

УДК 543.27

ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ ГАЗОГИДРАТОВ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ УЧЕТА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ СРЕДЫ

© С.И. Донченко, 2009

Научно-технический центр панорамных акустических систем НАН Украины, г. Запорожье

У даній статті проведений аналіз гідроакустичних ознак газогідратів. Існуючий масив експериментальних даних про властивості й структуру донних ґрунтів, а також ряд теоретичних моделей, що дають їхню адекватну інтерпретацію, дозволяють визначити робочі діапазони акустичних параметрів ґрунту й виділити найбільш істотні структурні особливості дна, які повинні бути враховані в моделі.

В данной статье проведен анализ гидроакустических признаков газогидратов. Существующий массив экспериментальных данных о свойствах и структуре донных грунтов, а также ряд теоретических моделей, дающих их адекватную интерпретацию, позволяют определить рабочие диапазоны акустических параметров грунта и выделить наиболее существенные структурные особенности дна, которые должны быть учтены в модели.

In this article we carry out analysis of sonar characteristics of gas hydrates. The existing array of experimental data on the properties and structure of bottom soil as well as a number of theoretical models giving their adequate interpretation enable us to determine working ranges of acoustic parameters of the soil and to highlight the most significant structural features of the bottom which should be taken into account in the model.

ГИДРОАКУСТИКА, МОРСКОЕ ДНО, СКОРОСТЬ ЗВУКА, ГАЗОГИДРАТЫ, АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Дефіцит енергетического сырья во многих странах стимулирует возрастание интереса ко всем потенциальным источникам энергии - ветровой, волновой, приливной, к ускорению разведки нефти и газа, попутных газов из угольных пластов. При современном уровне потребления энергоресурсов нефти достаточно на 40 лет, а природного газа - на 60-100 лет. В последние годы особое внимание уделяется изучению газогидратов, потенциальные ресурсы которого оцениваются специалистами в $1,5 \times 10^{16} \text{ м}^3$ [1].

В природе газогидраты образуются в глубоководных осадках морей и океанов и в районах вечной мерзлоты - главным образом из углеводородных газов, чаще всего метана. Подавляющее большинство скоплений газогидратов находится на континентальных склонах и подводных поднятиях, в условиях высокого давления и низких температур [2]. Могут образовываться и стабильно существовать в широком интервале давлений и температур (для метана от 2×10^{-8} до 2×10^3 МПа при температуре от 70 до 350° К). Некоторые свойства гидратов уникальны [1].

Термодинамическая зона образования и стабильного существования гидратов достигает несколько сот метров [1]. Верхняя граница существования газогидратных залежей в акваториях обычно находится у поверхности дна независимо от состава газа.

Существуют два основных вида газогидратных залежей: первичные и вторичные. Первичные - это те, после формирования которых в них не происходило циклических фазовых переходов гидрат-свободный газ-вода-гидрат. Они обычно приурочены к акваториям, где донные температуры изменяются крайне медленно. Большинство первичных залежей формируется из растворенных в пластовой воде газов и располагается в придонных осадках, характеризующихся высокой пористостью, низкой температурой и малой прочностью вмещающих пород. Часто первичные залежи не имеют литологических покровов.

Образующийся в порах гидрат является «цементом» и служит непроницаемой крышкой, под которой идет накопление гидрата. В результате разложения гидрата вмещающие породы могут превращаться в полужидкую массу (со всеми вытекающими отсюда последствиями для инженерных объектов, расположенных в зоне гидратообразования).

Газогидрат в первичных залежах может находиться в диспергированном состоянии или в виде монолита. Первичные залежи занимают обычно большие площади независимо от наличия стратиграфических структур. На нижней границе образующейся первичной залежи нет больших емкостных изменений, пористость и проницаемость пород остается практически неизменной и достаточно высокой, что необходимо учитывать при выборе методов разработки.

Вторичные газогидратные залежи обычно находятся на материках.

В акваториях Мирового океана зона гидратообразования начинается от дна океана и обычно составляет несколько сот метров. Субмаринные залежи приурочены, главным образом, к глубоководному шельфу и океаническому склону при глубинах воды от 200 м - для условий приполярья, и от 500-700 м - для экваториальных регионов.

Механизм формирования газогидратных залежей определяется многими факторами: термодинамическим режимом разреза пород в регионе, интенсивностью генерации и миграции углеводородов, составом газа, степенью газонасыщенности и минерализации пластовых вод, структурой пористой среды, литологической характеристикой разреза, геотермическим градиентом в зоне гидратообразования и в подстилающих породах, фазовым состоянием гидратообразователей и др.

Первая модель формирования газогидратных залежей была дана в работе [3].

Верхняя граница зоны образования гидрата в акваториях всегда находится в водной толще, нижняя - в разрезе пород. Исходя из термической характеристики глубоководных районов океана, а также из фактов накопления большей части осадочных пород и органического вещества в периферических районах океана, охватывающих шельфы, континентальные склоны и приконтинентальные глубоководные желоба, следует считать наиболее перспективными зонами накопления гидрата газов глубоководные шельфовые осадки и осадки континентального склона. Что касается абиссальных зон огромнейшего океанского ложа, то имеющиеся здесь осадки очень бедны органическим веществом, геотермические градиенты высоки, так что нет оснований связывать с ними серьезные перспективы накопления гидратов.

Формирование газогидратных залежей в зоне гидратообразования в период осадконакопления происходит как со стороны верхней границы зоны за счет поступления новых порций органического вещества в начальный период превращения органического вещества, так и со стороны нижней границы - за счет газов, образующихся в последующие периоды заглубления и дальнейшего превращения органического вещества, а также за счет газов, поступающих из глубинных недр Земли [1]. При вертикальной миграции газы поступают из высокотемпературных зон в зону гидратообразования, увеличивая толщину залежей снизу. Под гидратонасыщенными пластами может накапливаться газ в свободном состоянии, образуя традиционные газовые месторождения. Известны примеры залежей нефти непосредственно под гидратонасыщенными пластами, служащими непроницаемой крышкой для них.

Условия стабильного существования газогидратных залежей в пределах материков и в акваториях принципиально различны. Газогидратные залежи, сформировавшиеся в акваториях, слабо подвержены влиянию изменения температуры на поверхности Земли. Даже при значительном росте приповерхностных температур в придонных водах температура остается практически неизменной. Однако, газогидратные залежи в акваториях подвержены влиянию изменения уровня Мирового океана, вызванного формированием крупных объемов льда и его таянием. Во многих районах Мирового океана наличие газогидратных залежей обнаруживается от нескольких десятков или даже сотен метров от дна, что является результатом понижения уровня океана в течение последних оледенений, а также результатом тектонических и стратиграфических перемещений. В период крупных оледенений уровень Мирового океана понижался при практически неизменных придонных температурах. Снижение гидростатического давления приводило к разложению гидрата в придонных осадках, которые обычно слабо сцементированы и высокопроницаемы. Газ, высвобождающийся при разложении гидрата, поступает в придонные воды, растворяется и мигрирует в атмосферу, усиливая парниковый эффект.

