

К ПРОБЛЕМЕ ОБРАЗОВАНИЯ ГАЗОГИДРАТНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ НА ШЕЛЬФЕ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ СИБИРИ

А.Ф. Сафронов, Е.Ю. Шиц, М.Н. Григорьев*, М.Е. Семенов

Институт проблем нефти и газа СО РАН, 677891, Якутск, ул. Октябрьская, 1, Россия

** Институт мерзлотоведения СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия*

Исходя из известного соотношения запасов природного газа в водорастворенном состоянии и в месторождениях, можно предположить, что в скоплениях природных газовых гидратов (ПГГ) находится, по-видимому, около 10 % (даже с учетом более высокой удельной концентрации газа в гидратах) от объема газа, находящегося в гидратном состоянии. В большой степени это обусловлено тем, что коэффициент аккумуляции для скоплений ПГГ будет ниже, чем для свободного газа в силу более узкого спектра структурных условий, благоприятных для формирования скоплений. Следовательно, данные по мировой оценке ресурсов газа в гидратном состоянии требуют существенной корректировки.

Гидраты, присутствующие в породах, по происхождению можно подразделить на сингенетические и эпигенетические. Сингенетические гидраты образуются за счет газа, находящегося в породе *in situ* в свободной фазе или водорастворенной на момент наступления термобарических условий гидратообразования. Эпигенетические гидраты образуются за счет газа, поступающего в данную породу, находящуюся в термобарических условиях гидратообразования, в результате миграции.

Для формирования скопления ПГГ, которое может представлять коммерческий интерес, необходимо, кроме оптимальных температуры и давления, степени минерализации воды, еще одно условие — непрерывное (длительное) поступление природного газа в конкретную зону гидратообразования. Это условие выполнимо только в случае вертикальной миграции природного газа по разломам, зонам повышенной трещиноватости, литологическим «окнам» и реже в результате латеральной миграции.

В отношении практического использования перспективными представляются только скопления ПГГ, образование которых связано с процессами вертикальной или латеральной миграции.

Газовый гидрат, сингенетические и эпигенетические гидраты, условия образования скоплений природных газовых гидратов.

FORMATION OF GAS HYDRATE DEPOSITS IN THE SIBERIAN ARCTIC SHELF

A.F. Safronov, E.Yu. Shits, M.N. Grigor'ev, and M.E. Semenov

Natural gas hydrate deposits have been estimated to store about 10% of gas in the hydrate form (even with regard to a higher concentration of gas in hydrates), proceeding from the known ratio of dissolved-to-deposited gas. This high percentage is largely due to the fact that the buffer factor in natural gas hydrate deposits is lower than that for free gas because of less diverse structural conditions for gas accumulation. Therefore, the available appraisal of world resources of hydrated gas needs a revision.

Hydrates in rocks are either syngenetic or epigenetic. Syngenetic hydrates originate from free or dissolved gas which was present in rocks *in situ* at the time when *PT*-conditions became favorable for gas hydrate formation. Epigenetic hydrates are derived from gas which came by migration into rocks with their *PT*-conditions corresponding to formation of gas hydrate.

In addition to the optimum *PT*-conditions and water salinity, economic gas hydrate accumulation requires sustained supply of natural gas into a specific zone of gas hydrate formation. This condition is feasible only in the case of vertical migration of natural gas along faults, fractured zones, and lithologic windows, or, less often, as a result of lateral migration.

Of practical importance are only the gas hydrate deposits produced by vertical or lateral gas migration.

Natural gas hydrate, syngenetic and epigenetic hydrates, conditions of gas hydrate accumulation

ВВЕДЕНИЕ

Зафиксированное в 1970 г. научное открытие «Свойство природных газов, находящихся в земной коре в твердом состоянии, образовывать газогидратные залежи» (В.Г. Васильев, Ю.Ф. Макогон, Ф.А. Третьин, Н.В. Черский, А.А. Трофимук) возбудило мировой интерес к природным газовым гидратам (ПГГ) как возможным энергетическим ресурсам. Во многих промышленно развитых странах (Япония, США, Канада и др.) ПГГ уже рассматриваются как реальный энергетический ресурс. Вместе с тем еще до сих пор не определено, какие геологические и природные факторы контролируют формирование скоплений ПГГ. Также далека от реализации проблема разработки скоплений ПГГ, не разработаны критерии определения рентабельности разработки таких скоплений.

