

**ГАЗОВЫЕ ГИДРАТЫ ОХОТСКОГО МОРЯ, РЕЗУЛЬТАТЫ 21 РЕЙСА НИС
«ГЕОЛОГ ПЕТР АНДРОПОВ»**

В.А. СОЛОВЬЕВ, Г.Д. ГИНСБУРГ, В.К. ДУГЛАС, Р. КРЕНСТОН, Т. ЛОРЕНСОН, И.А. АЛЕКСЕЕВ, Н.С. БАРАНОВА, Г.А. ИВАНОВА, В.П. КАЗАЗАЕВ, В.А. ЛОБКОВ, Ю.Г. МАШИРОВ, М.И. НАТОРХИН, А.И. ОБЖИРОВ, Б.Ф. ТИТАЕВ
(ВНИИОкеангеология, Дальморгеология)

В результате специальных экспедиционных исследований ВНИИОкеангеология и Дальморгеология, направленных на изучение гидратоносности дальневосточных морей, обнаружено новое крупное газогидратопроявление в Охотском море, на северо-восточном континентальном склоне Сахалина (западный склон впадины Дерюгина) и изучено известное проявление в восточной, прикурульской, части моря на склоне о-ва Парамушир. Скопления гидратов связаны с очагами субмаринной разгрузки газа, фиксируемыми на эхолотных записях в виде аномалий типа «факел». По результатам сейсмоакустического профилирования, эхолотирования и грунтового пробоотбора в западной части Охотского моря предполагается обширная Присахалинская газогидратоносная область.

В Мировом океане имеется ряд районов, где скопления газовых гидратов находятся вблизи дна, что позволяет изучать их без применения бурения. В частности, в зонах разгрузки газоносных подземных вод и газов скопления формируются по фильтрационной модели газогидратообразования [Гинсбург и др., 1990; 1990а].

Целью экспедиционных исследований в Охотском море было изучение известного гидратопроявления у о-ва Парамушир [Зоненшайн и др., 1987] и поиск новых гидратопроявлений, связанных с субмаринной разгрузкой газа и (или) газонасыщенной воды.

Поскольку наиболее простым и очевидным признаком субмаринной разгрузки газосодержащих флюидов являются аномалии на эхолотной записи типа «факел в водной толще» [Авдейка и др., 1984; Зоненшайн и др., 1987], основная задача на первом этапе работ

состояла в обнаружении таких аномалий. При этом использовался навигационно-рыболовский эхолот «Сарган-Э» с рабочей частотой 20 кГц и глубиной до 1500 м. Глубины измерялись эхолотом ГЭЛ-3 с частотой излучения 12,4 кГц, что позволяло составлять относительно детальные батиметрические схемы сечением 1 м при глубине 700-800 м. Необходимое условие изучения скоплений гидратов, приуроченных к выходам газа на дне, - надежная и точная плановая привязка, позволяющая повторно выходить в одну и ту же точку. В рейсе использовался приемоиндикатор GP-500 (Япония) глобальной спутниковой навигационной системы GPS «Навстар» (США), обеспечивавший круглосуточную привязку места положения антенны приемоиндикатора с точностью не хуже 15 м в системе координат WGS-72.

Пробы отбирались прямооточной грунтовой трубкой длиной 3,5 м и внутренним диаметром 96 мм, оснащенной лепестковым клапаном и сменными мягкими полиэтиленовыми вкладышами. Максимальная глубина пробоотбора составила 320 см при средних значениях в прибрежье Парамушира 125±60 см (23 станции) и в прибрежье Сахалина 205±80 см (17 станций).

Непосредственно на борту судна выполнялись следующие аналитические исследования: анализы газа из гидратов, водорастворенного, сорбированного и остаточного газа из осадков, водорастворенного газа из придонной морской воды; отжим и анализ поровой воды; анализ придонной воды; определение плотности и влажности осадков. Кроме того, проводился отбор образцов породы, конкреций, воды и газа, а также

