

УДК 553:(548.562+542.7)

## Природные газовые гидраты как потенциальное полезное ископаемое

В. А. Соловьёв

*ВАЛЕРИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ СОЛОВЬЁВ — кандидат геологических наук, заведующий лабораторией геологии газовых гидратов Всероссийского научно-исследовательского института геологии и минеральных ресурсов Мирового океана (ВНИИОкеангеология). Область научных интересов: аспекты геологии, геохимии и геофизики газовых гидратов, морская геология, геотермия, криолитология.*

*190121 Санкт-Петербург, Английский просп., 1, ВНИИОкеангеология, тел. (812)114-16-85, факс (812)114-14-70, E-mail soloviev@gashyd.spb.ru*

### Введение

Прошло более четверти века с момента первого достоверного обнаружения газовых гидратов в природных условиях — они впервые были вскрыты в Черном море в 1972 году [1] и в Каспийском море в 1979 году [2]. В последнее десятилетие наблюдается активизация исследований природных газовых гидратов, что обусловлено рядом причин: газовые гидраты рассматриваются как потенциальное горючее ископаемое, как возможный источник поступления парникового газа в атмосферу, как фактор, влияющий на природную устойчивость континентальных и островных склонов, как компонент среды, осложняющий хозяйственную деятельность при освоении морских природных ресурсов.

Мировой интерес к природным газовым гидратам как к возможным энергетическим ресурсам, способным восполнить дефицит углеводородного сырья в будущем, стимулирован прежде всего предполагаемыми огромными количествами сосредоточенного в гидратах газа. Согласно имеющимся оценкам, содержание газа в газовых гидратах составляет от  $2 \cdot 10^{14}$  до  $7,6 \cdot 10^{18}$  м<sup>3</sup>. Разброс в оценках свидетельствует о неясности на сегодняшний день самого главного — каковы действительные масштабы газогидратоносности недр и в первую очередь субмаринных. Все остальные вопросы, связанные с проблемой природных газовых гидратов, нам представляются вторичными.

В статье дан обзор фактического материала по наблюдениям субмаринных газовых гидратов и их признаков, критически рассмотрены имеющиеся глобальные и региональные оценки количества газа, сосредоточенного в природных газовых гидратах, обсуждены возможные подходы к добыче газа из скоплений газовых гидратов. Основное внимание уделено рассмотрению газовых гидратов, существующих в акваториях. Это обусловлено двумя причинами. Во-первых, по всем имеющимся оценкам, именно здесь сосредоточены подавляющие запасы газовых гидратов. Так, по мнению Ю.Ф. Макогона [3], до 98% ресурсов газа в гидратах приходится на акватории Мирового океана и только 2% — на арктические территории. Во-вто-

рых, субмаринное гидратообразование обуславливает накопление газа, тогда как в условиях арктической суши, где скопления гидратов могут появиться только за счет трансформации ранее существовавших залежей газа при экзогенном охлаждении недр, гидратообразование, по-видимому, приводит к уменьшению доли извлекаемых запасов газа.

В данной работе широко используется термин «скопление газовых гидратов», который требует пояснения. Под этим термином понимается некоторый объем породы, поровое пространство которой в той или иной степени заполнено газовыми гидратами. На наш взгляд, принципиально важно рассматривать именно скопления газовых гидратов, поскольку маловероятно существование гидратов в природных средах в рассеянном состоянии.

Анализ всех известных газогидратопроявлений показал, что имеются два типа скоплений гидратов: скопления, связанные с очагами разгрузки флюидов на дне морей, которые формируются вблизи дна и контролируются флюидопроводниками (грязевые вулканы, диапиры, разломы), и скопления, прямо не связанные с очагами разгрузки (находящиеся на значительной поддонной глубине), но также контролируемые потоками флюидов. Наличие скоплений второго типа подтверждается результатами глубоководного бурения, выявившего приуроченность таких скоплений к зонам опреснения и к относительно грубозернистым отложениям [4]. Форма и размер скоплений, а также распределение гидратосодержащих пластов в их пределах, определяются потоками газовых флюидов (концентрированными и рассредоточенными) и параметрами диффузионного ореола рассеяния.

Следует отметить также, что природные газовые гидраты должны рассматриваться не сами по себе, а как одна из форм существования природного газа в недрах (наряду со свободным, водорастворенным и сорбированным газами), жестко детерминированная термодинамическими и геологическими условиями. Можно полагать, что газогидратоносность акваторий определяется именно скоплениями газовых гидратов, а не равномерным их распределением в породах. Образование скоплений гидратов и их расположение

контролируются, помимо собственно термобарическими условиями, неоднородностями геологического пространства: температурным полем, определяющим растворимость газа в воде; полем проницаемости, определяющим условия миграции флюидов; солёностью вод, также влияющей на растворимость газа; условиями генерации газа.

### Анализ данных наблюдений субмаринных газовых гидратов

Первое обобщение мировых данных по распространению субмаринных газовых гидратов, в котором приводится перечень из девяти районов, было опубликовано К. Квенволденом (К. Kvenvolden) и М. МакМенамином (М. McMenamin) в 1980 году [5]. Количество пунктов и площадей в Мировом океане, где наблюдались газовые гидраты или их признаки, к концу 2002 года уже достигло 64 (рис. 1 и табл. 1). В 23 из них (номера P2, P4-5, P7-9, P15-16, P18, P21a, P22, P24, P27, A7-8, A13, A16-19, N6, O1 и O3 на рис. 1 и табл. 1) газовые гидраты были вскрыты глубоководным бурением и/или грунтовым пробоотбором и наблюдались визуально. Внешний вид некоторых образцов природных газовых гидратов показан на рис. 2. В 41 районе были выявлены только косвенные признаки газовых гидра-

тов — главным образом, это отражающий сейсмический горизонт Bottom Simulating Reflector, BSR.

Скопления газовых гидратов, расположенные непосредственно вблизи дна и приуроченные к очагам разгрузки флюидов, оказались наиболее многочисленными; они обнаружены в 12 районах Мирового океана и в двух глубоководных озерах (показаны квадратиками на рис. 1). Скопление газовых гидратов такого типа в прибрежье острова Ванкувер [6] наиболее впечатляюще: более тонны гидратов метана было поднято на борт канадского рыболовного судна донным тралом (см. № 17 на рис. 2).

Большинство районов с косвенными признаками газовых гидратов охарактеризовано только по результатам наблюдений сейсмического горизонта BSR. Этот горизонт подавляющим числом исследователей рассматривается как некая фазовая граница, приуроченная к подошве зоны стабильности газовых гидратов. Ниже ее находится свободный газ, а выше — гидраты или предельно газонасыщенная поровая вода. При этом остается совершенно неясным, является ли наблюдение BSR свидетельством сколько-нибудь существенного гидратонасыщения осадочной толщи выше по разрезу и наличия в ней скоплений газовых гидратов. Есть основания полагать, что ответ на этот вопрос скорее всего будет отрицательным.