В пределах суши стабильно существуют лишь вторичные газогидратные залежи, образовавшиеся в период последнего оледенения из скоплений свободного газа, сохранившихся под литологически непроницаемыми покрывками.

Общим результатом динамики изменения условий стабильного существования газогидратных залежей на суше и в акваториях явилось перераспределение запасов газа - в акваториях сосредоточено до 98 % от общего потенциала и лишь около 2 % на материках.

Исключительно важную роль при формировании залежей газовых гидратов и свободного газа играет растворимость газа в свежеконденсированной воде и в пластовой воде, контактирующей с образующимся гидратом. Кратко рассмотрим особенности процесса формирования газогидратных залежей в этих условиях.

Как известно, все природные воды содержат растворенные газы [1]. Именно в системах газ-вода формируются, стабильно существуют и разрушаются залежи природных газов и нефти. Суммарный объем углеводородных газов, растворенных в подземных водах, составляет 10^{13} т [4].

В недрах Земли растворенный газ выделяется из водного насыщенного раствора в виде микропузырьков. В случае благоприятных термобарических условий скопления микропузырьков, объединяясь, могут формировать крупные залежи свободного газа или залежи газогидрата. При вертикальной или латеральной миграции газонасыщенных водных растворов изменяются давление, температура и степень газонасыщенности раствора, при этом газы могут как растворяться, так и выделяться из раствора. Наличие газогидрата, контактирующего с пластовой водой, резко меняет структуру воды и, как следствие, растворимость газа в воде понижается.

Уже первые исследования растворимости природных газов в воде в условиях образования гидрата [5] показали резкое изменение соотношения количества молекул воды и газа до образования и после образования гидрата. Дальнейшие исследования позволили объяснить условия формирования и разрушения залежей свободного газа и газогидратных залежей в системах газ-вода.

Зоной образования гидрата является толща пород, в которой давление и температура соответствуют термодинамическим условиям стабильного существования гидрата газа. Зона

гидратообразования может быть определена математически путем совместного решения уравнения изменения термического градиента в разрезе пород и уравнения равновесного стабильного существования гидрата в данной пористой среде. В настоящее время широко используется предложенный в [6] простой и надежный графический способ определения. На рисунке 1а) дана схема определения зоны образования гидрата на примере метана для условий материка, на рисунке 1б) — для акваторий [1]. С повышением минерализации воды зона гидратообразования уменьшается, а при наличии тяжелых газов возрастает. Толщина зоны гидратообразования сильно зависит от донных температур и геотермоградиента. С повышением донных температур и геотермоградиента она уменьшается.

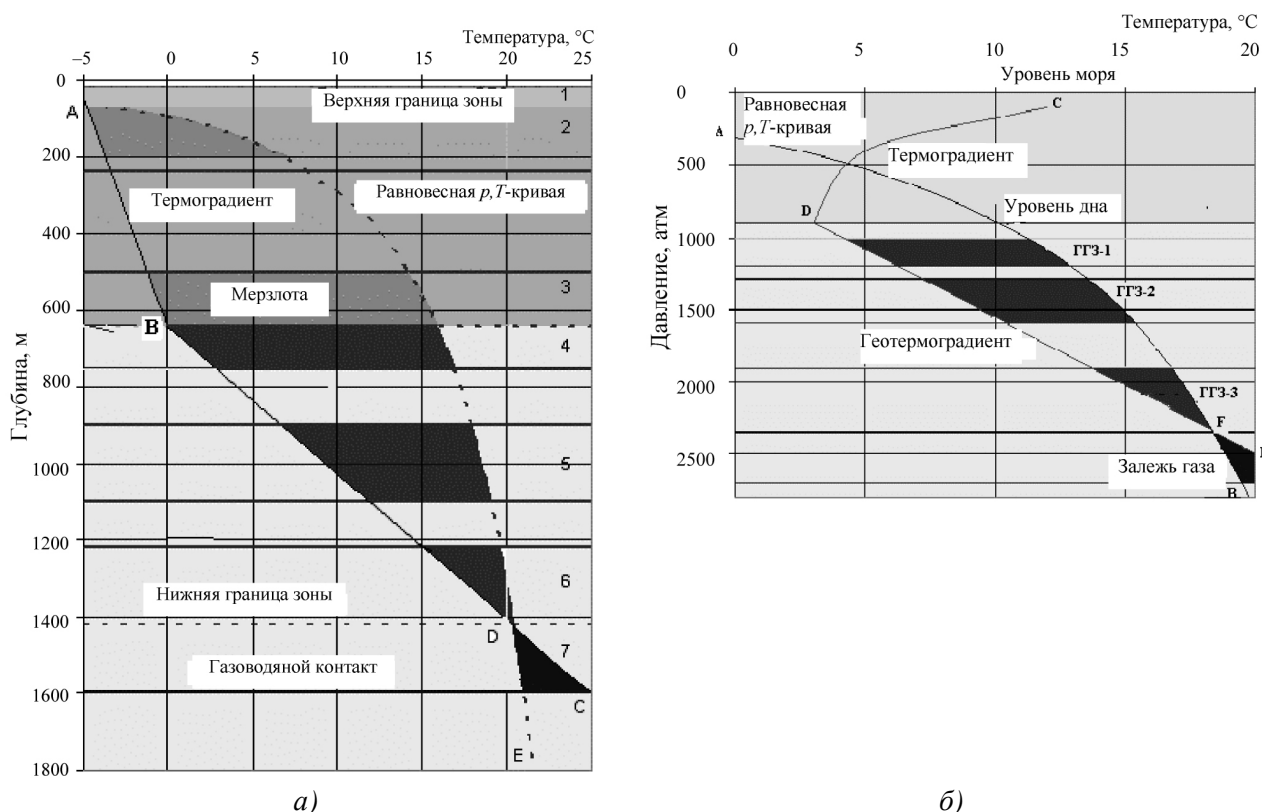


Рис. 1 - К определению зоны формирования залежей газогидрата в условиях материка (а) и акваторий (б) и их классификация. (ГГЗ - газогидратная залежь) [1]

Зарождение гидрата всегда происходит на свободной поверхности контакта газ-вода. В недонасыщенном газом растворе процесс образования гидрата не может начаться. Однако, в случае образования центров кристаллизации (на поверхности микропузырьков или на поверхности конденсата воды в объеме газа) может развиваться активный процесс роста кристаллов гидрата с формированием крупных скоплений гидрата из растворенного газа в недонасыщенном растворе. В осадочном чехле пород газовые залежи формируются только из свободного газа, выделяющегося из пересыщенного раствора при изменении давления и температуры. Газогидратные залежи могут формироваться и стабильно существовать в условиях дефицита растворенного газа в пластовых водах. Именно это свойство воды (формировать газогидратные залежи в условиях дефицита растворенного газа в воде) обеспечило сохранение на Земле огромных ресурсов природных газов в пределах акваторий

Мирового океана за геологическое время. Это же свойство определяет интервалы глубин существования газовых и газогидратных залежей в различных термобарических условиях.

