

УДК 552.578.1+553.981(26)

© Г.Д. Гинсбург, И.С. Грамберг, В.А. Соловьев

ВНИИОкеангеология

## ГЕОЛОГИЯ СУБМАРИННЫХ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ

Интерес к субмаринным гидратам газа определяется прежде всего тем, что они могут рассматриваться как потенциальный резерв углеводородного (УВ) сырья. Согласно имеющимся оценкам их энергетический потенциал на Земле, возможно, превышает потенциал всех прочих горючих полезных ископаемых [Зубова, 1988; Трофимук и др., 1979; 1981; Kvenvolden, 1988]. Предполагается, что значительными ресурсами обладают залежи «нормальных» УВ (нефти и газа), экранированные гидратоносными отложениями. Обсуждается возможность разложения гидратов газа при изменении физико-химической обстановки, в частности, при антропогенном изменении климата, следствием чего будут нарушение устойчивости грунтов и выделение газа [Kvenvolden, 1988]. С позиций теоретической геологии субмаринные гидраты представляют собой слабо исследованное геологическое явление, обуславливающее определенную специфику тех субмаринных геологических процессов, которые происходят при участии воды и газа.

Цель данной статьи - охарактеризовать состояние проблемы и обсудить подход к ее решению. Рассматриваются результаты исследований, выполнявшихся во ВНИИОкеангеологии начиная с 1982 г. [Гинсбург и др., 1984; 1986; 1988; Соловьев и Гинсбург, 1987], в т.ч. трех специальных морских экспедиций, предпринятых совместно с организациями АН СССР [Кремлев и Гинсбург, 1989; Гинсбург и др., 1988а].

В изучении геологии природных газовых гидратов можно выделить два этапа. На первом

этапе («подготовительном») в отдельных публикациях (начиная с работы И.Н. Стрижова и И.Е. Ходановича, 1946) констатировалась принципиальная возможность образования гидратов не только в трубопроводах, коммуникациях газовых промыслов и в стволах скважин (что было ранее известно), но и непосредственно в недрах, если они в достаточной мере охлаждены. В СССР в 1969 г. зарегистрировано открытие «свойства природных газов находиться в земной коре в твердом состоянии и образовывать газогидратные залежи» (авторы В.Г. Васильев, Ю.Ф. Макогон, Ф.А. Требин, А.А. Трофимук, Н.В. Черский). Доказанных наблюдений природных гидратов в этот период не было. В публикациях рассматривалась возможная газогидратоносность главным образом районов области вечной мерзлоты. На продолжающемся сейчас втором этапе идет накопление фактического материала и исследуются условия газогидратоносности с целью оценки ее масштабов. При этом отдается предпочтение Мировому океану в сравнении с областью вечной мерзлоты на континентах. По опубликованным оценкам ресурсы субмаринных гидратов газа на два - три порядка превышают ресурсы на суше [Зубова, 1988; Kvenvolden, 1988]. Прямых наблюдений гидратов на суше не было.

Термобарическая зона, в которой гидраты газа могут существовать, занимает практически все глубоководные акватории Мирового океана и значительную часть приполярных шельфов и имеет мощность в сотни метров. Однако гидраты в этой зоне встречаются отнюдь не повсеместно. Известно более 40 субмаринных

районов, где наблюдались сами гидраты газа или их геофизические и геохимические признаки. Непосредственно гидраты обнаружены в кернах 12 глубоководных скважин, пробуренных на семи площадях в Центральноамериканском и Перуанском желобах, на подводном хребте Блейк-Аутер и в Мексиканском заливе, а также в кернах десятков грунтовых станций на 11 площадях в Мексиканском заливе, Черном, Каспийском и Охотском морях. Помимо собственно гидратов в ряде районов фиксировались их косвенные признаки: высокое содержание газа в породе, аномально высокая поровая влажность и изотопный состав поровых вод. Известны сейсморазведочные признаки присутствия гидратов. Из них наибольшее значение имеет специфический отражающий горизонт BSR (bottom simulating reflector - имитирующий дно), отождествляемый с подошвой газогидратоносных отложений. Все субмаринные районы, где наблюдались гидраты, и районы с их признаками (за исключением нескольких площадей на арктическом шельфе США и Канады) располагаются на континентальных и островных склонах, подножиях и в глубоководье внутренних и окраинных морей в пределах осадочно-породных бассейнов, имеющих быстро формирующийся осадочный чехол сравнительно большой мощности. Эту приуроченность можно объяснить с помощью предлагаемых «фильтрационных и седиментационных» моделей гидратообразования.

