

УДК 548.562+542.7

## Природные газовые гидраты: распространение, модели образования, ресурсы

Ю. Ф. Макогон

*ЮРИЙ ФЕДОРОВИЧ МАКОГОН — доктор технических наук, профессор, руководитель газогидратной лаборатории Техасского А–М университета, США. Область научных интересов: добыча нефти и газа, природные и промышленные газогидраты.*

*Petroleum Engineering Department, Texas A&M University, College Station, Texas 77843-3116, U.S.A.  
E-mail makogon@spindletop.tamu.edu*

Традиционные ресурсы энергии на Земле ограничены и распределены на планете весьма не равномерно. По мировым оценкам на 1.1.2002, разведанные запасы нефти составляли  $142,1 \cdot 10^9$  тонн, природного газа —  $150,2 \cdot 10^{12}$  м<sup>3</sup>. При современном уровне потребления энергоресурсов нефти достаточно на 40 лет, а природного газа — на 60–100 лет.

Структура баланса потребляемой энергии быстро меняется в зависимости от уровня развития цивилизации. На рис. 1 показано изменение структуры мирового энергопотребления за последние 150 лет и дан прогноз на ближайшие 50 лет. Как видно, в первой половине прошлого столетия превалировало использование угля, во второй половине — нефти и природного газа. Следует ожидать, что потребление ядерной энергии и гидроэнергии постепенно будет снижаться.

Уже сегодня в ряде стран импорт энергии превышает 98% (Япония, Корея и др.) и число стран-импортеров энергии будет возрастать. В такой ситуации энергетическая проблема может быть решена за счет природных газовых гидратов. В недрах Земли и в акваториях Мирового океана существуют практически неограниченные ресурсы природного газа в твердом гидратном состоянии, доступные большинству стран мирового сообщества. Потенциальные ресурсы гидратированного газа оцениваются специалистами в  $1,5 \cdot 10^{16}$  м<sup>3</sup>.

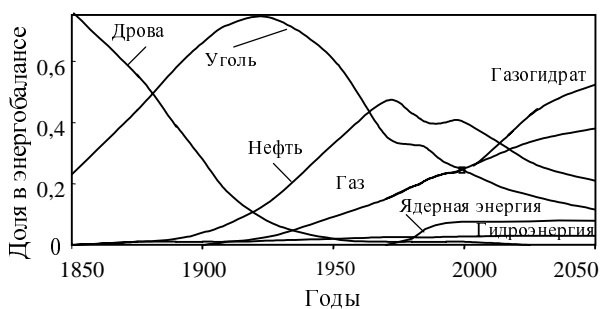


Рис. 1. Изменение мирового энергобаланса за период 1850–2000 гг. и прогноз до 2050 г.

Проблема выявления и освоения газогидратных залежей весьма актуальна. Ряд стран имеют Национальные программы по изучению и промышленному освоению природных газогидратов. Разработка ресурсов природных газогидратов будет способствовать не только экономическому развитию отдельных стран, но и политической стабильности в мире. Исчезнет необходимость борьбы за источники энергии, не потребуются огромные затраты на транспорт импортируемой энергии. Открытие природных газогидратов и освоение энергии, заключенной в них, будет способствовать развитию цивилизации на более мирных основах.

### История открытия природных газогидратов

Предположение о возможности существования газогидратов в газоносных пластах было высказано И.Н. Стрижовым в 1946 г., однако никаких доказательств он не привел. Более того, он высказал пессимизм относительно целесообразности их освоения. Спустя 21 год автором данной статьи после визита в Якутию, где в 1963 г. была пробурена Мархинская скважина глубиной 1800 м, вскрывшая разрез пород с температурой 0 °С на глубине 1450 м, была также высказана идея о существовании газогидратных скоплений в охлажденных пластах. Тогда реальность этой идеи у многих вызвала сомнения. Требовались доказательства возможности образования гидратов в пористых средах и формирования газогидратных залежей.

Первые эксперименты по исследованию условий образования гидратов природного газа в пористой среде были выполнены автором статьи на кафедре разработки и эксплуатации газовых и газоконденсатных месторождений МИНХиГП им. И.М. Губкина (1966 г.). Они убедительно показали возможность образования и стабильного существования газогидратов в недрах Земли и явились обоснованием научного открытия природных газогидратных залежей.

Спустя короткое время в Заполярье, на восточной границе Западной Сибири, группой молодых геологов (Сапир, Беньяминович, Безносиков, Шешуков, Храменков) было выявлено первое газ-газогидратное Мессояхское месторождение, которое в январе 1970 г.

введено в промышленную разработку. На основании комплексных геофизических исследований, выполненных в скважинах, было установлено, что в верхней части залежи газ находится в гидратном состоянии, а нижележащая, подстилающая часть залежи содержит газ в свободном состоянии. На фоне таких крупных месторождений, как Уренгойское, Ямбургское, Медвежье, Мессояхское месторождение с запасами менее 30 млрд. м<sup>3</sup> казалось карликом. Однако именно оно сыграло роль катализатора в развитии исследований природных газовых гидратов. Мир получил явное подтверждение наличия газогидратных залежей и реальную возможность их промышленного освоения. На крупнейшем в Заполярье металлургическом комбинате это месторождение обеспечило замену дорогостоящего привозного угля на высокоэкологичный дешевый природный газ.

В настоящее время над проблемой газовых гидратов, как промышленных, так и природных, работают тысячи высококвалифицированных специалистов во многих странах мира. Каждые три года проводятся международные конференции по проблемам природных и промышленных газогидратов.

#### Краткая характеристика газогидратов

Газовые гидраты — соединения включения, в которых молекулы газа заключены в кристаллические ячейки, состоящие из молекул воды, удерживаемых водородной связью. Газовые гидраты могут образовываться и стабильно существовать в широком интервале давлений и температур (для метана от  $2 \cdot 10^{-8}$  до  $2 \cdot 10^3$  МПа при температуре от 70 до 350 К). Некоторые свойства гидратов уникальны. Например, один объем воды связывает в гидратное состояние ~160 объемов метана. При этом ее удельный объем возрастает на 26% (при замерзании воды ее удельный объем возрастает на 9%).

Разложение гидрата в замкнутом объеме сопровождается значительным повышением давления. Процесс образования газогидрата происходит с выделением тепла, а его разложение — с поглощением тепла. На разложение природных гидратов в пласте необходимо затратить от 6 до 12% энергии, содержащейся в гидратированном газе.

Кристаллогидраты газа обладают высоким электросопротивлением и высокой акустической проводимостью. Они практически непроницаемы для молекул воды и газа.

Морфология кристаллогидратов весьма разнообразна и определяется составом газа и воды, давлением и температурой, динамикой процесса роста кристаллов. Однако при огромном разнообразии форм существует только три типа кристаллов гидратов: массивные, вискерные и гель-кристаллы.