Из теплофизических свойств газовых гидратов интерес представляет их теплопроводность. В 1979 г. Столл и Брайан обнаружили неожиданно низкий коэффициент теплопроводности у гидратов метана и пропана при температуре, близкой к 273° К, а именно $\lambda=0,4$ Вт/(м·К), что примерно в пять раз ниже теплопроводности льда. Более того, в отличие от поведения гексагонального льда, коэффициент теплопроводности газового гидрата возрастает с повышением температуры, так что при 100° К теплопроводность льда и гидрата различается в 20 раз! Причем структура гидрата, природа гостевых молекул и изменение его состава незначительно влияют на коэффициент теплопроводности [7].

Акустические измерения являются главным источником информации, на основании которой проводят идентификацию и количественную оценку местонахождения гидратов в донных отложениях. В работе [8] была представлена новая ультразвуковая установка, предназначенная для изучения акустических и геотехнических свойств гидратосодержащих пород в донных условиях. Она оснащена ультразвуковыми преобразователями и приемниками продольных и поперечных волн. Эта установка способна обнаруживать изменение времени пробега волны в 0,01 мс через 0,5 м керна (т.е. акустическая скорость - 0,5 м/с). Предварительные испытания с использованием водных растворов тетрагидрофурана и системы метан - вода в поровой среде, состоящей из синтетических шариков (моделирующих грубый кварцевый песок), показали, что скорость распространения волны высокочувствительна к объемам фаз (гидрат, жидкость и газ) и их распределению. По измерению времени пробега волны могут быть точно определены давление и температура диссоциации клатратов [8].

Существующие технологии выявления газогидратных залежей основаны на использовании свойств гидрата и гидратонасыщенных пород. Такими свойствами являются высокая акустическая проводимость, высокое электросопротивление, пониженная плотность, низкая теплопроводность, низкая проницаемость для газа и воды [1]. Выявление газогидратных залежей может быть осуществлено путем сейсмического или акустического зондирования, гравиметрическим методом, измерением теплового и диффузионного потоков над залежью, изучением динамики электромагнитного поля в исследуемом регионе и др. [9].

Наиболее распространенным методом является сейсмика - стандартная, на частотах 30-120 Гц с разрешающей способностью до 12-24 м и высокочастотная, на частотах от 250-650 до 1200 Гц с разрешающей способностью до 1-2 м. По данным сейсморазведки 2-D при наличии свободного газа под гидратонасыщенными пластами определяется положение нижней границы гидратонасыщенных пород - граница BSR (Bottom Simulation Reflector). К сожалению, низкочастотная сейсмика не отвечает на многие важные вопросы, в частности, не дает данных о степени гидратонасыщенности пород [1]. На рисунке 2 приведен результат, полученный при использовании сейсмического метода высокого разрешения 3-D.

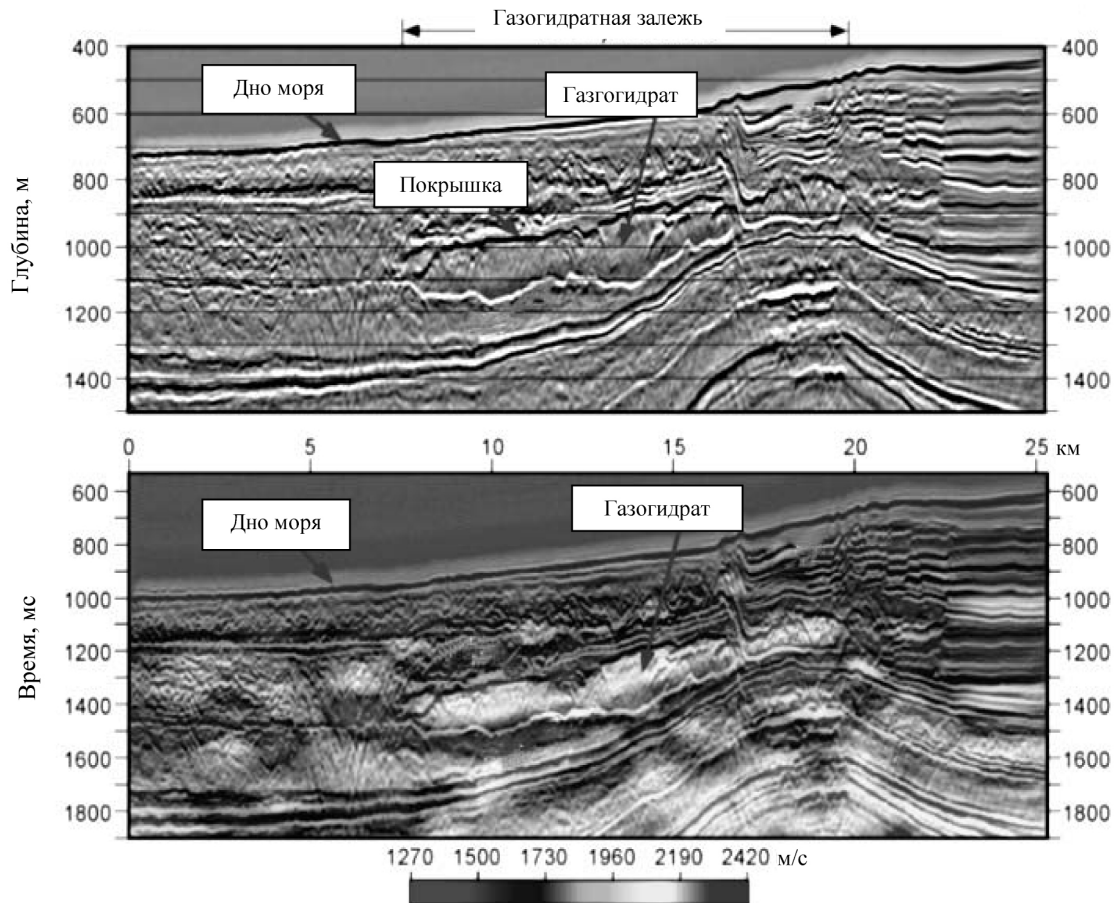


Рис. 2 - Сейсмический разрез высокого разрешения газогидратной залежи [1]

Этот метод более информативен, он позволяет определять нижнюю и верхнюю границы гидратонасыщенных пород, а также концентрацию гидрата в породах, на основании чего можно оценивать ресурсы газа и выбирать место бурения геологоразведочных скважин для первичной оценки залежи.

