту температуры и исчезновению морских растений и животных.

По утверждению представителей «зеленых» мир не должен добывать новый экзотический энергоноситель в то время, когда мы обязались построить низкоуглеродную экономику. Метан может и выделяет меньше углекислого газа при сгорании, чем уголь, но переход на метан не поможет странам в достижении амбициозных целей по сокращению выбросов парниковых газов до 80% к 2050 г. Поэтому полноценное вовлечение гидратов метана в мировой энергетический баланс невозможно и без решения тех экологических проблем, о которых сказано выше. Кроме того, как считают зарубежные специалисты, должны быть найдены технические решения и созданы производственные системы, которые не допускали бы при разработке морских залежей газогидратов разрушения богатых экосистем, сформировавшихся в местах выхода метана на дне водоемов [18].

По данным [20] пока неизвестно насколько экологически безопасны разработки газогидратов. Беспокойство вызывает не столько сам факт добычи газогидратов, сколько вероятность попадания метана в море, а затем и в атмосферу. Есть большой риск того, что это обернется для планеты глобальной катастрофой.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яковлев А. И., Губин С. В., Щекин А. Р. Альтернативные энергоносители в виде гранул метана (клатрата) и сероводорода // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». — 2013. — № 03 (121).

2. Коллетт Т. С., Льюис Р., Учида Е. Растущий интерес к газовым гидратам // Нефтегазовое обозрение. Осень. — 2001. — т. 6. — № 2. — С. 38–53. [www.worldenergy.ru](http://www.worldenergy.ru).
3. Инербаев Т. М., Субботин О. С., Белослудов В. Р., Белослудов Р. В., Кавазое Е., Кудо Д. И. Динамические, термодинамические и механические свойства газов гидратов структур. I и II // Российский химический журнал. — 2003. — т. XLVII. — № 3.
4. Новая Российская энциклопедия. XII (2). — М., 2014 — С. 316–317.
5. Дядин Ю. А., Гушин А. Л. Газовые гидраты // Соросовский образовательный журнал. 1998. — № 3 (28).
6. Дмитриевский А. Н., Баланюк И. Е. Газогидраты Баренцевоморского шельфа и критерии устойчивости морского дна // Газовая промышленность. — 2009. — № 7.
7. Молачиев А. С. Газогидраты // Энергетическая политика. — 2010. — Вып. 6.
8. Басниев К. С., Сухоносенко А. Л. Перспективы освоения ресурсов газогидратных месторождений // Газовая промышленность. — 2010. — № 1.
9. Захаренко В. С. Потенциальный экологический риск, связанный с газогидратами на западно-арктической континентальной окраине // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. — 2011. — № 4.
10. Геворкьян В. Х., Сокур О. Н. О глубинном происхождении метана в газогидратах // Геологический журнал. — 2011. — № 3.
11. Червякова Ю. И. Газовые гидраты в Западной Арктике: современное состояние и перспективы / Материалы международной молодежной конференции, 26–29 сентября 2012. — Мурманск: МГГУ, 2012. — С. 233–236.
12. Сергиенко В. И., Лобковский Л. И., Семилетов И. П., Дударев О. В., Дмитриевский Н. Н., Шахова Н. А., Романовский Н. Н., Космач Д. А., Никольский Д. Н., Никифоров С. Л., Саломатин А. С., Ананьев Р. Н., Росляков А. Г., Салюк А. Н., Карнаух В. В., Черных Д. Б., Тумской В. Е., Юсупов В. И., Куриленко А. В., Чувилин Е. М., Буханов Б. А. Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей Восточной Арктики как возможная причина «метановой катастрофы» // ДАН. — 2012. — т. 446. — № 3.
13. Мазарович А. О. Реальные и потенциальные геологические опасности на ложе, склонах и шельфе Мирового океана // Вестник РАН. — 2012. — т. 82. — № 8.
14. Метаногидраты: Выгоды и риски // Разведка и добыча. — 2013. — № 6. — С. 8–10.
15. Мишукова Г. И., Пестрикова Н. Л., Мишуков В. Ф. Изменчивость распределения потоков метана на границе вода — атмосфера на акваториях Японского, Охотского морей и открытой части Тихого океана / VIII Косыгинские чтения. Тектоника, глубинное строение и минерагения Востока Азии. Материалы всероссийской конференции 17–20 сентября 2013, Хабаровск. — Владивосток: Дальнаука, 2013. — С. 539–543.
16. Акуличев В. А., Обжиров А. И., Шакиров Р. Б., Малышева Е. В., Гресов А. И., Телеги Ю. А. Условия формирования газогидратов в Охотском море // ДАН. — 2014. — т. 454. — № 3.
17. Аксельрод С. М. Разработка залежей метаногидратов методом замещения метана углекислым газом (по материалам зарубежной литературы) // Каротажник. — 2014. — № 8 (242). — С. 70–102.
18. Мастепанов А. М. Газогидраты в перспективном мировом энергетическом балансе: оценки, проблемы и необходимые условия // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. — 2014. — № 5.
19. Газовые гидраты в российской части Арктики / Материалы Международной научно-технической конференции «Нефть, газ Арктики», Москва, 27–29 июня 2006. — М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2007. — 351 с.
20. Песля В. И. Проблемы и перспективы добычи газа из газогидратов // Вестник СПбГЭУ. — 2014. — Вып. 1 (68). — С. 42–49.
21. Utilization of coalbed methane // Natur. Resours. Forum. 1996. 20. No 1. Pp 59–68.
22. Kruglyakova R. P., Rozov P. B. The Black Sea gas hydrates — the form of near-surface manifestations of deep-sea hydrocarbons // Near-surface expression of hydrocarbon migration AAPG Hedberg Reseach Conference. Abstracts. Canada, Voncouver, B. C. 1994.
23. Suess E., Fisk M., Kadko D. Thermal interaction between backare volcanism and basin sediments in the Bransfield Strait Antarctica // Antarctic Journal of the United States. 1987. T. 22. Vol. 5. Pp. 46–49. **ТАБ**

