УДК 553.98

doi: 10.30730/2541-8912.2018.2.4.044-053

Изучение газогидратов Берингова моря с применением AVO-анализа

© 2019 В. В. Жигулев^{*}, А. В. Савицкий, А. В. Жигулев

Росгеология, ОАО «Дальморнефтегеофизика», Южно-Сахалинск, Россия *E-mail: zhvv@dmng.ru

Изложены результаты исследований газогидратов западного сектора Берингова моря. Показаны дополнительные возможности выделения на сейсмических разрезах ОГТ границы подошвы газогидрата с помощью привлечения данных скоростного и AVO анализа. Изучены особенности изменения динамики и кинематики отражений в газогидратном слое на участках, контактирующих с вертикальной эманацией газового флюида.

Ключевые слова: Берингово море, сейсморазведка, скоростной анализ, газогидраты, AVOатрибуты.

Study of Bering Sea gas hydrates with application of AVO-analysis

Vladimir V. Zhigulev^{*}, Alexander V. Savitsky, Alexander V. Zhigulev

Rosgeologia, JSC «Dalmorneftegeophysica», Yuzhno-Sakhalinsk, Russia *E-mail: zhvv@dmng.ru

The article describes results of gas hydrates studies in the western sector of the Bering Sea and additional ways of identification of gas hydrate lower limit in CDP sections using velocity analysis and AVO data. Peculiarities of changes in dynamics and travel time characteristics of reflections in gas hydrate layer were studied in the areas contacting with vertical emission of gas fluid.

Keywords: Bering Sea, seismic survey, velocity analysis, gas hydrates, AVO-attributes.

Введение

В связи с истощением в обозреваемом будущем углеводородных источников энергии возрастает актуальность совершенствования методов поиска нетрадиционных видов минерального топлива. В последнее время особое внимание обращено на природные газы, находящиеся в гидратном состоянии в придонной зоне акватории Мирового океана. Согласно теоретическим оценкам, запасы традиционного газа оцениваются примерно в 250 трлн т. В газогидратных залежах, которые содержат метан, газа как минимум в два раза больше. Если суммировать разведанные запасы нефти, газа и угля, то гидраты по перспективным запасам превосходят объем всех вместе взятых основных энергоносителей современной цивилизации (рис. 1). Именно поэтому разработку газогидратов называют перспективной технологией будущего.

В данной работе рассмотрены результаты применения некоторых методов обработки сейсмических данных при изучении газогидратов в западном секторе (Хатырский участок) Берингова моря (рис. 2).

Как известно, газогидрат – это вещество, в котором молекулы газа связаны в кристаллической решетке с молекулами воды с образованием структур, подобных льду; или это смесь воды и метана в различных концентрациях, способная при определенных термобарических условиях (например, t = 0; P = 25 атм) образовывать лед. При повышении температуры для образования газогидрата необходимо увеличение давления вышезалегающей воды. Поэтому глубинный диапазон залегания газогидрата в морях и океанах составляет 300–1200 м (30–120 атм). Из всех имеющихся дистанционных способов исследования для изучения газогидратов сейсмический метод является наиболее информативным, поскольку существует прямая связь между особенностями геологического строения зоны газогидратов и сейсмоакустическими параметрами в этой среде. Индикаторами наличия газогидратов на временных сейсмических разрезах могут быть аномальные изменения волновых сейсмических характеристик: амплитуда, частота, фаза, скорости продольных и поперечных волн и т.д. [Бочарова, 2013; Гинбург, Соловьев, 1994; Ampilov, 2010; Ampilov, Baturin, 2012; Bangs et al., 2011; Diaconesu et al., 2001; Frye et al., 2012; Sain et al., 2012; Sloan, Koh, 2007].

Основным сейсмическим признаком присутствия в осадочном разрезе газогидрата считается наличие на временных разрезах горизонта, образованного отражениями от подошвы газогидратного слоя. Его отличительными особенностями являются: субпараллельное рельефу морского дна простирание; пересечение под различными углами отражающих горизонтов литологических границ; высокая динамика отраженных волн (OB) и их полярность волнам, отраженным от кровли; значительно меньшая контрастность записи от горизонтов, залегающих внутри газогидратного слоя, чем от подстилающих слоев, т.е. газогидратный слой на сейсмических разрезах часто прослеживается как акустически более прозрачный интервал записи.