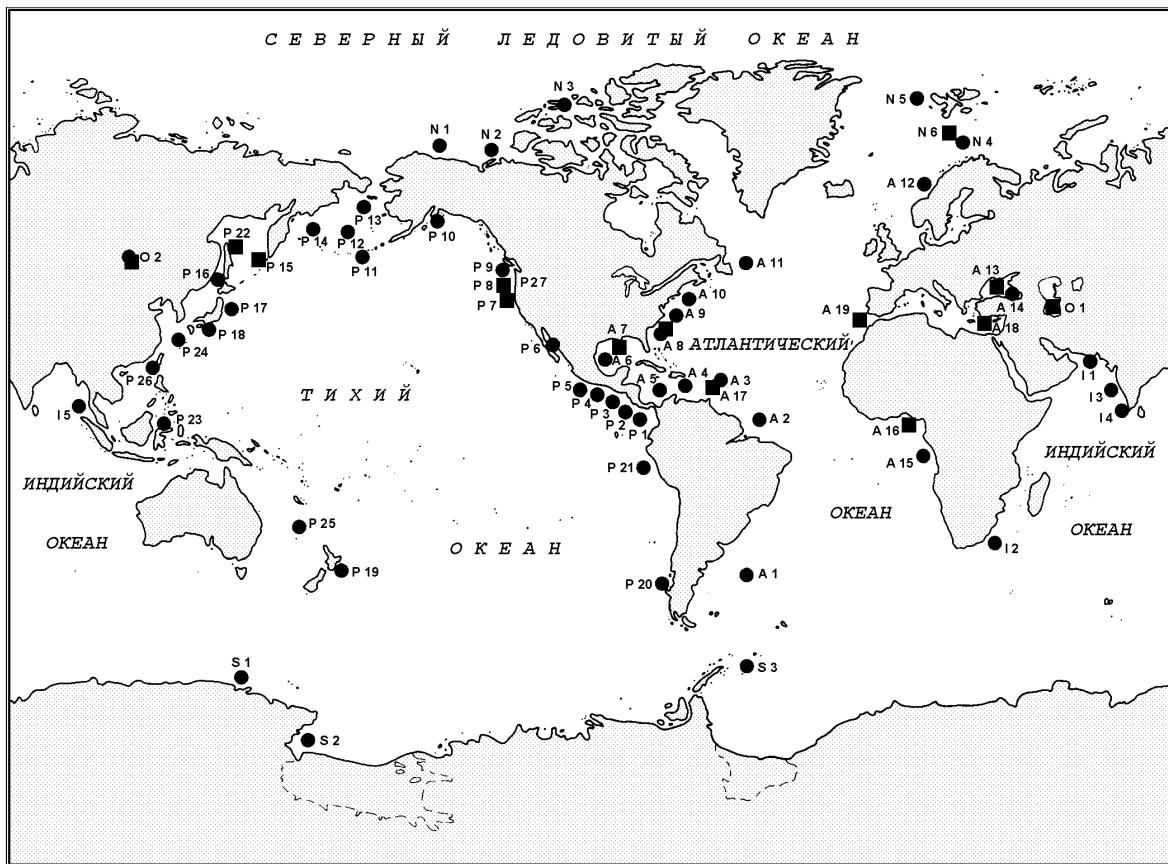


Рис. 1. Наблюдения субмаринных (субаквальных) газовых гидратов и их признаков.

■ — скопления газовых гидратов в очагах разгрузки флюидов

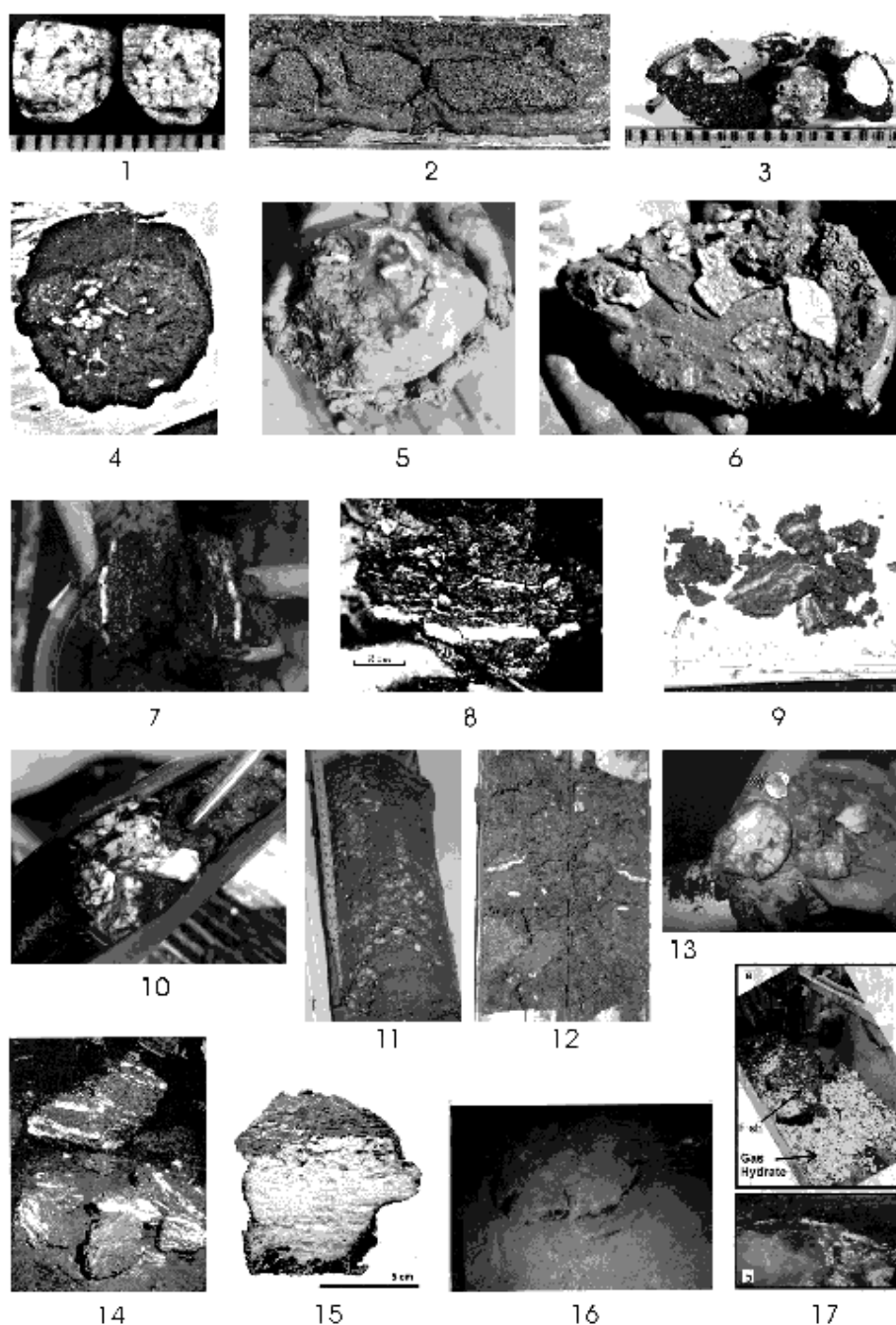
Пункты и площади, где наблюдались газовые гидраты и/или их признаки

