

УДК 553.981

*Гинсбург Г.Д., Соловьев В.А.***ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ГАЗОГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ**

На основе рассмотрения физических процессов, ответственных за образование газовых гидратов, оценки возможности осуществления их в недрах и привлечения данных наблюдений выделены и охарактеризованы криогенетические, трансгрессионная, диагенетическая, струйно-миграционная, сбросовая, элизионная, гидротермальная, седиментационная и водно-грязевулканическая геологические модели газогидратогенеза. Показано, что наиболее важные модели, в которых концентрируется газ, реализуются в субмаринных условиях. В регионах с мощной криолитозоной на суше и в полярных шельфах могут формироваться разубоженные скопления гидратов.

Гидраты углеводородных газов в недрах вызывают интерес как потенциальное полезное ископаемое и как нестабильный компонент техносферы, разложение которого может иметь нежелательные последствия [*Трофимук и др., 1979; Kvenvolden, 1988*]. Становится очевидным, что гидраты (в частности, субмаринные) представляют собой глобальное физико-геологическое явление, с которым связана определенная специфика седиментогенеза, литогенеза, формирования подземных вод и теплового поля [*Гинсбург и др., 1986; Соловьев и Гинсбург, 1987; Hesse & Harrison, 1981*]. Между тем газогидратообразование пока геологически изучено слабо. Не ясно, в частности, что представляют собой природные скопления, как они могут сформироваться, какова их распространенность.

Цель настоящей статьи - выявить геологические процессы, ответственные за газогидратообразование и определить наиболее действенные из них.

Итак, рассмотрим физические процессы, которые могут привести к образованию гидратов, с позиций их реализации в недрах.

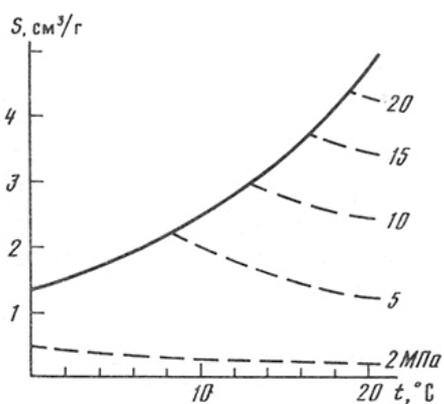
Имеются четыре условия синтеза газовых гидратов: достаточные концентрации исходных веществ - газа и воды, достаточно низкая температура и достаточно высокое давление. Возникновение любого из них при наличии остальных служит причиной гидратообразовательного процесса.

Различаются два вида гидратообразующих систем: покоящиеся, в которых ответственным за синтез гидратов является не перемещение реагентов извне, а изменения внутри систем, и динамичные, в которых в качестве непосредственной причины процесса выступает перенос вещества в зону реакции. Реагенты в гидратообразующих системах, вообще говоря, могут находиться в разных агрегатных состояниях. Однако мы ограничимся тремя случаями, характерными для земной коры: свободный газ + вода, растворенный в воде газ, свободных газ + лед.

Рассмотрим вначале *покоящиеся системы*. Гидраты газа в них могут образоваться в результате охлаждения, сжатия или увеличения концентрации реагентов.

Охлаждение. Становление проблемы газогидратоносности недр началось с осознания возможности образования гидратов при экзогенном понижении геотемператур в области многолетней мерзлоты. Мы будем называть геологические модели образования таких гидратов криогенетическими, а сами гидраты - *криогенными*. Они могут возникать в залежах газа (система свободный газ + вода), в водоносных пластах (из газонасыщенных вод) и в толще мерзлых пород (в контакте со льдом).

Остановимся прежде всего на образовании гидратов в газовых залежах. В работах [Гинсбург, 1969; 1973; Макагон, 1965; Мокшанцев и Черский, 1961] показано, что полное замещение газа залежи гидратом маловероятно - этому мешают дефицит свободной воды и увеличение ее солености, а также уменьшение образовавшимися гидратами эффективной пористости и проницаемости коллектора. В таких случаях в залежах будут сосуществовать свободный газ, гидрат и вода. Переход реализуется полнее в массивных залежах, чем в пластовых, благодаря большей площади газоводяного контакта. Вблизи этого контакта более вероятно относительно высокое гидратосодержание коллектора. В случае полного замещения газа в залежи будут сосуществовать гидрат и вода. В ходе гидратообразования падает пластовое давление; возможно некоторое уменьшение размера залежей и их разубоживание водой.



Фиг. 1. Растворимость метана S в зависимости от температуры [18] в равновесии с гидратом (сплошная линия) и изобары растворимости (штриховые линии)

Возможность выделения гидратов из раствора газа в воде определяется особенностью растворимости газов в равновесии с гидратами. Дело в том, что упругость растворенного газа в таких условиях лимитируется не внешним давлением, а равновесным давлением гидратообразования при данной температуре [Баркан и Воронов, 1983]. Поскольку равновесное давление с понижением температуры становится меньше, уменьшается и растворимость газа в воде (фиг. 1). Заметим, что эта тенденция противоположна известному увеличению растворимости при понижении температуры в обычных условиях (когда гидратообразование невозможно) [Намиот и Бондарева, 1963]. Таким образом, при охлаждении газонасыщенной воды в равновесии с гидратом его количество будет расти за счет уменьшения растворимости газа. Так, если 1 г воды, насыщенной метаном при 20°C и давлении 10 МПа, охладить до 2°C , то ее газосодержание за счет образования гидрата уменьшится на 1 см^3 - на 40% (здесь и далее объем газа приведен к нормальным условиям) от первоначального значения (см. фиг. 1) (в связи с ориентировочным характером расчетов здесь и в дальнейшем мы пренебрегаем влиянием солености воды на растворимость газа; возможная ошибка за счет этого не превышает 20%). Но количество воды, перешедшей в гидрат, уменьшится незначительно - всего на 0,5%. В условиях недр образовавшийся гидрат займет 0,5% объема пор породы.

