

УДК 552.578+550.834+550.361 (265.53)

О.В. Веселов<sup>1</sup>, В.В. Гордиенко<sup>2</sup>, В.В. Куделькин<sup>3</sup>

## ТЕРМОБАРИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ГАЗОГИДРАТОВ В ОХОТСКОМ МОРЕ

*Представлено описание газовых гидратов в донных отложениях Охотского моря, выявленных геологическими и геофизическими методами. Проведена оценка мощностей гидратсодержащих толщ, выделены зоны стабильности гидратов в зависимости от термобарических условий и состава газа. Сделан вывод о полигенетическом характере охотскоморских газогидратов.*

**Введение.** В связи с истощением в обозримом будущем запасов традиционных месторождений углеводородных источников энергии возрастает актуальность более точного научного прогноза и совершенствования методов поиска нетрадиционных видов минерального топлива. В последнее десятилетие особое внимание обращено на природные газы, находящиеся в верхней части земной коры в гидратном состоянии. В статье приведены в кратком виде результаты изучения газовых гидратов (ГГ) в осадочной толще Охотского моря.

**Сейсмические данные.** Первые признаки присутствия газовых гидратов в донных отложениях Охотского моря были выявлены ещё в 80-е годы при интерпретации сейсмических материалов МОВ ОГТ, полученных ФГУП «Дальморнефтегеофизика». Их анализ позволил выявить аномально высокоамплитудные параллельные дну отражения (BSR) в верхней части осадочного чехла на склонах Южно-Охотской, Дерюгина и ТИНРО впадин и в системе прогибов центральной части моря при его глубинах более 400–500 м. Положение сейсмических профилей МОВ ОГТ, на фрагментах которых идентифицирована подошва зоны газовых гидратов, представлено на рис. 1. Сейсмическими исследованиями других организаций также выявлены BSR на участках моря, расположенных к западу и северо-западу от о-ва Парамушир [12] и севернее о-ва Хоккайдо [17, 18] (рис. 1).

На временных разрезах положение аномалии BSR ниже поверхности дна изменяется в масштабе двойного времени пробега сейсмической волны от 0,4 до 0,8 с, в основном. — от 0,5 до 0,7 с. На сеймотрассах видны обращённые фазы отражений, BSR занимают секущее положение по отношению к слоистости там, где она не горизонтальна. Скоростное моделирование позволяет интерпретировать аномалии BSR как фазовую границу между гидратами и свободным газом, так как на границе прослеживается характерное для BSR изменение параметров сейсмической записи, описанное

© О.В. Веселов<sup>1</sup>, В.В. Гордиенко<sup>2</sup>, В.В. Куделькин<sup>3</sup>:

<sup>1</sup> Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск.

<sup>2</sup> Институт геофизики НАН Украины, Киев.

<sup>3</sup> ОАО «Дальморнефтегеофизика», Южно-Сахалинск.