Массивные кристаллы (рис. 2) формируются за счет сорбции молекул газа и воды растущей, постоянно обновляющейся поверхностью кристалла. Вискерные кристаллы\* формируются за счет тоннельной сорбции газа и

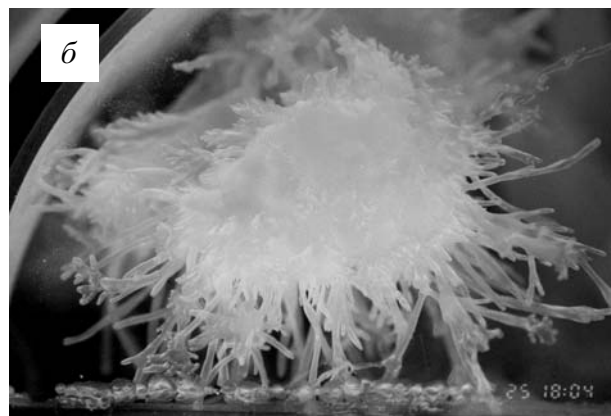


Рис. 2. Массивный кристаллогидрат метана, сформировавшийся на свободном контакте газ—вода (98 атм., 12 °С) (а) и массивные кристаллы гидрата метана, образованные в газовой среде из паров воды (86 атм., 3,3 °С) (б)

воды к основанию растущего кристалла. Размер сорбционного тоннеля соизмерим с размером сорбируемых молекул гидратообразователя. При образовании гидрата тоннель у основания растущего кристалла пульсирует, постоянно изменяясь в размере. При этом в зоне тоннеля создается электрическое поле высокого напряжения, результатом которого является интенсивная коррозия даже легированных металлов. Гель-кристаллы (рис. 3) формируются в объеме воды из растворенного газа, выделяющегося из нее при изменении давления и температуры.

Природные газогидраты представляют собой метастабильный минерал, образование и разложение которого зависит от давления и температуры, состава газа и воды, от свойств пористой среды, в которой они образуются. Кристаллогидраты, формирующиеся в пластовых условиях, могут быть диспергированы в поровом пространстве без разрушения пор и с разрушением вмещающих пор, могут быть в виде частиц размером до 5—12 см, в виде линз небольшого размера и даже в виде хорошо выдержанных, чисто гидратных пластов большой протяженности, толщиной до нескольких метров. На рис. 4 представлена фотография природного газового гидрата — керна, поднятого из скважины, пробуренной в акватории Тихого океана. КERN получен из пласта чистого гидрата толщиной более 4 м.

\* Фотоснимки вискерных кристаллов газовых гидратов см. в статье Ю.Ф.Макогона и Дж.С.Хольсти «Вискерные кристаллы газогидратов».

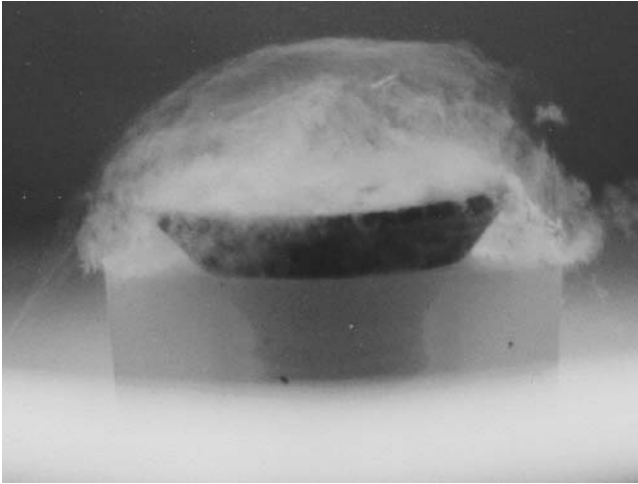


Рис. 3. Гель-кристаллы гидрата метана



Рис. 4. Массивный природный газогидратный керн

#### Формирование газогидратных залежей

В газогидратных залежах газ частично или полностью находится в твердом гидратном состоянии. Для их формирования необходимыми условиями являются наличие газа и воды, пониженные температуры и определенные давления. Стабильность газогидратных залежей зависит от интенсивности процессов генерации, миграции и диффузионного рассеяния газов в разрезе пород и динамики температурного режима в регионе. Термодинамическая зона образования и стабильного существования гидратов достигает несколько сот метров. Верхняя граница существования газогидратных залежей в акваториях обычно находится у поверхности дна независимо от состава газа. В пределах суши расположение верхней границы зоны образования гидрата зависит от состава газа. Например, гидраты сероводорода в грунтах с температурой около  $0^{\circ}\text{C}$  могут быть в стабильном состоянии непосредственно у поверхности земли, в то время как для гидратов метана верхняя граница располагается на глубине более 260 м.

Существуют два основных вида газогидратных залежей: первичные и вторичные. Первичные — это те, после формирования которых в них не происходило циклических фазовых переходов гидрат—свободный газ—вода—гидрат. Они обычно приурочены к акваториям, где донные температуры изменяются крайне медленно. Большинство первичных залежей формируется из растворенных в пластовой воде газов и располагается в придонных осадках, характеризующихся высокой пористостью, низкой температурой и малой прочностью вмещающих пород. Часто первичные залежи не имеют литологических покровов. Образующийся в порах гидрат является «цементом» и служит непроницаемой крышкой, под которой идет накопление гидрата. В результате разложения гидрата вме-

щающие породы могут превращаться в полужидкую массу (со всеми вытекающими отсюда последствиями для инженерных объектов, расположенных в зоне гидратообразования).

Газогидрат в первичных залежах может находиться в диспергированном состоянии или в виде монолита. Первичные залежи занимают обычно большие площади независимо от наличия стратиграфических структур. На нижней границе образующейся первичной залежи нет больших емкостных изменений, пористость и проницаемость пород остается практически неизменной и достаточно высокой, что необходимо учитывать при выборе методов разработки.

Вторичные газогидратные залежи обычно находятся на материках. Они формируются из скоплений свободного газа, расположенных под непроницаемыми литологическими покровками, при понижении температур в разрезе пород ниже равновесной для данного газа. За геологическое время температура в разрезе пород на материках неоднократно циклично изменялась, что приводило к циклическим фазовым переходам с образованием залежей газовых гидратов и свободного газа. В переходный период под газогидратной залежью может существовать залежь свободного газа или нефти. Именно к этой категории относится Мессояжское месторождение, которое находится в завершающей стадии разложения гидратов (за счет повышения температуры в разрезе пород).

В результате неоднократных фазовых переходов на газоводяном контакте вторичных залежей имеет место значительная кальматация пор (закупоривание пор микрочастицами осадочных пород) с резким снижением проницаемости. Именно этот фактор способствует эффективной разработке газогидратных месторождений путем понижения пластового давления ниже равновесного.