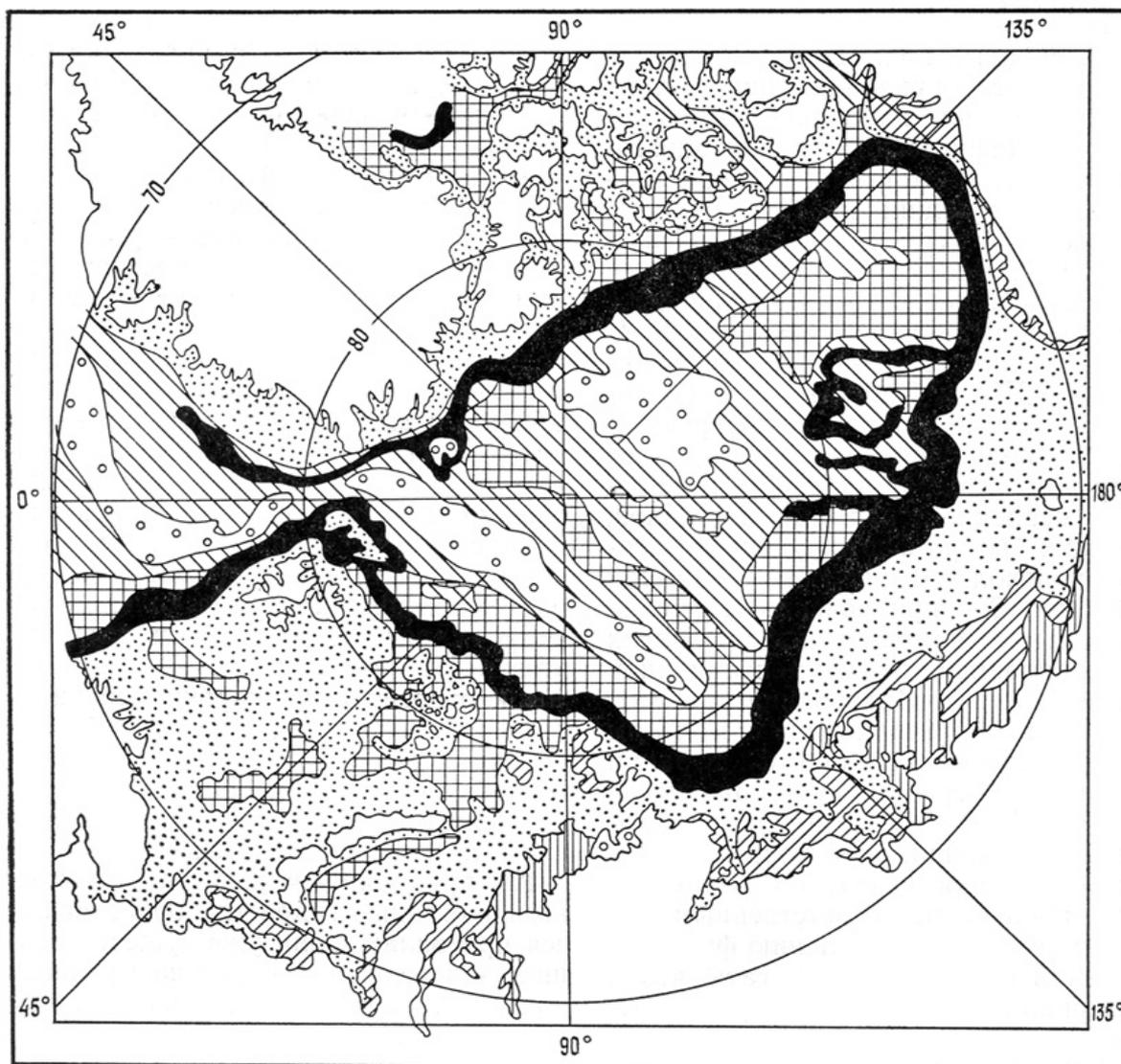
Согласно фильтрационным моделям гидраты образуются при фильтрации флюидов в (через) зону стабильности гидратов. Эти модели можно различать по движущимся флюидам (газ, газонасыщенная вода), по геологическим процессам, ответственным за фильтрацию, по направлению фильтрации. Есть основания полагать, что в субмаринной обстановке широко распространен процесс образования гидратов из газа, растворенного в водах. Геологическая эффективность такого процесса определяется особенностью растворимости газов в равновесии с гидратами: упругость и содержание водорастворенного газа в таких условиях лимитируются не внешним, а равновесным давлением гидратообразования при данной температуре [Баркан и Воронов, 1983]. Поэтому из газонасыщенной воды, фильтрующейся через зону стабильности гидратов (латерально - со стороны континента или вверх), должны выпадать гидраты. Ответственными за