Детальная разведка газогидратных залежей осуществляется посредством геофизических исследований в пробуренных скважинах, а также путем отбора кернов с последующим их комплексным анализом.

На большей части Черноморской мегавпадины в придонном слое осадков при глубине моря 600-650 м существует благоприятная термобарическая обстановка для формирования и стабильного существования газогидратов [10]. Мощность зоны гидратообразования существенно зависит от величины градиента температуры или теплового потока. В зонах с низким тепловым потоком ($25-30 \text{ мВт/м}^2$) мощность пласта гидратообразования составляет 350-400 м, при увеличении теплового потока до 40 мВт/м^2 она уменьшается до 200-250 м, а при значениях потока 60 мВт/м^2 и более - сокращается до десятков метров. В зонах аномально высоких потоков ($80-100 \text{ мВт/м}^2$) газогидратный пласт, скорее всего, отсутствует [10].

В данное время установлено, что донные отложения Черного моря, начиная с глубин 550-600 м, загазованы метаном. Мощные выходы газа в виде многочисленных сипов, фонтанов, грязевых вулканов зафиксированы практически по всему периметру Черного моря. В настоящее время в акватории Черного моря обнаружено 4 тыс. газовых факелов

(сипов), локалізованих по периферії, в частині, на северо-западе Чорного моря, болгарському шельфі, Керченсько-Таманському шельфі, вздовж берегів Кавказу. Даних про газові факели у берегів Турції мало. Однак, рой газових факелів був зустрічений при пошуках траси газопроводу «Голубий потік» на материковому схилі і шельфі Турції [10].

Як правило, газові факели розвинуті на глибинах моря 50-800 м, глибше вони зустрічаються дуже рідко. Висота факелів звичайно становить від 100 до 200 м (більшість не досягає поверхні води і дифузійно розпилюється). Частіше за все це невеликі газові струї, іноді групи газових струй (до 5, 10, 12); деякі з них достатньо значущі і утворюють своєрідні хмари газу поблизу дна (на рис. 3 показано фрагмент виявлення гідроакустичними засобами газового факела на дні Чорного моря в науковому рейсі НИС «Київ» 1997 року під науковим керівництвом ака. Шнюкова Е.Ф.).



Рис. 3 - Газовий факел [2]

Во багатьох випадках видно преривистість газових факелів, т.е. як би пульсуюче викинення. Характер газових факелів в різних районах моря приблизно однаковий, змінюється лише потужність струй [11]. Існуючий досвід спостереження за витіканням рідини з різних типів отворів дає підставу вважати, що спочатку витікаючий через свід газ має форму струї, на певній відстані розпадається на окремі краплі (при малих інтенсивностях витікання краплі будуть утворюватися одразу ж на свіді) [12].

Основна маса газових крапель з середніми і близькими до середніх розмірами утворює шлейф, піднімаючийся до поверхні моря, подібно струї диму. В процесі вспливання краплі спочатку утворюють тонкий жгут, а потім розсіюються турбулентністю морської середовища в вертикальному і горизонтальному напрямку і сносяться від місця утворення течією, утворюючи піднімаючийся до поверхні моря шлейф. Розміри

этого шлейфа можно оценить, рассматривая диффузию капель газа как активной (всплывающей) примеси.

Геометрическую форму газового факела можно аппроксимировать как цилиндр, конус, конус-цилиндр или конус-полусфероид. На рис. 4-9 представлены зависимости эквивалентного радиуса цилиндра и конуса от угла падения звуковой волны на эти фигуры.

При рассмотрении уравнений гидролокации сила цели была определена как умноженный на 10 десятичный логарифм отношения интенсивности звука, возвращаемого в некотором направлении целью, на единичном расстоянии от «акустического центра» цели к интенсивности падающей на цель звуковой волны, излучаемой удаленным источником [13].

Геометрический объект может быть приравнен «эквивалентному» сферическому отражателю, сила цели которого равна таковой данного объекта. Сила цели (СЦ) такой идеальной сферы в зависимости от ее радиуса R определяется соотношением [12]:

$$СЦ = 10 \lg \left(\frac{R^2}{4} \right). \quad (1)$$

Отсюда эквивалентный радиус цели такого тела:

$$R_{\text{экв}} = 2 \left[10^{(СЦ/10)} \right]^{1/2}. \quad (2)$$

Если газовый шлейф аппроксимировать как объект цилиндрической формы, то формула силы цели цилиндра имеет вид:

$$СЦ = 10 \lg \left[\frac{aL^2}{2\lambda} \left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \cos^2 \theta \right], \quad (3)$$

где $\beta = kL \sin \theta$,

a – радиус цилиндра,

L – длина цилиндра,

λ – длина звуковой волны излучаемого сигнала,

θ – угол между направлением падения звуковой волны и нормалью к плоскости.

Условия применимости соотношения (3):

$$ka \gg 1, \quad (4)$$

r – расстояние от гидролокатора до цели должно удовлетворять соотношению $r > \frac{L^2}{\lambda}$.

Зависимость эквивалентного радиуса $R_{\text{экв}}$ от угла θ определяется выражением (2) с учетом выражения (3) и приведена на рис.4-6.