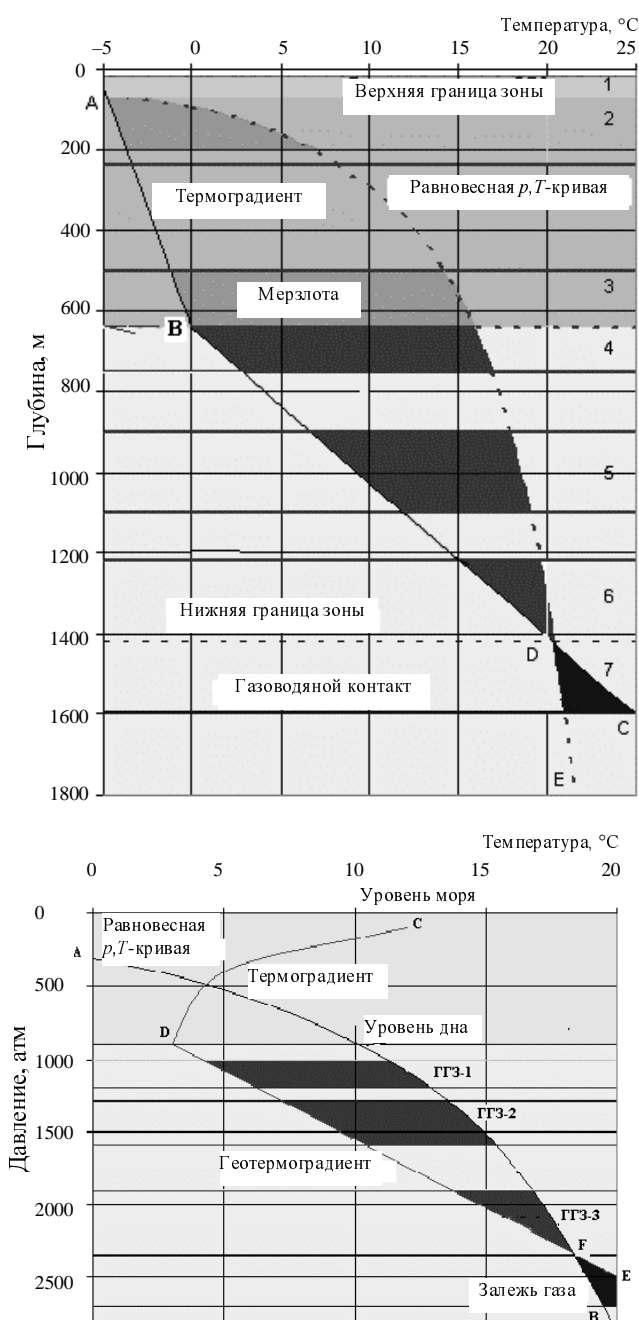


Рис. 5. К определению зоны формирования залежей газогидрата в условиях материка (а) и акваторий (б) и их классификация.

ГГЗ — газогидратная залежь

Зоной образования гидрата является толща пород, в которой давление и температура соответствуют термодинамическим условиям стабильного существования гидрата газа. Зона гидратообразования может быть определена математически путем совместного решения уравнения изменения термического градиента в разрезе пород и уравнения равновесного стабильного существования гидрата в данной пористой среде. В настоящее время широко используется предложен-

ный нами в 1966 г. простой и надежный графический способ определения зоны образования гидрата на примере метана для условий материка, на рис. 5а — для акваторий. С повышением минерализации воды зона гидратообразования уменьшается, а при наличии тяжелых газов возрастает. Толщина зоны гидратообразования сильно зависит от донных температур и геотермоградиента. С повышением донных температур и геотермоградиента она уменьшается.

Скопления природных газогидратов на суше приурочены к охлажденным зонам осадочного чехла земной коры. В районах многолетней мерзлоты толща пород, в которой существуют газогидратные залежи, может достигать 400—800 м, а в некоторых случаях превышает 1000 м. В акваториях Мирового океана зона гидратообразования начинается от дна океана и обычно составляет несколько сот метров. Субмаринные залежи приурочены, главным образом, к глубоководному шельфу и океаническому склону при глубинах воды от 200 м — для условий приполярья, и от 500—700 м — для экваториальных регионов.

Механизм формирования газогидратных залежей определяется многими факторами: термодинамическим режимом разреза пород в регионе, интенсивностью генерации и миграции углеводородов, составом газа, степенью газонасыщенности и минерализации пластовых вод, структурой пористой среды, литологической характеристикой разреза, геотермическим градиентом в зоне гидратообразования и в подстилающих породах, фазовым состоянием гидратообразователей и др.

Первая модель формирования газогидратных залежей была дана в работе «Об одном из возможных механизмов образования залежей природного газа» (Трифимук и др. Геология и геофизика, 1972, № 9).

Генезис углеводородов в осадочном чехле земной коры и формирование газогидратных залежей в акваториях Мирового океана неразрывно связаны, так как большая часть генерируемых углеводородов в донных осадках не рассеивается, диффундируя в придонные воды, а накапливается в виде гидратов в непосредственной близости от дна, независимо от наличия литологических покровов. Накопление отдельных компонентов природного газа в твердой фазе происходит уже на первых стадиях превращения органического вещества при его биохимическом преобразовании, если этот процесс осуществляется в зоне гидратообразования.

Верхняя граница зоны образования гидрата в акваториях всегда находится в толще воды, нижняя — в разрезе пород. Исходя из термической характеристики глубоководных районов океана, а также из фактов накопления большей части осадочных пород и органического вещества в периферических районах океана, охватывающих шельфы, континентальные склоны и приконтинентальные глубоководные жёлоба, следует считать наиболее перспективными зонами накопления гидрата газов глубоководные шельфовые осадки и осадки континентального склона. Что касается абиссальных зон крупнейшего океанского ложа, то имеющиеся здесь осадки очень бедны органическим веществом, геотермические градиенты высоки, так что нет оснований связывать с ними серьезные перспективы в отношении накопления гидратов.

Формирование газогидратных залежей в зоне гидратообразования в период осадконакопления происходит как со стороны верхней границы зоны за счет поступления новых порций органического вещества в начальный период превращения органического вещества, так и со стороны нижней границы — за счет газов, образующихся в последующие периоды заглубления и дальнейшего превращения органического вещества, а также за счет газов, поступающих из глубинных недр Земли. При вертикальной миграции газы поступают из высокотемпературных зон в зону гидратообразования, увеличивая толщ залежей снизу. Под гидратонасыщенными пластами может накапливаться газ в свободном состоянии, образуя традиционные газовые месторождения. Известны примеры залежей нефти непосредственно под гидратонасыщенными пластами, служащими непроницаемой крышкой для них.