фильтрацию могут быть уплотнение отложений - элизионная модель и термоартезианский напор - гидротермальная модель; специфична подводногрязевулканическая модель гидратообразования.

Седиментационная модель предполагает образование гидратов в ходе лавинной седиментации [Лисицын, 1988] - гравитационного перемещения по континентальному склону осадочных масс (оползней, обвалов и продуктов их разжижения), содержащих газ. Существенным фактором, благоприятствующим образованию гидратов газа в рамках той и другой моделей, является гравитационная тектоника: конседиментационные разломы, ротационные мегаоползни. При совместном влиянии этих процессов могут формироваться полигенетические скопления гидратов, обязанные и фильтрации по слоистости, и заполнению трещин и каверн, и «волочению» в массиве гравититов. На активных континентальных окраинах отжатие флюидов при субдукции может способствовать возникновению скоплений гидратов. Материалы наблюдений гидратов в кернах подтверждают представления об их формировании из движущихся флюидов в подвижной среде: они приурочены к относительно хорошо проницаемым литологическим разностям или образуют включения в пустотах и трещинах [Гинсбург и др., 1984]. Газ, из которого образуются гидраты, может быть диагенетическим или катагенетическим.

На приполярных шельфах возможны криогенные гидраты, образовавшиеся при охлаждении уже существовавших залежей газа и газонасыщенных подземных вод либо на субаэральном этапе развития (Арктика), либо в результате гляциоизостатического погружения (Антарктика). Однако образование криогенных гидратов не приводит к существенному увеличению ресурсов УВ, более того, оно уменьшает долю извлекаемых запасов из залежей газа.

На основе предложенных моделей и выполненной в соответствии с ними генетической типизации природных гидратов газа составлены карты потенциально гидратоносных областей Мирового океана (рис. 1, 2). На них показаны области вероятного распространения гидратов разных генетических типов, а также те акватории, где вероятность встретить гидраты любого генезиса крайне мала. К категории последних отнесены, во-первых, те шельфы и верхние части



**Рис. 1. Потенциально газогидратоносные области Северного Ледовитого океана. Составлено при участии Е. В. Телупнева:**

области, где возможны скопления газовых гидратов: 1 — фильтрогенных и седиментогенных на континентальных склонах, 2 — фильтрогенных, 3 — филь-

трогенных и криогенных, 4 — фильтрогенных преимущественно из биохимического газа на шельфе, 5 — фильтрогенных преимущественно из биохимического газа в глубоководье; области, в которых гидраты углеводородных газов не могут существовать в связи с отсутствием: 6 — необходимых термобарических условий, 7 — достаточного количества газа

континентальных склонов, где гидраты не могут существовать из-за слишком высокой температуры и низкого давления. Это - области с глубиной воды от 250 м и меньше в приполярных регионах (если недостаточная глубина воды не компенсируется субаквальной мерзлой зоной), до 700 м и меньше в экваториальных, а также некоторые более глубокие, но существенно изолированные впадины с теплой придонной водой (Кариакская впадина, Красное море). Во-вторых, к категории негидратоносных должны быть отнесены акватории, где нет достаточного для гидратообразования количества газа, т.е.