Залегание подошвенного горизонта, субпараллельное морскому дну, определяется в отечественной литературе как «повторяющее дно отражение», а в англоязычной как bottom simulation reflection (BSR).







Рис. 2. Обзорная схема района исследований (выделен красным прямоугольником).

Геосистемы переходных зон, 2019, т. 3, № 1, с. 044–053

На сейсмических разрезах глубина горизонта BSR обычно увеличивается с увеличением глубины моря. С расширением частотного диапазона излучающего сигнала улучшаются форма и частотный состав отражения от BSR. Характерным свойством гидратов и гидратонасыщенных пород является пониженная плотность (порядка 800–1240 кг/м³). Скорость прохождения сейсмических волн в чистом газогидрате составляет порядка 3300-3800 м/с. Однако скорости в осадочных породах, насыщенных газогидратами, для различных регионов мира варьируют в широком интервале: 1600-3500 м/с. При этом в газогидратах метана она равна 1600–1900 м/с. По экспериментальным данным, гидратообразование приводит к увеличению скорости продольных волн в несцементированных песках от 1850 до 2690 м/с, а в сцементированных гидратами породах – от 3000 до 3500 м/с [Thakur, Rajput, 2011]. На основе перечисленных критериев на полигоне исследований было выделено несколько локализованных участков газогидратов, залегающих на различных глубинах и приуроченных к различным структурным образованиям (рис. 3).

Газогидраты проявляются только в диапазоне глубин от ~550 до 2380 м, а их мощность варьирует от 210 до 507 м (рис. 4). При этом прослеживается прямая зависимость между увеличением глубины и возрастанием мощности газогидратного слоя.

Таким образом, выделение BSR на сейсмических разрезах не вызывает особых затруднений, когда в волновом поле наблюдается их сечение с литологическими границами (рис. 5а). Однако при их субпараллельном залегании (рис. 5б) выделить подошву газогидратного слоя достаточно сложно.

В этом случае можно воспользоваться скоростными характеристиками газогидратов. На рис. 6 приведен скоростной разрез, полученный по профилю КН0653_m, где на графике средних и интервальных скоростей (правая



Рис. 3. Схема сейсмических профилей с участками газогидратов (цветные фрагменты), выделенных на основных структурных элементах. 1 – Корякско-Алеутский прогиб, 2 – Аниваямская складчато-блоковая зона, 3 – поднятие Ровное, 4 – Внешний прогиб.

часть рисунка) отчетливо видно, что газогидратная толща соответствует повышенным значениям интервальной скорости до 1700 м/с, после чего скорость понижается до 1550 м/с.

Более детальный скоростной анализ для этого же фрагмента с расчетом спектра ско-

ростей для участка субпараллельного залегания границы BSR с литологическими горизонтами и для участка их сечения приведен на рис. 7 и 8.

Как видно из рис. 7, на обоих участках газогидратная толща проявляется повышенными



Рис. 5. Граница BSR на временном разрезе в случае сечения границ (а) и субпараллельного залегания (б).



Рис. 6. Скоростной разрез по профилю КН0653_т.

Геосистемы переходных зон, 2019, т. 3, № 1, с. 044–053



Рис. 7. Проявления газогидратной толщи на временном разрезе ОГТ (а), в скоростных характеристиках (б), на суммотрассе ОГТ (в) и атрибут интерцепта (г) при субпараллельном залегании слоев и BSR (слева) и при секущем залегании слоев и BSR (справа). ПН – пункт наблюдения.

значениями интервальных скоростей относительно покрывающей водной толщи и подстилающих отложений.

В некоторых случаях наблюдается резкое понижение скорости под BSR, ее значение может быть даже меньше, чем в водной толще, что дает основание говорить о наличии здесь газовых включений. Чтобы определить, чем конкретно обусловлены аномально низкие скорости в породах ниже границы BSR и связано ли это с накоплением газовых УВ на различных участках полигона, мы проанализировали динамические характеристики сейсмических сигналов, применяемых в методе AVO (amplitude versus offset). В основе данного метода лежит свойство ОВ изменять свою амплитуду и полярность в зависимости от величины угла падения на границу, разделяющую среды с различными петрофизическими и коллекторскими свойствами. В качестве основных параметров при AVO-анализе использовали атрибуты интерцепта (I), градиента (G) и флюид-фактора (ΔF), рассчитываемые с помощью специализированных программ в системе Promax.