В мировой литературе приведено много оценок ресурсов ПГГ. По опубликованным оценкам, мировые запасы природного газа в газогидратном состоянии колеблются в весьма широких пределах: от $2 \cdot 10^{14}$ м³ [Соловьев, 2003] — $1 \cdot 10^{15}$ м³ [Гинсбург, Соловьев, 1994] — $39 \cdot 10^{15}$ м³ [Gortnitz, Fung, 1994] до $7.6 \cdot 10^{18}$ м³ [Dobrynin et al., 1981]. В основу таких расчетов положен объемный принцип — произведение объема пород, находящихся в термобарических условиях существования газогидратов, и коэффициента гидратонасыщенности. По всем существующим оценкам большая часть ПГГ приходится на материковые окраины Мирового океана. Так, по мнению Ю.Ф. Макогона [Макогон, 2001], до 98 % ресурсов газа в гидратной форме приходится на акватории Мирового океана и только 2 % — на континенты.

На наш взгляд, данные по мировой оценке ресурсов газа, находящегося в гидратном состоянии, требуют существенной корректировки. Исходя из известного соотношения запасов природного газа в водорастворенном состоянии и в месторождениях, можно, не рискуя сильно ошибиться, предположить и соотношение ПГГ в рассеянном состоянии и в скоплениях. По подсчетам Л.Г. Уикса [Weeks, 1958], общий объем растворенных углеводородов в пластовых водах седиментационных бассейнов мира составляет 1800 трлн м³, тогда как в месторождениях (в том числе газ, растворенный в нефти) всего около 113—170 трлн м³, т.е. 6—9 % от объема растворенных газов. Исходя из этого, в скоплениях ПГГ может находиться, по-видимому, около 10 % (даже с учетом более высокой удельной концентрации газа в гидратах) от объема газа, находящегося в гидратном состоянии. В большой степени это обусловлено тем, что коэффициент аккумуляции для скоплений ПГГ будет ниже, чем для свободного газа, в силу более узкого спектра структурных условий, благоприятных для их формирования.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ

Гидраты, присутствующие в литифицированных породах и осадках, по происхождению можно подразделить на сингенетические и эпигенетические. Сингенетические гидраты образуются за счет газа, находящегося в породе *in situ* в свободной фазе или водорастворенной на момент наступления термобарических условий гидратообразования. Эпигенетические гидраты образуются за счет газа, поступающего в данную породу, находящуюся в термобарических условиях гидратообразования, в результате миграции. Естественно, на данном этапе изученности гидратосодержащих пород идентифицировать син- и эпигенетические гидраты в скоплении ПГГ не представляется возможным, хотя в идеале они могут различаться по составу. Исходя из приведенного определения, можно сделать вывод, что сингенетические гидраты могут находиться только в рассеянном состоянии. При прочих равных условиях (степень минерализации воды, состав газа-гидратообразователя, *PT*-условия) характер рассеянной гидратонасыщенности будет определяться фильтрационно-емкостными свойствами (ФЕС) пород. Совершенно естественно, что в нелитифицированных или слаболитифицированных осадках ФЕС значительно выше, чем в литифицированных. Следовательно, в литифицированных породах, характеризующихся сложной структурой порового пространства и ее анизотропностью, будет и более неоднородная рассеянная гидратонасыщенность. При этом связь характера насыщения гидратами с текстурными особенностями таких пород будет затухать по мере увеличения степени их постседиментационной преобразованности.

Скопления ПГГ могут формироваться за счет главным образом эпигенетических гидратов. В литифицированных породах формирование скоплений ПГГ возможно или в результате вертикальной миграции природного газа по разломам, или, при определенных условиях, в результате латеральной миграции. В результате вертикальной миграции при достижении потока природного газа по плоскости разлома термобарических условий гидратообразования в этой зоне может произойти образование газовых гидратов. Масштабы такого скопления ПГГ будут определяться большим количеством факторов: толщиной и ФЕС пород, слагающих горизонт, в котором начнется процесс гидратообразования, интенсивностью процесса вертикальной миграции, структурно-тектоническими условиями залегания горизонта, в котором происходит гидратообразование, соленостью пластовых вод и геотермическими условиями.