Расчеты показывают, что для природного процесса охлаждения недр, связанного с формированием криолитозоны, приведенная выше оценка близка к максимально возможной, даже если принять мощность криолитозоны равной 1000 м, а понижение температуры в подмерзлотной части разреза - квазистационарным. Очевидно, что гидраты, образовавшиеся из водорастворенного газа в рамках криогенетической модели, будут находиться в породе в рассеянном состоянии, т.е. не образуют скоплений. Следует отметить также, что предельная газонасыщенность подземных вод в регионах, где развивается криогенез, встречается редко.

Обратимся теперь к системам, в которых гидрат газа образуется из льда. Очевидно, что это возможно при переходе через точку замерзания охлаждающихся систем газ + вода или газ, растворенный в воде, и что, как и в самих этих системах до замерзания воды,

образование гидратов в скоплениях (не рассеянных) реально только в первом случае. Гидратообразованию при замерзании воды способствует криогенное давление [Якушев, 1989].

Криогенные гидраты газа могут быть обнаружены как на суше, так и на акваториях - на полярных шельфах. На шельфах условия для их формирования создавались в период субаэрального развития, когда растущая мощность криолитозоны достигла 300 м [Гинсбург, 1969].

Из изложенного ясно, что криогенные гидраты могут образовывать более или менее крупные скопления только в ассоциации с ранее существовавшими залежами газа. Однако до настоящего времени неизвестна ни одна газовая залежь с однозначно идентифицированными гидратами. Гидраты в газоносных коллекторах только предполагаются по интерпретируемым неоднозначно данным каротажа скважин и по другим признакам, также допускающим различное истолкование.

Это касается и известного Мессояхского месторождения. При прогнозной оценке геологических ресурсов углеводородного сырья криогенные гидраты можно не принимать во внимание, поскольку газ в них не является «прибавкой» к ресурсам «нормального» газа (учитываемым тем или иным из принятых методов), а составляет его долю. Но извлечение этой доли представляет существенную проблему; поэтому ее следует выяснять для оценки извлекаемых ресурсов.

Сжатие. Условия для образования гидратов в системе свободный газ + вода могут возникнуть при ее сжатии - если газа в ней больше, чем необходимо для насыщения воды при увеличении давления, - например, в газовых залежах, образовавшихся на суше или на шельфах и оказавшихся в более глубоководных условиях. Такую модель назовем *трансгрессионной*. Соответствующие ей залежи пока неизвестны. Образование гидратов в залежах газа в условиях сжатия аналогично криогенетической модели: в том и другом случае возможно уменьшение их размера и разубоживание водой. В ресурсном плане обе модели идентичны.

Из водорастворенного газа при увеличении внешнего давления гидраты образоваться не могут. О гидратообразовании за счет криогенного давления при замерзании воды сказано выше, при обсуждении криогенетической модели.

Рост концентрации. По-видимому, на газогидратообразование в земной коре рост концентрации воды не может оказать влияния (хотя само по себе это явление имеет место, например, при дегидратации минералов). Мы рассмотрим увеличение концентрации газа. В недрах оно может происходить при диагенезе. Если в субмаринной обстановке, где температура допускает существование гидратов, количество аутогенного биохимического газа, растворенного в поровых водах, возрастает настолько, что его упругость достигает равновесного давления гидратообразования, то в порах начнется выпадение гидратов. Назовем такую модель *диагенетической*. Анализ ее очень важен для проблемы геологии газовых гидратов, так как считается, что именно таким образом в недрах океанов формируются значительные ресурсы газа [Трофимук и др., 1979; 1982; Черский и Царев, 1977; Черский и др., 1983].

Диагенетические преобразования морских осадков, и в частности биохимическое газообразование, в них исследованы еще не до такой степени, чтобы можно было построить количественную модель гидратогенеза. Дискутируется роль различных реакций, слабо исследованы их скорости [Галимов и Кодина, 1982; Claypool & Kvenvolden, 1983; Reeburgh, 1983], нет ясности в оценках расхода органического вещества в этих реакциях. Следует отметить также, что диагенетические процессы изучались в основном в условиях шельфа, тогда как гидраты могут возникать главным образом в глубоководье.

Общепризнано, однако, что существует вертикальная зональность раннедиагенетических окислительно-восстановительных реакций и что метаногенез занимает в ней определенное место. А именно метанообразование начинается на некоторой глубине ниже дна - там, где в поровой воде существенно уменьшается

концентрация сульфат-иона (более чем на 80% по сравнению с морской водой). Эта глубина обычно изменяется от 0,2 до 200 м [Claypool & Kvenvolden, 1983], но может достигать и 600 м [Галимов и Кодина, 1982; Miller et al., 1979].

Считается, что она зависит главным образом от скорости осадконакопления и содержания органического вещества в осадке [Claypool & Kvenvolden, 1983], причем зависимость в том и другом случае обратная. Оба контролируемые ее показателя, как известно, характеризуются циркумконтинентальной зональностью [Кукал, 1987; Троцюк и Марина, 1988]. Согласно данным [Claypool & Kaplan, 1974], при низких $C_{орг}$ (менее 0,5%) микробиальный метан не образуется вовсе. Более высокие значения присущи периферии океанов и не свойственны его внутренним областям [Троцюк и Марина, 1988].

Кинетическая модель диагенетического газогидратообразования должна учитывать скорости нескольких процессов, в первую очередь скорость метаногенеза. В реальных условиях часть генерирующегося газа неизбежно рассеивается, диффундируя в направлении дна, поэтому скорость образования гидратов заведомо меньше скорости генерации метана. В результате перехода части поровой воды в гидрат возрастает соленость оставшейся воды. В контакте с более соленой водой увеличивается равновесная с гидратом упругость растворенного газа. Поэтому, чтобы процесс продолжился, скорость генерации метана должна быть больше. В то же время концентрирующиеся в поровой воде соли, как и газ, будут диффундировать из зоны реакции. Существенным является также тепловой баланс развивающихся процессов, поскольку образование гидратов - это экзотермическая реакция. Наконец, одно из основных диагенетических явлений - литификация осадка. Понятно, что заполнение пор гидратами будет более эффективно, если метаногенезу предшествует интенсивное обезвоживание, и наоборот. Создание модели, учитывающей все процессы, - весьма трудная задача, и мы рассмотрим лишь в самых общих чертах ограничения со стороны скорости метаногенеза.