Атрибут I рассчитывается для получения информации об амплитуде и полярности ОВ вблизи пункта взрыва (при нормальном падении луча), что позволяет стратифицировать разрез по акустической жесткости (акустическому импедансу). Необходимость его применения вызвана тем, что для решения динамических задач нельзя использовать отдельные сейсмотрассы ОГТ, поскольку они представляют собой суммарную сборку множества трасс (суммотрассы), образованных сейсмическими лучами с различными углами подхода к отражающей границе, тем самым кардинально искажая динамические параметры OB. При расчете же атрибута I используются только сейсмотрассы, фиксируемые вблизи пункта излучения (при угле падения луча близком к нулю). Атрибут G показывает характер изменения магнитуды ОВ в зависимости от угла падения, служит предварительным индикатором присутствия в разрезе УВсодержащих коллекторов различного класса. Атрибут ΔF , определяемый как весовая функция, отображающая степень насыщенности разреза углеводородами, дает возможность дифференцировать УВ-содержащие и водосодержащие коллекторы, исключая последние из дальнейшего расчета. При благоприятных условиях (достаточной разрешающей способности) использование этого атрибута позволяет выделять горизонты кровли и подошвы исследуемого пласта [Воскресенский, 2001; Козлов, 2006; Veeken, 2007].

По параметру I установим характер поведения продольных волн, отраженных от границ газогидратов, расположенных на участках сечения BSR литологических границ и на участках их субпараллельного залегания. Как видно из рис. 7, динамика отражений от кровли газогидрата обоих участков практически не различается, отражения характеризуются невысокой амплитудой положительной полярности. Вызывает интерес динамика OB от границы подошвы газогидратного слоя. Как на участке сечения границ, так и на участке субпараллельного залегания амплитуда этих волн по сравнению с отражениями от кровли увеличивается примерно в 3 раза (порядка 10 дБ), а полярность меняется с положительной на отрицательную. Таким образом, газогидратная толща отмечается повышенной акустической жесткостью (импедансом) по отношению к вмещающей среде (вышезалегающим водным слоям и подстилающим осадкам). При этом на границе кровли (вода - поверхность газогидрата) перепад жесткости менее контрастный, чем на границе подошвы (газогидрат – подстилающие осадочные отложения), что подтверждает предположения, полученные по скоростному анализу, о наличии газового флюида непосредственно под BSR.

Проведем проверку полученных данных с помощью расчетов коэффициентов отражения и прохождения, используя скоростные и плотностные параметры слоев, а также зарегистрированные амплитуды OB от кровли и подошвы газогидрата. Расчет коэффициентов отражения сейсмических волн проводился при условии нормального падения луча на границе вода – поверхность газогидрата, подошва газогидрата – подстилающие осадки, поверхность газогидрата – вода. Для расчета коэффициента прохождения используются границы раздела вода – поверхность газогидрата и поверхность газогидрата – вода. На рис. 8 показана схема прохождения сейсмических лучей, траектории которых, для на-



Рис. 8. Схема прохождения падающего и отраженного лучей от кровли и подошвы газогидрата.

глядности восприятия, изображены при наклонном (не нулевом) угле падения.

При нормальном падении луча коэффициент отражения определяется как отношение отраженной волны к падающей. В нашем случае это Ko₁ = A₁₁ / A₁, где Ko₁ – коэффициент отражения от границы вода–газогидрат, A₁ – амплитуда падающей волны, A₁₁ – амплитуда отраженной волны.

По физическим параметрам коэффициент отражения рассчитывается по формуле

 $Ko_{1} = (\rho_{2}V_{2} - \rho_{1}V_{1}) / (\rho_{2}V_{2} + \rho_{1}V_{1}),$

где ρ_1 , V_1 и ρ_2 , V_2 – плотность и скорость в воде и газогидрате соответственно.

Находим амплитуду падающей волны: $A_1 = A_{11} / Ko_1$.