Характер насыщения гидратами нелитифицированных осадков в самом общем виде напоминает таковой насыщения осадочных пород природными битумами. Это может быть сплошное насыщение, при котором гидрат может играть роль цемента. Это пятнистые, линзовидные, обусловленные текстурными особенностями вмещающей ПГГ породы.

Как известно, нелитифицированные, не вышедшие из стадии диагенеза, терригенные породы характеризуются высокой пористостью (водонасыщенностью). По данным Ю.В. Мухина [1965], на стадии диагенеза из глин выжимается до 75 % поровой воды. Следовательно, на стадии диагенеза, которая на континентальных склонах в мощных толщах глинистых пород может длиться до первых десятков миллионов лет, в песчаники, присутствующие в этом же разрезе, вместе с водой эмигрирует и газ, генерируемый в диагенетической зоне интенсивного газообразования.

К настоящему времени наличие ПГГ зафиксировано на шельфе и континентальных склонах всех океанов, в Черном и Каспийском морях, в оз. Байкал. В пределах континентальной части ПГГ достоверно

установлены только на северо-западном склоне Канадского щита (северное побережье Аляски, дельта р. Маккензи, побережье моря Бофорта).

Количество всех пунктов и площадей в Мировом океане, в которых наблюдались ПГГ или их косвенные признаки, приближается к 70. При этом скопления ПГГ, расположенные непосредственно вблизи дна и приуроченные к зонам разгрузки углеводородных флюидов, оказались наиболее многочисленными [Соловьев, 2003]. Среди них наиболее эффективными являются грязевые вулканы Южного Каспия, Хаакон Мосби (Норвежское море), Милано (Средиземное море).

Достаточно подробно изучены проявления ПГГ на месторождениях Прадхо-Бей и Купарук Ривер (впадина Коллвил, Аляска). Здесь было выделено шесть протяженных гидратосодержащих горизонтов с различной степенью гидратонасыщенности. При этом по четырём пластам отмечено [Collet, 1993] увеличение гидратонасыщенности вверх по воздыманию пластов, что связывается с латеральной миграцией углеводородов по пласту. Открытая пористость песчаников достигает 35—42 %, гидратонасыщенность в отдельных местах — 85 %.

Широко известны в мировой литературе проявления ПГГ в дельте р. Маккензи (Канада). Выбросы газа фиксировались в процессе бурения двух добывающих скважин Ивик и Маллик. По данным ГИС были идентифицированы три гидратонасыщенных пласта, толщина которых составляет 38, 40 и 37 м [Collett et al., 1999]. Пористость песчаников, содержащих гидраты, очень высокая — от 30 до 40 %. Также высока и гидратонасыщенность — от 40 до 90 %. Наиболее насыщен гидратами нижний пласт, подошва которого совпадает с нижней границей зоны стабильности гидратов. В процессе бурения в дельте Маккензи с интервала 892—1107 м было поднято 110 м гидратосодержащего керна [Dallimore, Collett, 2002]. В центральной части дельты р. Маккензи, в разрезах пробуренных скважин было выделено пять прослоев, возможно, содержащих гидраты.

ГИДРАТОНОСНОСТЬ ШЕЛЬФА АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ СИБИРИ