№	Номерна рис. 1	Океан	Район	Характер наблюдений	Авторы, дата
1	P-1	Тихий	Южное побережье Панамы	BSR	Shiplee e. a., 1979
2	P-2	Тихий	Центральноамериканский жёлоб, побережье Коста-Рики	Гидраты в керне скв.565 (84 рейс DSDP) BSR Гидраты в керне скв.1041 (170 рейс ODP)	Kvenvolden, McDonald, 1985 Shiplee e. a., 1979 Kimura e. a., 1997
3	P-3	Тихий	Центральноамериканский жёлоб, побережье Никарагуа	BSR	Shiplee e. a., 1979
4	P-4	Тихий	Центральноамериканский жёлоб, побережье Гватемалы	Гидраты в керне скв. 496—498 (67 рейс DSDP), скв. 565 и 570 (84 рейс DSDP) BSR	Harrison, Curiale, 1982 Kvenvolden, McDonald, 1985 Shiplee e. a., 1979 Ladd e. a., 1982
5	P-5	Тихий	Центральноамериканский жёлоб, побережье Мексики	Гидраты в керне скв. 490—492 (66 рейс DSDP) BSR	Shiplee, Didyk, 1982 Shiplee e. a., 1979
6	P-6	Тихий	Калифорнийский залив (бассейн Гуаймас)	BSR	Lonsdale, 1985
7	P-7	Тихий	Побережье Северной Калифорнии	BSR Гидраты в грунтовых колонках	Field, Kvenvolden, 1985 Brooks e. a., 1991
8	P-8	Тихий	Побережье штата Орегон (зона субдукции Каскадиа)	BSR Гидраты в керне скв. 892 (146 рейс ODP) Гидраты в грунтовых колонках	Moore e. a., 1992 Westbrook e. a., 1994 Suess e. a., 1997
9	P-9	Тихий	Побережье о. Ванкувер	BSR Температура керна $-1,4^{\circ}\text{C}$ Гидраты в грунтовых колонках	Davis e. a., 1990 Hyndman, Spence, 1992 Westbrook e. a., 1994 Riedel e. a., 2001
10	P-10	Тихий	Алеутский жёлоб, восток	BSR	Kvenvolden, von Huene, 1985
11	P-11	Тихий	Алеутский жёлоб, центральная часть	Опреснение поровой воды в скв. 186 (19 рейс DSDP) BSR	Hesse, Harrison, 1981 McCarthy e. a., 1984
12	P-12	Тихий	Берингово море, Алеутская котловина	VAPs (амплитудно-скоростные аномалии)	Scholl, Cooper, 1978; Салтыкова и др., 1987
13	P-13	Тихий	Берингово море, континентальный склон США	BSR	Carlson, Karl, 1984 Carlson e. a., 1985
14	P-14	Тихий	Берингово море, хр. Ширшова	BSR	Салтыкова и др., 1987
15	P-15	Тихий	Охотское море, побережье о. Парамушир	Гидраты в грунтовых колонках	Зоненшайн и др., 1987 Соловьев и др., 1993, 1994
16	P-16	Тихий	Японское море, хр. Окусири	Гидраты в керне скв. 796 (127 рейс ODP)	Tamaki e. a., 1990
17	P-17	Тихий	Японский жёлоб	Опреснение поровой воды в скв. 438, 439 (57 рейс DSDP)	Hesse, Harrison, 1981
18	P-18	Тихий	Жёлоб Нансей, побережье Японии	BSR Гидраты в керне скв. 808 (131 рейс ODP)	Aoki e. a., 1983 Tamano e. a., 1984 Taiga e. a., 1991

№	Номер на рис. 1	Океан	Район	Характер наблюдений	Авторы, дата
19	P-19	Тихий	Прибрежье Новой Зеландии	BSR	Katz, 1981, 1982
20	P-20	Тихий	Прибрежье Чили	BSR	Cande e. a., 1987
21	P-21	Тихий	Перуанский жёлоб (5–7 °ю.ш.)	BSR	Shepard, 1979
22	<b>P-21a</b>	Тихий	Перуанский жёлоб (южнее 9 °ю.ш.)	BSR Гидраты в керне скв.685, 688 (112 рейс ODP)	von Huene e. a., 1985 Miller e. a., 1991 Suess e. a., 1988 Kvenvolden, Kastner, 1990
23	<b>P-22</b>	Тихий	Охотское море, прибрежье о. Сахалин (впадина Дерюгина)	Гидраты в грунтовых колонках	Ginsburg e. a., 1993 Соловьёв и др., 1993
24	P-23	Тихий	Прибрежье о. Сулавеси	BSR	Neben e. a., 1998
25	<b>P-24</b>	Тихий	Желоб Окинава, Восточно-Китайское море	Гидраты CO <sub>2</sub> на дне	Sakai e. a., 1990
26	P-25	Тихий	Тасманово море	BSR	Exon, Symonds, 1998
27	P-26	Тихий	Южно-Китайское море, прибрежье о. Тайвань	BSR	Chow e. a., 2000
28	<b>P-27</b>	Тихий	Каскадия, к югу от о. Ванкувер	Гидраты подняты тралом	Spence e. a., 2001
29	A-1	Атлантический	Прибрежье Аргентины	BSR	Manley, Flood, 1989
30	A-2	Атлантический	Прибрежье Бразилии	BSR	Manley, Flood, 1988
31	A-3	Атлантический	Прибрежье о. Барбадос	BSR Опреснение поровой воды в скв. 671, 674 (110 рейс ODP)	Ladd e. a., 1982 Gieskes e. a., 1990
32	A-4	Атлантический	Карибское море, прибрежье Венесуэлы	BSR	Ladd e. a., 1984
33	A-5	Атлантический	Карибское море, прибрежье Панамы и Колумбии	BSR	Shiplee e. a., 1979 Lu, McMillen, 1983
34	A-6	Атлантический	Мексиканский залив, запад	BSR	Shiplee e. a., 1979 Hedberg, 1980
35	<b>A-7</b>	Атлантический	Мексиканский залив, прибрежье США	Гидраты в керне скв. 618 (96 рейс DSDP) Гидраты в грунтовых колонках	Pflaum e. a., 1986 Brooks e. a., 1984, 1986
36	<b>A-8</b>	Атлантический	Прибрежье США, хр. Блейк Аутер	BSR Гидраты в керне скв. 533 (76 рейс DSDP) Опреснение поровой воды в скв. 104 (11 рейс DSDP) Гидраты в керне скв. 994–997 (164 рейс ODP)	Markl e. a., 1970; Shiplee e. a. 1979; Sheridan e. a., 1982 Kvenvolden, Barnard, 1983 Hesse, Harrison, 1981 Paull e. a., 1996
37	A-9	Атлантический	Прибрежье США, жёлоб Каролины	BSR	Dillon e. a., 1983
38	A-10	Атлантический	Прибрежье США, между каньонами Гудзон и Вашингтон	BSR	Carpenter, 1981 Tucholke e. a., 1977
39	A-11	Атлантический	Прибрежье Канады к востоку от о. Ньюфаундленд	BSR	Taylor e. a., 1979
40	A-12	Атлантический	Прибрежье Норвегии	BSR Опреснение поровой воды в скв. 339, 341 (38 рейс DSDP) Опреснение поровой воды и присутствие метана в скв. 644 (104 рейс ODP)	Bugge e. a., 1987 Hesse, Harrison, 1981; Kvenvolden e. a., 1989