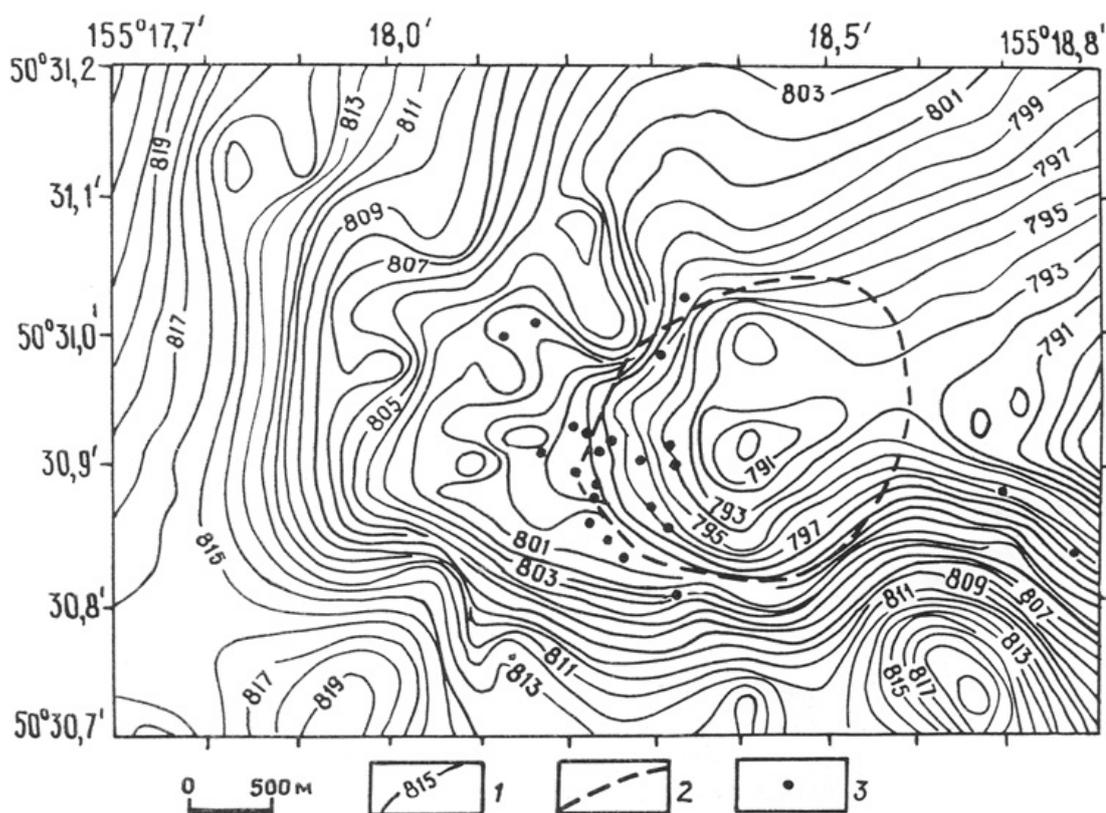


Рис. 1. Рельеф дна в районе поля субмаринной разгрузки газа № 1, побережье о-ва Парамушир:

1 — изогипсы, м; 2 — граница «факела» вблизи дна; 3 — места положения станции грунтового пробоотбора

образцов гидратов и гидратосодержащих отложений в стальные герметичные бароконтейнеры для различных физико-химических исследований, включая изотопные, в стационарных лабораториях. Пробы газа из гидратов отбирались в стеклянные бутылки замещением раствора NaCl. Поровые воды отжимались с помощью винтовых прессов и фильтровались. Пробы придонных вод отбирались через оголовье грунтовых трубок, а также с помощью батометров, автоматически срабатывавших в 1 м от дна. Для отбора и анализа газа из отложений был использован метод «head space» [Initial reports..., 1983].

Газовый анализ выполнялся на двух спаренных газовых хроматографах ЛХМ-8МД с детекторами по теплопроводности. В одном из них использовалась колонка с полисорбтом длиной 6 м, в другом - также 6-метровая колонка с молекулярными ситами. Газ-носитель гелий подавался со скоростью 40 мл/мин при 50°C. Предел чувствительности составлял 0,03%, относительная ошибка - 1% при концентрациях компонентов более 1% по объему и 10% при концентрациях менее 1%.