Условия стабильного существования газогидратных залежей в пределах материков и в акваториях принципиально различны. Газогидратные залежи, сформировавшиеся в акваториях, слабо подвержены влиянию изменения температуры на поверхности Земли. Даже при значительном росте приповерхностных температур в придонных водах температура остается практически неизменной. Однако газогидратные залежи в акваториях подвержены влиянию изменения уровня Мирового океана, вызванного формированием крупных объемов льда и его таянием за геологическое время. Во многих районах Мирового океана наличие газогидратных залежей обнаруживается от нескольких десятков или даже сотен метров от дна, что является результатом понижения уровня океана в течение последних оледенений, а также результатом тектонических и стратиграфических перемещений. В период крупных оледенений уровень Мирового океана понижался при практически неизменных придонных температурах. Снижение гидростатического давления приводило к разложению гидрата в придонных осадках. Придонные осадки обычно слабо сцементированы и высокопроницаемы. Газ, высвобождающийся при разложении гидрата, поступает в придонные воды, растворяется и мигрирует в атмосферу, усиливая парниковый эффект.

В пределах суши стабильно существуют лишь вторичные газогидратные залежи, образовавшиеся в период последнего оледенения из скоплений свободного газа, сохранившихся под литологически непроницаемыми крышками.

Общим результатом динамики изменения условий стабильного существования газогидратных залежей на суше и в акваториях явилось перераспределение запасов газа — в акваториях сосредоточено до 98% и лишь около 2% на материках от общего потенциала.

Исключительно важную роль при формировании залежей газовых гидратов и свободного газа играет растворимость газа в свежеконденсированной воде и в пластовой воде, контактирующей с образующимся гидратом. Кратко рассмотрим особенности процесса формирования газогидратных залежей в этих условиях.

Как известно, все природные воды содержат растворенные газы. Именно в системах газ—вода формируются, стабильно существуют и разрушаются залежи природных газов и нефти. Суммарный объем углеводородных газов, растворенных в подземных водах, составляет  $10^{13}$  т (Корценштейн, 1984).

В недрах Земли растворенный газ выделяется из водного насыщенного раствора в виде микропузырьков. В случае благоприятных термобарических условий скопления микропузырьков, объединяясь, могут формировать крупные залежи свободного газа или залежи газогидрата. При вертикальной или латеральной миграции газонасыщенных водных растворов изменяются давление, температура и степень газонасыщенности раствора, при этом газы могут как растворяться, так и выделяться из раствора. Наличие газогидрата, контактирующего с пластовой водой, резко меняет структуру воды и, как следствие, растворимость газа в воде понижается.

Уже первые исследования растворимости природных газов в воде в условиях образования гидрата (Макогон, 1971) показали резкое изменение соотношения количества молекул воды и газа до образования и после образования гидрата. Дальнейшие исследования позволили объяснить условия формирования и разрушения залежей свободного газа и газогидратных залежей в системах газ—вода (Макогон и др., 2001).

Зарождение гидрата всегда происходит на свободной поверхности контакта газ—вода. В недонасыщенном газом растворе процесс образования гидрата не может начаться. Однако в случае образования центров кристаллизации (на поверхности микропузырьков или на поверхности конденсата воды в объеме газа) может развиваться активный процесс роста кристаллов гидрата с формированием крупных скоплений гидрата из растворенного газа в недонасыщенном растворе. В осадочном чехле пород газовые залежи формируются только из свободного газа, выделяющегося из перенасыщенного раствора при изменении давления и температуры. Газогидратные залежи могут формироваться и стабильно существовать в условиях дефицита растворенного газа в пластовых водах. Именно это свойство воды (формировать газогидратные залежи в условиях дефицита растворенного газа в воде) обеспечило сохранение на Земле огромных ресурсов природных газов в пределах акваторий Мирового океана за геологическое время. Это же свойство определяет интервалы глубин существования газовых и газогидратных залежей в различных термобарических условиях\*.

Не останавливаясь детально на технологии определения растворимости газа в воде в условиях гидратообразования, приведем лишь обобщенные кривые растворимости газа в морской воде до образования гидрата (рис. 6а) и в воде, контактирующей с гидратом после его образования (рис. 6б).

Для определения растворимости метана в переохлажденной морской воде с достаточной точностью можно использовать уравнение:

$$\phi = 0,4342 \frac{p^{0,64}}{(t + 5,278)^{0,3882}} \quad [\text{см}^3/\text{г}] \quad (1)$$

где  $p$  — давление, кг/см<sup>2</sup>,  $t$  — температура, °С.

\* Модель Ю.Ф. Макогона образования газогидратных залежей из «растворенного газа в недонасыщенном растворе» основана на экспериментальных данных по растворимости метана в воде в присутствии гидрата, полученных в неравновесных условиях. — Прим. научного консультанта номера.

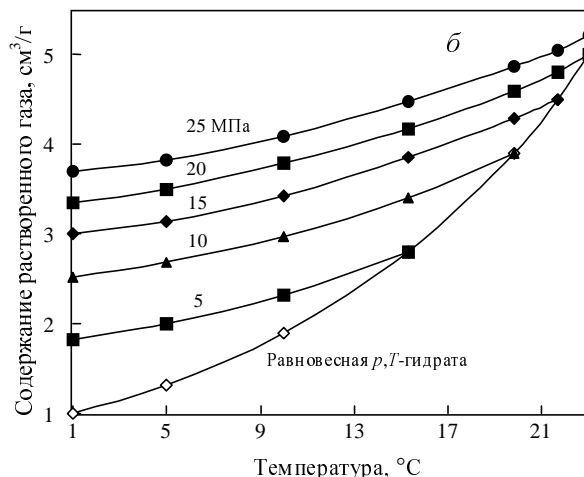
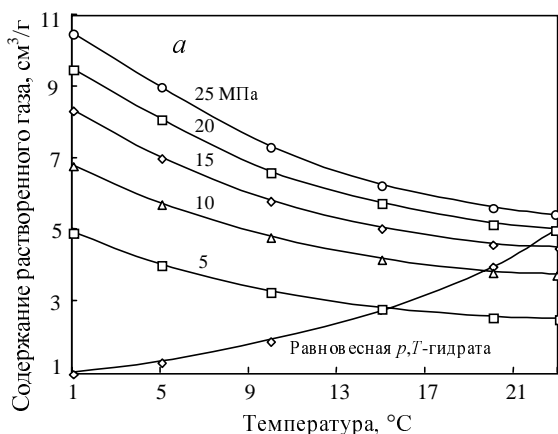


Рис. 6. Растворимость природного газа (метана) в воде в условиях образования гидрата (а) и после его образования (б)

Растворимость метана в морской воде, контактирующей с гидратом, можно рассчитать по уравнению:

$$\phi = 5,3207 \cdot 10^{-6} \cdot p^{(2,8227-0,0087T)} e^{(0,0439T)} \quad [\text{см}^3/\text{г}] \quad (2)$$

где  $p$  — давление, МПа.