№	Номер на рис. 1	Океан	Район	Характер наблюдений	Авторы, дата
41	<b>A-13</b>	Атлантический	Черное море, побережье Крыма	Гидраты в грунтовых колонках	Ефремова, Жиженко, 1974 Гинсбург и др., 1990 Конюхов и др., 1990
42	A-14	Атлантический	Черное море, побережье Кавказа	BSR	Номоконов, Ступак, 1988 Горчилин, Лебедев, 1991
43	A-15	Атлантический	Конус выноса р. Конго	BSR	Uenzelman e. a., 1997
44	<b>A-16</b>	Атлантический	Прибрежье Нигерии	Гидраты в грунтовых колонках BSR	Brooks e. a., 1994
45	<b>A-17</b>	Атлантический	Барбадосский желоб	Гидраты в грунтовых колонках	Henry e. a., 1996
46	<b>A-18</b>	Атлантический	Восток Средиземного моря	Гидраты в грунтовых колонках	Woodside e. a., 1996
47	<b>A-19</b>	Атлантический	Кадисский залив	Гидраты в грунтовых колонках	
48	I-1	Индийский	Оманский залив	BSR	White, 1979 White, Louden, 1983
49	I-2	Индийский	Прибрежье Юго-Восточной Африки	BSR	Ben-Avraham e. a., 1998
50	I-3	Индийский	Прибрежье Западной Индии, 14° с.ш.	BSR	Veerayya e. a., 1998
51	I-4	Индийский	Прибрежье мыса Кумари, Индия	BSR	Veerayya e. a., 1998
52	I-5	Индийский	Прибрежье Андаманских островов	BSR	Chopra, 1985
53	N-1	Северный Ледовитый	Море Бофорта, континентальный склон, Аляска, США	BSR	Grantz e. a., 1976 Grantz, May, 1983
54	N-2	Северный Ледовитый	Море Бофорта, шельф Канады	Каротаж скважин	Weaver, Stewart, 1982
55	N-3	Северный Ледовитый	Бассейн Свердруп	Каротаж скважин	Judge, 1982 Goodman, Franklin, 1982
56	N-4	Северный Ледовитый	Баренцево море, побережье Норвегии	Сейсмические аномалии, BSR	Andreassen e. a., 1990
57	N-5	Северный Ледовитый	Прибрежье Шпицбергена, пролив Фрама	BSR	Eiken, Hinz, 1989
58	<b>N-6</b>	Северный Ледовитый	Норвежское море	Гидраты в грунтовых колонках	Vogt e. a., 1997 Ginsburg e. a., 1998, 1999
59	S-1	Прибрежье Антарктиды	Прибрежье Земли Уилкса, западная часть моря Дюровила	BSR	Kvenvolden e. a., 1987 Eittreim, Smith, 198
60	S-2	Прибрежье Антарктиды	Море Росса, западная часть	Опреснение поровой воды и присутствие метана в скв. 271—273 (28 рейс DSDP)	McIver, 1975; Mann, Gieskes, 1975
61	S-3	Прибрежье Антарктиды	Море Уэдделла, северо-западная часть	BSR	Lonsdale, 1990
62	<b>O-1</b>		Впадина Южного Каспия	Гидраты в грунтовых колонках	Ефремова, Гритчина, 1981 Гинсбург и др., 1988, 1992
63	O-2		Озеро Байкал	BSR	Hutchinson e. a., 1991
64	<b>O-3</b>		Озеро Байкал	Гидраты в керне скважин Гидраты в грунтовых колонках	Кузьмин и др., 1998; Matveeva e. a., 2000

Примечание. В столбце 2 жирным шрифтом выделены номера районов, где газовые гидраты наблюдались визуально.



**Рис. 2. Примеры образцов газовых гидратов, вскрытых глубоководным бурением и грунтовым пробоотбором.**

1 — Центральноамериканский жёлоб в прибрежье Гватемалы, станция 570, 84 рейс DSDP, поддонная глубина около 250 м, глубина воды 1698 м; 2 — Центральноамериканский жёлоб в прибрежье Гватемалы, станция 498, 67 рейс DSDP, интервал поддонных глубин 307—316 м, глубина воды 5478 м; 3 — Центральноамериканский жёлоб в прибрежье Гватемалы, станция 568, 84 рейс DSDP, поддонная глубина около 400 м, глубина воды 2010 м; 4 — Перуанский жёлоб, станция 688, 112 рейс ODP, поддонная глубина 141 м, глубина воды 3820 м; 5—6 — Черное море, прогиб Сорокина, поддонная глубина 0,4—2,2 м, глубина воды 2050 м; 7—9 — Охотское море, побережье Сахалина, поддонная глубина 0,4—1 м, глубина воды 710 м; 10—12 — озеро Байкал, Южная впадина, поддонная глубина 0,2 м, глубина воды 1380 м; 13 — Мексиканский залив, каньон Миссисипи, поддонная глубина до 8,2 м, глубина воды до 1300 м; 14—15 — Гидратный хребет в прибрежье штата Орегон, гидраты подняты со дна драгированием, глубина воды около 800 м; 16 — Мексиканский залив, выходы газовых гидратов на дне (поле снимка — несколько м<sup>2</sup>); 17 — Тихий океан к югу от о. Ванкувер, гидраты подняты со дна рыболовецким тралом, глубина воды 700—800 м.