отсутствуют условия для его генерации и сохранения.

Условиями газонакопления в отложениях являются высокое содержание органического вещества (ОВ), высокая скорость седиментации (что обеспечивает интенсивную генерацию биохимического метана и предохранение его от рассеяния), а также значительная мощность осадочного чехла (обуславливающая возможность образования катагенетического газа). Каждый из этих трех показателей в Мировом океане в целом характеризуется циркумконтинентальной зональностью - все они убывают при удалении от континентов. Вероятно, в глобальном плане их можно

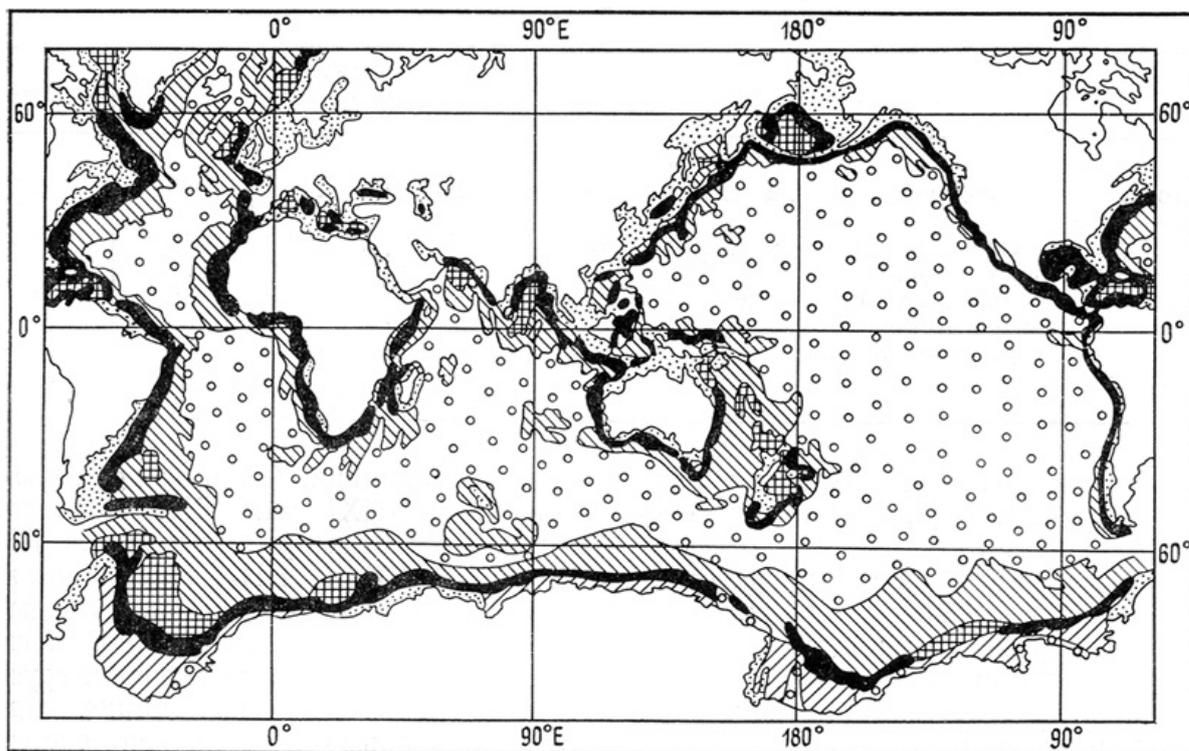


Рис. 2. Потенциально газогидратоносные области Мирового океана. Составлено при участии Е. В. Телепнева:  
 усл. обозн. см. рис. 1