Погрешность определения  $\phi$  не превышает 2,5%.

Зная зависимость растворимости газа в воде от давления и температуры и располагая данными об изменении термоградиента пород на различных глубинах, можно оценить реальную динамику залежей углеводородов в заданном регионе. На рис. 7 приведены кривые зависимости газосодержания в пластовых водах региона жёлоба Нансей (Япония). Отрезок В-Е соответствует условиям газонасыщения в точке В. Интервал между ВЕ и ВС определяет дефицит газосодержания на различных глубинах. Интервал между ВЕ и ВД показывает избыток газа в воде, контактирующей с гидратом. Выделяющийся газ переходит в гидратное состояние, формируя газогидратные залежи. Из приведенного графика следует, что мигрирующие вертикально газы в условиях, соответствующих кривой А-В, будут выделяться из объема воды в виде микропузырьков, которые объединяясь, могут формировать крупные залежи свободного газа — газовые месторождения. При миграции газонасыщенных вод в разрезе пород вверх до глубин, соответствующих кривой В-С, они попадают в условия недонасыщенного состояния.

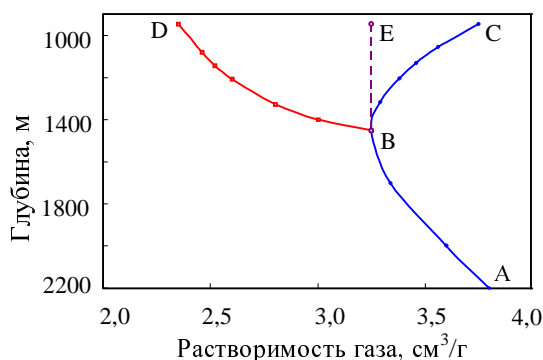


Рис. 7. Условия формирования газовых и газогидратных залежей в регионе жёлоба Нансей (Япония).

Расшифровку кривых см. в тексте

Произойдет обратное насыщение — воды газом, что приведет к исчезновению микропузырьков свободного газа, т.е. в термобарических условиях выше кривой В-С залежи свободного газа существовать не могут. Следовательно, в аналогичных условиях тратить время и средства на поиски газовых залежей в данном регионе не целесообразно.

Одновременно с отмеченными процессами при существовании гидрата в интервале  $p, T$ -условий выше кривой В-Д происходит активное поглощение растворенного газа из воды, мигрирующей вертикально, образующимся гидратом. В аналогичных условиях формируются газогидратные залежи. При этом исключительно важную роль играет величина геотермического градиента в пределах зоны образования гидрата и в нижележащих подстилающих породах. Если геотермоградиент в подстилающих гидратонасыщенных породах превышает его величину в зоне гидратообразования, происходит разложение гидрата на нижней границе залежи. В результате под газогидратной залежью будут скапливаться газы в свободном состоянии. В условиях постоянного геотермоградиента в разрезе пород гидрат в пластах в зоне гидратообразования находится в стабильном состоянии. Если градиент в подстилающих породах ниже его величины в зоне гидратообразования, происходит формирование гидрата и, соответственно, газогидратной залежи.

На рис. 8 приведены кривые геотермического гра-

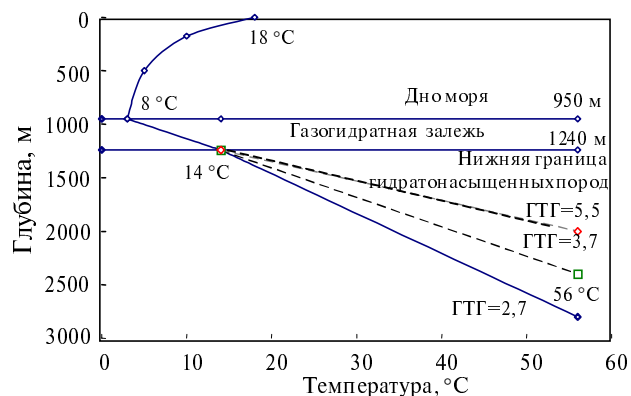


Рис. 8. Распределение геотермического градиента (ГТГ) и условия существования залежей газа в регионе жёлоба Нансей

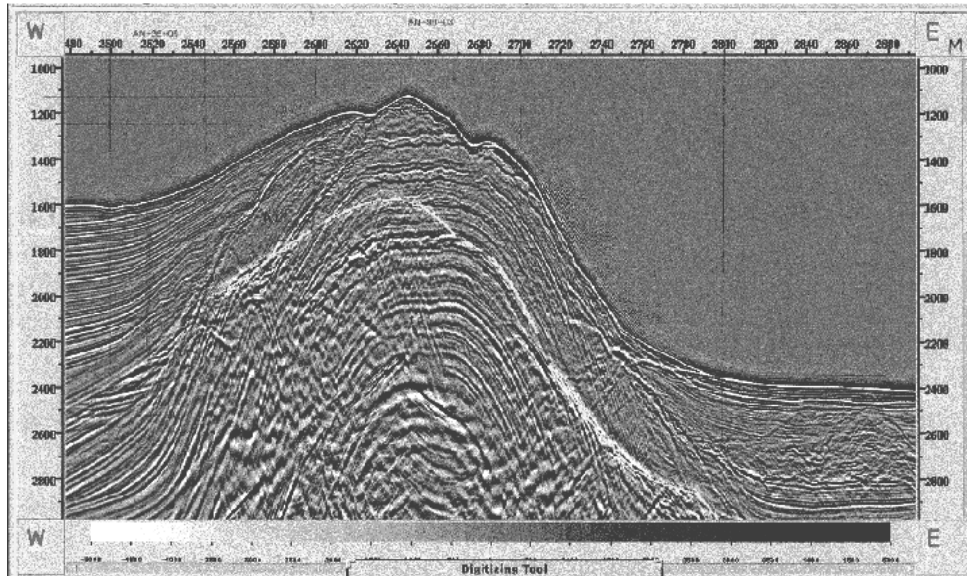


Рис. 9. Сейсмический профиль низкой частоты (BSR)

диента для месторождения в районе жёлоба Нансей, где термоградиент в зоне гидратообразования выше, чем в подстилающих породах. Результаты бурения и геофизических исследований этого месторождения показали отсутствие газа в свободном состоянии. Месторождение в районе жёлоба Нансей находится в стадии формирования. Низкое содержание органического вещества в породах и пассивная генерация углеводородов в регионе исключают возможность накопления газа в свободном состоянии под гидратными пластами. Располагая данными о равновесной  $p, T$ -кривой, величиной термоградиентов и характеристической пористости среды, можно определить скорость накопления гидрата в данном разрезе пород.