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Гудзенко Виктор Трифионович<sup>1</sup> — кандидат геолого-минералогических наук, заведующий Отделом по геологии,

Вареничев Анатолий Алексеевич<sup>1</sup> — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий Отделением наук о Земле, e-mail: avar@viniti.ru,

Громова Марина Петровна<sup>1</sup> — заместитель заведующего Отделом по геологии и горному делу,

<sup>1</sup> Всероссийский институт научной и технической информации РАН.

---

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 11, pp. 77–91.

## Ecological problems of gas hydrates

Gudzenko V.T.<sup>1</sup>, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Head of Department,

Varenichev A.A.<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of Department, e-mail: avar@viniti.ru,

Gromova M.P.<sup>1</sup>, Deputy Head of Division,

<sup>1</sup> All-Russian Institute for Scientific and Technical Information of Russian Academy of Sciences (VINITI), 125190, Moscow, Russia.

**Abstract.** Depletion of gas and oil reserves spurs the search for alternative sources of hydrocarbons. In this respect, the deposits of gas hydrates are assumed to be the most promising. Natural gas occurs in a solid compound with water in such reservoirs. This is a sort of “combustible ice” with methane molecules reliably enclosed in a network of ice cells made of water molecules. According to most researchers both in Russia and abroad, energy potential of gas hydrates on the Earth exceeds the potential of all fossil fuels (oil, gas, coal). The ecological aspect is governed by the fact that gas hydrates are the component of the geological environment extremely sensitive to induced alterations, which contributes to the enhancement of greenhouse effect when methane releases from gas hydrates into atmosphere under anthropogenic climate fluctuation. Methane content of gas hydrates in the world exceeds methane content of atmosphere by a few orders of magnitude. Methane present in the atmosphere enhances the greenhouse effect. Gas hydrates under temperatures and pressures approaching gas hydrate decomposition conditions are very environmentally hazardous: —under thermal disequilibrium, released methane can greatly heighten the greenhouse effect.