Пробы воды анализировались на хлорность, рН, Eh, сульфат, аммоний и кремний. Концентрации хлор-иона определялись

титрованием раствором нитрата серебра (точность $\pm 0,2$ г/д). Значения Eh измерялись с использованием хлор-серебряного электрода (точность ± 30 мВ), рН - стеклянным электродом. Содержание сульфатов определялось турбидиметрическим методом с использованием бария для осаждения растворенного сульфата. Аммоний и кремний находились стандартными колориметрическими методами, принятыми в работе по проекту глубоководного бурения (относительная ошибка $\pm 10\%$ для обоих ионов). Отжим и анализ поровых вод выполнялись в течение двух дней после получения керна. Проверка на хранящихся пробах показала, что за время хранения Eh мог увеличиться примерно на 50 мВ.

На полигоне в побережье о. Парамушир «факел», известный ранее [Авдейка и др., 1984; Зоненшайн и др., 1987], был пересечен пятью промерными галсами и пятнадцатью галсами с пробоотбором и геотермическими измерениями, что позволило уточнить его координаты (табл. 1, №1).

Суммарная погрешность определения местоположения центра «факела» (погрешность навигационной системы, погрешность меток времени на эхограмме, смещение положения

1. Поля субмаринной разгрузки газа («факелы») в Охотском море

Номер п/п	Широта (северная)	Долгота (восточная)	Глубина воды, м	Примечание
1	50° 30,370	155° 18,370	800	Гидраты вскрыты на двух станциях
2	54° 26,782	144° 04,858	710	Гидраты вскрыты на пяти станциях
3	54° 26,584	144° 04,170	700	Пробоотбор не проводился
4	54° 26,526	144° 04,700	700	То же
5	54° 26,086	144° 12,612	865	«Факел» пересечен только одним галсом; пробоотбор не проводился
6	53° 22,718	144° 25,390	640	Гидраты предполагаются по косвенным данным
7	53° 22,371	144° 31,041	760	«Факел» пересечен тремя галсами; пробоотбор не проводился
8	53° 22,364	144° 25,090	620	Гидраты предполагаются по результатам пробоотбора
9	53° 22,329	144° 32,440	700	«Факел» пересечен только одним галсом; пробоотбор не проводился
10	53° 20,666	144° 39,543	1040	То же
11	53° 20,634	144° 29,206	700	То же

вибратора эхолота по отношению к антенне (приемоиндикатора) достигает 60-70 м.

Диаметр «факела» в водной толще вблизи дна, по данным эхолотных пересечений, составляет 350-400 м. По-видимому, сам источник газа имеет меньшие размеры и тяготеет, к наиболее возвышенной части гребневидного поднятия субширотного простирания, протягивающегося с востока от островного склона Парамушира (рис. 1).

Глубина моря в границах «факела» меняется от 790 до 800 м.

Данные сейсмического (МОВ ОГТ) и сейсмоакустического (НСП) профилирования в районе «факела» [Бондаренко и Надежный, 1987; Надежный и Бондаренко, 1989] свидетельствуют о его приуроченности к своду поднятия акустического фундамента и о наличии газосодержащих отложений выше акустического фундамента, что проявляется в потере корреляции и опускании отражающих горизонтов вследствие пониженной сейсмической скорости в газонасыщенных отложениях. Мощность осадочной толщи в районе 1-1,5 км. Результаты среднечастотного сейсмоакустического профилирования (два пересечения «факела») не противоречат этим данным.

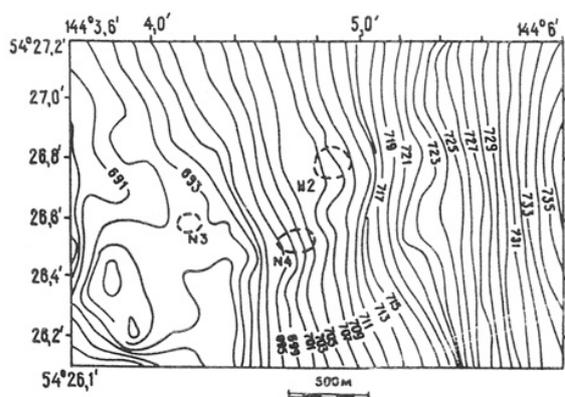
Грунтовым пробоотбором газовые гидраты были обнаружены на двух станциях (91-01-05 и 91-01-07), расположенных вблизи западной окраины «факела» (см. рис. 1), причем станция 07 оказалась за его пределами. На ряде других станций наблюдались признаки гидратов (ст. 91-01-23 - понижение хлорности поровой воды до 15,6 г/л) или следы воздействия газа (ст. 91-01-01, 03, 04, 08, 19, 22, 28, 30, 33 - запах сероводорода, разуплотнение осадков,