Особый интерес с позиций гидратоносности представляет шельф арктических морей. До сих пор нет достоверных сведений о присутствии многолетнемерзлых пород (ММП) в относительно глубоководной части шельфа арктических морей. Из результатов математического моделирования [Романовский и др., 1999] следует, что на шельфе моря Лаптевых в диапазоне глубин от современного побережья до изобаты –20 м для 72—77° с.ш. толщина ММП увеличивается при движении на север, достигая 310—350...470 м. С увеличением современных глубин моря происходит уменьшение толщины ММП до, возможно, прерывистого их распространения на внешней бровке шельфа. Ниже ММП на шельфе находится слой охлажденных пород, толщина которых достигает, по данным этих же авторов, 100—120 м. Как отмечает Н.Н. Романовский с соавторами [1999], наибольшей толщины ММП на территории современного шельфа моря Лаптевых достигали при последней, сартанской регрессии моря в наиболее холодный период позднеплейстоценового этапа развития криолитозоны (27—15 тыс. лет назад). На осушенном до изобат 100 и более метров шельфе шло промерзание горных пород при более низких (на 5—10 °С) температурах воздуха, чем современных. Пик холода приходился на отрезок времени 20—18 тыс. лет назад, который характеризуется максимальным наращиванием мощности шельфовой криолитозоны. Последний деградационный этап развития шельфовой мерзлоты морей Восточной Сибири начался примерно 15 тыс. лет назад и продолжается в настоящее время.

Океаническая криолитозона, или подводные криогенные породы, в Северном полушарии занимают площадь около 13 млн км² [Жигарев, 1997]. В прибрежно-шельфовой зоне морей Лаптевых и Восточно-Сибирского присутствуют как подводная реликтовая мерзлота, так и новообразованные субаквальные мерзлые породы. Имеющиеся материалы показывают достаточно сложное строение субаквальных многолетнемерзлых пород (СММП). Разрезы могут содержать талые прослои с различной соленостью или характеризоваться переслаиванием мерзлых, пластично-мерзлых и морозных слоев. Поверхность СММП характеризуется сложной структурой — иногда отмечается «ныряние» поверхности на значительную глубину. В ряде случаев СММП не удается подсесть бурением (скважины глубиной до 60—70 м) даже вблизи от берега, а иногда СММП прослеживаются на 40—50 км от побережья.

В 2005 г. в акватории прибрежной части западного сектора моря Лаптевых, в районе м. Мамонтов Клык, был пробурен субмеридиональный профиль неглубоких (до 77 м) скважин [Григорьев, 2006; Большианов и др., 2007; Overduin et al., 2007; Rachold et al., 2008]. Бурение проводилось в апреле с морского льда. Целью исследований было уточнение закономерностей эволюции и распространения подводной мерзлоты. В процессе бурения со льда скважины обсаживались. Обсадка перекрывала лед, воду и талые донные осадки, для защиты керна от контакта с морской водой. Диаметр бурового снаряжения составлял от 78 до 160 мм. Все морские скважины подсекали кровлю подводной мерзлоты на разных глубинах. Мерзлые породы представлены реликтовыми континентальными позднеплейстоценовыми породами, за исключением нижних горизонтов скв. С-2 (рис. 1). Подошва ледового комплекса в этом районе, как правило, расположена ниже уровня моря и подстилается преимущественно песчаными отложениями с