считать скоррелированными. Наиболее исследована мощность осадочных отложений, использованная нами в качестве картировочного признака: к негидратоносным отнесены акватории, где мощность чехла не превышает 0,5 км. Это значение взято в качестве порогового, исходя из принятого принципа - минимизировать пропуск гидратов. По данным глубоководного бурения, при меньшей мощности чехла вся осадочная толща с высокой степенью вероятности находится выше подошвы зоны сульфатредукции и накопление биохимического метана не происходит. Все остальные акватории рассматриваются как потенциально газогидратоносные. При этом принято, что фильтрогенные гидраты могут существовать в районах с мощностью осадочного чехла больше 0,5 км, но если она не превышает 2 км, возможны гидраты только из биохимического газа (как в глубоководье, так и на арктическом шельфе), при большей мощности (свыше 2 км) - из биохимического и катагенетического. Седиментогенные гидраты накапливаются на морфологически выраженном континентальном склоне при мощности осадочных пород более 0,5 км. Для криогенных гидратов в газовых залежах принята необходимая мощность осадочного чехла более 2 км, как при

выделении потенциально нефтегазоносных бассейнов.

Составленные карты позволили количественно оценить распространенность гидратоносных акваторий (таблица). Доля акваторий, где имеются условия для образования гидратов газа, составляет в Мировом океане около 30% его площади. Регионы континентальных окраин, где могли реализоваться наиболее эффективные модели газогидратообразования - фильтрационные (с участием и биохимического, и катагенетического газа) и седиментационная, занимают около 10% площади океанов.

Данные о размерах газогидратных скоплений и о содержании гидратов в них немногочисленны. Наиболее эффективное газогидратопроявление (в Тихоокеанском прибрежье Гватемалы) - пересеченное скважиной на поддонной глубине 249-253 м почти мономинеральное тело (содержание гидратов около 90%); размеры его по латерали не установлены [Гинсбург и др., 1984]. Вероятно, это седиментогенное или полигенетическое скопление.

Изученное нами подводногрязевулканическое скопление в глубоководье Южного Каспия по площади соответствует кратерному полю вулкана

Доля потенциально газогидратоносных акваторий океанов, %

Характер акватории	Атланти- ческий	Тихий	Индий- ский	Северный Ледовитый	Мировой
Акватории, где возможны скопления газо- вых гидратов	45	20	25	60	30
в т. ч. фильтрогенных и седиментогенных на континентальных склонах	20	5	10	10	10
Акватории, где газогидратообразование ма- ловероятно из-за отсутствия необходимых термобарических условий или достаточного количества газа	55	80	75	40	70

(диаметр около 300 м) и характеризуется содержанием гидратов в породе до 35% (по объему); мощность гидратоносных пород - более 1,2 м (максимальная глубина пробоотбора). Гидраты встречены непосредственно у дна [Гинсбург и др., 1988а]. Другое скопление, выявленное нами в Черном море, контролируется выходящим на дно удлиненным диапиром размером 1000 x 200 м [Кремлев и Гинсбург, 1989]. Гидраты здесь наблюдались, начиная с глубин 0,4-2,2 м ниже дна. Максимальная вскрытая мощность гидратоносных пород 0,5 м; подошва их нигде не была пройдена. С забоя грунтовой станции 57 (XXI рейс НИС «Евпатория» в Черное море, экспедиция ВЦ СО АН СССР и ВНИИОкеангеология, 1988 г. [Кремлев и Гинсбург, 1989]) поднят штуф почти мономинерального гидрата длиной 8 см (рис. 3), занимавший все сечение грунтовой трубки. На других станциях гидраты образовывали несколько систем прожилков мощностью до 5 мм; содержание гидратов оценено визуальнo в 10% по объему.

О латеральной протяженности предполагаемых фильтрогенных скоплений гидратов на континентальных склонах и подножиях в условиях терраклинальной слоистости отложений можно судить по данным о прослеживаемости упоминавшегося сейсмического отражающего горизонта BSR. В ряде регионов он наблюдался на площадях в десятки тысяч квадратных километров. Правда, гидратообусловленность этого горизонта пока однозначно не доказана.

Учитывая явно недостаточную изученность субмаринных газовых гидратов, их можно рассматривать лишь как потенциальное полезное ископаемое. Имеющиеся общие оценки ресурсов газа в гидратах носят скорее экспертный, чем аналитический характер. Существенно также, что в этих оценках учитываются гидраты, промышленная ценность

которых неясна, поскольку они могут быть рассредоточены в больших объемах осадочных пород. Количественные же оценки ресурсов в состоянии концентрации в скоплениях отсутствуют.