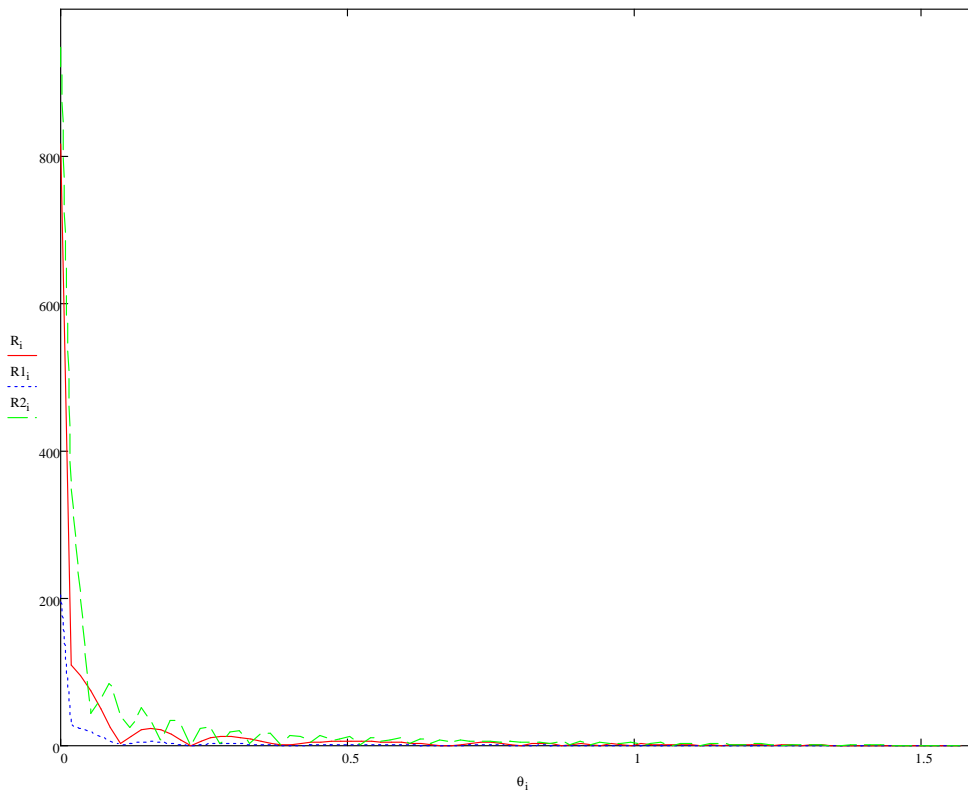


Рис. 4 - Зависимость эквивалентного радиуса цели газового факела, представленного в виде цилиндра, от угла θ_i и размерами цилиндра.

Параметры факела: для R_i $a=5$ м, $L=100$ м; $R1_i$ $a=5$ м, $L=25$ м; $R2_i$ $a=3$ м, $L=150$ м.

Рабочая частота 10 кГц. Угол θ в диапазоне от 0° до 90° (на графике представлен в радианах).

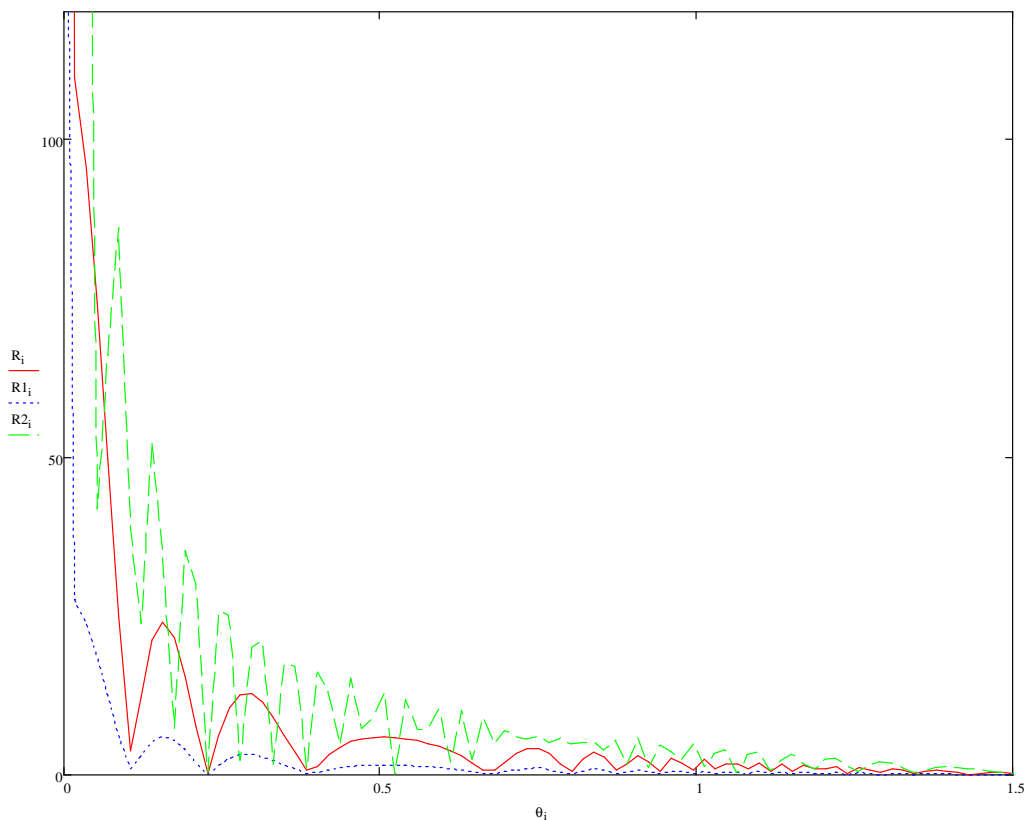


Рис. 5 – Зависимость, представленная на рис. 4, в увеличенном масштабе.

