

УДК 553.981+551.3.051

ГЕОЛОГИЯ

Академик А. А. ТРОФИМУК, член-корреспондент АН СССР Н. В. ЧЕРСКИЙ,
В. П. ЦАРЕВ

ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ГАЗОВ В ЗОНАХ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ МИРОВОГО ОКЕАНА

Открытие газогидратных залежей и выделение зон гидратообразования (ЗГО) в толще осадочного чехла материков невольно привлекает внимание исследователей к придонным слоям Мирового океана, имеющим еще более благоприятную термодинамическую обстановку для формирования крупных скоплений клатратов.

Первые обоснования условий накопления углеводородных газов в виде гидратов были сделаны в работах ^(1, 2), а затем получили подтверждение детальными расчетами ⁽³⁻⁵⁾ и результатами бурения океанического дна ^(6, 7).

Верхняя граница зоны гидратообразования в морях и океанах почти всегда находится в толще воды, а нижняя — в породах дна. Положение границ определяется составом газа, образующего гидраты, соотношением температур и давлений, минерализацией воды.

В табл. 1 показаны глубины верхней границы ЗГО в Мировом океане для различных типов температурной зональности в толще воды ⁽⁸⁾, с минерализацией 35 г/л и с учетом градиента давления, равным 1,025 атм. на 10 м.

Исходные данные и результаты расчета нижней границы ЗГО в породах дна Мирового океана приведены в табл. 2. Градиент давления в разрезе придонного слоя земной коры принимался равным 1,0 атм. на 10 м, а температурный градиент 60—70 град/км.

Таблица 1

Типы температурной зональности	Распространение	Глубины верхней границы ЗГО для газов, м		
		CH ₄	H ₂ S	N ₂
Полярный	Выше 76° с.ш. 61° ю.ш.	250	10	1600
Умеренный	46—76° с.ш. 46—61° ю.ш.	350	30	1600
Субтропический	25—46° с.ш. 25—46° ю.ш.	600	70	2100
Тропический	Ниже 3° с.ш. 3° ю.ш.	650	100	2300

Расчеты показывают, что углеводороды могут образовывать гидраты в зонах шельфа (при глубинах моря 250—600 м) только в полярных областях. В прибрежной полосе полярных морей, где отступление суши происходило после формирования многолетнемерзлых пород, возможно наличие газогидратных залежей и на меньших глубинах (моря Восточно-Сибирское, Лаптевых и др.). В пределах материкового склона и в перфокеанических частях мощность ЗГО может достигать 470 м и более.

Схема строения ЗГО в различных структурных зонах Мирового океана показана на рис. 1. Максимальные мощности в породах дна ЗГО имеет в глубоководных океанических впадинах. При перемещении от периферии

к центру океанических хребтов мощность ЗГО значительно уменьшается вследствие увеличения значений геотермического градиента (^{9, 10}).

Если принять наименьшую глубину бассейна, при которой возможно образование гидратов метана, равной 500 м, то около 93% площади Мирового океана будет охвачено ЗГО. При средней мощности зоны гидратообразования 300 м и площади распространения 335,71 млн км² объем пород, находящихся в ЗГО Мирового океана, составит 100,7 млн км³.

Перспективы нефтегазоносности территорий, находящихся за пределами подножий материкового склона, т. е. в глубоководных желобах и котловинах, а также в срединных океанических хребтах, с ортодоксальных позиций оцениваются невысоко (^{11, 12}). Однако возможность накопле-

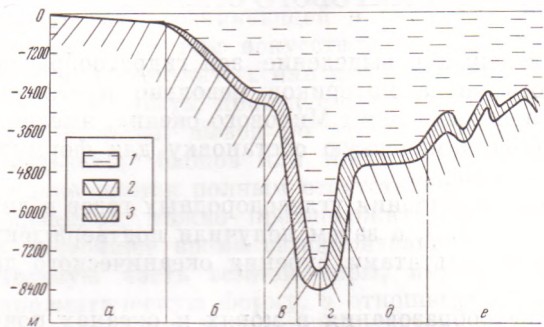


Рис. 1. Схема строения ЗГО дна Мирового океана. 1 — вода, 2 — породы, 3 — ЗГО в породах дна. а — материковая отмель, б — материковый склон, в — материковое подножие, г — океаническая впадина, д — океаническая котловина, е — срединный океанический хребет

ния углеводородов именно в твердой фазе дает основание утверждать, что в этих районах происходило накопление природных газов, образовавшихся при биохимическом распаде органического вещества и катагенном его превращении. Кроме того, в формировании залежей здесь может участвовать и метан неорганического происхождения.