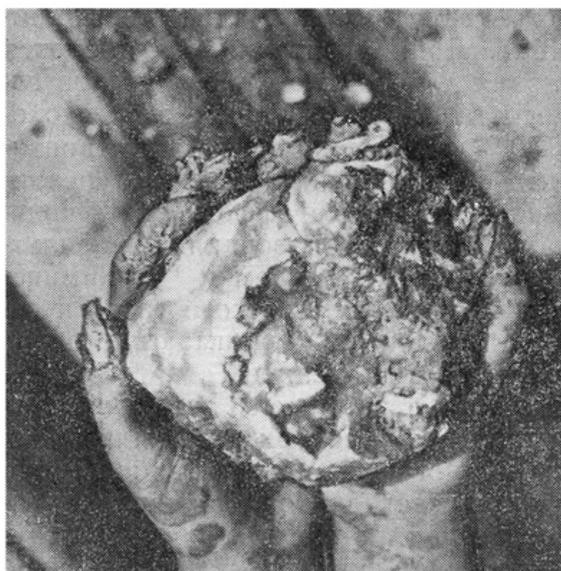


Рис. 3. Штуф почти мономинерального газового гидрата. Фото М. Н. Григорьева

Специальную проблему составляет добыча газа из газогидратных залежей. Очевидно, что экономически она будет менее выгодна, чем разработка «нормальных» месторождений, поскольку на фазовый переход гидрат-газ необходимо затратить тепло; кроме того, газ в гидратах по сравнению с «нормальным» разубожен - при разложении 1 м<sup>3</sup> гидрата выделяется 0,85 м<sup>3</sup> воды. И все же, как показано в работах ряда авторов, разработка газогидратных скоплений может оказаться рентабельной [Истомин и др., 1988]. Предложены способы, предусматривающие дезинтеграцию субмаринных гидратосодержащих отложений и разложение гидратов с помощью сравнительно теплой

воды, взятой с поверхности моря. Однако, пока остаются неясными геологическое строение скоплений гидратов, их размер, условия залегания, вещественный состав, концентрация газа, нельзя серьезно говорить о технологии их разработки.

Геология газовых гидратов, в первую очередь, - геология природного газа. Гидраты, как и нормальные УВ (нефть и газ) являются продуктом совокупности геологических процессов, формирующих осадочный чехол. Это обстоятельство обуславливает целесообразность обычного нефтегазгеологического подхода к изучению газогидратоносности, требующего выяснения мощности и строения чехла, режима его развития, содержания и характера ОВ в породах. Однако наряду с несомненным генетическим единством имеется и отличие: гидраты формируются из того деривата ОВ, из той части мигрирующего газа, которая в отсутствие условий для гидратообразования покинула бы осадочный чехол и ушла в гидросферу.

Очевидно, что в субмаринном газогидратонакоплении значительная роль принадлежит биохимическому газу, который, как известно, генерируется в осадочном чехле в процессе диагенеза (в залежах УВ осадочно-породных бассейнов континентов этот газ существенного значения не имеет, считается, что он теряется). В ходе диагенеза одновременно с биохимическими процессами происходит обезвоживание отложений. Отсюда понятно, что судьба биохимического газа во многом определяется соотношением темпа его генерации в отложениях и скорости их обезвоживания. Таким образом, понимание субмаринного газогидратообразования сопряжено с необходимостью познания диагенеза океанических отложений - в широком смысле этого понятия.

Поскольку гидраты образуются из движущихся флюидов и в определенных температурных условиях, фундаментальное значение для геологии гидратов имеет гидрогеология и геотермия: субмаринных бассейнов.

Из других геологических процессов, влияющих на гидратонакопление, должны быть названы лавинная седиментация, гравитационная тектоника, глиняный диапиризм и грязевой вулканизм.

В связи с явной приуроченностью гидратов газа к континентальным окраинам их исследование связано с такой фундаментальной проблемой геологии, как тектоника плит.

Отметим, что геодинамический режим должен влиять на характер обезвоживания отложений и на созревание ОВ через особенности гидродинамических и геотермических обстановок.