карбонатизация отложений). Все эти станции также находятся вблизи западного края «факела». Гидраты наблюдались в виде уплощенных обломков неправильной формы (размером от нескольких миллиметров до 7 см по длинной оси) на поддонной глубине 10-40 см (ст. 91-01-05) и 30-80 см (ст. 91-01-07) в глинисто-алевритовых отложениях с многочисленными включениями обломков карбонатных корок, стяжений, карбонатизированных раковин двустворчатых моллюсков и их обломков.

На северо-восточном континентальном склоне Сахалина (западный борт впадины Дерюгина) эхолотированием было выявлено 10 полей субмаринной разгрузки газа по газовым «факелам» в водной толще (см. табл. 1). Они обнаружены в интервале глубин 620-1040 м в относительно узкой зоне шириной менее 20 км, вытянутой с севера на юг почти на 130 км. Некоторые поля (например, №№ 2-3, табл. 1) расположены на расстоянии 0,5-1 км одно от другого и, возможно, имеют общий глубинный источник газа.

Район исследований находится вблизи нефтегазоносных площадей Сахалина и примыкающего к нему шельфа. Осадочный чехол мощностью до 6 км представлен главным образом кайнозойскими толщами [Геологическая карта..., 1986]. Вдоль западного борта впадины Дерюгина отмечается зона резкого снижения информативности сейсморазведочных материалов: на временных разрезах МОВ ОГТ отражающие горизонты почти не прослеживаются [Журавлев, 1984]. По данным среднечастотного НСП, выполненного в нашей экспедиции, можно с уверенностью предполагать наличие здесь многочисленных

субмеридиональных разломов, которые пересекают слабонаклоненные или субгоризонтально залегающие отложения, образуя зоны нарушений шириной порядка нескольких сотен метров (рис. 2).



2. Характеристика газогидратосодержащих интервалов грунтовых станций в Охотском море

Станция	Глубина моря, м	Гидратосодержащий интервал, м	Объемное гидратосодержание, % (визуальная оценка)	Влажность массовая, % после разложения гидратов	Состав воды, выделенной из гидратосодержащих интервалов					
					Хлорность, г/л	Eh, мВ	pH	Si, мМ	SO ₄ , мМ	NH ₄ , мМ
91-01-05	798	0,10—0,40	Не опр.	39,8	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.
91-01-07	802	0,30—0,80	»	Не опр.	15,6	-340	8,05	0,72	18	0,85
91-01-23*	800	0,30—0,80	»	»	15,6	-50	8,75	0,74	12	0,36
91-02-39	719	0,30—0,40	20—30	»	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.
91-02-40	708	0,95—1,95	35—40	66,2	12,6	-387	8,00	0,73	0	0,55
91-02-41	708	1,20—1,40	80—90	66,3	7,0	-280	8,06	0,47	0	0,61
91-02-42	710	1,00—1,20	50—60	Не опр.	11,2	-330	8,32	0,44	4	0,24
91-02-44	708	0,70—1,60	30—40	65,1	15,9	-290	8,20	1,00	0	3,00
91-02-51*	643	1,65—1,85	Не опр.	50,0	20,0	80	7,85	0,69	0	1,10

Примечание. Звездочками отмечены станции, на которых гидраты предполагаются в указанных интервалах по характерному выделению газа, понижению температуры в керне ниже пластовой или по опреснению поровой воды; Eh измерено по отношению к потенциалу хлор-серебряного электрода.

реакции разложения гидратов. Кроме того, на этой станции во всем интервале 125-250 см керн носил следы воздействия газа, а выше присутствовали карбонатные конкреции и выполненные карбонатами трубочки полихет.

В кернах других станций на этих полях разгрузки также наблюдались карбонатные конкреции и газосодержащие горизонты. Другой косвенный признак присутствия гидратов - уменьшение хлорности поровой воды с глубиной от 19,0 до 18,2 г/л при соответствующем увеличении влажности от 45,6 до 52,5% (рис. 4. ст. 91-02-53).