Из формулы коэффициента прохождения через границу раздела вода–газогидрат

 $K\pi_1 = A_{12}/A_1; K\pi_1 = 2\rho_1 V_1/(\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1)$ определяем амплитуду проходящей волны: $A_{12} = A_1 \cdot K\pi_1.$

Находим коэффициент отражения от раздела газогидрат – осадочные отложения:

Ко₂ = $A_{22}/A_{12} = (\rho_3 V_3 - \rho_2 V_2)/(\rho_3 V_3 + \rho_2 V_2)$, где ρ_3 и V₃ – плотность и скорость в осадочных отложениях под газогидратом.

Рассчитываем амплитуду волны (A_{22}) , отраженной от раздела газогидрат – подстилающие осадочные отложения: $A_{22} = Ko_2 \cdot A_{12}$.

Из формулы коэффициента прохождения через границу газогидрат-вода

 $K\pi_2 = A_{21}/A_{22}; K\pi_2 = 2\rho_2 V_2/(\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1)$ находим амплитуду проходящей волны: $A_{21} = K\pi_2 \cdot A_{22}.$

Для расчета берем скорости из графика скоростного анализа, плотности по литературным источникам, а амплитуды ОВ – по



Рис. 9. Значение амплитуды волны, отраженной от BSR, рассчитанное по атрибуту интерцепта.

результатам AVO-анализа в относительных единицах. Подставляем в формулу физические параметры: $V_1 = 1470 \text{ м/c}$; $V_2 = 1700 \text{ м/c}$; $V_3 = 1500 \text{ м/c}$; $\rho_1 = 1 \text{ кг/м}^3$; $\rho_2 = 1.2 \text{ кг/м}^3$; $\rho_3 = 0.9 \text{ кг/м}^3$.

Рассчитываем следующие параметры:

 $\begin{aligned} &\text{Ko}_1 = (1700 \times 1.2 - 1470 \times 1) / (1700 \times 1.2 + \\ &+ 1470 \times 1) = 570/3510 = 0.16; \\ &\text{A}_1 = 66\ 637/0.16 = 416\ 481; \\ &\text{K}\Pi_1 = 2 \times 1470/(1700 \times 1.2 + 1470) = \\ &= 2940/3510 = 0.83; \\ &\text{A}_{12} = 0.83 \times 416\ 481 = 345\ 679; \\ &\text{Ko}_2 = (1500 \times 0.9 - 1700 \times 1.2) / (1500 \times 0.9 + \\ &+ 1700 \times 1.2) = -0.2; \\ &\text{A}_{22} = -0.2 \times 345\ 679 = -69\ 135; \\ &\text{K}\Pi_2 = 2 \times 1700 \times 1.2/(1700 \times 1.2 + 1470 \times 1) = \\ &= 4080 \times 3510 = 1.16; \end{aligned}$

 $A_{21} = -1.16 \times 69\ 135 = -80\ 196.$

Полученная величина амплитуды волны, отраженной от BSR, показывает хорошее совпадение с рассчитанной в программе Promax для атрибута интерцепта. Как показано на рис. 9, ее значение составляет –83 007.5, что свидетельствует о корректности проведенных расчетов.

Отражение от горизонта BSR демонстрирует аномально высокую амплитуду с одновременной инверсией полярности (по отношению к отражениям от кровли газогидрата). Эти признаки совместно с вышеприведенными скоростными параметрами указывают на аномально низкие значения акустической жесткости пород, подстилающих газогидратную толщу (возможно, даже меньше, чем в водном слое). Полученные данные убедительно свидетельствуют о наличии газового флюида непосредственно под BSR, что подтверждается результатами расчета градиента (G) и флюид-фактора (ΔF) (рис. 10). Следует отметить, что атрибут градиента проявился положительной аномалией, это не характерно для наиболее распространенных типов УВсодержащих коллекторов: у них этот параметр выражается отрицательной аномалией. Однако подобный характер поведения динамики OB (отрицательная полярность при положительном градиенте) соответствует редко встречаемому типу низкоимпедансных коллекторов в случае, когда скорость поперечных волн коллектора ниже значений этих же скоростей в покрывающем слое. Например, когда плотная непроницаемая масса флюидоупора, а в нашем случае газогидратный слой покрывает газосодержащие породы.