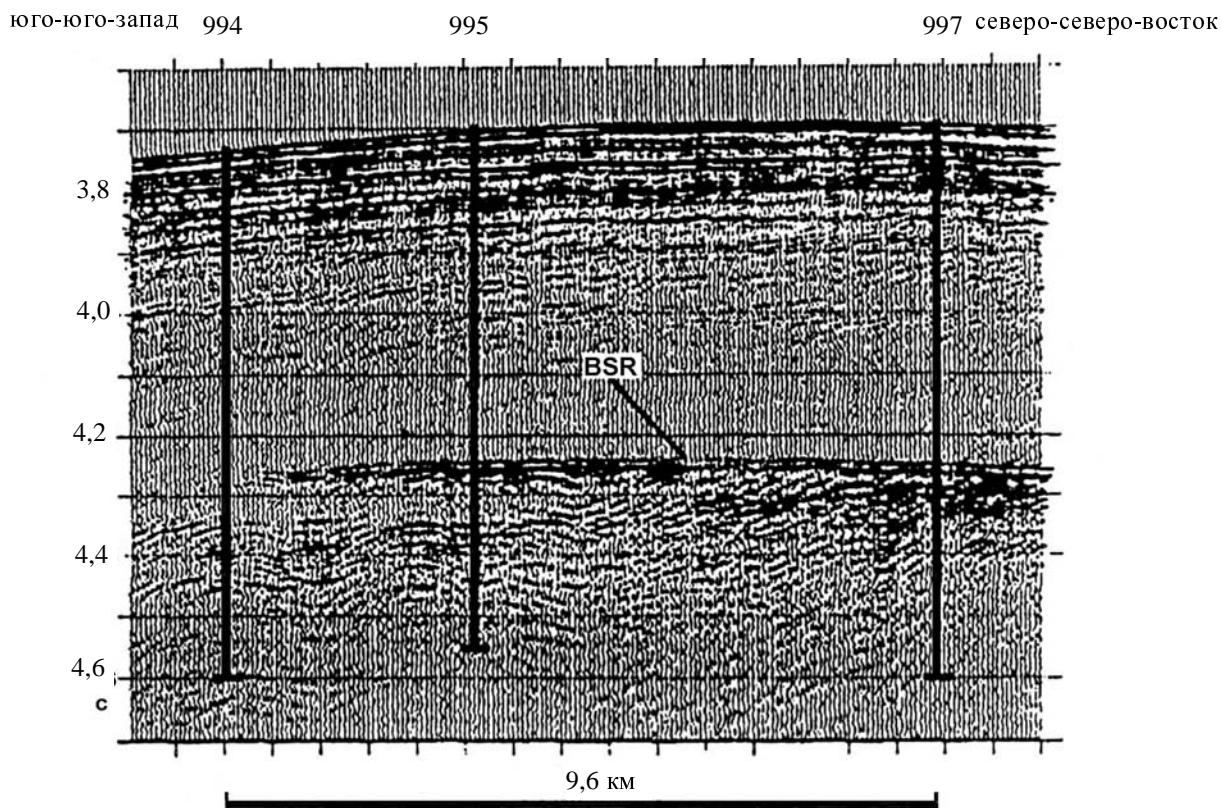


Рис. 3. Фрагмент сейсмического профиля через станции глубоководного бурения 994, 995 и 997, вскрывшие газовые гидраты. Подводный хребет Блейк Аутер, 164 рейс ODP. По [12]

Во-первых, результаты многочисленных исследований показали, что инверсия полярности отраженного сигнала (а это основной признак гидратообусловленного сейсмического горизонта BSR) связана, главным образом, с присутствием свободного газа ниже BSR [7–9], а не с гидратонасыщенностью отложений над этим горизонтом.

Причем, для этого появления BSR достаточно, если всего лишь 1% объема порового пространства будет занят свободным газом [10, 11]. Соответственно, содержание гидратов непосредственно над границей BSR, как правило, также будет низким, поскольку должно быть соответствие между содержанием гидратов и газа выше и ниже подошвы зоны стабильности газовых гидратов.

Во-вторых, данные глубоководного бурения свидетельствуют об отсутствии прямой связи между наблюдениями BSR и наличием газовых гидратов в вышележащей осадочной толще. Имеются многочисленные примеры, когда гидратосодержащие отложения вскрывались при отсутствии BSR и наоборот. В этом отношении показательны результаты бурения в 164 рейсе ODP (Ocean Drilling Program — программа глубоководного бурения на хребте Блейк Аутер) [12]. Здесь на всех трех станциях (994, 995 и 997), расположенных на

профиле, проходящим поперек гребня хребта, был вскрыт практически одинаковый гидратосодержащий разрез в интервале поддонных глубин приблизительно от 200 до 450 м. Однако на сейсмическом профиле, проходящем через эти станции, отражающий сейсмический горизонт BSR наблюдался только на станциях 995 и 997 (рис. 3).

Анализ многочисленных наблюдений BSR приводит к следующим выводам. Во-первых, для этого сейсмического горизонта характерна прерывистость. Она проявляется как регионально (BSR наблюдается, как правило, только на отдельных участках сейсмических профилей), так и локально (отмечаются сильные вариации коэффициента отражения в пределах этих участков).

Во-вторых, горизонт BSR всегда связан с присутствием некоторого количества свободного газа, хотя часто и незначительного в поровом пространстве ниже подошвы зоны стабильности газовых гидратов. Поскольку газ в свободной фазе может существовать только в условиях полного насыщения сосуществующей с ним поровой воды, BSR явно свидетельствует о предельном насыщении газом подземных вод в данном районе, а это — одно из необходимых условий нахождения в относительно стабильном состоянии

скопления газовых гидратов. Таким образом, отражающий горизонт BSR следует рассматривать скорее как признак потенциально газогидратоносных акваторий, в границах которых могут быть скопления газовых гидратов, а не как признак самих скоплений.

**Содержание газа в субмаринных газовых гидратах**

Глобальные оценки содержания метана в субмаринных газовых гидратах рассматривались в ряде обзоров [см. 17, 19, 21]. В табл. 2 приведены оценки за период 1997–1999 гг. Их разброс очень велик: крайние оценки различаются более, чем на четыре порядка величины (от  $2 \cdot 10^{14}$  до  $7,6 \cdot 10^{18}$  м<sup>3</sup>). Большинство оценок является произведением нескольких параметров: общей площади потенциально газогидратоносных акваторий, коэффициента гидратонасыщения (степени заполнения гидратами порового пространства), мощности гидратосодержащей толщи, пористости отложений, коэффициента расширения при разложении гидратов метана (при полном заполнении гидратной решетки молекулами метана он равен 164).