Изучение скоплений газовых гидратов предполагает их геологическую характеристику, прежде всего - определение распространения гидратов по площади и на глубину. Наиболее доступны подводногрязевулканические скопления, ассоциирующие с глиняными диапирами, залегающие, как правило, вблизи дна; в Южном Каспии над ними невелика и глубина моря - до 700-800 м. В Черном море скопление такого типа обнаружено при глубине воды 2050 м. Вблизи дна залегают гидраты, найденные в Охотском море, при глубине воды 800 м [Зоненшайн, 1987]. Сравнительно легко доступны благодаря малым поддонным глубинам также известные скопления гидратов в Мексиканском заливе. Остальные прямые наблюдения гидратов сделаны в Тихоокеанском прибрежье Гватемалы, Мексики, Коста-Рики и Перу и в Атлантическом прибрежье США; исследование всех этих гидратопроявлений требует применения глубоководного бурения.

В потенциально газогидратоносных регионах имеются объекты, где целесообразно провести поиск скоплений гидратов и где работы на первом этапе не требуют применения бурения. К таким объектам относятся, в частности, авандельты крупных рек в местах эрозионного вреза в них каньонов - к ним могут быть приурочены зоны разгрузки газоносных подземных вод и газов и, как следствие - скопления газовых гидратов элизионно-фильтрационного генезиса. Представляют интерес поля развития «оспенного» (rockmark) рельефа, с которыми предположительно связывается выход на морское дно газов и (или) подземных вод.

Из морских геофизических методов изучения газогидратоносности наиболее важны сейсмические в различных частотных диапазонах - от десятков герц (МОВ ОГТ для изучения осадочного чехла, выявления и прослеживания горизонта BSR и гидратоносных толщ на поддонных глубинах в сотни метров) до первых килогерц (расчленение разреза вблизи дна, в т.ч. выделение и прослеживание пород с гидратами, корреляция грунтовых станций, выявление «факелов» в местах выхода газов).

В экспедициях, проводившихся при участии ВНИИОкеангеология в Каспийском и Черном морях [Кремлев и Гинсбург, 1989;

*Гинсбург и др., 1988а*], с целью поиска гидратов применялись сейсмоакустическое профилирование и эхолотирование, задачей которых было выявление диапировых структур и выяснение их строения. Непосредственно по этим данным задавались поисковые грунтовые станции. Такая методика (в сочетании с навигационным обеспечением) преопределила успех поисков.

Особо должна быть выделена задача окончательного выяснения природы отражающего сейсмического горизонта BSR.

Очевидна необходимость геотермических измерений. Они преследуют две цели: во-первых, без знания температуры и геотермического градиента нельзя оценить положение в разрезе термобарической зоны стабильности гидратов; во-вторых, представляет интерес выявление аномалий теплового поля, обусловленных энергоемкостью процессов гидратообразования и диссоциации. Электроразведочные работы методом естественного поля должны быть ориентированы на выявление аномалий - окислительно-восстановительных, фильтрационных и связанных непосредственно с образованием - разложением гидратов газа. Гидрологические исследования (газо-, ионо-, термо- и резистивиметрия придонных вод) найдут применение при выявлении очагов разгрузки подземных флюидов. Большую пользу может принести использование методов и средств, позволяющих визуализировать объекты исследования.

Решение проблемы геологии газовых гидратов требует проведения физико-химических исследований, в т.ч. экспериментальных. Их задачи - изучение физических свойств гидратосодержащих отложений и самих гидратов, выяснение особенностей термодинамики и кинетики образования - разложения гидратов в природных условиях, оценка эффектов фракционирования при образовании гидратов (молекулярных и изотопных). Эти сведения нужны для оценки стабильности гидратов в конкретном геологическом пространстве и во времени, для разработки геофизических и

геохимических методов экспедиционных исследований на основе соответствующих поисковых признаков, для выяснения экранирующей способности газогидратоносных отложений, а также для создания технологии добычи газа из гидратов.

Анализ накопленных данных свидетельствует: субмаринное газогидратообразование - глобальное физико-геологическое явление. Наибольшее развитие оно получило на континентальных склонах, подножиях активных и пассивных материковых окраин и в глубоководье внутренних и окраинных морей в пределах осадочно-породных бассейнов со сравнительно мощным и быстро накапливающимся осадочным чехлом.