Отсутствие данных о наличии ЗГО на дне Мирового океана порождало у исследователей (¹) мнение о невозможности захоронения газов, образовавшихся в результате биохимических превращений органического вещества. Такие газы считались потерянными в результате всплывания и

Таблица 2
Глубины нижней границы ЗГО в породах морского дна для смеси CH₄ (80%) и CO₂ (20%)

Глубина по- верхности дна, м	Темпер. на поверхности дна в разл. областях, °С			Ср. геотерм. градиент в породах дна, град/км	Глуб. нижней границы ЗГО в разл. типа областях, м от поверх. дна			Давление на поверхн. дна, ата
	тропич., субтропич.	умерен- ный	полярный		тропич., субтропич.	умерен- ный	полярный	
200	16	5	0	50	0	0	0	20,5
400	10	4	0	60	0	15	90	41,0
600	8	3	0	70	0	110	150	61,5
1000	4	2	0	70	135	170	200	102,5
1500	4	1	0	70	185	225	245	153,7
2000	3	1	0	70	240	270	290	205
3000	2	1	0	70	285	300	310	307,5
4000	2	1	0	70	310	325	340	410,0
6000	0	0	0	60	470	470	470	615,0

диффузионного рассеивания, так как процессы переработки органического вещества заканчиваются в основном в слое неуплотненного осадка на глубине 1–2 м (¹³). Однако в условиях ЗГО эти газы накапливаются в слое осадка в виде гидратов, и их незначительная утечка возможна только путем диффузии. Вместе с тем диффузионный поток газа из гидратов значительно меньше, чем из скоплений в свободной фазе, так как давление газа над гидратом мало, а следовательно невелики и градиенты концентраций.

Так, при 0° упругость паров метана над гидратом на глубине 3000 м равна 26 атм., а на той же глубине давление в газовой залежи превышает 300 атм.

Для оценки запасов газогидратных залежей рассматриваемого типа нужно учитывать, что количество газа, захороняемого в осадках в виде гидратов, определяется объемом переработанного органического вещества.

Как известно, в глубоководных частях Мирового океана продуцируется большое количество $C_{орг}$ (¹⁴). Если только его десятая часть достигает придонных слоев воды и поверхности дна, это составляет 2,8–10,0 кг/м² $C_{орг}$ за 1000 лет. Тогда при разложении этого вещества образуется 1,4–5 кг CH_4 и CO_2 , или 1960–7000 л/м² за 1000 лет.

Расчеты показывают, что при градиенте концентрации 1 атм/м, диффузионный поток метана будет равен 315 л через 1 м² за 1000 лет. Градиент 1 атм/м означает, что при давлении газа над гидратом, находящимся в осадках поверхности дна, равном 26 атм., на расстоянии 26 м от гидрата концентрация растворенного в воде метана равна 0. Очевидно, в природных условиях этот градиент гораздо меньше, следовательно, меньшие значения будет иметь и диффузионный поток.

Таким образом, органическое вещество, которое перерабатывается в придонном слое воды и на самой поверхности осадков, генерирует даже в глубоководных частях океана больше газа, чем его рассеивается, а следовательно происходит непрерывное накопление гидратов.

Эти гидраты являются как бы броней, предохраняющей от рассеивания те порции газа, которые образуются при биохимических процессах, происходящих в толще осадка. Если считать, что захороняется в виде гидратов только газ, который образовался в осадке, и что перерабатывается при захоронении около 40% органического вещества (^{16, 17}), составляющего 0,8% от общей массы осадков, то при переходе 10% этого количества в метан в каждом кубометре осадков плотностью 1,8 образуется 2 м³ метана. Переход еще 20–30% органического вещества в CO_2 приведет к генерации нескольких кубометров углекислого газа, но, учитывая высокую растворимость CO_2 в воде, его содержание в составе гидрата следует оценивать как невысокое.

На поверхности дна Мирового океана формируется покров, представленный осадками, сцементированными гидратами; мощность его изменяется от первых метров на мелководье до нескольких сотен в глубоководных частях океана. Концентрация газов в осадках такого покрова определяется скоростями осадконакопления, величиной органической продукции моря и мест ее переработки после захоронения. В случае полного заполнения пор осадка гидратами, при пористости 0,2 в 1 м³ породы может содержаться 30,0–36,0 м³ газа.

Наибольшая степень заполнения породы гидратами будет наблюдаться у нижней границы ЗГО. Здесь накапливаются те порции газа, которые превратились в свободную фазу при разложении гидратов в процессе погружения осадка за пределы нижней границы ЗГО, а затем снова в результате всплывания оказались в зоне гидратообразования. По мере накопления осадков и погружения части их за пределы ЗГО концентрация газа в виде гидратов в ЗГО будет расти за счет миграции газа из нижележащих участков.