Таким образом, применение скоростного и AVO-анализа позволяет достаточно надежно



Рис. 10. Проявление BSR на разрезе ОГТ, в скоростных характеристиках и AVO-атрибутах интерцепта (I), градиента (G) и флюид-фактора (ΔF).



Изучение газогидратов Берингова моря с применением AVO-анализа

Рис. 11. Изменение волновых характеристик BSR и внутри газогидратного слоя на разрезах ОГТ и атрибут AVO: а – при прохождении газового флюида сквозь газогидратную толщу, б – на контакте BSR с газовым флюидом, в – при внедрении газового флюида в газогидратную толщу.

обнаруживать границу BSR даже в случае ее маскирования отражениями от литологических границ при их согласном залегании, а также исследовать подстилающие породы на предмет содержания УВ-флюидов.

Поскольку в пределах исследуемого района отмечается множество участков проявления вертикальной эманации газового флюида, так называемые газовые столбы (ГС), имеется уникальная возможность использовать методику AVO-анализа для изучения особенностей внутреннего строения газогидратов на участках их взаимодействий с ГС.

На рис. 11а представлен фрагмент временного разреза ОГТ совместно с разрезами AVO на участке, где ГС насквозь пересекает газогидратную залежь с выходом флюида в покрывающий водный слой. Здесь по всем атрибутам отчетливо наблюдается полное исчезновение BSR, тогда как на временном разрезе эта граница прослеживается на всем протяжении (включая участок контакта с ГС) непрерывными отражениями уверенной корреляции. В то же время на некотором удалении от зоны контакта непосредственно под BSR отмечаются высокоамплитудные аномалии AVO, указывающие на присутствие УВ-флюидов. Внутри самой газогидратной толщи заметных волновых возмущений не фиксируется.

Несколько иная картина наблюдается на участках, где ГС контактирует с подошвой газогидратной толщи, не проникая внутрь (рис. 11б). В этом случае граница BSR по атрибуту I не исчезает над ГС (ПВ 5790–5700), а только меняет свои характеристики. Полярность ОВ с отрицательной меняется на положительную, что означает переход сейсмического луча из слоя с меньшей в слой с большей акустической жесткостью. По атрибутам G и Δ F внутри газогидрата (t = 950 мс) выделяются отдельные аномалии, которые можно идентифицировать как локальные скопления УВ-флюидов.

В случае, когда ГС внедряется внутрь газогидратной толщи, не пересекая ее насквозь (рис. 11в), на разрезах I, G, и Δ F граница BSR плавно вздымается, образуя куполообразную антиклинальную структуру, содержащую множество отражающих фрагментов различной протяженности. По общей конфигурации данное образование наиболее соответствует структурам, формирующимся в процессе грязевого вулканизма, наблюдаемого во многих районах Мирового океана [Frye et al., 2012].

В нашем случае возникновение подобных образований весьма вероятно, поскольку на участке проникновения более теплых (по сравнению с газогидратами) флюидов в отложения газогидратного слоя, очевидно, происходит их расплавление с выделением газоводогрязевой массы, которая в конечном итоге является основной составляющей вулканической постройки.

Заключение

Таким образом, приведенные в работе результаты наглядно свидетельствуют о необходимости обязательного включения методики скоростного и AVO-анализа в комплекс сейсмических методов по изучению газогидратов. Показано, что во многих случаях непосредственно под газогидратом, играющим роль непроницаемой покрышки, наблюдается значительное скопление газовых углеводородов, особенно на участках, располагающихся вблизи зон вертикальной газовой эманации. По всей видимости, именно эти зоны являются главным источником поступления флюида под газогидратную покрышку, поскольку, как это видно из сейсморазреза, они приурочены к тектоническим нарушениям, выполняющим роль подводящих каналов для флюидов, мигрирующих из глубинных слоев. В ситуации прямого контакта газогидратов с газовым столбом возможны три варианта развития поведения восходящих флюидов: 1) они насквозь пронизывают газогидратную толщу, проникая в водную среду; 2) контактируют только с границей BSR, не проникая внутрь газогидратов; 3) внедряются внутрь газогидратного слоя.