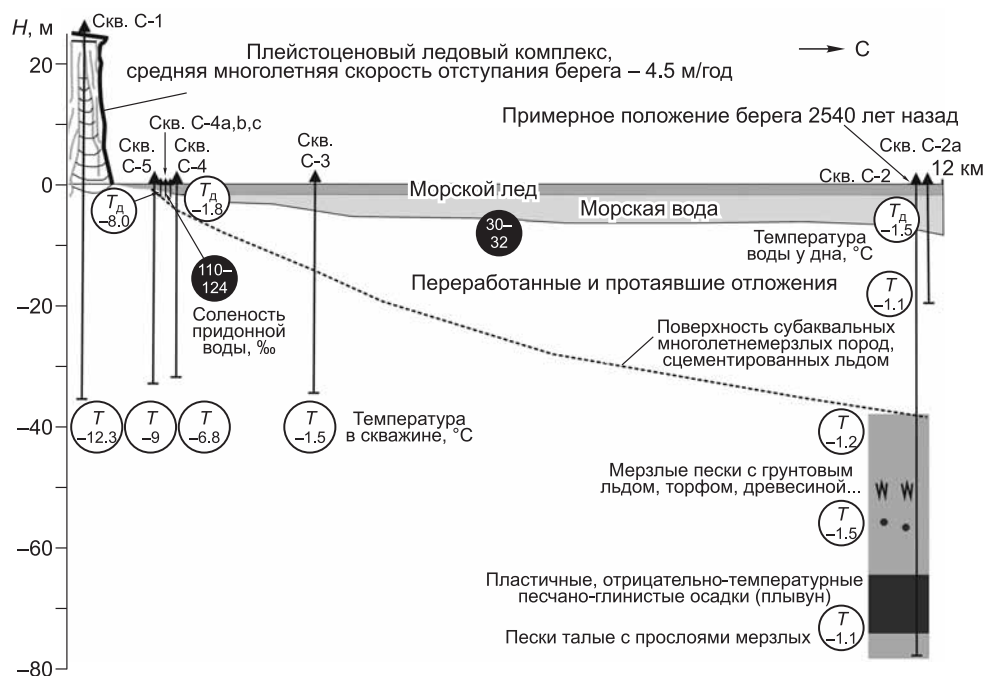


Рис. 1. Буровой профиль экспедиции «Южный берег моря Лаптевых» вблизи м. Мамонтов Клык в западном секторе моря Лаптевых, побережье Анабар-Оленекского междуречья (апрель 2005 г.).

ледово-песчаными жилами, органическими остатками, суглинисто-супесчаными и глинистыми прослоями, а также с включениями дресвы и гравия. В основании переработанных и протаявших под морем отложений и реликтовых мерзлых пород залегают засоленные морские осадки, сложенные прослоями глин и песков и датированные возрастом 111 ± 7.5 тыс. лет (RLOG 1727-026) [Большаинов и др., 2007].

В процессе бурения самой удаленной от береговой линии (12 км) скв. С-2 при забое на глубине 68.2 м (кern в этом интервале представлен светло-серым и серым мелкозернистым песком) во время прогрева колонковой трубы паяльной лампой произошло возгорание газа в устье обсадной трубы. Газ горел с перерывами (при порывах сильного ветра факел гас) около 10 мин. Видимая высота факела составляла около 30—40 см в первую минуту, затем уменьшилась до 10—20 см. Цвет факела был синим (бурение шло в ночное время в сумерках начинающегося полярного дня). Отобраный в пластиковые банки газ при последующем вскрытии банки загорался на 1 с. Можно предположить, что газ мог выделяться и при вскрытии других горизонтов, но прогрев паяльной лампой (да еще и вблизи устья скважины) применялся не всегда, так что обнаружение выхода газа здесь было случайным.

Распределение солей в керне скв. С-2 показало, что морское засоление проникает до глубины 24 м ниже дна. Распределение температур в этой скважине оказалось почти безградиентным, с некоторым повышением в нижней части почти до -1 °C (рис. 2). Начиная с глубины 65 м, когда встретились первые прослой пластично-мерзлых глин, в обсаженную буровую колонну снизу стала поступать вода. Еще ниже снова встретились цементированные ММП (песчано-суглинистые прослой) и поступление воды временно прекращалось. Температура грунта около -1 °C является предельно высокой для существования подводной, цементированной льдом, мерзлоты, особенно в случае распространения глинистых пород или наличия повышенного засоления.

Можно предположить, что зафиксированное газопроявление связано с диссоциацией реликтовых газогидратов, присутствовавших в этой части разреза. Температура воды у дна в зимнее время отрицательная и составляет около -1.5 °C при ее солёности в пределах 30—32 ‰.

Большую роль в формировании и эволюции мерзлых толщ на шельфе играют температура и солёность морской воды. Известно, что на мелководном шельфе арктических морей температура дна особенно зависит от глубины моря. В летний период в акваториях морей Лаптевых и Восточно-Сибирского с глубинами менее 15 м температуры придонного слоя морской воды обычно положительны. В зимний период придонные температуры воды на шельфе этих морей в большинстве отрицательные. Вместе с тем температурный режим придонных вод шельфа этих морей очень изменчив, он существенно меняется как сезонно, так и в связи с постоянным перемещением водных масс, но при этом очень часто отрицательные температуры в придонном слое воды сохраняются и в летний период. Так, среднегодовая температура в