Чтобы из поровой воды, находящейся при температуре 3-4°C, выделилась первая порция гидратов, в ней должно накопиться 1,5-1,7 см³/г метана (см. фиг. 1). Если газогенерация продолжается 10 тыс. лет, то скорость ее должна быть не менее (2,3-2,7) 10⁻¹² см³/см³с (в расчете на водонасыщенную породу, при ее пористости около 50%). При длительности 100 тыс. лет скорость может быть на порядок меньше. Захоронение под толщей накапливающихся отложений сопровождается нагреванием поровой воды за счет глубинного теплового потока. При более высокой температуре для гидратообразования требуется большее газосодержание воды: при 10°C - 2,5, при 20°C ~ 4,5 см³/г (см. фиг. 1).

Оценим, какая скорость метаногенеза необходима в этих условиях, чтобы обеспечить продолжение ранее начавшегося гидратонакопления. Для этого зададимся значениями геотермического градиента 50 градус/км и скорости осадконакопления 100 см/1000 лет - для океанов за пределами шельфов они, вероятно, близки к максимальным. Расчет показывает, что в интервале роста температур от 3 до 10°C метан должен генерироваться в породе со средней скоростью не менее 1,3 · 10⁻¹³ см³/см³с, в интервале 10-20°C - не менее 2,6 · 10⁻¹³ см³/см³с. По данным микробиологов [Алексеев и др., 1978; Беляев, 1979; Нефтегазогенетические..., 1984; Океанология, 1979], скорости биохимического метанообразования в морских осадочных отложениях различных регионов обычно составляют величины порядка 10⁻¹³ см³/см³с, иногда возрастают на один порядок и никогда на два порядка. В свете этих данных гидратообразование в рамках диагенетической модели в принципе реально в отложениях древнее голоценовых.

Возникает другой вопрос - может ли быть высоким содержание в породе гидратов газа, образовавшихся в соответствии с данной моделью? Это зависит от количества преобразованного в гидрат исходного вещества - органического углерода. Можно рассчитать, например, что для заполнения гидратами половины объема пор в породе, обладающей пористостью 50%, необходимо «переработать» без потерь количество углерода, превышающее 2% от массы минеральной части породы. Содержания

органического углерода такого порядка в донных осадках Мирового океана встречаются только на его периферии и далеко не повсеместно [*Океанология, 1979*].

На основании изложенного можно с высокой вероятностью заключить, что образование гидратов в рамках диагенетической модели не приводит к значительному гидратосодержанию пород. Рассеянные гидраты такого генезиса (с содержанием в единицы процента) могут быть встречены в периферической области океана (за пределами шельфов), в отложениях древнее голоценовых, обогащенных органическим веществом, на некоторой глубине ниже дна - ниже зоны сульфатредукции.

Материалы наблюдений гидратов газа в отложениях Мирового океана показывают возможность их образования из биохимического газа. Об этом свидетельствуют сравнительно высокое содержание органического углерода в гидратовмещающих отложениях [*Гинсбург и др., 1988a*], изотопный состав углерода газов [*Галимов и Квенволден, 1984*]. Вместе с тем, как правило, отмечается приуроченность гидратов к пустотам, трещинам или к относительно проницаемым горизонтам [*Гинсбург и др., 1988a*]. Это говорит об образовании гидратов из движущихся флюидов, а не из газа, генерированного *in situ*, т.е. противоречит диагенетической модели.

По данным исследования гидратопроявления на подводном хр. Блейк Аутер в Северо-Западной Атлантике, которое, по изотопным данным, сформировано биохимическим газом [*Галимов и Квенволден, 1984*] и приурочено к отложениям, относительно богатым органическим углеродом ($C_{орг} 1,1-2,4\%$) [*Brooks et al., 1983*], на основании изотопных данных был выполнен балансовый расчет интенсивности метаногенеза в разрезе [*Claypool & Threlkeld, 1983*]. Расчет был сделан применительно к условиям, отвечающим диагенетической модели гидратообразования в нашем понимании. В результате оказалось, что рассчитанное количество генерированного метана недостаточно для насыщения поровых вод и выпадения из них гидратов. Этот результат, по мнению авторов [*Claypool & Threlkeld, 1983*], находится в противоречии с наблюдениями, но оно может быть снято, в частности, привлечением другой модели гидратообразования. Образование гидратов в системе биохимический газ *in situ* + лед, вероятно, может иметь место в тундрах, однако геологическое значение таких гидратов вряд ли велико.

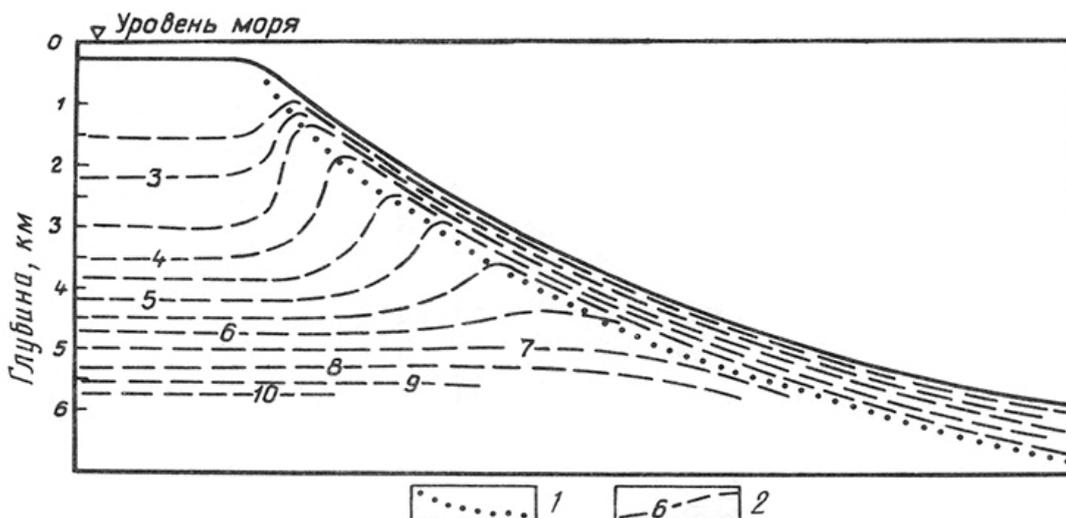
Перейдем к *динамическим системам*. Напомним, что мы понимаем их как системы, в которых гидраты газа образуются в результате переноса вещества в зону реакции. Можно представить четыре способа переноса: фильтрация, молекулярная диффузия, транспортировка реагентов в потоке флюидизированной породы и перемещение блоков пород.