Вместе с тем, на ряде станций хлорность с глубиной возрастала (ст. 91-02-51, 57), достигая 22,5 г/л. Это, вероятно, связано с концентрацией солей в поровой воде за счет гидратообразования в смежной части разреза. Такой вывод следует также из анализа характера распределения пропана в остаточных газах. Отношение метан/пропан уменьшается в интервалах, где возрастает хлорность и увеличивается, где она не растет (см. рис. 4). Известно, что пропан образует гидраты только структуры II [Sloan, 1990]. Поэтому можно предполагать, что газ с пониженным отношением метан/пропан является остаточным после образования гидратов структуры I. Таким образом, увеличение хлорности поровой воды и уменьшение отношения метан/пропан с глубиной на станциях 91-02-51, 57 могут свидетельствовать о гидратообразовании в смежной части разреза.

На исследованных полигонах (Припарамуширском и Присахалинском) глубина моря 600-1000 м, давление 6-10 МПа и температура у дна соответственно 2,2-2,3°C и 1,7-2,2°C обуславливают благоприятные для образования гидратов термобарические условия до некоторой глубины ниже дна в зависимости от геотермического градиента. В условиях конвективного теплопереноса, связанного с разгрузкой газа, геотермический градиент может быть малым. Учитывая это, а также присутствие свободного газа, следует заключить, что на всех исследованных площадях, где газ выделяется на дне (см. табл. 1), должны существовать гидраты. Можно полагать, что нижняя граница гидратосодержащей зоны определяется в первую очередь значением геотермического градиента, а верхняя граница (глубина ниже дна) - интенсивностью потока газа: чем она выше, тем на меньшей поддонной глубине могут образовываться и сохраняться гидраты.

Характеристика гидратосодержащих интервалов грунтовых станций обоих полигонов дана в табл. 2. Анализ поровой воды выявил более низкую концентрацию хлор-иона в гидратоносных образцах. Это - результат добавления к соленой поровой воде, сосуществовавшей с гидратами, пресной воды, выделившейся из разложившихся гидратов. Обращает на себя внимание отрицательная корреляция между содержанием в воде хлора и оценкой содержания гидратов в породе. Газ,

выделившийся при разложении гидратов, имел преимущественно метановый состав (табл. 3).

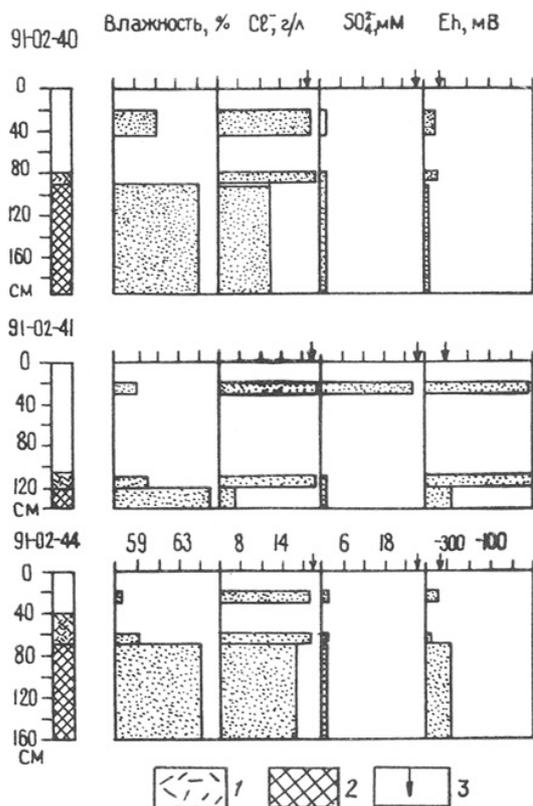


Рис. 3. Характеристика гидратосодержащих кернов, станции 91-02-40, 41, 44 (поле № 2):

1 — газосодержащие интервалы; 2 — гидратосодержащие интервалы; 3 — концентрации ион-хлора, сульфатов и значение Eh в придонной воде

Итак, скопления газовых гидратов, связанные с очагами субмаринной разгрузки газа, характеризуются малой поддонной глубиной, значительной гидратонасыщенностью, линзовидно-слоистой субгоризонтальной гидратной текстурой, ассоциацией с выделениями карбоната кальция, большим содержанием воды в гидратосодержащих интервалах по сравнению с вышележащими осадками.