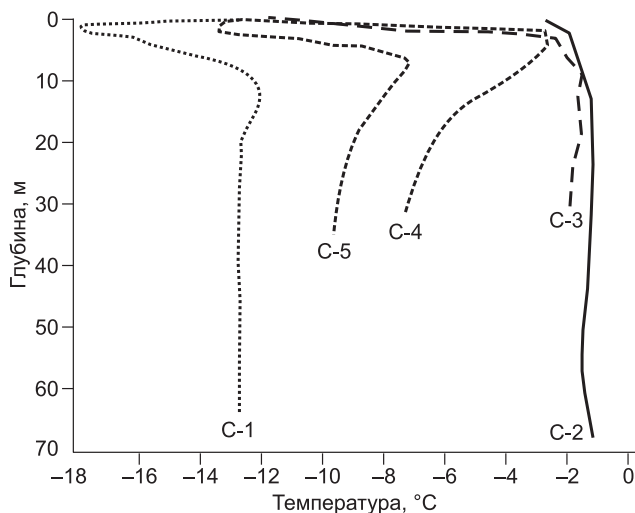


Рис. 2. Распределение температур в скважинах бурового профиля Мамонтов Клык.

открытом море на материковой отмели с глубинами 50—60 м имеет температуру $-1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (иногда до $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$), в прибрежной зоне $-1.0\text{...}-1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В целом шельфовая криолитозона, северная граница которой проходит примерно по изобате 200 м, характеризуется температурой горных пород от 0 до $-1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Океанская криолитозона Арктического бассейна расположена в пределах глубин более 800 м. Температура горных пород в ее пределах, в приатлантической зоне — минус $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, в притихоокеанской — минус $0.35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Зона распространения талых пород, разделяющая шельфовую и океаническую криолитозоны, рас-

полагается на материковом склоне в пределах глубин от 200 до 800 м, местами охватывая северную оконечность шельфа, и характеризуется температурами от 0.6 до $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ [Антипина и др., 1979].

Придонные температуры шельфовых морей, которые располагаются в более низких широтах, при прочих равных условиях существенно выше, чем в акваториях, прилегающих к Восточной Сибири.

Например, средние многолетние температуры на дне Охотского моря составляют $+1.7\text{...}+1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в северной его части температуры понижаются до $-0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$) при средних глубинах всего бассейна — 820 м (на шельфе до 200 м, на краевых плато с нижним шельфом — 900—1700 м, в глубоководных котловинах — до 3520 м). В Беринговом море температура дна составляет $+1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ при средних глубинах 1640 м (максимальная глубина — 4420 м). В северных районах этого моря температура дна составляет $+1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$. В Японском море при средней глубине моря 1535 м (максимальная глубина 4224 м) средняя температура дна не опускается ниже $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Следовательно, можно предположить, что на шельфе арктических морей, где температура донных отложений при равных батиметрических отметках существенно ниже, чем в морях более низких широт, верхняя граница зоны стабильности ПГГ будет располагаться гипсометрически ближе к поверхности моря по сравнению с морями, расположенными в более низких широтах.

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СКОПЛЕНИЙ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ

Механизм формирования ПГГ в рассеянном виде в нелигифицированных породах более универсален, чем в литифицированных. Необходимые условия: термобарические условия стабильного гидратообразования, метан биохимического происхождения (диагенетическая зона газогенерации). В рассеянном виде ПГГ представляют собой вкрапления, в разной степени заполняющие поровое пространство породы.