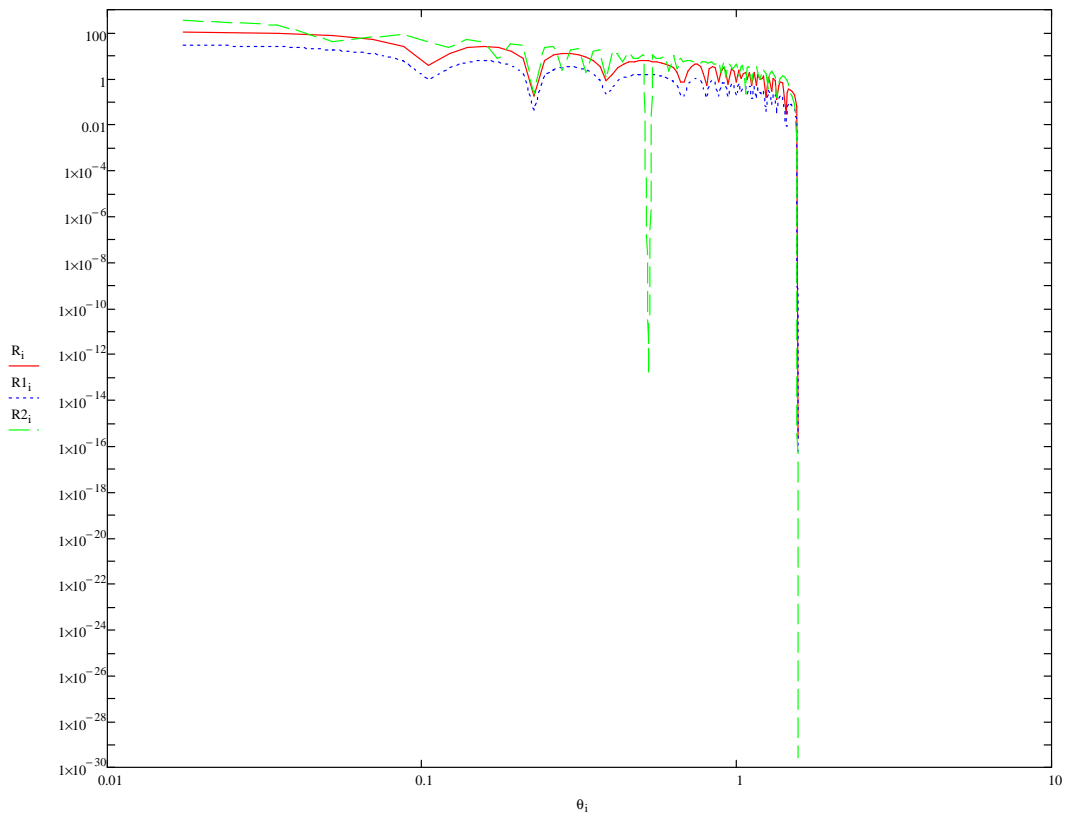


Рис. 6 – Зависимость, представленная на рис. 4 в логарифмическом масштабе

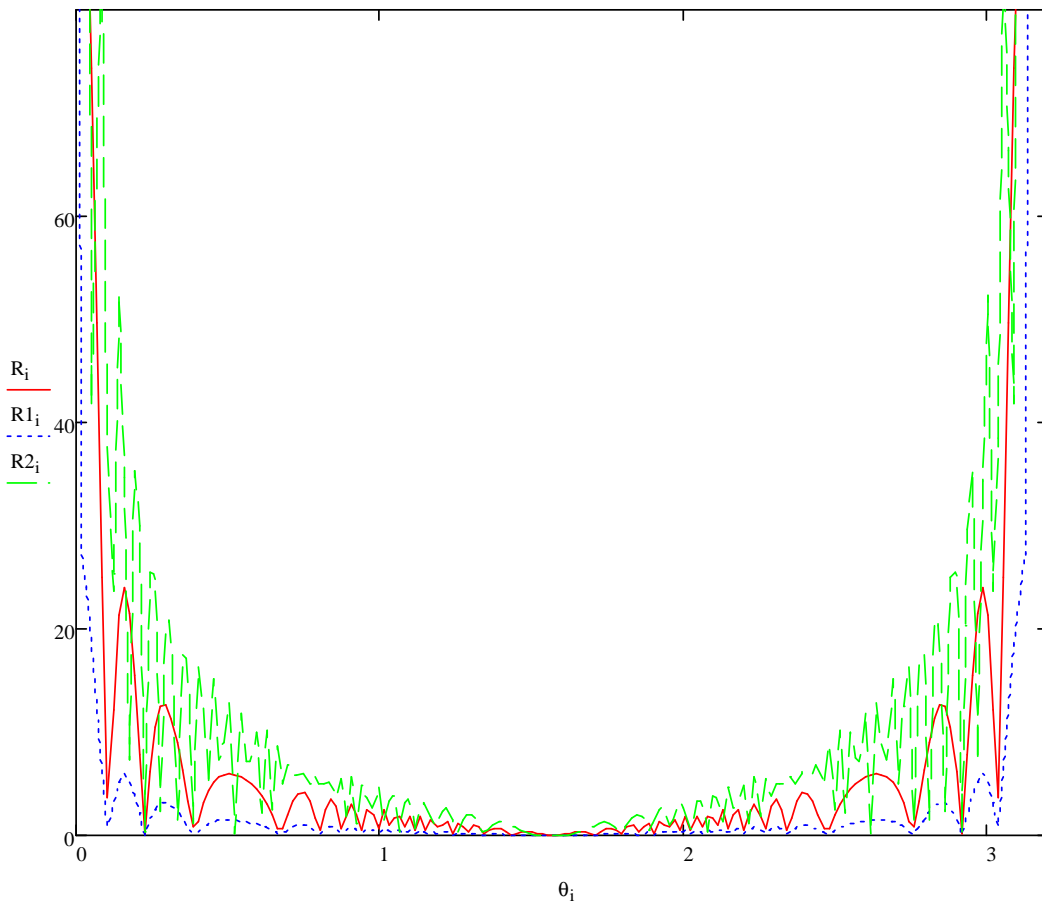


Рис. 7 – Зависимость, представленная на рис. 4, при θ , лежащем в диапазоне от 0° до 180° (в радианах)

Если газовый шлейф аппроксимировать как объект конусной формы, то формула силы цели конуса имеет вид:

$$СЦ = 10 \lg \left[\left(\frac{\lambda}{8\pi} \right) \operatorname{tg}^4 \psi \left(1 - \frac{\sin^2 \theta}{\cos^2 \psi} \right)^{-3} \right] \quad (6)$$

ψ - половина угла при вершине конуса,

θ – угол между направлением падения звуковой волны и осью конуса.

Условия применимости соотношения (6)

$$\theta < \psi. \quad (7)$$

Зависимость $R_{\text{экв}}$ от угла θ определяется выражением (2) с учетом выражения (6) и приведена на рис.8,9.

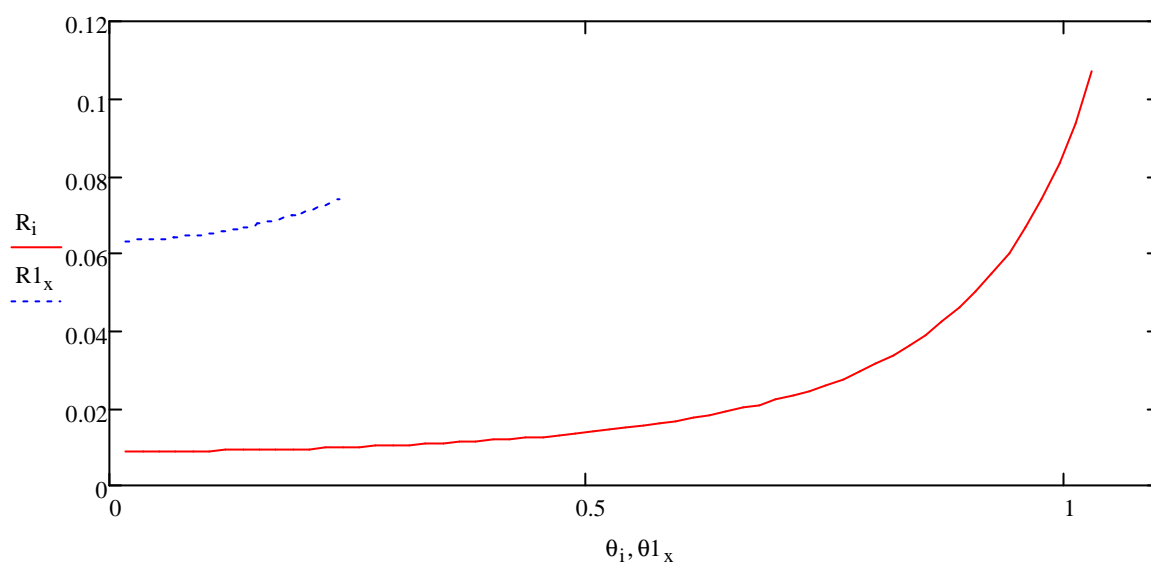


Рис. 8 - Зависимость эквивалентного радиуса цели газового факела, представленного в виде конуса, от угла падения звуковой волны к оси конуса и угла при вершине конуса. Параметры факела: для R_i половина угла при вершине конуса $\psi=15^\circ$, а угол θ_i в диапазоне от 1° до 14° ; R_{I_x} половина угла при вершине конуса $\psi=60^\circ$, а угол θ_{I_x} в диапазоне от 1° до 59° . На графике углы представлены в радианах.