Фильтрация. Гидраты могут отлагаться в коллекторах при фильтрации газа и газонасыщенной воды. Рассмотрим вначале последний случай.

Очевидно, что фильтрующаяся газонасыщенная вода, достигнув зоны стабильности гидратов, оказывается пересыщенной газом (в силу уменьшения его растворимости - см. фиг. 1) и становится источником гидратов. По-видимому, наиболее распространенный в природе вариант региональной фильтрации газонасыщенных вод - элизионные течения, характерные для погружающихся, формирующихся осадочно-породных бассейнов. Если такой бассейн располагается на современной континентальной окраине, а какая-то его часть в пределах глубоководья, в этой части из фильтрующихся в океан вод будут накапливаться гидраты газа. Это - *элизионная модель* гидратообразования. Эффективность элизионной модели определяется, в частности, глубоким охлаждением недр континентальных склонов и подножий в сравнении с прилегающими шельфом и сушей, в результате чего разность растворимости газа на одной и той же абсолютной глубине может достигать нескольких кубических сантиметров на грамм (фиг. 2).

Фильтрация воды может быть восходящей, сугубо латеральной, или нисходящей - в любом случае на пути к субмаринной разгрузке она будет оставлять гидраты в

коллекторах. Растворенный газ, из которого формируются гидраты в данной модели, может быть и диагенетическим, и катагенетическим. Скорее всего значительная часть гидратопоявлений, выявленных в Тихом и Атлантическом океанах [Kvenvolden, 1988], представляет гидраты, образовавшиеся в соответствии с данной моделью. Выше уже упоминалось о том, что гидраты в них приурочены к пустотам, трещинам и относительно проницаемым горизонтам.



Фиг. 2. Растворимость метана в чистой воде в p - T -условиях недр континентальной окраины 1 – подошва зоны стабильности гидрата метана; 2 – изолинии растворимости метана в чистой воде, $\text{см}^3/\text{г}$. Данные по растворимости заимствованы из [18, 20]. Принято: температура дна при глубине воды до 500 м $+5^\circ\text{C}$, при большей глубине $+2^\circ\text{C}$; геотермический градиент 30 градус/км; гидробарический градиент 10 кПа/м

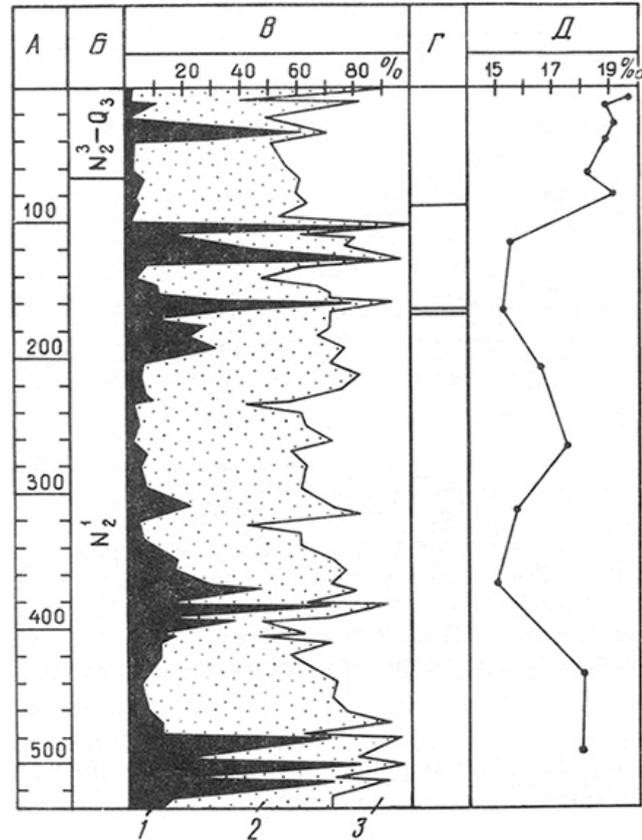
Так, гидраты, обнаруженные в керне скважины глубоководного бурения 491 в Центрально-Американском желобе, судя по гранулометрическому составу, контролируются относительно хорошо проницаемым горизонтом в интервале поддонных глубин 100-200 м (фиг. 3). В этом же горизонте наблюдается аномалия состава поровых вод, выражающаяся в уменьшении солености и хлорности. По данным сейсмических исследований [Site 491, 1982], этот горизонт, как и вся гидратовмещающая толща, наклонен в сторону суши. Скорее всего гидраты в данном случае образовались из подземных вод, фильтрующихся в сторону океана.

Вероятно, именно с гидратами элизионного генезиса связан широко распространенный на континентальных склонах отражающий сейсмический горизонт BSR (bottom simulating reflector - отражающий горизонт, имитирующий дно), секущий осадочную слоистость и интерпретируемый как подошва гидратоносной зоны [Shipley et al., 1979]. Такой горизонт наблюдается также на участке скв. 491 [Site 491, 1982].

Путь к оценке масштабов распространения газовых гидратов образовавшихся в соответствии с элизионной моделью, лежит через расчет количества и газосодержания вод, отжатых из осадочно-породного бассейна в океан за время существования необходимых термобарических условий. На активных континентальных окраинах определенная роль в отжатии вод может принадлежать субдукционному стрессу, а в газогенерации - особенностям геотермического режима.