Для формирования скоплений ПГГ необходимо наличие еще одного обязательного условия — устойчивого в течение определенного времени притока природного газа, на что указывают многие исследователи. Ведь если представить переход метана в гидратное состояние в отдельно взятой поре (in situ), то, исходя из содержания в объемной единице гидрата до 170—180 объемных единиц природного газа, для насыщения данной поры гидратом необходимо поступление в пору объема газа, многократно превышающего объем этой поры. Как справедливо отмечают некоторые исследователи, гидраты, заполняющие поровое пространство, замедляют, а возможно, и затормаживают процессы постседиментационных преобразований пород. Логично предположить и то, что в подобной ситуации преобразование ОВ на стадии диагенеза, например, разложение углеводно-белковой его части, также будет затормаживаться. Следовательно, для увеличения гидратонасыщенности до высоких значений, необходимо поступление метана в конкретную пору извне. Однако процессу поступления пузырьков метана в конкретную пору, помимо преодоления капиллярных сил, будут препятствовать уже образованные кристаллы гидрата, заполнившие межпоровые каналы и сами поры. Обязательным условием для формирования высокой гидратонасыщенности является поступление в конкретный объем пород потока газа с градиентом давления, превышающим капиллярное давление (давление прорыва). В качестве подтверждения нашего тезиса приведем данные американских исследователей [Brewer et al., 1997]. В ходе проведенных ими экспериментов на морское дно доставлялись пластиковые прозрачные трубки, заполненные морской водой или смесью осадков с морской водой. На глубине, соответствующей условиям гидратообразования, через отверстия в днище трубок подавался метан и уже через несколько минут в трубках образовывалась гид-

ратная масса. На сайте http://www.mbari.org/~brpe/gas_hydrates.html приведены две фотографии гидратов, образовавшихся в ходе этого эксперимента. В цитируемой работе, к сожалению, не приведена количественная информация, из которой, на наш взгляд, наиболее информативным должен быть объемный расход метана, подаваемого в трубки. При этом формирование скопления ПГГ возможно как за счет газа, генерируемого в верхней диагенетической зоне газообразования, так и за счет газа, генерируемого в более жестких термобарических условиях. Совершенно очевидно, что эпигенетические гидраты могут образовываться и за счет эффузии, но количество их ничтожно мало по сравнению с образующимися за счет миграции.

Возможны, по-видимому, только два механизма формирования скоплений ПГГ: за счет природного газа, генерируемого в верхней зоне газообразования схемы вертикальной зональности генерации углеводородов — диагенетическая зона интенсивного газообразования и за счет природного газа, поступающего в результате вертикальной миграции из более глубоких горизонтов.

Большинство специалистов сходятся во мнении, что имеются два типа скоплений ПГГ: скопления, связанные с очагами разгрузки газосодержащих флюидов, которые формируются непосредственно на поверхности дна или вблизи дна и контролируются грязевыми вулканами и разломами, и скопления, находящиеся на значительной глубине от дна, но также контролируемые потоками флюидов. Форма и размер скоплений, а также распределение гидратосодержания в их пределах определяются как ФЕС осадков, так и потоками газосодержащих флюидов (концентрированными и рассредоточенными) и, в значительно меньшей степени, параметрами эффузионного и диффузионного ореола рассеяния природного газа из низзалегających отложений.

Следовательно, для формирования скопления ПГГ, которое может представлять коммерческий интерес, необходимо, кроме оптимальных температуры и давления, степени минерализации воды, еще одно условие — непрерывное (длительное) поступление природного газа в конкретную зону гидратообразования. Это условие выполнимо только в случае вертикальной миграции природного газа по разломам, зонам повышенной трещиноватости, литологическим «окнам».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На наш взгляд, данные по мировой оценке ресурсов газа в гидратном состоянии требуют существенной корректировки.

Исходя из известного соотношения запасов природного газа в водорастворенном состоянии и в месторождениях, можно, не рискуя сильно ошибиться, предположить, что в скоплениях ПГГ находится, по-видимому, около 10 % (даже с учетом более высокой удельной концентрации газа в гидратах) от объема газа, находящегося в гидратном состоянии.

Гидраты, присутствующие в породах, по происхождению можно подразделить на сингенетические и эпигенетические.

Для формирования скопления ПГГ, которое может представлять коммерческий интерес, необходимо, кроме оптимальных температуры и давления, степени минерализации воды, еще одно условие — непрерывное (длительное) поступление природного газа в конкретную зону гидратообразования.

Исходя из распределения температур на поверхности морского дна Мирового океана, можно сделать вывод о том, что зоны стабильности ПГГ на шельфе арктических морей при прочих равных условиях будут располагаться от поверхности моря на глубинах значительно меньших, чем в районах Мирового океана, расположенных в более низких широтах.