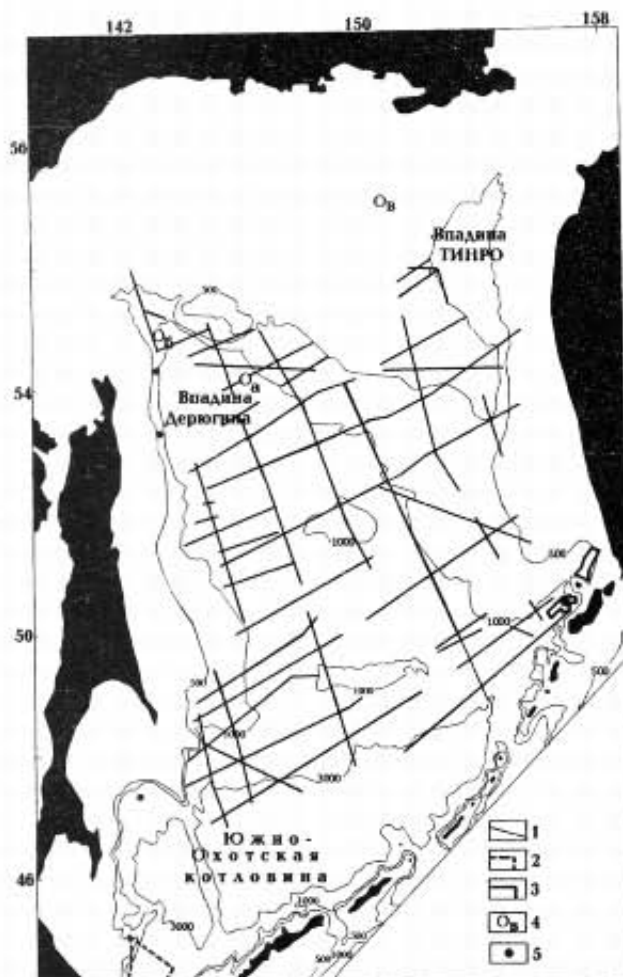


Рис. 1. Расположение профилей МОВ ОГТ, на фрагментах которых выявлены газогидратные BSR 1 — данные ФГУП «Дальморнефтегеофизика», 2, 3 — границы участков исследований (2 — по [17, 18], 3 — по [12]), 4 — пункты, в которых построены скоростные разрезы (рис. 2), 5 — пункты обнаружения ГГ в грунтовых пробах

в ряде работ [19, 20 и др.] и наблюдаемое как инверсия скорости ниже аномального BSR (рис. 2). При скоростном анализе сейсмотрасс в пределах газогидратных слоев выявляется ещё один эффект, выражающийся в инверсии полярности BSR относительно полярности отражения от дна. Для подчеркивания отличия газогидратных BSR (пункты Oa и Ob на рис. 1) от параллельных дну отражений иного происхождения на рис. 2 приведён результат скоростного анализа по сейсмической трассе в Магаданском прогибе (пункт Ob на рис. 1) на участке распространения диагенетической границы, обусловленной переходом опала-А в опал-КТ. Природа этой границы подтверждена данными параметрического бурения. Видно, что граница преобразования опала залегает на глубинах, в два раза превышающих глубины подошвы газогидратных слоев во впадине Дерюгина. При этом на наблюдаемой диагенетической границе не происходит инверсии полярности отражения и отмечается существенное увеличение скорости [2] (рис. 2).

Сейсморазведочные данные послужили структурной основой для построения термобарических моделей гидратных BSR в Охотском море.

**Данные опробования.** Со второй половины 80-х годов появились первые сообщения о находках газовых гидратов при отборе грунтовых колонок со дна Охотского моря. В рейсе 11-А НИС «Академик Мстислав Келдыш» (1986 г.) северо-западнее о. Парамушир были подняты грунтовыми трубками колонки осадков, содержащих гидраты. Эти станции находились в районе активного просачивания через дно гидротерм, проявляющихся на эхолотных записях в виде «факелов» [1]. В водной толще «факелов» выявлено повышенное содержание растворённых водорода, метана, кремниевых кислот и т.п., что оценивалось авторами [1] как проявление гидротермальной разгрузки через дно. С помощью подводных обитаемых аппаратов в местах газовых выходов наблюдались воронки диаметром 1–1,5 м, на стенках которых, а также на пологом грунте местами отмечались карбонатные корки в виде пла-

стин и кавернозных желваков диаметром до 20 см [7].

Придонная вода в пределах газового источника имеет температуру около 2,4 °С. Гидраты подняты на двух станциях. На первой извлечена колонка ила в нижней части с пластиной монолитного, снежно-белого гидрата толщиной 2 см. Содержание метана в ней составило 97,8%, этана — 0,04%, двуокиси углерода — 0,09% [11]. На второй станции слой с тонкими пластинками гидратов заполнял призабойный интервал в 20 см. Отложения, содержащие гидраты, состоят из чёрных кремнистых диатомово-вулканокластических алевроитовых илов с тонкими прослойками алевроитов и насыщены сероводородом.

По сообщению В.В Соина (ИМГиГ ДВО АН СССР) в 1988 г. в 14-м рейсе НИС “Академик Несмеянов” в полосе профиля ГСЗ 1-М на северо-западном склоне Южно-Охотской впадины была поднята колонка мелкоалевритового ила с газовыми гидратами в нижней части. Цементированный гидратами ил быстро распался на открытом воздухе с выделением газа, имеющего запах ацетилена. Температура придонной воды не превышала 1,8 °С.