Причиной фильтрации подземных вод может быть нагрев локальным источником тепла (магматическая камера, остывающий интрузив). Под влиянием такого нагрева, как известно, формируются конвекционные гидротермальные системы. Если в сфере действия такой системы оказываются осадочные породы с достаточными мощностями и содержаниями органического вещества, в них становится возможной генерация

углеводородных газов. Когда фильтрующаяся вода с растворенным газом достигнет зоны стабильности гидратов, они в случае достаточно высокого газосодержания вод начнут осаждаться. Это - гидротермальная модель газогидратообразования. Вероятно, в зоне разгрузки метаноносных термальных вод сформировано скопление гидратов, обнаруженное в Охотском море на месте ожидавшейся гидротермы [Зоненшайн, 1987]. По данным сейсморазведки [Merewether et al., 1985] можно предположить, что подобный генезис могут иметь гидраты в бассейне Гуаймас (Калифорнийский залив).



Фиг. 3. Литологический и гидрогеохимический контроль проявлений газовых гидратов в разрезе скв. 491 глубоководного бурения (Тихоокеанское побережье Мексики) [36, 44]
 А – поддонная глубина, м; Б – стратиграфический возраст; В – гранулометрия кернов (фракция: 1 – песчаная, 2 – алевритовая, 3 – глинистая); Г – проявления гидратов; Д – хлорность поровых вод, ‰

Образование гидратов из фильтрующихся газонасыщенных вод в принципе возможно и на суше, и на шельфах, в областях с мощной криолитозоной. Однако вряд ли этот процесс здесь широко развит, так как в результате криогенного охлаждения в водонапорных системах формируется дефицит пластовых давлений, в условиях которого не происходит движения глубоких вод к поверхности [Гинсбург, 1973].

Фильтрация (или струйная миграция) газа, как известно, происходит под действием архимедовой силы и требует предварительного формирования скопления некоторой высоты, достаточной для преодоления сопротивления всплыванию.

Механизм выделения гидратов в порах фильтрующего газ коллектора можно представить следующим образом. В момент вхождения струи газа в зону стабильности гидратов в лобовой части струи (в порах) на границе газ-вода образуется пленка гидрата. Если сила всплывания окажется недостаточной для «взламывания» этой пленки, газ будет ее обтекать. Если же пленка будет прорвана, струя продвинется вверх по потоку. Вслед за

лобовой частью струи в коллектор с пленкой попадет следующая порция газа. Но образование гидрата из этой порции затруднено в связи с наличием пленки и с возросшей соленостью остаточной воды гидратоносного коллектора. Тот газ лобовой части струи, который продвинулся по потоку, попадет в условия, аналогичные первоначальному, и новая часть этого газа осадится в порах в виде гидрата. Результатом процесса явится «размазывание» фильтрующейся струи газа.

В то же время следует обратить внимание на возможность «сквозьгидратной» фильтрации газа. Оба эффекта зависят, очевидно, от размеров струи газа, фильтрационного напора, проницаемости коллектора и гидратной пленки, солености пластовой воды и возможности диффузионного рассеяния концентрирующихся в результате гидратообразования солей. О том, что «сквозьгидратная» фильтрация действительно происходит, можно судить по многочисленным наблюдениям длительно действующих газовых грифонов в окрестностях аварийных газовых скважин, расположенных в районах с мощной криолитозоной. Об этом же свидетельствуют межпластовые перетоки газа, сопровождающиеся образованием гидратов в прискважинной зоне коллекторов на Мессояхском месторождении [Гинсбург и др., 1985].

Описанная *струйно-миграционная модель* газогидратообразования может реализоваться в разных геологических условиях: в осадочно-породных бассейнах, испытывающих прогибание, когда газ выделяется из элизионных потоков подземных вод; при воздымании регионов, когда причиной газовыделения является уменьшение пластовых давлений; на этапах относительного гидродинамического покоя, в ходе колебательных и структурообразующих тектонических движений - при переформировании газовых залежей. Такие условия могут быть в разных нефтегазоносных бассейнах - на суше и в акваториях.

Субмаринные гидраты, сформированные из свободного газа, который еще вне зоны гидратообразования выделился из элизионных потоков вод, вряд ли целесообразно и возможно отличать от гидратов, отложенных непосредственно водой этих потоков, - те и другие рационально рассматривать в элизионной модели. Иное дело гидраты, образованные струями всплывающего газа в областях с мощной криолитозоной. Они могут залежать в зонах газонакопления на склонах положительных структур разного порядка и на моноклиналях непосредственно под региональными и локальными покрывками в виде более или менее концентрированных скоплений. Если они располагаются в непосредственной близости к газовым залежам, то содержащиеся в них ресурсы газа могут представлять интерес - по крайней мере часть этих ресурсов может быть добыта при разработке этих залежей (как привлекаемые запасы). До сего времени такие скопления не были встречены.

Образование природных гидратов в системе фильтрующийся газ - лед, вероятно, не играет существенной геологической роли в силу низкой газопроницаемости мерзлых пород.

Подводя итог рассмотрению фильтрационных моделей, обратим внимание на принципиальное отличие результативности образования гидратов при фильтрации газонасыщенной воды и фильтрации газа: в первом случае происходит концентрирование газа, во втором - разубоживание. Ведь концентрация газа в гидрате всегда больше, чем в водном растворе, и заведомо меньше, чем в однофазной газовой системе. Отличительной чертой выделения гидратов из фильтрующегося водного раствора (по сравнению с газом) является также удаление концентрирующихся в воде солей непосредственно в ходе самой фильтрации. Пока существуют необходимые термобарические условия, пока продолжается фильтрация воды и пока эта вода газонасыщена - ничто не мешает отложению гидратов из раствора. Накопление гидратов в фильтрующих коллекторах является важной особенностью таких моделей.

В заключение обратим внимание на две газогеохимические особенности фильтрационных моделей. Первая особенность - это хроматографический эффект,

обусловленный различной способностью компонентов природного газа образовывать гидраты: в направлении фильтрации состав газа в гидратах должен изменяться. Такой эффект присущ всем фильтрационным моделям. Вторая особенность характерна для элизионной модели в условиях континентального склона. Мощность зоны стабильности гидратов на склоне считается зависимой главным образом от термобарической обстановки. Но она может изменяться и в результате закономерного (обусловленного глубиной) изменения состава газа в нефтегазоносном бассейне: в флюидах, фильтрующихся в океан на разных уровнях континентального склона, газ должен быть разным.