**Способы выявления и разведки газогидратных залежей**

Существующие технологии выявления газогидратных залежей основаны на использовании свойств гидрата и гидратонасыщенных пород. Такими свойствами являются высокая акустическая проводимость, высокое электросопротивление, пониженная плотность, низкая теплопроводность, низкая проницаемость для газа и воды. Выявление газогидратных залежей может быть осуществлено путем сейсмического зондирования, гравиметрическим методом, измерением теплового и диффузионного потоков над залежью, изучением динамики электромагнитного поля в исследуемом регионе и др.

Наиболее распространенным методом является сейсмика — стандартная, на частотах 30—120 Гц с разрешающей способностью до 12—24 м и высокочастотная, на частотах от 250—650 до 1200 Гц с разрешающей способностью до 1—2 м. По данным сейморазведки 2-D при наличии свободного газа под гидратонасыщенными пластами определяется положение нижней границы гидратонасыщенных пород — граница BSR (Bottom Symulation Reflector). Пример характер-

ного вида границы BSR приведен на рис. 9. К сожалению, низкочастотная сейсмика не отвечает на многие важные вопросы, в частности, не дает данных о степени гидратонасыщенности пород. На рис. 10 приведен результат, полученный при использовании сейсмического метода высокого разрешения 3-D (Diaconescu e. a., 2001). Этот метод более информативен, он позволяет определять нижнюю и верхнюю границы гидратонасыщенных пород, а также концентрацию гидрата в породах, на основании чего можно оценивать ресурсы газа и выбирать место бурения геологоразведочных скважин для первичной оценки залежи.

Детальная разведка газогидратных залежей осуществляется посредством геофизических исследований в пробуренных скважинах, а также путем отбора кернов с последующим их комплексным анализом.

**Состав газа в газогидратных залежах**

Состав газа и пластовой воды в газогидратных залежах определяет как удельное энергосодержание, так и технологию извлечения энергии. В таблице приведены данные по составу газа для ряда газогидратных месторождений (Kohin, 2002).

Таблица  
Состав газа в газогидратных залежах (в % мол.)

Газогидратная залежь	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	изо-C <sub>4</sub>	n-C <sub>4</sub> +	CO <sub>2</sub>
Haakon Mosby, США	99,5	0,1	0,1	0,1	0,2	
Bussh Hill, США	29,7	15,3	36,6	9,7	8,8	
Bush Hill Wite, США	72,1	11,5	13,1	2,4	0,9	
Bush Hill Yellow, США	73,5	11,5	11,6	2,0	1,3	0,1
Green Can. Wite, США	66,5	8,9	15,8	7,2	1,6	
Green Can. Yellow, США	69,5	8,6	15,2	5,4	1,2	
Мессояха, Россия	98,6	0,1	0,1			0,5 (0,7 % N <sub>2</sub> )
Nankai Trough, Япония	99,63					0,37

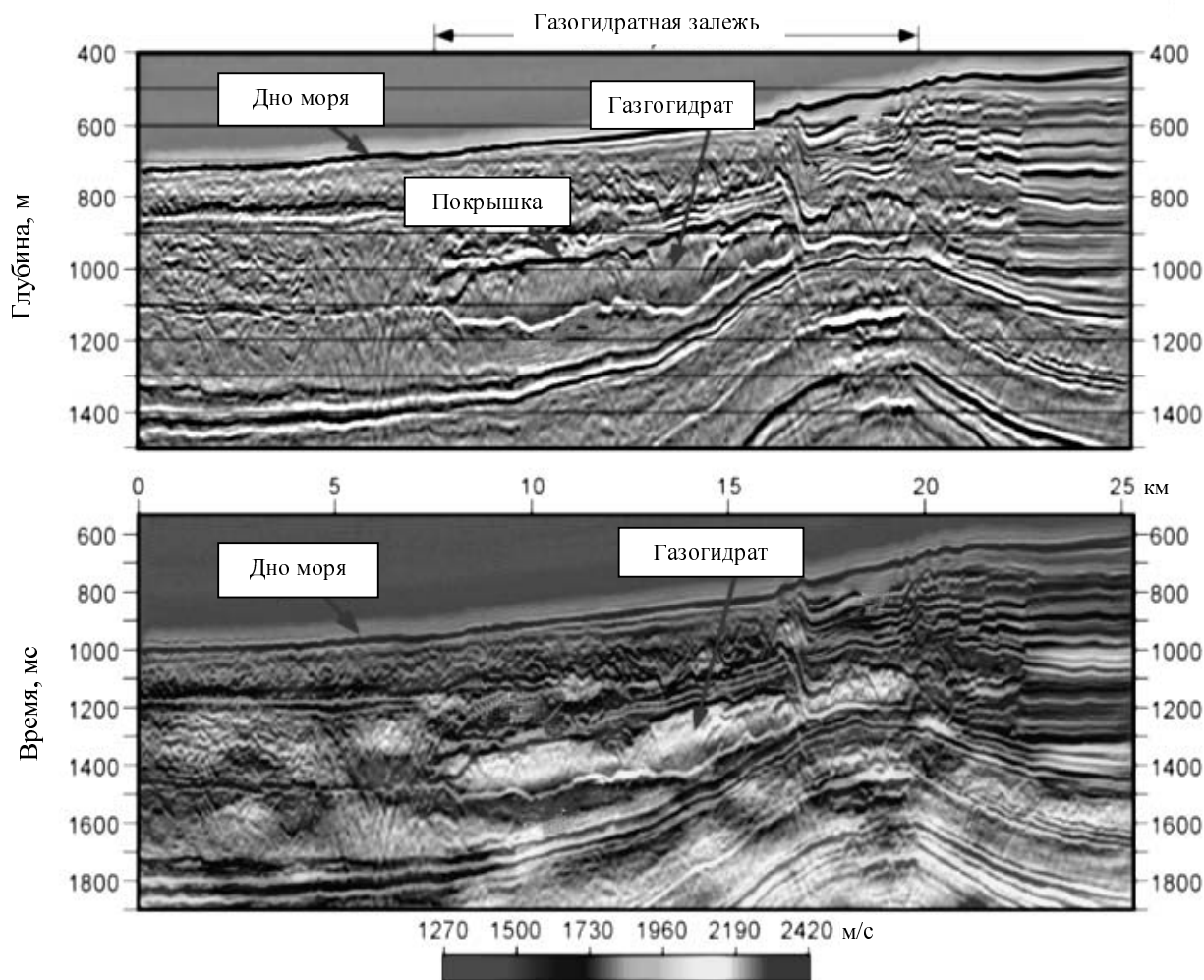


Рис. 10. Сейсмический разрез высокого разрешения газогидратной залежи.