Данные, приведенные в табл. 2, отражают четыре разных подхода к оценке содержания метана в газовых гидратах Мирового океана. Оценки [16, 18–20] основаны на допущении, что газовые гидраты распространены в пределах термобарической зоны стабильности только там, где отложения достаточно обогащены органическим веществом (содержание органического вещества составляет более 1%). Расхождения полученных величин в интервале от  $2 \cdot 10^{16}$  до  $1,4 \cdot 10^{17}$  м<sup>3</sup> обусловлены в основном некоторыми различиями принятых значений площади гидратоносных акваторий (от  $1 \cdot 10^7$  до  $3,17 \cdot 10^7$  км<sup>2</sup>) и коэффициента гидра-

тонасыщения (от 5 до 10%). Глобальное удельное количество метана в гидратах на единицу площади при таком подходе к оценке должно составить от  $2 \cdot 10^9$  до  $4,4 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup>/км<sup>2</sup>.

Второй подход [16] заключается в том, что региональная оценка, сделанная на основе сейсморазведочных данных, распространяется на все потенциально газогидратоносные акватории Мирового океана. Так, по данным о распространении сейсмического горизонта BSR в море Бофорта было предположено, что газовые гидраты занимают около 75% полосы площадью приблизительно  $7 \cdot 10^5$  км<sup>2</sup>, протянувшейся вдоль континентального склона между изобатами от 400 до 2800 м. Было принято, что поровое пространство полностью занято гидратами в пределах нижних 40 метров зоны стабильности при средней пористости отложений 30%. Поскольку протяженность изученной площади в 20 раз меньше, чем суммарная протяженность континентальных окраин, глобальная оценка содержания метана в гидратах была определена как 20-кратная региональная оценка и составила  $1,8 \cdot 10^{16}$  м<sup>3</sup>. При этом глобальное и региональное удельное содержание газа в гидратах должно быть одинаковым,  $1,3 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup>/км<sup>2</sup>.

Третий подход [19] основан на миграционной модели Р. Хиндмана и Е. Девиса [26], согласно которой гидраты осаждаются в пределах зоны стабильности из восходящего флюидного потока. Предполагается, что площадь потенциально гидратоносных акваторий включает в себя площадь всех аккреционных призм на активных континентальных окраинах, а также все акватории с высокой скоростью кайнозойского осадконакопления, и равна  $2,3 \cdot 10^7$  км<sup>2</sup>. Гидратонасыщенность отложений была принята равной 50% непосредственно у подошвы зоны стабильности и плавно уменьшающейся до нуля в направлении к морскому дну. Последнее допущение основано на уменьшении концентрации хлорид-ионов в поровой воде (которая рассматривается как мера гидратосодержания) с глубиной, что наблюдалось на станциях 496 и 497 DSDP (Deep Sea Drilling Project) [27]. Мощность гидратосодержащей толщи была принята равной мощности зоны стабильности газовых гидратов; среднее значение пористости составляет 46%. В результате глобальное содержание газа в гидратах было оценено величиной  $1,1 \cdot 10^{17}$  м<sup>3</sup>. Этой оценке должно соответствовать глобальное удельное содержание газа, равное  $5 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup>/км<sup>2</sup>.

В приведенных оценках обращают на себя внимание не только огромные количества газа в гидратах, но и большие значения его глобальных удельных содержаний, составляющих  $(1,3–5) \cdot 10^9$  м<sup>3</sup>/км<sup>2</sup>. Для сравнения, средняя плотность запасов газа в известных газовых месторождениях [28] существенно меньше —  $6,2 \cdot 10^8$  м<sup>3</sup>/км<sup>2</sup>. Плотность запасов Уренгойского газового месторождения-гиганта на севере Западной Сибири составляет порядка  $2,1 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup>/км<sup>2</sup>, а его основной сеноманской залежи —  $1,1 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup>/км<sup>2</sup> [28]. Такие значения соизмеримы с нижними оценками глобального удельного содержания газа в гидратах, что вызывает вполне закономерное сомнение в достоверности последних. Это и понятно, поскольку все приведенные выше оценки количества газа в гидратах были основаны на представлениях о сплошном рас-

Таблица 2

**Глобальная оценка количества метана в газовых гидратах Мирового океана**

Количество метана, м <sup>3</sup>	Год	Авторы
$5 \cdot 10^{15} - 2,5 \cdot 10^{16}$	1977	Трофимук и др.
$7,6 \cdot 10^{18}$	1981	Добрынин и др.
$3,1 \cdot 10^{15}$	1981	McIver
$4 \cdot 10^{16}$	1988	Kvenvolden, Claypool
$1 \cdot 10^{16}$	1988	Makogon
$2,1 \cdot 10^{16}$	1988	Kvenvolden
$2,1 \cdot 10^{16}$	1990	McDonald
$2,6 \cdot 10^{16} - 1,4 \cdot 10^{17}$	1994	Gornitz, Fung
$2,3 \cdot 10^{16} - 9,1 \cdot 10^{16}$	1995	Harvey, Huang
$1 \cdot 10^{15}$	1995	Гинсбург, Соловьёв
$7 \cdot 10^{15}$	1996	Holbrook e. a.
$1,5 \cdot 10^{16}$	1997	Makogon
$2 \cdot 10^{15} - 2 \cdot 10^{16}$	1997	Dickens e. a.
$2 \cdot 10^{14}$	1999	Соловьёв



Таблица 3

Результаты оценки удельного газосодержания ( $q$ ) в скоплениях газовых гидратов (по данным наблюдений)

Район	Скопление/гидратопроявление	$q$ , м <sup>3</sup> /км <sup>2</sup>	Примечания
Южный Каспий	Грязевой вулкан «Буздаг»	$4 \cdot 10^8$	Оценка автора
Норвежское море	Грязевой вулкан «Хаакон Мосби»	$2 \cdot 10^8$	Оценка автора
Средиземное море	Грязевой вулкан «Милано»	$4 \cdot 10^8$	Оценка автора по данным (De Lange, Brumsack, 1998)
Прибрежье Сахалина	Очаг разгрузки газа	$8 \cdot 10^8$	Оценка автора
Перуанский жёлоб	Станция 685, 112 рейс ODP	$4 \cdot 10^8$	Оценка автора по данным (Suess <i>et al.</i> , 1988)
Центральноамериканский жёлоб	Станция 570, 84 рейс DSDP	$1,4 \cdot 10^9$	Mathews, von Huene, 1985, с поправками автора
Центральноамериканский жёлоб	Станция 1041, 170 рейс ODP	$1,2 \cdot 10^9$	Оценка автора по данным (Kimura <i>et al.</i> , 1997)
Прибрежье о. Ванкувер	Станция 889, 146 рейс ODP	$4,7 \cdot 10^8$	Collett, 1998
Берингово море	VAMPs	$7 \cdot 10^8$	Scholl, Hant, 1993
Хребет Блейк Аутер	В границах BSR	$3,8 \cdot 10^8$	Площадь 26000 км <sup>2</sup> ; оценка автора

пространении субмаринных газовых гидратов на больших площадях, в широком интервале поддонных глубин, а также значительном гидратосодержании отложений. Такие представления не согласуются с данными геологических наблюдений, анализ которых приводит к неоспоримому выводу о дискретности скоплений газовых гидратов.