Молекулярная диффузия. В нефтегазогеологической литературе диффузия рассматривается главным образом как механизм рассеяния скоплений углеводородов. Однако в условиях, когда подземные воды во всем объеме системы до предела насыщены углеводородами, и в ней существует градиент концентрации, обусловленный градиентом растворимости, диффузия, оказывается, может играть роль в первичной миграции и первичной аккумуляции углеводородов [*Геодекян и Егоров, 1988; Савченко, 1968*]. В этом смысле геозона стабильности гидратов обладает определенной спецификой - здесь градиенты концентрации и упругости растворенных углеводородных газов могут оказаться значительно большими, чем в безгидратной части разреза (см. фиг. 1).

В условиях, когда гидраты не могут существовать, при нормальном гидробарическом градиенте предельный вертикальный градиент упругости водорастворенного газа составляет около 10 кПа/м, а в зоне стабильности гидратов он может достигать 100 кПа/м, причем наибольшие его значения характерны для нижней части этой зоны. Это служит предпосылкой своего рода ускоренной диффузионной «перегонки» газа («переконденсации») в терминологии работы [*Геодекян и Егоров, 1988*] в зоне гидратообразования. Однако самостоятельного значения в образовании гидратов (во всяком случае в их скоплениях) диффузия, очевидно, не имеет.

Перемещение в потоке флюидизированной породы. Можно назвать два геологических явления с участием флюидизированной породы, которые могут быть ответственными за образование гидратов; субмаринный грязевый вулканизм и движение субмаринных гравитационных седиментационных потоков. Соответствующие им модели гидратообразования назовем подводно-грязевулканической и седиментационной.

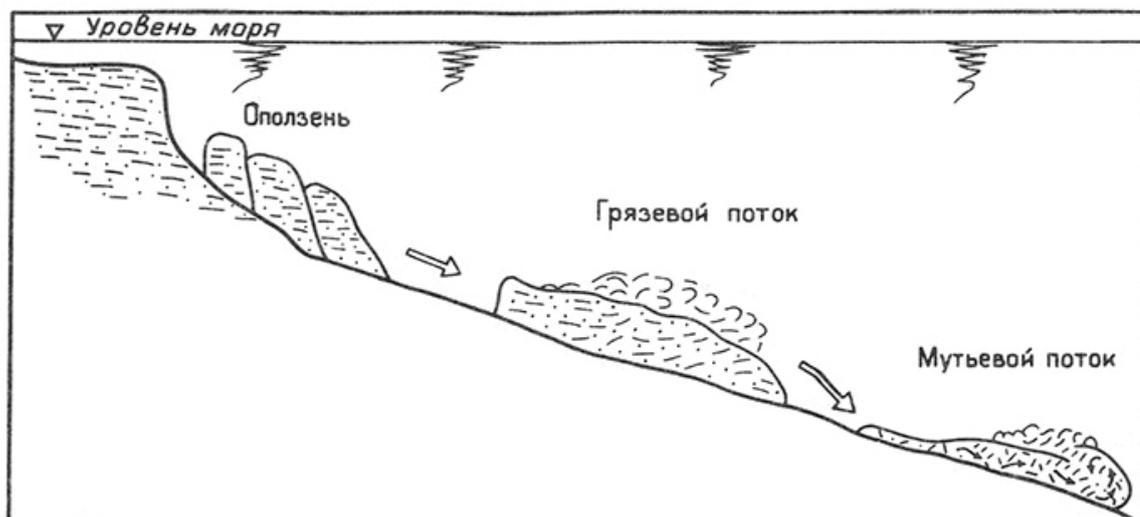
Подводно-грязевулканическая модель охарактеризована на примере гидратопроявления в Южном Каспии [*Гинсбург и др., 1988*]. Площадь исследованного скопления (около 0,3 км²) контролировалась кратерным полем вулкана. Гидраты были обнаружены уже непосредственно на дне. Очевидно, их стабильность обеспечивается движущимся флюидом - газом или газонасыщенной водой. Гидратосодержание глиняной брекчии достигало 35%. Включения гидратов размером до 5 см имели различную (чаще субизометричную) форму, но встречались и более крупные, но тонкие пластинчатые выделения.

Скопления подобного же типа открыты и исследованы в Черном море [*Кремлев и Гинсбург, 1989*] и, вероятно, в Мексиканском заливе [*Brooks et al., 1986*]. По-видимому, субизометричные агрегаты гидратов образованы в результате барботирования пузырей газа в разжиженной глиняной брекчии, а пластинчатые - при движении флюидов по трещинам.

Подводно-грязевулканические гидраты газа, очевидно, приурочены к регионам с мощным молодым осадочным чехлом, испытывающим быстрое прогибание. Благодаря неглубокому залеганию такие скопления представляют благоприятный объект для изучения субмаринного газогидратообразования. Генетически эта модель близка элизионной модели.

Идея *седиментационной модели* была выдвинута при разгадке природы наиболее эффективного из всех известных гидратопроявлений - почти мономинерального тела гидратов мощностью около 4 м, вскрытого скв. 570 глубоководного бурения на

внутреннем склоне Центрально-Американского желоба [Гинсбург и др., 1986]. В основу этой модели положены представления о лавинной седиментации [Лисицын, 1988], в частности о гравитационных потоках, переносящих осадочный материал с первого глобального уровня осадконакопления (граница река-море) на второй (основание материкового склона) или - на активных континентальных окраинах - на третий (дно глубоководных желобов).



Фиг. 4. Модель гравитационных потоков осадочного материала на континентальном склоне (по [46] с небольшими изменениями)

Гравитационные потоки - это ряд, характеризующийся разбавлением осадочного вещества водой по мере движения вниз по склону. В начале этого ряда стоят подводные оползни и обвалы, из них образуются гравититы других классов (фиг. 4). Массивы пород, вовлекаемые в перемещение, в первоначальном залегании могут содержать свободный газ, защемленный в порах или в скоплениях. Этот газ, с одной стороны, увлекается вниз движущимся потоком, с другой, высвобождаясь и коалесцируя по мере разжижения потока, стремится всплыть. Оказавшись в термобарических условиях глубоководья, газ переходит в гидрат, вызывая «застудневание» содержащей его части потока.