В первом случае на разрезах AVO горизонт BSR полностью исчезает, а внутри газогидратного слоя заметных структурных изменений не наблюдается. Во втором кардинальные изменения происходят только на подошвенной границе BSR, они проявляются в изменении динамики и полярности отраженной волны. В третьем случае внутри газогидратной толщи отмечаются существенные структурные преобразования, приводящие к формированию построений, по своей форме идентичных газово-грязевым вулканам.

Подобные различия структурных изменений в газогидратной толще можно объяснить различной температурой восходящих флюидных потоков (в первом случае они наиболее высокие) или различной длительностью их воздействия на толщу, также возможен вариант одновременного влияния обоих факторов. В любом случае обнаружение под газогидратами обширных залежей УВ-флюидов должно вызвать повышенное внимание с точки зрения их возможного использования в будущем в качестве перспективных источников энергии.

Список литературы

1. Бочарова А.А. Разработка методики картирования зон распространения газовых гидратов на основе спектрального анализа морских сейсмических данных. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2013. 25 с.

2. Воскресенский Ю.Н. Изучение изменений амплитуд сейсмических отражений для поисков и разведки залежей углеводородов. М.: РГУ нефти и газа, 2001. 68 с.

3. Гинсбург Г.Д., Соловьев В.А. *Субмаринные газовые гидраты*. СПб.: ВНИИОкеангеология, 1994. 193 с.

4. Козлов Е.А. Модели среды в разведочной сейсмологии. Тверь: ГЕРС, 2006. 480 с.

5. Макагон Ю.Ф. Природные газовые гидраты: распространение, модели образования, ресурсы // *Рос. хим. журн.* 2003. Т. 47, № 3. С. 70–79.

6. Ampilov Yu.P. From seismic interpretation to modelling and assessment of oil and gas fields.

Houten, Netherlands: EAGE Publ Europ Assoc. Geoscientists & Engineers, 2010. 274 p. https://doi. org/10.3997/9789073781825

7. Ampilov Yu.P., Baturin D.G. Latest marine geophysical technologies for comprehensive study of natural hydrocarbon reservoirs and monitoring // Society of Petroleum Engineers – SPE: Russian Oil and Gas Exploration and Production Techn. Conf. and Exhibition, 16–18 Oct., Moscow, Russia, 2012. P. 2056–2063. https://doi.org/10.2118/162032-ms; https://doi. org/10.2118/162032-ru

8. Bangs N., Hornbach M., Berndt C. The mechanics of intermittent methane venting at South Hydrate Ridge inferred from 4d seismic surveying // *Earth and Planetary Science Letters*. 2011. Vol. 310. P. 105–112. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.06.022

9. Diaconescu C.C., Kieckhefer R.M., Knapp J.H. Geophysical evidence for gas hydrates in the deep water of the South Caspian Basin, Azerbaijan // Marine and Petroleum Geology. 2001. N 18. P. 209–221. https://doi. org/10.1016/s0264-8172(00)00061-1

10. Frye M., Shedd W., Boswell R. Gas hydrate resource potential in the Terrebonne Basin, Northern Gulf of Mexico // *Marine and Petroleum Geology*. 2012. N 6. P. 150–168. https://doi.org/10.1016/j. marpetgeo.2011.08.001

11. Sain K., Gupta H. Gas hydrates in India: Potential and development // *Gondwana Research*. 2012. Vol. 22, N 2. P. 645–657. https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.01.007

12. Sloan E.D., Koh A.C. *Clathrate hydrates of natural gases*. N. Y.: CRC Press, 2007. 752 p. https://doi. org/10.1201/9781420008494

13. Thakur N., Rajput S. *Exploration of gas hydrates. Geophysical techniques*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. 282 p. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14234-5

14. Veeken P.C.H., Ed. Seismic stratigraphy, basin analysis and reservoir characterization. Elsevier, 2007. 509 p. (Handbook of Geophysical Exploration: Seismic Exploration; vol. 37). https://doi.org/10.1016/S0950-1401(13)70001-6

Сведения об авторах

ЖИГУЛЕВ Владимир Валентинович, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий геофизик, САВИЦКИЙ Александр Викторович, кандидат геолого-минералогических наук, главный геолог, ЖИГУЛЕВ Александр Владимирович, геофизик – ОАО «Дальморнефтегеофизика», Южно-Сахалинск.