В 1991 г. сотрудниками ВНИИОкеангеологии на НИС “Геолог Павел Антропов” проведен поиск гидратопроявлений [4 и др.] западнее о. Парамушир, где ранее был выявлен “факел”. ГГ обнаружены на западной периферии поля субмаринной разгрузки газа. Они представлены уплотненными обломками в алевролитах с карбонатными корками на придонных глубинах. В газе преобладает метан. На ряде других станций наблюдались признаки гидратов, в частности, повышенное содержание хлора в поровой воде и её опреснение. Тепловой поток (ТП) в этом районе понижен.

В этом же рейсе при эхолотировании на западном склоне впадины Дерюгина были обнаружены по газовым “факелам” в водной толще десять полей субмаринной разгрузки газа. Эти поля распределены в пределах довольно узкой полосы субмеридионального простирания шириной не более 20 км и длиной до 180 км. Глубина дна в пределах полосы изменяется от 620 до 1040 м, температура придонной воды от 1,7 до 2,2 °С. Этот участок дна на западном склоне впадины Дерюгина в плане совпадает с зоной глубинных разломов.

На шельфе северо-восточнее Сахалина установлены три поля субмаринной разгрузки газов. На одном из них в диатомовых илах выявлены гидратсодержащие слои мощностью 10–100 см с глубиной кровли 30–120 см. В грунтовых колонках полей, расположенных примерно в 120 км южнее, существование гидратов предполагается по характерному выделению газа, понижению температуры в керне ниже пластовой или по опреснению поровой воды. Газ, выделявшийся при разложении гидратов, имел преимущественно метановый состав.

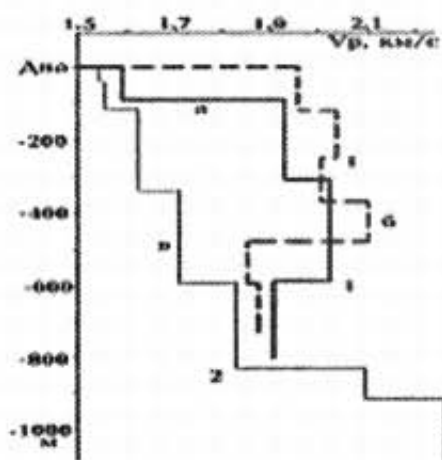


Рис. 2. Результаты скоростного анализа сейсмотреасс в пунктах а, б и в  
1 — BSR, 2 — диагенетическая граница  
опал-А — опал — КТ

Тепловой поток на полях понижен. Возможно, это связано с поглощением тепла при разложении ГГ – 420–500 кДж/кг [10]. Не исключено, что этим эффектом вызвано появление участков с низким тепловым потоком на фоне высокого ТП в Охотском море. Такие участки зарегистрированы вдоль западного борта впадины Дерюгина и у юго-западного берега Камчатки [6]. Этот геотермический феномен может служить дополнительным (по отношению к сейсмическим данным) критерием поисков газогидратов.

**Геотермические данные.** Определения температуры (Т) для термобарической характеристики слоя выше BSR, на подошве слоя газогидратов выполнены следующим образом.

$$T_{BSR} = T_0 + \sum (ТП_i - 0,5ТГ_i \cdot h_i) h_i / \lambda_i,$$

где:  $T_0$  — температура дна ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $ТП_i$  — ТП на кровле  $i$ -го слоя ( $\text{мВт}/\text{м}^2$ ),  $ТГ_i$  — радиогенная теплогенерация в  $i$ -том слое ( $\text{мкВт}/\text{м}^3$ ),  $\lambda_i$  — теплопроводность пород  $i$ -го слоя ( $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$ );  $h_i$  — мощность  $i$ -го слоя (м).