В основе четвертого подхода к глобальной оценке количества газа в гидратах, развиваемого во ВНИИ-Океангеология, лежит анализ данных прямых наблюдений [4]. На весьма ограниченном фактическом материале был сделан вывод, что общее количество газа в скоплениях газовых гидратов Мирового океана может быть оценено величиной  $10^{15}$  м<sup>3</sup>, а в скоплениях у дна, связанных с очагами разгрузки флюидов,  $10^{14}$  м<sup>3</sup>. Последующий анализ по десяти наиболее обеспеченным фактическими данными скоплениям газовых гидратов дал оценки удельного содержания газа в изученных скоплениях газовых гидратов от  $2 \cdot 10^8$  до  $1,4 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup>/км<sup>2</sup> (табл. 3). Среднее удельное содержание газа в отмеченных десяти скоплениях приблизительно равно  $6,5 \cdot 10^8$  м<sup>3</sup>/км<sup>2</sup>, что соизмеримо со средней плотностью запасов газа в месторождениях. Вместе с тем эта величина почти на порядок меньше, чем глобальное удельное содержание газа ( $1,3-5 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup>/км<sup>2</sup>), полученное на основании опубликованных оценок (см. выше), что явно противоречит закону распределения плотности запасов полезных ископаемых.

Количество газа, сосредоточенного в гидратах каждого из изученных скоплений, составляет от  $1 \cdot 10^8$ — $2,5 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup> в скоплениях, приуроченных к очагам разгрузки флюидов, до  $1 \cdot 10^{13}$  м<sup>3</sup> в крупнейшем скопле-

нии газовых гидратов на хребте Блейк Аутер (прибрежье США). Согласно известным закономерностям распределения плотностей запасов в газоносных объектах [35], глобальное удельное содержание метана в газовых гидратах, т.е. плотность запасов в пределах всех потенциально газогидратоносных акваторий на Земле, не должно превышать  $5 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup>/км<sup>2</sup>.

По геологическим условиям потенциально газогидратоносные акватории должны либо находиться в границах бассейнов с мощным осадочным чехлом в целом, либо быть приуроченными к областям с большими скоростями кайнозойского осадконакопления, либо располагаться в пределах зон субдукции и аккреционных комплексов. Как правило, они ассоциируются с нефтегазоносными регионами. По данным прогнозного картирования в масштабе 1:15000000, выполненного нами, суммарная площадь таких акваторий составляет около 35,7 млн. км<sup>2</sup>, т.е. приблизительно 10% площади Мирового океана. При этом на долю арктических акваторий приходится 12,3%, на побережье Антарктиды — 19,7%, на Атлантический океан — 38,2%, на Тихий океан — 15,4%, на Индийский океан — 14,4%.

Общее количество газа, сосредоточенного в скоплениях газовых гидратов в недрах Мирового океана, было оценено величиной, полученной умножением предполагаемой средней глобальной удельной плотности запасов газа в газовых гидратах ( $5 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup>/км<sup>2</sup>) на суммарную площадь потенциально газогидратоносных акваторий ( $3,57 \cdot 10^7$  км<sup>2</sup>). Полученная оценка ( $1,8 \cdot 10^{14}$  м<sup>3</sup>, или приблизительно 200 триллионов м<sup>3</sup>) существенно отличается от ранее опубликованных

оценок и является наименьшей. Поскольку эта оценка основана на анализе фактических данных, а не на общих предположениях, она представляется в методологическом отношении наиболее обоснованной. Вместе с тем ее можно рассматривать и как минимально возможную. Таким образом, согласно оценкам, выполненным во ВНИИОкеангеология, количество газа, сосредоточенного в природных газовых гидратах, составляет величину не более 1000 трлн. м<sup>3</sup> и не менее 200 трлн. м<sup>3</sup>.

### Об утилизации газовых гидратов

Известно, что энергия, которую можно получить из газа разложившихся гидратов, более чем в 15 раз превышает чистые (без учета тепловых потерь) энергетические затраты, необходимые для их разложения [36]. Такой благоприятный энергетический баланс дает основания для оптимизма в отношении возможного практического использования субмаринных газовых гидратов.

Имеются три теоретически возможных подхода к извлечению газа из газовых гидратов: повышение (и поддержание) температуры выше равновесной, снижение пластового давления и воздействие ингибиторами, сдвигающими фазовое равновесие. На практике ни один из этих подходов пока не был реализован. Единственные имеющиеся в литературе данные о добыче газа из гидратов Мессояхского месторождения (север Западной Сибири) не могут служить примером разработки субмаринных скоплений газовых гидратов методом снижения давления. Дело в том, что снижение пластового давления в газовой залежи Мессояхского месторождения являлось следствием извлечения газа в ходе ее разработки как газового месторождения, что могло привести к частичному разложению гидратов в пласте. В субмаринных условиях в пределах зоны стабильности газовых гидратов свободного газа не может быть даже теоретически. Газ может находиться только ниже подошвы этой зоны стабильности гидратов. На наш взгляд, перспектив у методов разработки субмаринных газогидратных месторождений, основанных на снижении пластового давления, нет.

Для извлечения газа из скоплений гидратов в субмаринных условиях целесообразными представляются методы, основанные на повышении температуры и на воздействии ингибиторов. Кроме того, определенный интерес могут вызывать механические, включая гидравлические и термогидравлические, методы. Для оценки экономической эффективности таких методов необходимо учитывать многие параметры скоплений — размер, форму, давление, температуру, интервал поддонных глубин, пористость и проницаемость отложений, характер гидратовыделений, концентрацию гидратов и ее распределение в скоплении. Пока же все предлагаемые схемы добычи газа из скоплений гидратов остаются в значительной мере умозрительными.

### Заключение

Определение значимости и перспективности природных газовых гидратов как горючего ископаемого представляет несомненный практический интерес. Сегодня ответить с какой-либо определенностью на вопрос о месте газовых гидратов в ряду других горю-

чих ископаемых не представляется возможным, поскольку еще не накоплен достаточный фактический материал и не завершены первый необходимый этап работ — научно-исследовательский.

Но даже минимальные оценки количества газа в субмаринных скоплениях газовых гидратов (от  $1,8 \cdot 10^{14}$  до  $1 \cdot 10^{15}$  м<sup>3</sup>) свидетельствуют о наличии значительных потенциальных ресурсов, соизмеримых с геологическими запасами обычного природного газа. Безусловно, в будущем эти ресурсы так или иначе будут использоваться. Пока лишь сделаны первые шаги в изучении геологии залежей газовых гидратов. Еще предстоит выяснить, какие геологические факторы контролируют формирование скоплений газовых гидратов, что представляют собой конкретные скопления, каковы их размеры и форма, каковы концентрации гидратов и как они распределены по площади и глубине, какое количество газа содержится в гидратах отдельных скоплений.