**Key words:** gas hydrates, methane, hydrocarbons, resources, energy potential, permafrost, shelf, greenhouse effect, atmosphere.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-0-77-91

## REFERENCES

1. Yakovlev A. I., Gubin S. V., Shchekin A. R. Al'ternativnye energonositeli v vide granul metana (klatrata) i serovodoroda [Alternative energy sources in the form of granulated methane (clathrate) and hydrogen sulfide]. *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal «Al'ternativnaya energetika i ekologiya»*. 2013, no 03 (121). [In Russ].

2. Kollett T.S., L'yuis R., Uchida E. Rastushchiy interes k gazovym gidratam [Growing interest in gas hydrates]. *Neftegazovoe obozrenie*. Autumn. 2001, vol. 6, no 2, pp. 38–53. www.worldenergy.ru. [In Russ].

3. Inerbaev T. M., Subbotin O. S., Belosludov V. R., Belosludov R. V., Kavazoe E., Kudo D. I. Dinamicheskie, termodinamicheskie i mekhanicheskie svoystva gazov gidratov struktur. I, II [Dynamic, thermodynamic and mechanical properties of gas hydrates of structures. I, II]. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*. 2003, vol. XLVII, no 3. [In Russ].

4. *Novaya Rossiyskaya entsiklopediya*, t. XII (2) [New Russian encyclopedia, vol. XII (2)], Moscow, 2014, pp. 316–317.

5. Dyadin Yu.A., Gushchin A.L. Gazovye gidraty [Gas hydrates]. *Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal*. 1998, no 3 (28). [In Russ].



6. Dmitrievskiy A. N., Balanyuk I. E. Gazogidraty Barentsevomorskogo shel'fa i kriterii ustoychivosti morskogo dna [The Barents Sea shelf gas hydrates and stability criteria of the sea bottom]. *Gazovaya promyshlennost'*. 2009, no 7. [In Russ].

7. Molachiev A. S. Gazogidraty [Gas hydrates]. *Energeticheskaya politika*. 2010, issue 6. [In Russ].

8. Basniev K. S., Sukhosenko A. L. Perspektivy osvoeniya resursov gazogidratnykh mestorozhdeniy [Prospects of development of gas hydrate reserves]. *Gazovaya promyshlennost'*. 2010, no 1. [In Russ].

9. Zakharenko V. S. Potentsial'nyy ekologicheskiy risk, svyazanny s gazogidratami na zapadno-arkticheskoy kontinental'noy okraine [Potential ecological risk connected with gas hydrates in the West Arctic continental margin]. *Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse*. 2011, no 4. [In Russ].

10. Gevork'yan V. Kh., Sokur O. N. O glubinnom proiskhozhdenii metana v gazogidratakh [Deep-seated origin of methane in gas hydrates]. *Geologicheskii zhurnal*. 2011, no 3. [In Russ].

11. Chervyakova Yu. I. Gazovye gidraty v Zapadnoy Arktike: sovremennoe sostoyanie i perspektivy [Gas hydrates in the West Arctic: Current state and prospects], *Materialy mezhdunarodnoy molodezhnoy konferentsii*, 26–29 September 2012. Murmansk, MGGU, 2012, pp. 233–236. [In Russ].

12. Sergienko V. I., Lobkovskiy L. I., Semiletov I. P., Dudarev O. V., Dmitrievskiy N. N., Shakhova N. A., Romanovskiy N. N., Kosmach D. A., Nikol'skiy D. N., Nikiforov S. L., Salomatin A. S., Anan'ev R. N., Roslyakov A. G., Salyuk A. N., Karnaukh V. V., Chernykh D. B., Tumskey V. E., Yusupov V. I., Kurilenko A. V., Chuvilin E. M., Bukhanov B. A. Degradatsiya podvodnoy merzloty i razrushenie gidratov shel'fa morey Vostochnoy Arktiki kak vozmozhnaya prichina «metanovoy katastrofy» [Degeneration of underwater permafrost and decomposition of gas hydrates on the sea shelf in the East Arctic as a possible cause of «methane disaster»]. *Doklady Akademii nauk*. 2012, vol. 446, no 3. [In Russ].