ЛИТЕРАТУРА

Антипина З.Н., Арэ Ф.Э., Войченко В.В., Молочушкин Е.Н. Криолитозона Арктического шельфа Азии // Позднечетвертичная история и седиментогенез окраинных и внутренних морей. М., Наука, 1979, с. 183—189.

Большаинов Д.Ю., Григорьев М.Н., Шнайдер В., Макаров А.С., Гусев Е.А. Происхождение пород ледового комплекса на побережье моря Лаптевых в позднем неоплейстоцене // Проблемы инженерного мерзлотоведения (Материалы VII Международного симпозиума. Чита, 21—23 ноября 2007 г.). Якутск, Изд-во Института мерзлотоведения СО РАН, 2007, с. 14—17.

Гинсбург Г.Д., Соловьев В.А. Субмаринные газовые гидраты. СПб., ВНИИОкеангеологии, 1994, 199 с.

Григорьев М.Н. Морфология и динамика преобразования подводной мерзлоты в прибрежно-шельфовой зоне морей Лаптевых и Восточно-Сибирского // Наука и образование, 2006, № 4, с. 104—109.

Жигарев Л.А. Океаническая криолитозона. М., Изд-во Моск. ун-та, 1997, 320 с.

- Макогон Ю.Ф.** Природные гидраты: открытие и перспективы // Газовая промышленность, 2001, № 5, с. 10—16.
- Мухин Ю.В.** Процессы уплотнения глинистых осадков. М., Недра, 1965, 200 с.
- Романовский Н.Н., Холодов А.Л., Тумской В.Е., Хубберген Х.-В., Кассенс Х.** Мощность мерзлых толщ восточной части шельфа моря Лаптевых (результаты моделирования) // Криосфера Земли, 1999, т. III, № 2, с. 22—32.
- Соловьев В.А.** Природные газовые гидраты как потенциальное полезное ископаемое // Российский химический журнал, 2003, т. XLVII, № 3, с. 59—69.
- Brewer P.G., Orr F.M., Friedrich G., Kvenvolden K.A., Orange D.L., McFarlane J., Kirkwood W.** Deep ocean field test of methane hydrate formation from a remotely operated vehicle // *Geology*, 1997, v. 25, № 5, p. 407—410.
- Collett T.S., Lewis R.E., Dallimore S.R., Lee M.W., Mroz T.H., Uchida T.** Scientific results from JAPEX/JNOC/GSC Mallik 2L-38 gas hydrate research well, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. Ottawa, Ontario, Canada // *Geological Survey of Canada, Bulletin*, 1999, v. 544, p. 295—311.
- Dallimore S.R., Collett T.S.** Summary and implication of the Mallik 2002 gas hydrate production research well program // *Scientific results. Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. Geological Survey of Canada, Bull.* 585, p. 1—36.
- Dobrynin V.M., Korotajev Yu.P., Plyushev D.V.** Gas hydrates — a possible energy resources // *Long-term energy resources*. Eds. R.F. Meyer, J.C. Olson. Boston, Pitman, 1981, p. 727—729.
- Gortnitz V., Fung I.** Potential distribution of methane hydrates in the world's oceans // *Global Biogeochem. Cycles*, 1994, v. 8, p. 335—347.
- Overduin P.P., Grigoriev M.N., Junker R., Rachold V., Kunitsky V.V., Bolshiyarov D.Yu., Schirmermeister L.** Subsea permafrost studies in the near-shore zone of the Laptev Sea // *Reports on polar and marine research. Russian-German Cooperation System Laptev Sea: Coast Drilling Campaign 2005. The Expedition COAST 1*. Vol. 550. Paul Overduin, ed. Bremerhaven. Germany. 2007, p. 1—40.
- Rachold V., Bolshiyarov D. Y., Grigoriev M. N., Hubberten H.-W., Junker R., Kunitsky V. V., Overduin P., Schneider W.** Nearshore Arctic subsea permafrost in transition // *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, v. 88, № 13, 2008, p. 149—156.
- Weeks L.G.** Habitat of oil // *A symposium conducted by AAPG. Oklahoma*, 1958, p. 344—365.

*Поступила в редакцию 10 октября 2008 г.,
после доработки — 22 мая 2009 г.*