В пробах придонной воды, отобранных батометрами вблизи очагов субмаринной разгрузки, наблюдается повышенное содержание растворенных газов, в частности метана. Так, в районе поля 2 (см. табл. 1) при фоновом объемном метаносодержании около $4 \cdot 10^{-6}$ л/л вблизи центра «факела» зафиксировано значение $282 \cdot 10^{-6}$ л/л, а на расстоянии около 150 м от края «факела» - $56 \cdot 10^{-6}$ л/л.

Рассмотрим модель субмаринного гидратообразования в условиях восходящего потока свободного газа, увязывающую все наблюдаемые особенности в исследованных гидратопроявлениях.

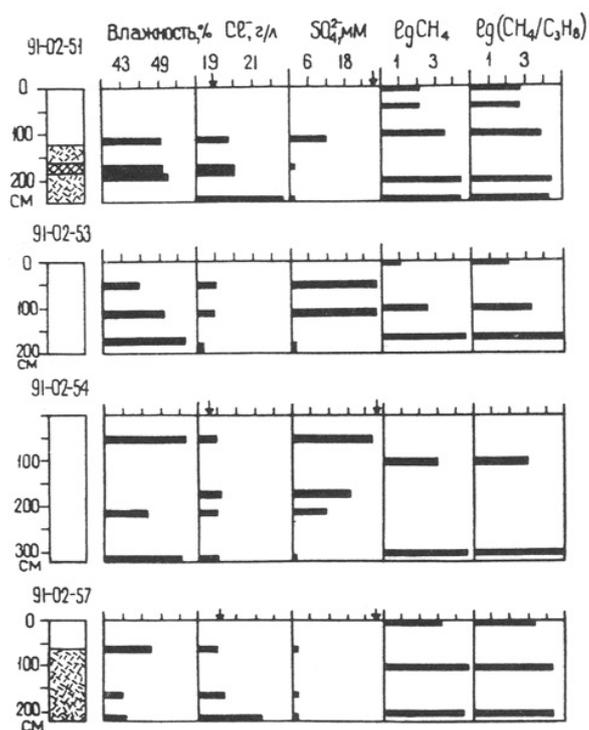


Рис. 4. Характеристика кернов, станций 91-02-51, 53, 54 (поле № 6) и 91-02-57 (поле № 8):

усл. обозн. см. рис. 3

Известно, что гидраты могут осаждаться на фазовой границе «вода-газ» и (или) из газонасыщенной воды. Мы считаем второй процесс преобладающим, хотя газонасыщенность воды, конечно, обусловлена потоком свободного газа. Очевидно также, что газонасыщенная зона существует вокруг потока благодаря диффузии. И именно диффузия растворенного метана обеспечивает образование гидратов. Форма и размеры газонасыщенной зоны зависят от структуры поля диффузионной проницаемости, определяемой геологической структурой и концентрацией растворенного метана на характеристических границах. Концентрация метана очень низка в придонной морской воде и в поддонной зоне сульфатредукции из-за процессов окисления. Поэтому наиболее значительный градиент концентрации метана, очевидно, будет непосредственно ниже зоны сульфатредукции. Этот градиент определяет субвертикальный диффузионный поток растворенного метана, ответственный за накопление гидратов.

Положение фронта гидратообразования контролируется поверхностями концентрации метана, которые, по крайней мере непосредственно в области вертикального потока газа, задаются положением дна.

Как только гидраты начинают образовываться, соленость остаточной воды

3. Состав газа, выделившегося при разложении гидратов, %

№ станции	CO ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	He, $n \cdot 10^{-4}$
91-01-07*	0,05	1,9	24,0	73,9	<0,03	5,7
1395-Г2**	0,089	—	1,61	97,8	0,045	He опр.
91-02-40	0,61	0,29	3,3	95,6	<0,03	4,6
92-02-42	2,96	<0,02	<0,02	97,04	<0,03	4,4

* При отборе образцов гидратов использовался жидкий азот;