Сведения о распределении ТП в Охотском море взяты из работ [6, 9 и др.]. Теплопроводность каждого слоя осадочной толщи определялась по графику зависимости  $\lambda$  от глубины. Так как экспериментальные данные показывают, что в большинстве определений теплопроводность растет от 0,75–1,05 у поверхности дна до 1,4–1,65  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  на предельных глубинах подошвы слоя газовых гидратов, то для ее прогнозирования можно использовать эмпирическую зависимость от мощности газогидратов ( $h_g$ , м), предложенную в работе [5]:

$$\lambda = 1,05 + 0,001h_g.$$

При обычных величинах ТП в Охотском море  $80 \pm 30 \text{ мВт}/\text{м}^2$  и мощностях слоя ГГ в несколько сотен метров теплогенерация не играет заметной роли в результатах расчета  $T_{BSR}$ .

Давление на нижней границе слоя газовых гидратов вычисляется как сумма давления воды и осадков, средняя плотность которых оценена как 1,8–1,9  $\text{г}/\text{см}^3$ . Более детально ее можно представить по графику связи плотности осадочных пород и скорости упругих волн в них или по усредненному графику зависимости плотности от глубины.

Расчёт термобарических условий на глубину аномалий BSR, выполненный для ряда сейсмотрасс (более 20 определений) показал, что подошва ГГ слоев в осадках Охотского моря характеризуется параметрами, несколько отличными от метановой фазовой диаграммы. При сопоставимых давлениях Т выше. В интервале давлений 120–450 атм. она находится в диапазоне 25–35  $^{\circ}\text{C}$ , что свидетельствует о существенной примеси к метановому гидрату компонент, формируемых за счёт гомологов метана, диоксида углерода или сероводорода (рис. 3). Сопоставление полученных результатов с данными лабораторных экспериментов по формированию гидратов из смесей метана с этаном в различных пропорциях [15] и сравнение с оценкой полей стабильности ГГ в южной части Каспийского моря подтверждают предположение о составе ГГ в Охотском море, об их явно катагенетическом происхождении в нижней части слоя и полигенетическом характере этих скоплений [3] (рис. 3).

Большая мощность гидратсодержащих толщ объясняется также очень низкими температурами (около  $2^{\circ}\text{C}$ ) придонного слоя воды в Охотском море. Не исключено, что структура газогидратного слоя Охотского моря аналогична предполагаемой в полярных районах Атлантики [16], где были выделены многослойные толщи газовых гидратов, свидетельствующие о диссоциации в многоэтажной гидратсодержащей толще. При этом вниз по разрезу в гидратсодержащих толщах происходит возрастание доли катагенетических газов-гидратообразователей, и положение фазовой границы диссоциации контролируется их высокой концентрацией в гидратоформирующей смеси. В Охотском море об этом свидетельствуют данные придонных газовых съёмок, многочисленные проявления газовых факелов [4, 8 и др.].

**Ресурсы газогидратов Охотского моря.** Проведена оценка зависимости зоны образования газогидратов в осадках моря от градиента температуры (типичные величины. — около  $70^{\circ}\text{C}/\text{км}$  в верхней части разреза и около  $50^{\circ}\text{C}/\text{км}$ . — в нижней), температуры дна, глубины моря и полей стабильности ГГ (рис. 4).

Для сравнения использована типичная для океанических условий ситуация на подошве метановых гидратов [13]. Видно, что подошвы слоя газогидратов в осадках Охотского моря при сопоставимых глубинах дна находятся ниже него на глубине примерно вдвое большей, чем BSR океанических метановых гидратов. Это свидетельствует о значительном потенциале газогидратов Охотского моря [3].

При оценке ресурсов метана в осадках Охотского моря площадь газосодержащей зоны определена в 100 тыс. км<sup>2</sup>, а ее мощность — минимум в 200 м. При реальном содержании газа около 0,1 объема [14] ресурсы метана составляют более  $2 \cdot 10^{12}$  м<sup>3</sup> (2,5 млрд т условного топлива)

**Выводы.** Довольно значительные ресурсы ГГ Охотского моря диктуют необходимость их дальнейшего изучения. Весьма важными являются воп-