13. Mazarovich A. O. Real'nye i potentsial'nye geologicheskie opasnosti na lozhe, sklonakh i shel'fe Mirovogo okeana [Realistic and potential geological hazards on the floor, sides and shelf of the World Ocean]. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk*. 2012. vol. 82, no 8. [In Russ].

14. Metanogidraty: Vygoty i riski [Methane hydrates: Benefits and risks]. *Razvedka i dobycha*. 2013, no 6, pp. 8–10. [In Russ].

15. Mishukova G. I., Pestrikova N. L., Mishukov V. F. Izmenchivost' raspredeleniya potokov metana na granitse voda — atmosfera na akvatoriyakh Yaponskogo, Okhotskogo morey i otkrytoy chasti Tikhogo okeana [Mishukova G. I., Pestrikova N. L., Mishukov V. F. Variability of methane flows at the water–air interface in the water area of the Seas of Japan and Okhotsk and the Pacific midocean]. VIII Kosygin'skie chteniya. Tektonika, glubinnoe stroenie i minerageniya Vostoka Azii. *Materialy vs Rossiyskoy konferentsii 17–20 September 2013*, Khabarovsk. Vladivostok, Dal'nauka, 2013, pp. 539–543. [In Russ].

16. Akulichev V. A., Obzhirov A. I., Shakirov R. B., Malysheva E. V., Gresov A. I., Telegi Yu. A. Usloviya formirovaniya gazogidratov v Okhotskom more [Conditions of formation of gas hydrates in the Sea of Okhotsk]. *Doklady Akademii nauk*. 2014, vol. 454, no 3. [In Russ].

17. Aksel'rod S. M. Razrabotka zalezhey metanogidratov metodom zameshcheniya metana uglekislym gazom (po materialam zarubezhnoy literatury) [Development of methane hydrates using the method of methane replacement by carbon dioxide (foreign literature review)]. *Karotazhnik*. 2014, no 8 (242), pp. 70–102. [In Russ].

18. Mastepanov A. M. Gazogidraty v perspektivnom mirovom energeticheskom balanse: otsenki, problemy i neobkhodimye usloviya [Gas hydrates in the future global energy balance: Estimates, problems and requirements]. *Problemy ekonomiki i upravleniya neftegazovym kompleksom*. 2014, no 5. [In Russ].

19. Gazovye gidraty v rossiyskoy chasti Arktiki [Gas hydrates in the Russian Arctic]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnikeskoy konferentsii «Nef't', gaz Arktiki»*, Moscow, 27–29 June 2006, Moscow, RGU nefti i gaza im. I. M. Gubkina, 2007, 351 p. [In Russ].

20. Peslya V. I. Problemy i perspektivy dobychi gaza iz gazogidratov [Problems and prospects of gas recovery from gas hydrates]. *Vestnik SPbGEU*. 2014, issue 1 (68), pp. 42–49. [In Russ].

21. Utilization of coalbed methane. *Natur. Resours. Forum*. 1996. 20. No 1. Pp 59–68.

22. Kruglyakova R. P., Rozov P. B. The Black Sea gas hydrates — the form of near-surface manifestations of deep-sea hydrocarbons. *Near-surface expression of hydrocarbon migration AAPG Hedberg Reseach Conference*. Abstracts. Canada, Voncouver, B. C. 1994.

23. Suess E., Fisk M., Kadko D. Thermal interaction between backare volcanism and basin sediments in the Bransfield Strait Antarctica. *Antarctic Journal of the United States*. 1987. T. 22. Vol. 5. Pp. 46–49.