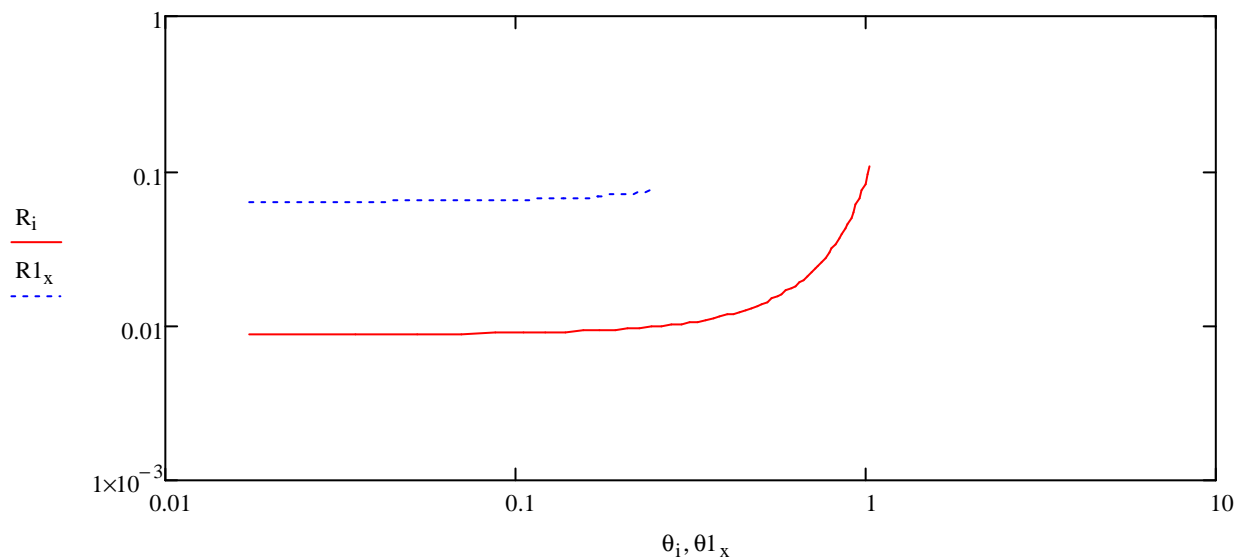


Рис. 9 – Зависимость, представленная на рис. 8 в логарифмическом масштабе

Приведенные зависимости показывают возможность обнаружения газовых и нефтяных выбросов из поврежденных трубопроводов, а также выбросов газа из дна водоемов гидроакустическими методами с помощью эхолотов, профилографов и гидролокаторов бокового обзора.

Исследования условий образования, стабильного существования и свойств гидратов в природных условиях позволяют уверенно прогнозировать их наличие в различных регионах суши и Мирового океана. Следует подчеркнуть, что целенаправленные поисковые работы, проводимые как на суше, так и в акваториях, всегда выявляли газогидратные залежи. Разумеется, газогидраты не лежат сплошным ковром в термодинамической зоне гидратообразования - одних соответствующих температуры и давления недостаточно. Необходимо высокое содержание органического вещества в породах (от 0,5 до 4 % и выше), активная генерация и миграция углеводородов в зону образования гидрата. Огромные перспективные газогидратные залежи выявлены в пределах полярных акваторий на глубинах вод от 200 м, в районах Атлантического, Индийского и Тихого океанов - на глубинах от 500-700 м. Только в пределах Мексиканского залива выявлено более 70 залежей газогидратов [1]. В акватории Австралии, в районе Новой Каледонии сейсмическая разведка обнаружила газогидратную залежь общей площадью более 80 тыс. км² на глубине воды от 1 до 4 км [1]. Запасы газа в гидратном состоянии здесь могут быть от 20 до 200 трлн. м³.

Характерным свойством гидратов и гидратонасыщенных пород является пониженная плотность (порядка 800-1240 кг/м³). Скорость звуковой волны в газогидратах метана составляет 1600-1900 м/с, что объясняется большим сцеплением между гидратными зернами, образующими жесткий каркас. Скорость звуковой волны в песчаных осадках газогидратов достигает 3000 м/с [12]. 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 [13].

Простейшая модель газогидратной залежи может быть представлена в виде однородного пласта с пониженной плотностью и повышенной скоростью упругих волн. В

такой модели газогидратной залежи должны соответствовать две контрастные границы - у поверхности дна, связанной с кровлей залежи, и на нижней граничной глубине. Изменение плотности осадков и скорости распространения в них упругих волн при гидратообразовании создает предпосылки для выявления газогидратов сейсмическими и акустическими методами. Поскольку газогидраты распределены в осадочной толще крайне неравномерно и встречаемые структурные аномалии разномасштабны, может потребоваться применение гораздо более сложных структурно-акустических моделей газогидратной залежи.

Гидраты обычно распространены в нижней части зоны гидратообразования, а вверх по разрезу их содержание постепенно сокращается. Поэтому кровля газогидратного слоя обычно не дает четких отражений [14]. Сама же зона гидратообразования обычно начинается ниже поверхности дна от 0,5 до 10 и более метров. В связи с этим для обнаружения кровли гидратоносных пластов необходимо применение акустических методов (рабочая область частот 0,1-10 кГц) с очень высокой разрешающей способностью.

Одним из основных акустических признаков наличия газогидратов в донных осадках является особое отражение (так называемое BSR - bottom simulating reflections), повторяющее конфигурацию поверхности дна, но не являющееся результатом кратных отражений (см. рис. 4).