По геологическим условиям наиболее перспективными, в соответствии с представлениями о ведущей роли в формировании скоплений газовых гидратов процесса фильтрации флюидов, можно считать континентальные склоны активных окраин в границах аккреционных призм, что также подтверждается имеющимися фактическими данными.

Что касается возможности освоения залежей газовых гидратов, то первоочередной интерес, по-видимому, представляют скопления газовых гидратов, связанные с очагами разгрузки флюидных источников. Такие скопления расположены непосредственно вблизи дна водоемов, часто при относительно небольшой глубине воды (от 480 м и более), и характеризуются относительно большим содержанием гидратов в отложениях (максимально до 35% об.). Кроме того, есть основания полагать, что ресурсы газа в гидратах таких скоплений являются возобновляемыми. Поскольку термобарические условия в верхней части разреза определяют, как правило, наибольшее переохлаждение (пересыщение) флюида непосредственно вблизи дна, очаги разгрузки можно рассматривать как своеобразные природные реакторы, в которых газ (растворенный или свободный) стабилизируется в форме гидратов, образуя современные скопления. Само явление глубоководной разгрузки газосодержащих флюидов на дне весьма широко распространено как на континентальных окраинах, так и во внутренних и окраинных морях. В настоящее время в Мировом океане известно не менее 70 районов с признаками разгрузки флюидов на дне. Все эти районы могут рассматриваться как потенциально газогидратоносные источники.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ефремова А.Г., Жижченко Б.П. Докл. АН СССР, 1974, т. 214, № 5, с. 1179—1181.
2. Ефремова А.Г., Гритчина Н.Д. К вопросу о роли газогидратов в формировании газопродуцирующих отложений. Методы оценки нефте- и газоматеринского потенциала седиментов. Москва, МГУ, 1979, с. 72—73.
3. Макогон Ю.Ф. Газ. Пром-сть, 2001, № 5, с. 10—16.
4. Гинсбург Г.Д., Соловьёв В.А. Субмаринные газовые гидраты. С-Пб., ВНИИОкеангеология, 1994, с. 200.

5. *Kvenvolden K.A., McMenamin M.A.* U.S. Geol.Surv.Circ., 1980, v. 825, p. 11.
6. *Spence G.D., Chapman N.R., Hyndman R.D., Cleary C.* EOS, 2001, v. 82, № 50, p. 621, 627.
7. *Miller J.J., Lee M.W., von Huene R.* AAPG Bull., 1991, v. 75, № 5, p. 910—924.
8. *Rowe M.M., Gettrust J.F.* J. Geophys. Res., 1993, v. 98 (B1), p. 463—473.
9. *Minshull T.A., Singh S.C., Westbrook G.K.* Ibid., 1994, v. 99 (B3), p. 4715—4734.
10. *Domenico S.N.* Geophysics, 1974, v. 39, № 6, p. 882—894.
11. *Murphy W.F.* J. Geophys. Res., 1984, v. 89 (B13), p. 11549—11559.
12. *Paull C.K., Matsumoto R., Wallace P.J. e. a.* Proc. ODP. Init. Repts., 164, College Station, TX (Ocean Drilling Program), 1996.
13. *Trofimuk A.A., Cherskiy N.V., Tsarev V.P.* The role of continental glaciation and hydrate formation on petroleum occurrences. In: Future supply of nature-made petroleum and gas. Ed. R.F. Meyer. New York: Pergamon Press, 1977, p. 919—926.
14. *Dobrynin V.M., Korotajev Yu.P., Plyushev D.V.* Gas hydrates — a possible energy resources. In: Long-term energy resources. Eds. R.F. Meyer, J.C. Olson. Boston: Pitman, 1981, p. 727—729.
15. *McIver R.D.* In: Long-term energy resources. Eds. R.F. Meyer, J.C. Olson. Boston: Pitman, 1981, p. 713—726.
16. *Kvenvolden K.A., Claypool G.E.* Gas hydrates in oceanic sediment, U.S. Geol. Surv. Open-File Rep., 1988, p. 88—216.
17. *Kvenvolden K.A.* Chem. Geol., 1988, v. 71, p. 41—51.
18. *McDonald G.T.* Clim. Change, 1990, v. 16, p. 247—281.
19. *Gornitz V., Fung I.* Global Biogeochem. Cycles, 1994, v. 8, № 3, p. 335—347.
20. *Harvey L.D., Huang Z.* J. Geophys. Res., 1995, v. 100 (D2), p. 2905—2926.
21. *Ginsburg G.D., Soloviev V.A.* Submarine gas hydrate estimation: Theoretical and empirical approaches. In: 27<sup>th</sup> Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 1995, p. 513—518.
22. *Holbrook W., Hoskins H., Wood W. e. a.* Science, 1996, v. 273, p. 1840—1843.
23. *Makogon Yu.F.* Hydrates of hydrocarbons. PenWell Books, 1997.
24. *Dickens G.R., Paull C.K., Wallace P., e. a.* Nature, 1997, v. 385, p. 426—428.
25. *Soloviev V.A.* Assessment of methane content in submarine gas hydrates. In: XIII Intern. Conf. on Marine Geology, Moscow, 1999, v. 2, p. 207—208.
26. *Hyndman R.D., Davis E.E.* J. Geophys. Res., 1992, v. 97 (B5), p. 7025—7041.
27. *Auboin J., von Huene R. e. a.* Init.Repts. DSDP, Washington, 1982, v. 67.
28. *Васильев В.Г., Ермаков В.И., Жабров И.П.* Газовые и газо-конденсатные месторождения. Справочник. М.: Недра, 1983.
29. *De Lange G.J., Brumsack H.-J.* The occurrence of gas hydrates in Eastern Mediterranean mud dome structures as indicated by pore-water composition. In: Relevance to world margin stability and climate change. Geol. Soc. London, Special Publ., 1998, v. 137, p. 167—175.
30. *Suess E., von Huene R. e. a.* Proc. ODP, Init. Repts. College Station, TX, 1988, v. 131.
31. *Mathews M.A., von Huene R.* Site 570 methane hydrate zone. In: Init. Repts. DSDP, 1985, v. 84, p. 773—90.
32. *Kimura G., Silver E., Blum P. e. a.* Proc. ODP, Init. Repts. College Station, TX, 1997, v. 170.
33. *Collett T.* Personal commun., 1998.
34. *Scholl D.W., Hart P.E.* Velocity and amplitude structures on seismic-reflection profiles — possible massive gas-hydrate deposits and underlying gas accumulations in the Bering Sea. In: The future of energy gases. U.S. Geol.Surv. Prof.Paper, 1993, v. 1570, p. 331—351.
35. *Назаров В.И.* Экономические проблемы добычи нефти и газа. М.: Недра, 1989.
36. *Sloan E.D.* Clathrate hydrates of natural gases. New York, Basel: Marcel Dekker Inc., 1990.