Экспериментальные исследования на пузырьках газа, всплывающих в противотоке воды, показали, что гидратный слой на границе пузырьков образуется быстро, даже если в воде нет растворенного газа [Topham & Bishnoi, 1980]. После образования слоя гидрата скорость всплывания пузырьков резко замедлилась, что объясняется высокой, по сравнению с газом, плотностью гидрата [Maini & Bishnoi, 1981]. Движущийся в потоке гравититов пузырек газа, покрытый гидратом, в результате роста внешнего давления, очевидно, будет раздавлен, и весь газ пузырька перейдет в гидрат.

Образовавшиеся в соответствии с данной моделью гидраты будут растворяться в морской воде; необходимым условием их сохранения является быстрое погребение под толщей гравититов и высокое гидратосодержание. Количество седиментогенных гидратов в телах гравититов определяется размерами оползневых массивов, первоначальным содержанием в них газа и гидродинамическими условиями переноса и отложения материала; очевидно, возможно образование разных тел - от почти мономинеральных, подобных вскрытому скв. 570, до редких мелких включений. Образование седиментогенных гидратов газа наиболее вероятно на крутых континентальных склонах с развитой гравитационной тектоникой, примыкающих к широким шельфам или палеошельфам с газоносным осадочным чехлом.

Перемещение блоков пород. Можно себе представить опускание по сбросу крупного блока пород, содержащего залежь газа, с суши или шельфа в относительно

глубоководную обстановку, без нарушения его сплошности. Такая *сбросовая модель* по эффекту вполне аналогична трансгрессионной. Подобные гидраты не наблюдались.

* * *

Итак, перебор возможных физических механизмов газогидратогенеза позволил выделить несколько геологических моделей этого процесса. Они отличаются по степени обоснованности теоретических соображений, материалами наблюдений и - главное - по результативности. Концентрирование газа происходит при образовании гидратов в соответствии с элизионной, гидротермальной, подводно-грязевулканической, диагенетической и (при определенных условиях) седиментационной моделями. В рамках первых трех вполне вероятно аккумуляция гидратов - формирование их скоплений.

Возможны скопления гидратов и седиментационного генезиса, но они образуются в геологическом смысле мгновенно. Формирование концентрированных диагенетических скоплений гидратов маловероятно; рассеянные гидраты такого генезиса могут быть встречены в доголоценовых отложениях в условиях высокого содержания органического вещества и большой скорости метаногенеза.

Все эти модели могут реализоваться в субмаринных условиях - на континентальных склонах, подножиях и в глубоководье внутренних морей в пределах осадочно-породных бассейнов с быстро формирующимся осадочным чехлом. Скопления, сформированные адекватно элизионной, гидротермальной, подводно-грязевулканической и седиментационной моделям, могут иметь ресурсное значение.

В регионах с мощной криолитозоной (на суше и полярных шельфах) скопления гидратов могут формироваться в соответствии с криогенетической и струйно-миграционной моделями; в обоих случаях происходит разубоживание газа. В криогенетической модели скопления гидратов связаны с ранее существовавшими залежами газа; присутствие гидратов уменьшает долю извлекаемых из них запасов. Ресурсы газа, сосредоточенные в скоплениях струйно-миграционного генезиса, могут представлять практический интерес.

Список литературы

1. Алексеев Ф.А., Войтов Г.И., Лебедев В.С., Несмелова З.Н. Метан. М.: Недра, 1978. 310 с.
2. Баркан Е.С., Воронов А.Н. Оценка ресурсов газа в зонах возможного гидратообразования // Советская геология. 1983. № 8. С. 26-29.
3. Беляев С.С. Микробиологическое образование метана в различных экосистемах // Роль микроорганизмов в круговороте газов в природе. М.: Наука, 1979. С. 205-219.
4. Галимов Э.М., Квенволден К.А. Геохимия газов в газгидратсодержащих отложениях района Блейк Аутер Ридж (Атлантический океан) // Геохимия. 1984. № 7. С. 1075-1982.
5. Галимов Э.М., Кодина Л.А. Исследование органического вещества и газов в осадочных толщах дна Мирового океана. М.: Наука, 1982. 228 с.
6. Геодекия А.А., Егоров А.В. Направленная диффузионная переконденсация - возможный механизм первичной миграции // Энергия и механизм первичной миграции углеводородов. М.: Наука, 1988. С. 38-43.
7. Гинсбург Г.Д. Об образовании кристаллогидратов природных газов в недрах // Гидрогеология Енисейского Севера. Л.: НИИГА, 1969. С. 109-128.
8. Гинсбург Г.Д. Геотермические условия и нефтегазоносность Норильского района. М.: Наука, 1973. 91 с.
9. Гинсбург Г.Д., Грамберг И.С., Иванов В.Л., Соловьев В.А. Особенности литогенеза при газогидратообразовании в недрах Мирового океана // Докл. АН СССР. 1986. Т. 288. № 6. С. 1446-1449.
10. Гинсбург Г.Д., Грамберг И.С., Гулиев И.С. и др. Подводно-грязевулканический тип скоплений газовых гидратов // Докл. АН СССР. 1988. Т. 300. № 2. С. 416-418.