** По данным экспедиции на НИС «Академик Мстислав Келдыш» [8]

вблизи их зародышей возрастает. Это препятствует аккумуляции гидратов и одновременно вызывает диффузию солей из зоны гидратообразования и поток чистой воды в эту зону. Таким образом поровая вода из безгидратной зоны мигрирует в зону гидратообразования. Можно полагать, что и морская вода также мигрирует вниз, восполняя дефицит поровой воды, переходящей в структуру гидрата, в условиях ее постоянного насыщения растворенным метаном. В этом случае гидратосодержание в осадках может существенно превысить то количество гидратов, которое лимитируется естественной «стационарной» влажностью. Без учета тепловых эффектов рост гидратоносной зоны зависит от движения растворенного газа, растворенной соли и воды. В определенных условиях (неравномерное по скорости осадконакопление, пульсация мощности потока газа или превышение скорости образования гидратов над скоростью миграции воды в зону их формирования) фронт гидратообразования может перемещаться вверх скачкообразно, чем и объясняется наблюдаемая слоистая текстура.

Таким образом, в результате проведенных экспедиционных исследований в Охотском море обнаружены и изучены новые гидратопроявления, связанные с субмаринной разгрузкой флюидов. Широкое распространение полей разгрузки газа на северо-восточном континентальном склоне Сахалина позволяет рассматривать этот регион как крупную газогидратоносную область. Нахождение гидратов на малой поддонной глубине и их площадное распространение делают этот регион очень удобным полигоном для дальнейшего детального исследования особенностей субмаринного газогидратообразования.

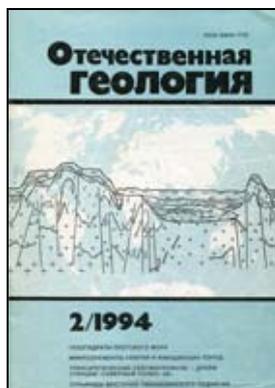
Авторы выражают благодарность за помощь в организации и проведении экспедиционных работ руководству АНПО «Тихоокеанские морские технологии», сотрудникам ПО «Дальморгеология», экипажу судна «Геолог Петр Антропов». Мы признательны также руководителям геологических служб Канады и США, сделавшим возможным участие в рейсе их сотрудииков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондаренко В.И., Надежный А.М. Акустические неоднородности осадочного чехла в районе подводного газогидротермального выхода у о-ва Парамушир // Вулканология и сейсмология. 1987. № 2. С. 100-104.
2. Геологическая карта Дальнего Востока СССР и прилегающих акваторий м-ба 1:500 000 / Под ред. Л.И. Красного, В.К. Путинцева, Б.И. Васильева, 1986.
3. Гинсбург Г.Д., Грамберг И.С., Соловьев В.А. [Геология субмаринных газовых гидратов](#) // Советская геология. 1990. № 11, С. 12-19.
4. Гинсбург Г.Д., Соловьев В.А. Геологические модели газогидратообразования // Литология и полезные ископаемые. 1990. № 2. С. 76-87.
5. Журавлев А.В. Сравнительная характеристика впадин Дерюгина и Тинро Охотского моря // Тихоокеанская геология. 1984. № 1. С. 21-27.
6. Надежный А.М., Бондаренко В.И. Газовые гидраты в прикамчатско-припарамуширской части Охотского моря // Докл. АН СССР. 1989. Т. 306. № 5. С. 1192-1196.
7. Авдейка Г.П., Гавриленко Г.М., Черткова Л.В. и др. Подводная газогидротермальная активность на северо-западном склоне о. Парамушир (Курильские острова) // Вулканология и сейсмология. 1984. № 6. С. 66-81.
8. Зоненшайн Л.П., Мурдмаа И.О., Баранов Б.В. и др. Подводный газовый источник в Охотском море к западу от о-ва Парамушир // Океанология. 1987. Т. XXVII. Вып. 5. С. 795-800.

9. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project. Vol. 76, Washington D. C, U. S. Government Printing Office, 1983.
10. Sloan E.D. Clathrate Hydrates of Natural Gases. Marcel Dekker Inc., New-York, 1990.

Ссылка на статью:



Соловьев В.А., Гинсбург Г.Д., Дуглас В.К., Кренстон Р., Лоренсон Т., Алексеев И.А., Баранова Н.С., Иванова Г.А., Казаев В.П., Лобков В.А., Маширов Ю.Г., Наторхин М.И., Обжиров А.И., Титаев Б.Ф. Газовые гидраты Охотского моря, результаты 21 рейса НИС «Геолог Петр Андропов» // Советская геология. 1994. № 2. С. 10-17.