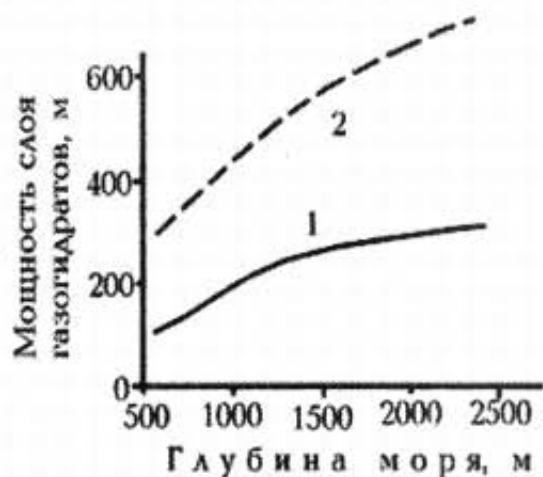


Рис. 3. Мощность слоя ГГ в зависимости от глубины моря

1 — для метановых гидратов океана, 2 — для гидратов Охотского моря

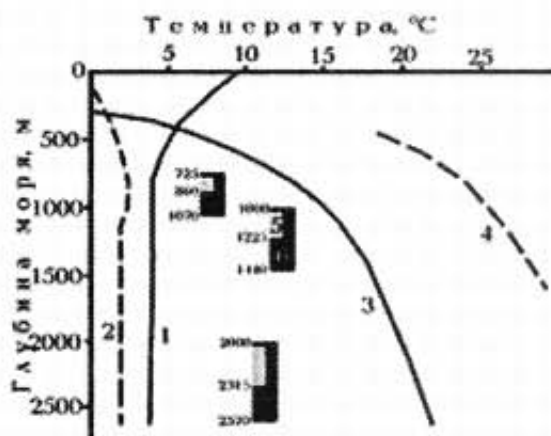


Рис. 4. Термобарические условия формирования слоев газогидратов

1, 2 — температуры придонной воды (1 — типичные для океана, 2 — в Охотском море), 3, 4 — температуры на подошве слоя ГГ (3 — метановых в океане, 4 — в Охотском море), 5, 6 — слои ГГ при глубине моря 725, 1000 и 2000 м (5 — метановых в океане, 6 — в Охотском море)

росы формирования газогидратных прослоев в зависимости от темпа осадконакопления, соотношения скорости поступления воды и газа в зоны гидратообразования, состава фильтрующихся катагенетических газов и т.д. Их решение возможно при детальном отборе проб осадков, как гидратсодержащих, так и перекрывающих, количественном определении в осадках соотношений воды, газа, гидратов углеводородов и их химических составов, гранулометрическом анализе осадков и определении физических свойств газогидратсодержащих пород в соответствующем диапазоне температур и давлений.

Непременным методом в комплексе геофизических исследований должны быть, помимо сейсмического, геотермические измерения, которые позволяют уточнять физико-химические модели формирования газовых гидратов, их стабилизации и диссоциации, а также динамику флюидной миграции. Температурные измерения необходимо проводить не только в осадках, но и в водной толще, рассматривая её как составную часть системы, включающей в себя гидратсодержащие осадки.

Не менее важны проблемы изучения гидратов как вероятного источника поступления метана в атмосферу, что может воздействовать на климат. Обращает на себя внимание проблема диссоциации гидратов на континентальных склонах, связанная с оползновыми процессами на бортах котловин и поднятий.

1. Авдейко Г.П., Гавриленко Г.М., Черткова Л.В. и др. Подводная газотермальная активность на северо-западном склоне о. Парамушир (Курильские острова) // Вулканология и сейсмология. — 1984. — №6. — С. 66–81.

2. Веселов О.В., Куделькин В.В. Гидраты Охотского моря и геофизические аспекты их выделения и картирования // Проблемы поисков энергетических носителей на рубеже 2-3 тысячелетий. — Южно-Сахалинск. — 2000. — С. 35–68.

3. Веселов О.В., Куделькин В.В., Чухонцев В.И. Особенности распространения и образования газовых гидратов в Охотском море // Строение земной коры и перспективы нефтегазоносности в регионах Северо-Западной окраины Тихого океана.1. — Южно-Сахалинск. — 2000. — С. 7–37.

4. Гинсбург Г.Д., Соловьев В.А. Субмаринные газовые гидраты. — Сб. ВНИИ-Океангеология. — 1994. — 199 с.