11. Гинсбург Г.Д., Иванов В.Л., Матвеев Ю.И., Соловьев В.А. Основные генетические типы субмаринных газовых гидратов // Геология морей и океанов. Л.: ПГО «Севморгеология», 1988. С. 81-88.
12. Гинсбург Г.Д., Тихомиров В.В., Баранов А.В., Новожилов А.А. Состав газа как признак вторичного гидратообразования // Газовая промышленность. 1985. № 3. С. 23-24.
13. Зоненшайн А.Л. Газовый источник на дне Охотского моря // Природа. 1987. № 8. С. 53-57.
14. Кремлев А.Н., Гинсбург Г.Д. Первые результаты поиска субмаринных газовых гидратов в Черном море // Геология и геофизика. 1989. № 4. С. 110-111.
15. Кукол З. Скорость геологических процессов. М.: Мир, 1987. 246 с.
16. Лисицын А.П. Лавинная седиментация и перерывы в осадконакоплении в морях и океанах. М.: Наука, 1988. 309 с.
17. Макогон Ю.Ф. Образование гидратов в газоносном пласте в условиях многолетней мерзлоты // Газовая промышленность. 1965. № 5. С. 14-15.
18. Макогон Ю.Ф., Дэвидсон Д.В. Влияние избыточного давления на стабильность гидрата метана // Газовая промышленность. 1983. № 4. С. 37-40.
19. Мокшанцев К.Б., Черский Н.В. Основные черты геологического строения и перспективы нефтегазоносности Восточной Якутии. Якутск: Якут. кн. изд-во, 1961. 135 с.
20. Намиот А.Ю., Бондарева М.М. Растворимость газов в воде под давлением. М.: Гостоптехиздат, 1963. 147 с.
21. Нефтегазогенетические исследования болгарского сектора Черного моря. Серия: Изд. Болг. АН, 1984. 290 с.
22. Океанология. Химия океана. Т. 2. М.: Наука, 1979. 536 с.
23. Савченко В.П. Методика направленных поисков газовых месторождений // Тр. ВНИИГАЗ. 1968. Вып. 42/50. С. 5-55.
24. Соловьев В.А., Гинсбург Г.Д. Геотермические исследования в Мировом океане в связи с изучением газогидратоносности // Литология и полезные ископаемые. 1987. № 5. С. 121-125.
25. Трофмук А.А., Черский Н.В., Царев В.П. Газогидраты - новые источники углеводородов // Природа. 1979. № 1. С. 18-27.
26. Трофимук А.А., Черский Н.В., Царев В.П., Никитин С.П. Пути освоения газогидратных залежей // Геология и геофизика. 1982. № 1. С. 3-10.
27. Троцюк В.Я., Марина М.М. Органический углерод в отложениях Мирового океана. М.: Наука, 1988. 176 с.
28. Черский Н.В., Царев В.П. Оценка ресурсов и некоторые вопросы поисков и извлечения природных газов из осадков дна Мирового океана // Геология и геофизика. 1977. № 5. С. 22-31.
29. Черский Н.В., Царев В.П., Никитин С.П. Исследование и прогнозирование условий накопления ресурсов газа в газогидратных залежах. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1983. 156 с.
30. Якушев В.С. Одна из возможных причин газовых выбросов в толщах многолетнемерзлых пород // Геология нефти и газа. 1989. № 4. С. 45-46.
31. Brooks J.M., Barnard L.A., Wiesenburg D.A. et al. Molecular and isotopic composition of hydrocarbons at site 533 DSDP Leg 76 // Initial Reports of DSDP. Wash. 1983. V: 76. P. 377-389.
32. Brooks J.M., Cox H.B., Bryant W.R. et al. [Association of gas hydrates and oil seepage in the Gulf of Mexico](#) // Org. Geochem. 1986. V. 10. P. 221-234.
33. Claypool G.E., Kaplan I.R. The origin and distribution of methane in marine sediments // Natural gas in marine sediments. N.Y.: Plenum Press, 1974. P. 94-129.
34. Claypool G.E., Kvenvolden K.A. [Methane and other hydrocarbon gases in marine sediments](#) // Ann. Rev. Earth. Planet. Sci. 1983. V. II. P. 299-327.
35. Claypool G.E., Threlkeld Ch.N. Anoxic diagenesis and methane generation in sediments of the Blake Outer Ridge, DSDP sites 533, Leg 76 // Initial Reports of DSDP. Wash. 1983. V. 76. P. 391-402.
36. Gieskes J.M., Johnston K., Boehm M. Appendix. Interstitial water studies. Leg 66 // Initial Reports of DSDP. Wash. 1985. V. 84. P. 961-967.
37. Hesse R., Harrison W. [Gas hydrates \(clathrates\) causing pore-water freshening and oxygen isotope fractionation in deep-water sedimentary sections of terrigenous continental margins](#) // Earth and Planet. Sci. Lett. 1981. V. 55. №3. P.453-462.
38. Kvenvolden K.A. [Methane hydrate - a major reservoir of carbon in the shallow geosphere?](#) // Chem. Geol. 1988. V. 71. P. 41-51.

39. Maini B.B., Bishnoi P.R. [Experimental investigations of hydrate formation behavior of a natural gas bubble in a simulated deep sea environment](#) // Chem. Engng. Sci. 1981. V. 36. P.: 183-189.
40. Merewether R., Olsson M.S., Lonsdale P. [Acoustically detected hydrocarbon plumes rising from 2 km depths in Guaymas Basin, Gulf of California](#) // J. Geophys. Res. 1985. V. 90. №B4. P. 3075-3085.
41. Miller R.S., Lawrence J.M., Gieskis J.M. Interstitial water studies. Sites 386 and 387, Leg 43 // Initial Reports of DSDP. Wash. 1979. V. 43. P. 669-674.
42. Reeburgh W.S. [Rates of biochemical processes in anoxic sediments](#) // Ann. Rev. Earth. Planet. Sci. 1983. V. 11. P. 269-298.
43. Shipley T.H., Houston M.N., Buffler R.I. [Seismic evidence for widespread possible gas-hydrate horizons on continental slope and rise](#) // Bull. AAPG, 1979. V. 63. № 12. P. 2204-2213.
44. Site 491 / Shopboard Sci. Party // Initial Reports of DSDP. Wash. 1982. V. 66. P. 219-232.
45. Topham D.R., Bishnoi P.R. Deep water blowouts // Spill Technol. Newslett. 1980. V. 5. № 3. P. 88-94.
46. Wright R., Anderson J.B. [The importance of sediment gravity flow to sediment transport and sorting in a glacial marine environment: Eastern Weddell Sea, Antarctica](#) // Bull. Geol. Soc. America. 1982. V: 93. P. 951-963.

ПГО "Севморгеология",
Ленинград

Поступила в редакцию
7. VIII. 1989

Ссылка на статью:



Гинсбург Г.Д., Соловьев В.А. Геологические модели газогидратообразования // Литология и полезные ископаемые. 1990. № 2. С. 76-87.