Если учесть, что в большинстве бассейнов осадконакопление происходит с третичного времени и ранее, в ЗГО за десятки и сотни миллионов лет скопились громадные запасы природного газа.

Крупные зоны накопления углеводородов в ЗГО и подстилающих ее породах могут быть приурочены к участкам разгрузки гидрогеологических комплексов осадочного чехла. Такая разгрузка сопровождается выделением природных газов и обычно происходит в зоне развития глубинных разломов соляных и глиняных диапиров, палео- и современных вулканов и на участках материкового склона. Последний часто является зоной вы-

клинивания горизонтов, развитых на суше. По мере удаления от берега и сокращения мощностей здесь происходит резкое снижение геостатических давлений, так как плотность воды примерно в 2,5 раза меньше плотности пород. Поскольку в процессе уплотнения осадков флюидам передается геостатическое давление, то материковый склон является зоной разгрузки гидрогеологических комплексов, развитых на шельфах и материках.

В настоящее время уже есть многочисленные факты, подтверждающие существование природных газов на дне Мирового океана в виде гидратов (^{3, 6, 7, 18-20}).

Породы, значительная часть порового пространства которых заполнена гидратами, являются газопорами. Поэтому верхняя часть подстилающих пород океанического дна, охваченная ЗГО, является региональной экраняющей толщей, под которой могут формироваться залежи углеводородов в жидкой и газовой фазах.

Таким образом, вся поверхность дна в Мировом океане, за исключением шельфа ниже 61° с. ш. и ю. ш., является зоной накопления природных газов в твердой фазе. Наиболее интенсивно процессы накопления углеводородов происходят на материковом склоне — в зоне разгрузки флюидов, мигрирующих с шельфов и материков. Эти участки также характеризуются высокими скоростями осадконакопления и большими содержаниями органического вещества. При его биохимической переработке в ЗГО образуется и накапливается значительное количество углеводородов. Здесь же, вследствие отсутствия придонных течений, существуют благоприятные условия для сохранения гидратов.

Метан органического происхождения может накапливаться в твердой фазе преимущественно в районе Тихоокеанского вулканического пояса и зонах срединных океанических хребтов.

Из приведенных данных следует, что слои осадков, покрывающие дно всего Мирового океана мощностью до 500 м и более практически на любом участке содержат углеводороды в твердой фазе с высокими значениями концентраций.

Поступило
12 VI 1973

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ В. А. Соколов, Геохимия газов земной коры и атмосферы, М., 1966.
- ² В. Г. Васильев, Ю. Ф. Макагон и др., Газовая промышленность, № 6 (1970).
- ³ Ю. Ф. Макагон, Экспресс-информация ВНИИЭГазПром., № 11, 1972.
- ⁴ Н. В. Черский, В. П. Царев, В кн. Вопросы энергетики Якутской АССР, 1973.
- ⁵ Ю. Ф. Макагон, А. А. Трофимук и др., Геология и геофизика, № 3 (1973).
- ⁶ R. D. Stoll, J. Ewing, G. M. Braun, J. Geophys. Res., 76, № 8, 2090 (1971).
- ⁷ D. Z. Katz, J. Petrol. Technol., 24, № 5, 557 (1972).
- ⁸ Ю. В. Истомин, Океанология, Л., 1969.
- ⁹ У. Ли, С. Уэда, Р. Тейлор, В кн. Окраины континентов и островные дуги, М., 1970.
- ¹⁰ Р. П. фон Герцен, У. Х. К. Ли, В кн. Земная кора и верхняя мантия, М., 1972.
- ¹¹ П. Л. Безруков, В кн. Проблемы теоретической и региональной тектоники, «Наука», 1971.
- ¹² И. Н. Жабров, Геол. нефти и газа, № 8 (1972).
- ¹³ С. М. Кузнецов, Химия и генезис твердых горючих ископаемых, Изд. АН СССР, 1953.
- ¹⁴ Тихий океан. Осадконакопление в Тихом океане, 6, кн. 2, «Наука», 1970.
- ¹⁵ О. К. Бордовский, В кн. Генезис нефти и газа, 1967.
- ¹⁶ Д. Д. Траск, Тр. XVII сессии Международн. геол. конгр., 4 (1970).
- ¹⁷ Н. Д. Старикова, ДАН, 106, № 3 (1956).
- ¹⁸ Australasian Oil and Gas Review. Oil and Gas, 17, № 6, 3 (1971).
- ¹⁹ О. К. Emery, Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol., 42, № 9, 2174 (1958).
- ²⁰ Challenger Leg 10 Finels Gas in Gulf of Mexico, World Oil, 171, № 2 (1970).