Расшифровку кривых см. в тексте

#### Распространение природных газогидратов

Исследования условий образования, стабильного существования и свойств гидратов в природных условиях позволяют уверенно прогнозировать их наличие в различных регионах суши и Мирового океана. Следует подчеркнуть, что целенаправленные поисковые работы, проводимые как на суше, так и в акваториях, всегда выявляли газогидратные залежи. Разумеется, газогидраты не лежат сплошным ковром в термодинамической зоне гидратообразования — одних соответствующих температуры и давления недостаточно. Необходимо высокое содержание органического вещества в породах (от 0,5 до 4% и выше), активная генерация и миграция углеводородов в зону образования гидрата. Огромные перспективные газогидратные залежи выявлены в пределах полярных акваторий на глубинах вод от 200 м, в районах Атлантического, Индийского и Тихого океанов — на глубинах от 500—700 м. Только в пределах Мексиканского залива выявлено более 70 залежей газогидратов. В акватории Австралии, в районе Новой Каледонии сейсмическая разведка

обнаружила газогидратную залежь общей площадью более 80 тыс. км<sup>2</sup> на глубине воды от 1 до 4 км. (OGJ Newsletter Nov., 15, 1999). Запасы газа в гидратном состоянии здесь могут быть от 20 до 200 триллионов м<sup>3</sup>.

Газогидраты широко распространены и в космосе. Вода и различные газы являются постоянными компонентами в космическом пространстве и любые природные газы при определенных условиях в космосе образуют гидраты. Отметим еще раз, что природные газогидраты играли важную роль при формировании планет Солнечной системы, их атмосферы и гидросферы.

Весьма вероятно, что именно гидраты — метастабильные, легко трансформируемые соединения, явились родоначальниками простейших представителей биологической жизни на нашей планете. Массовые соотношения воды и газа в гидратах и живых организмах весьма близки. Тело морской медузы близко по составу и форме к гель-гидратам, образующимся в объеме воды из растворенных газов.

На Марсе существует слой гидратонасыщенных пород толщиной около 6 км. Анализ термобарических условий показал, что отношение массы воды к общей



массе планет на Земле и Марсе одинаково. Это еще раз подтверждает, что планеты формировались из однородного исходного вещества. Вода на Марсе существует в жидком, парообразном и твердом (в виде льда и гидрата) состояниях. В зависимости от положения планеты, от температуры на различных участках ее поверхности объем гидрата изменяется, меняется давление и масса паров воды и газа в атмосфере. Происходит активный перенос вещества между полюсами, что сопровождается сильными ветрами и осевым раскачиванием планеты.

Предположительно комета Галлея представляет собой глыбу гидрата  $\text{CO}_2$  (Макогон, 1987), а не льда, как считали ранее.

#### Методы оценки запасов газа в газогидратных залежах

Объем газа в гидратном состоянии определяется выражением:

$$V_G = \frac{22400 \cdot V_H \cdot \rho_H}{M_H} \text{ [м}^3\text{]} \quad (3)$$

где  $V_H$  — объем гидрата,  $\text{м}^3$ ;  $\rho_H$  — плотность гидрата,  $\text{г/см}^3$ ;  $M_H$  — молекулярная масса гидрата, г.

Газ в газогидратной залежи может находиться в свободном, связанно-гидратированном и растворенном состоянии. Общие запасы газа  $Q$  определяются суммой:

$$Q = Q_G + Q_H + Q_\phi \quad (4)$$

где  $Q_G$ ,  $Q_H$ ,  $Q_\phi$  — объем газа в свободном, гидратном, растворенном состоянии, соответственно.

Объем газа в свободном состоянии можно рассчитать по уравнению:

$$Q_G = V \cdot m \frac{p T_0}{p_0 T \cdot z} [1 - S_W(1 + S_H V_H - S_H)] \quad (5)$$

где  $V$  — объем залежи,  $\text{м}^3$ ;  $m$  — пористость вмещающих пород;  $p$  — пластовое давление, МПа;  $T$  — пластовая температура, К;  $T_0$ ,  $p_0$  — нормальная температура и атмосферное давление;  $z$  — коэффициент сжимаемости свободного газа в залежи;  $S_W$  — суммарное содержание поровой воды в залежи;  $V_H$  — удельный объем воды в гидратном состоянии,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ , для метана  $V_H = 1,26$ ;  $S_H$  — часть поровой воды, перешедшей в залежи в гидратное состояние, величина  $S_H$  всегда меньше единицы и определяется выражением:

$$S_H < (S_W - 1)/(1/V_H - 1) \quad (6)$$

Объем газа в гидратном состоянии в залежи составляет:

$$Q_H = V \cdot m \cdot S_W \cdot S_H \cdot V_H \cdot \Psi \quad (7)$$

где  $\Psi$  — коэффициент реагирования, равный количеству объемов газа (при нормальных условиях), содержащихся в одном объеме воды при их переходе в гидратное состояние,

$$\Psi = 22400 / M_H \text{ [м}^3/\text{м}^3\text{]} \quad (8)$$

Объем газа, растворенного в воде:

$$Q_\phi = V \cdot m \cdot S_W \cdot (1 - S_H) \cdot \phi \quad (9)$$

где  $\phi$  — растворимость газа в воде, контактирующей с гидратом в залежи,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ .

Наиболее сложным при оценке ресурсов газа в гидратном состоянии в залежах является определение коэффициента гидратонасыщенности. Современные сейсмические методы высокого разрешения позволяют успешно выполнить эту работу.

#### К вопросу о ресурсах газа в гидратном состоянии и освоении газогидратных залежей

Оценкой потенциальных ресурсов газовых гидратов занимались многие — как геологи, так и эксперты, далекие от геологии, а тем более от вопросов технологий освоения этих ресурсов. Дискуссия о мировых запасах природных газовых гидратов продолжается до настоящего времени.

Первые оценки для районов распространения вечной мерзлоты дали величину  $37 \cdot 10^{12} \text{ м}^3$  — в СССР и  $57 \cdot 10^{12} \text{ м}^3$  — для мировых запасов (Трофимук и др., 1977). Были и другие оценки, в частности —  $31,1 \cdot 10^{12} \text{ м}^3$  (MacIver, 1979). На IV Канадской конференции по вечной мерзлоте, проходившей в Калгари в 1981г., потенциальные мировые ресурсы газогидратов были оценены в  $1,5 \cdot 10^{16} \text{ м}^3$  (Макогон, 1982). В дальнейшем были даны уточнения —  $1,8 \cdot 10^{16} \text{ м}^3$  (Kvenvolden, 1988); и  $2,1 \cdot 10^{16} \text{ м}^3$  (Kvenvolden, 1999).

К настоящему времени в мире выявлено около 200 газогидратных залежей. Только для Северо-Американского континента, по данным Департамента геологической службы США, ресурсы газа в газогидратных залежах, выявленные путем сейсмического зондирования и глубокого бурения с отбором керна и полным комплексом геофизических исследований, превышают  $9 \cdot 10^{15} \text{ м}^3$  (Taylor, 2002). Относительно небольшая газогидратная залежь в жёлобе Нансей, в акваториях Японии при наличии трех пластов общей толщиной в 17 м и коэффициенте гидратонасыщения от 40 до 80 % содержит более  $6 \cdot 10^8 \text{ м}^3/\text{км}^2$  метана, а суммарные запасы превышают  $20,7 \cdot 10^{12} \text{ м}^3$ . В акваториях Японии уже выявлено 14 газогидратных залежей.