Для выяснения возможного значения субмаринных гидратов как потенциального источника углеводородного газа необходимы целенаправленные исследования, включающие экспедиционные работы. Однако такие исследования методологически должны проводиться в единстве с фундаментальным изучением геологии и минерагении Мирового океана, в частности, его осадочного чехла.

Прогресс в изучении субмаринных газовых гидратов будет во многом определяться прогрессом в создании и внедрении новых методов и средств изучения океана и его недр. Особое значение имеет глубоководное бурение, без широкого применения которого оценка значимости субмаринных гидратов вообще невозможна.

Проблему изучения газогидратоносности недр Мирового океана следует рассматривать как долгосрочную. Скорее всего, она будет решена в первой четверти будущего столетия на основе широкого международного сотрудничества. Необходимость такого сотрудничества явствует уже из географии основных потенциально гидратоносных регионов - континентальных склонов и подножий. Работа над этой проблемой в контексте с комплексным изучением геологии океана будет способствовать познанию его минерагении, а также нефтегазоносности глубоководных акваторий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баркан Е.С., Воронов А.Н. Оценка ресурсов газа в зонах возможного гидратообразования // Советская геология. 1983. № 8. С. 26-29.

2. Гинсбург Г.Д., Иванов В.Л., Соловьев В.А. Гидраты природного газа в недрах Мирового

океана // Нефтегазоносность Мирового океана. Л., 1984. С. 141-158.

3. 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.

4. Гинсбург Г.Д., Иванов В.Л., Матвеев Ю.И., Соловьев В.А. Основные генетические типы субмаринных газовых гидратов // Доклады советских геологов на XXVIII МГК. Геология морей и океанов. 1988. С. 81-88.

5. Гинсбург Г.Д., Грамберг И.С., Гулиев И.С. и др. [Подводногрязевулканический тип скоплений газовых гидратов](#) // Докл. АН СССР. 1988. Т. 300. № 2. С. 416-418.

6. Зоненшайн Л.П. Газовый источник на дне Охотского моря // Природа. 1987. № 8. С. 53-57.

7. Зубова М.А. Гидраты природных газов в недрах Мирового океана: Обзор. Сер. Морская геология и геофизика. - М.: ВИЭМС. 1988.

8. Истомин В.А., Якушев В.С., Карпук В.В., Квон В.Г. Аналитический библиографический указатель литературы по газовым гидратам / М.: ВНИИГаз, 1988.

9. Кремлев А.Н., Гинсбург Г.Д. Первые результаты поиска субмаринных газовых

гидратов в Черном море (XXI рейс НИС «Евпатория») // Геология и геофизика. 1989. № 4. С. 110-111.

10. Лисицын А.П. Лавинная седиментация и перерывы в осадконакоплении в морях и океанах. - М.: Наука, 1988.

11. 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.

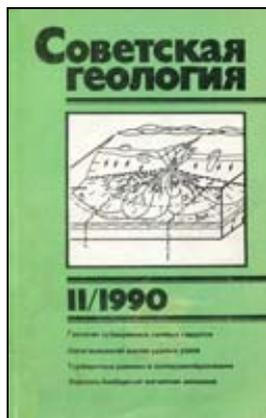
12. Трофимук А.А., Макогон Ю.Ф., Толкачев М.В. Газогидратные залежи - новый резерв энергетических ресурсов // Геология нефти и газа. 1981. № 10. С. 15-22.

13. Трофимук А.А., Черский Н.В., Царев В.П. Газогидраты - новые источники углеводородов // Природа. 1979. № 1. С. 18-27.

14. Kvenvolden K.A. Methane hydrate - a major reservoir of carbon in the shallow geosphere // Chemical Geology. 1988. vol. 71. P. 41-51.

Принята редколлегией 30 октября 1989 г.

#### Ссылка на статью:



Гинсбург Г.Д., Грамберг И.С., Соловьев В.А. Геология субмаринных газовых гидратов // Советская геология. 1990. № 11. С. 12-19.