5. Гольмшток А.Я., Дучков А.Д., Хатчинсон Д.Р. и др. Оценки теплового потока на озере Байкал по сейсмическим данным о нижней границе слоя газогидратов // Геология и геофизика. — 1997. — 38, №10. — С. 1677–1691.

6. Гордиенко В.В., Андреев А.А., Биккенина С.К. и др. Тектоносфера Тихоокеанской окраины Азии. — Владивосток: ДВО РАН. — 1992. — 238 с.

7. 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. — 27. — С. 795–800.

8. Обжиров А.И., Астахова Н.В., Липкина М.И. и др. Газохимическое районирование и минеральные ассоциации дна Охотского моря. — Владивосток: Дальнаука. — 1999. — 184 с.

9. Соинов В.В., Веселов О.В., Кочергин А.В. и др. Тепловой поток Северо-Запада Тихого океана // Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Т.3. Геофизические поля и моделирование тектоносферы. — Южно-Сахалинск. — 1997. — С. 14–20.

10. Трофимук А.А., Черский Н.В., Царев В.П. Особенности накопления природных газов в зонах гидратообразования Мирового океана // Докл. АН СССР. — 1973. — 212 — №4. — С. 931–934.

11. *Черткова Л.В., Биличенко А.А., Стунжас П.А.* Обнаружение газогидратов метана в Охотском море // Тез. докладов III съезда советских океанологов.— Л.— 1987.— С. 172–173.
12. *Gaedicke C., Baranov B.V., Obzhirov A.I. et al.* Seismic stratigraphy, BSR distribution and venting of methane-rich fluids west off Paramushir and Onekotan Islands, northern Kurils // *Marine geology.*— 1997.— 136.— P. 259–276.
13. *Field M.E., Kvenvolden K.A.* Gas hydrates on the northern California continental margin // *Geology.*— 1985.— 13.— P. 513–520.
14. *Laberg J.S., Andreassen K., Knutsen S.-M.* Inferred gas hydrate on the Barents Sea shelf.— a model for its formation and a volume estimate // *Geo-Marine Letters.*— 1998.— 18.— P. 26–33.
15. *Maekawa T.* Equilibrium conditions of gas hydrate from mixtures of methane and ethane and outline of experimental apparatus for gas hydrate synthesis in porous sediment // *Bull. Geol. Surv. Japan.*— 1998.— 49 — №10.— P. 501–507.
16. *Mienert J., Posewang J.* Evidence of shallow and deep-water gas hydrate destabilizations in North Atlantic polar continental margin sediments // *Geo-Marine Letters.*— 1999.— 19 — №1/2.— P. 143–149.
17. *Okuda Y.* Natural gas hydrate // *J. Japan Soc. Energy and Resources.*— 1994.— 15 — №1.— P. 40–46.
18. *Okuda Y.* Introduction to exploration research on gas hydrates in Japan // *Bull. Geol. Surv. Japan.*— 1998.— 49.— №10.— P. 494–500.
19. *Shipley T.H., Houston M.H., Buffler R.T. et al.* Seismic reflection evidence for the widespread occurrence of possible gas hydrate horizons on continental slopes and rises // *Amer. Assoc. Petr. Geol. Bull.*— 1979.— 63.— P. 2204–2213.
20. *Stoll R.D., Bryan G.M.* Physical properties of sediments containing gas hydrates // *J. Geophys. Res.*— 1979.— 84.— №B4.— P. 1629–1634.

Надано опис газових гідратів, виявлених у донних відкладах Охотського моря геологічними та геофізичними методами. Проведено оцінку потужностей гідратовміщуючих товщ, виділені зони стабільності гідратів залежно від термобаричних умов і складу газу. Зроблено висновок про полігенетичний характер охотськоморських газогідратів.

A description of gas hydrates, revealed in bottom sediments of the Sea of Okhotsk by geological and geophysical methods was presented. Thickness of gas hydrate-bearing layers are estimated. Zones of hydrates stability were distinguished versus thermobaric conditions and gas composition. A conclusion was made on a polygenetic character of gas hydrates accumulations in the Sea of Okhotsk.