Для определения эффективности коммерческого освоения газогидратных залежей не достаточно знать потенциальные ресурсы, необходимо знать величину извлекаемых запасов в конкретных условиях данного региона. Извлекаемые запасы гидратированного газа зависят от множества факторов, наиболее важными из которых можно назвать коэффициент гидратонасыщенности порового пространства продуктивных пластов залежи; размер залежи и суммарные потенциальные запасы газа в залежи; удельное газосодержание в регионе ( $\text{м}^3/\text{км}^2$ ); эффективность применяемой технологии разработки залежи; степень переохлаждения газовых гидратов. Освоение газогидратных залежей в условиях акваторий при глубинах воды от 0,7 до 2 км можно считать рациональным при коэффициенте гидратонасыщенности свыше 30—50%. Коэффициент извлечения газа из газогидратных залежей, находящихся в различных геологических условиях, в зависимости от используемой технологии, может изменяться от 10 до 60%. В среднем он составляет 15—17% от потенциальных ресурсов. Экономические показатели разработки газогидратных ресурсов также зависят от конкретных геологических и термодинамических условий. В целом решение проблемы освоения газогидратных залежей требует индивидуального подхода для каждого конкретного региона, для каждой отдельной страны.

### Заключение

Потенциал энергии, сосредоточенный в природных газогидратах, может обеспечить мир экологически чистой энергией не менее, чем на 200 лет. Природные газогидраты более равномерно распределены на планете, чем источники нефти и газа. Для их освоения не потребуются сверхглубокие скважины, сложные и дорогостоящие системы транспортирования добываемой продукции.

Для разработки газогидратных залежей могут быть успешно использованы существующие технологии поиска и разведки, бурения и добычи углеводородных энергоресурсов при их незначительных усовершенствованиях. Экономические показатели освоения газогидратных залежей могут быть даже более эффективными, чем в случае месторождений нефти и природного газа.

Разумеется, освоение залежей твердых газогидратов имеет свои особенности, которые требуют серьезного изучения. Одной из наиболее важных задач является создание высокоэффективных технологий перевода газа из твердого состояния в свободное непосредственно в пластах. Особенно серьезную проблему, связанную с разработкой газогидратных месторождений, составляет обеспечение региональной и глобальной экологической безопасности.

В целом природные газовые гидраты составляют весьма сложную многоаспектную проблему. Исследования в этой области необходимо координировать в мировом масштабе, что позволит исключить дублирование работ и потерю времени. Необходима организация единого координационного международного центра по исследованию газогидратов и созданию эффективных технологий их освоения.

### ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Корценштейн В.Н. Растворенные газы подземной гидросферы земли. М.: Недра, 1984.
2. Макогон Ю.Ф. Образование гидратов в газоносном пласте в условиях многолетней мерзлоты. Газовая промышленность, 1965, № 5.
3. Макогон Ю.Ф. Особенности эксплуатации месторождений природных газов в зоне вечной мерзлоты. ЦНТИ Мингазпрома, 1966.
4. Макогон Ю.Ф. Метод определения запасов газа в газогидратных залежах. Газовое дело 1966, № 1.
5. Макогон Ю.Ф. Растворимость газов в воде при наличии гидратов. Экспресс-информация, 1971, № 22.
6. Макогон Ю.Ф., Требин Ф.А., Трофимук А.А., Черский Н.В. Обнаружение залежи газа в газогидратном состоянии. Докл. АН СССР, 1971, т. 196, № 1.
7. Макогон Ю.Ф. Природные газы океанов и проблема их гидратов. Экспресс-информация ВНИИЭгазпром, № 11, 1972.
8. Макогон Ю.Ф. Гидраты природных газов. 1974, М.: Недра, 1981.
9. Макогон Ю.Ф. Эффект самоконсервации газогидрата. Докл. АН, 2003, т. 390, № 1.
10. Трофимук А.А., Макогон Ю.Ф., Толкачев М.В. Геология нефти и газа, 1981, т. 10.
11. Трофимук А.А., Макогон Ю.Ф., Стклянин Ю.И. Об одном из возможных механизмов образования залежей природного газа. Геол. и геофизика, 1977, № 9.
12. Трофимук А.А., Черский Н.В., Царев В.П. Газовые гидраты — новый источник углеводородов. Природа, 1979, № 1.
13. BP Statistical Review of World Energy, 2002.
14. Brooks J.M., Bryant W.R. Report USGS, DOE MC, 1989, 21088.
15. Davy H. Phil. Trans. Roy. Soc. London, 1811, v. 101, p. 1.
16. Dobrinin V.M., Korotaev Y.P., Physhev D.V. Long term energy resource. Ed. R.G. Meyer, Boston: Pitman, 1981.
17. Kvenvolden K.A. Chem. Ceol., 1988, v. 71, p. 41.
18. Kvenvolden K.A. Potential effect of gas hydrate on human welfare. Prec. of the Nat. Ac. Of Sc., USA, 1999, 96 3420—3426.
19. MacIver R.D. Long-Term Energy Resources, 1981, Boston: Pitman.
20. Makogon Y.F. Perspectives for the development of Gas Hydrate deposits. Fourth Canadian Permafrost Conference, Calgary, March 2—6 1981, p. 299—304.
21. Makogon Y.F. Hydrates of Gases: Energy Resources, Recherche, #192, Oct. 1987. Paris.
22. Makogon Y.F. Hydrates of Hydrocarbons. 1997, PennWell, Tulsa, USA.
23. Makogon Y.F., Holditch S.A. Measurement of gas solubility in water under high pressure and low temperature. Annual Report, 1998. Texas A&M University.
24. Makogon Y.F., Holditch S.A. Gas solubility in water, kinetics and morphology of gas hydrates. Annual Report, 1999. Texas A&M University.
25. Selzmann U., Wagner W. A New Equation of State and Tables of Thermodynamic Properties for Methane Covering the Range from the Melting Line to 625 K at Pressures up to 1000 Мра, J. Phys. Chem. Ref. Data, 1991, 20(6), 1061—1151.
26. Sloan E.D. Clathrate Hydrates of Natural Gases. 1990; 1998. Marcel Dekker, Inc. N.Y.
27. Soloviev V.A. Potential estimation of gas content in submarine gas hydrate accumulations. Sixth Int. Conf. On Gas in Marine Sediments. St.Petersburg/
28. Taylor C. Formation Studies of Methane Hydrates with Surfactants. 2<sup>nd</sup> International Workshop on Methane Hydrates. October 2002, Washington.