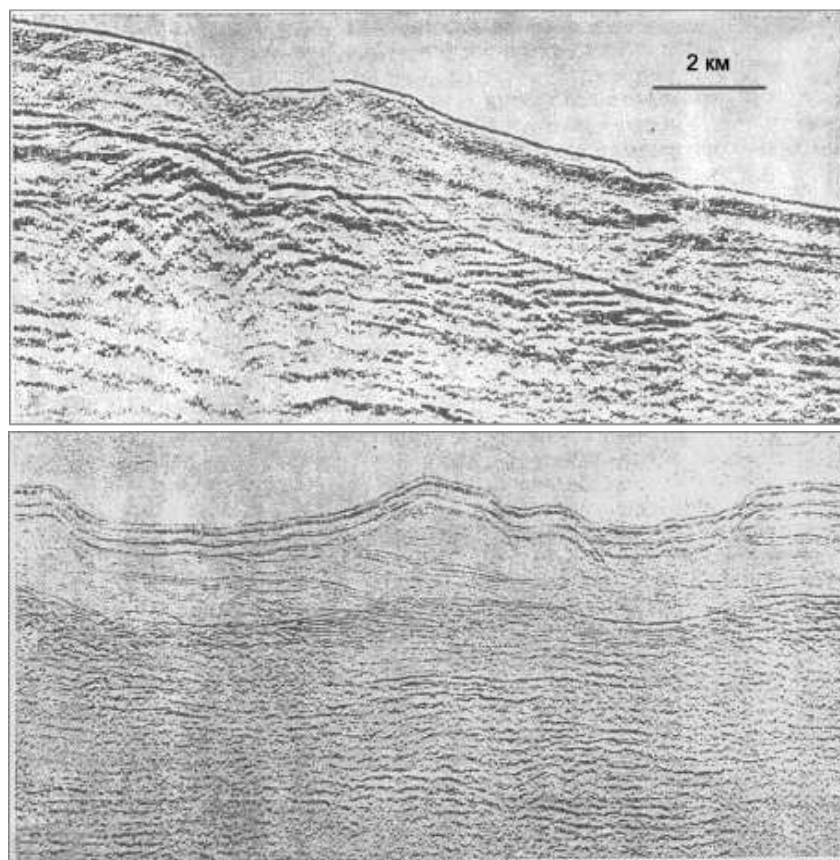


Рис. 4 – Примеры отражений типа BSR в Туапсинском прогибе Черноморской впадины [15]

Волновая картина в интервале от донного отражения до BSR обычно отличается ослаблением амплитуд и степени когерентности вступлений эхо-сигнала. Важным критерием при анализе природы BSR является связь между глубиной аномальных донных горизонтов и

глубиной дна. Общая закономерность заключается в возрастании глубины подошвы зоны газогидратов (горизонта BSR) при увеличении глубин дна. Этот признак, а также аномальное повышение скоростей звуковых волн позволяют отличить эффект, обусловленный наличием газогидратов в донных грунтах, от акустических аномалий другой природы.

При переходе в гидратную форму воды с метаном в песчаниках скорость звуковых волн увеличивается от 1700 до 2500 м/с и более. Четкая выраженность горизонта BSR обусловлена наличием скоплений газа под гидратной толщей. Отсутствие BSR при наличии гидратов обусловлено их маломощными тонкими прослойками, слабо влияющими на изменение скорости сигнала.

В качестве примера отметим, что по результатам анализа скоростей на сейсмических профилях, расположенных на восточном склоне Туапсинского прогиба, средняя скорость для BSR составляет 1550 м/с при фоновом значении 1490-1500 м/с. При этом интервальные скорости возрастают до 2800 м/с над BSR и снижаются до 1200 м/с в залегающей ниже толще при фоновых значениях 1800-1900 м/с. Средняя скорость акустической волны для BSR – 1550 м/с, над ним 2000-2600 м/с, под ним - 1700-1800 м/с [16].

Другой признак газогидратов - аномалии волнового поля (так называемые VAMP), расположенные, как правило, в подошве зоны гидратообразования. На временных сейсмических разрезах VAMP-аномалии проявляются в виде сочетания повышенных амплитуд в своде аномалии и сниженных амплитуд в ядре. Дополнительным признаком может служить уменьшение скорости звуковых волн, связанное, вероятно, с наличием подгидратных газовых залежей.

Анализ материалов геоакустического профилирования Черного моря позволяет выявить признаки газогидратов в осадочной толще на трех участках: на континентальном склоне в Керченско-Таманском районе, в глубоководной котловине южнее Крыма и на континентальном склоне в западной части Черного моря. Выявленные признаки (псевдодонные отражения BSR и определенным образом расположенные амплитудные аномалии) позволяют сделать вывод о наличии в осадочной толще специфической границы, приуроченной к подошве залежей газогидратов. Мощность зоны, в которой возможно гидратообразование, не превышает в Черном море сотен метров. Поэтому применение геоакустических методов, уступающих по глубинности сейсморазведке, представляется вполне возможным.

В работе А. Стефаномы [17] на мелководных сейсмических профилях с высоким разрешением, полученных при совместном использовании профилографа, гидролокатора бокового обзора и эхолота обнаружен в северной части Адриатического моря ряд акустических структур, обусловленных газонасыщенными осадками. Автором сделан вывод о том, что обнаружить газонасыщенные структуры можно с помощью профилографа с очень высоким разрешением.

Таким образом, многочисленные экспериментальные данные указывают на выраженную в большей или меньшей степени слоистость осадочной толщи, нарушаемую разномасштабными, локализованными либо распределенными в пространстве неоднородностями (полостями и включениями) различной природы и свойств. Исследование такой среды акустическими методами требует предварительного построения развитых структурно-акустических моделей среды, в полной мере учитывающих все указанные структурные и физические особенности.

Все типы акваторий, где наблюдаются газогидраты, можно условно разделить на геодинамические зоны: глубоководные бассейны внутренних и окраинных морей, континентальные склоны конвергентных окраин, подводные хребты островных дуг, континентальные склоны пассивных окраин [11].

К настоящему времени в мире выявлено около 200 газогидратных залежей. Только для Северо-Американского континента по данным Департамента геологической службы США, ресурсы газа в газогидратных залежах, выявленные путем сейсмического зондирования и глубокого бурения с отбором керна и полным комплексом геофизических исследований, превышают $9 \times 10^{15} \text{ м}^3$ [18].

Разумеется, освоение залежей твердых газогидратов имеет свои особенности, которые требуют серьезного изучения. Одной из наиболее важных задач является создание высокоэффективных технологий перевода газа из твердого состояния в свободное непосредственно в пластах. Особенно серьезную проблему, связанную с разработкой газогидратных месторождений, составляет обеспечение региональной и глобальной экологической безопасности.

В целом природные газовые гидраты представляют весьма сложную многоаспектную проблему. Исследования в этой области необходимо координировать в мировом масштабе, что позволит исключить дублирование работ и потерю времени. Необходима организация единого координационного международного центра по исследованию газогидратов и созданию эффективных технологий их освоения.

Литература

- 1 Макогон Ю.Ф. Природные газовые гидраты: распространение, модели образования, ресурсы // Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева). – 2003. - т. XLVТІ, № 3. – С. 70-79.
- 2 Шнюков Е.Ф., Зиборов А.П. Минеральные богатства Черного моря. – Киев: ОМГОР НАН Украины, 2004. – 280 с.
- 3 Трофимук А.А., Макогон Ю.Ф., Стеглянин Ю.И. Об одном из возможных механизмов образования залежей природного газа // Геол. и геофизика. – 1977. - № 9.
- 4 Корценштеш В.Н. Растворенные газы подземной гидросферы земли. - М.: Недра, 1984. – С. 185-187
- 5 Макогон Ю.Ф. Растворимость газов в воде при наличии гидратов // Экспресс-информация. – 1971. - № 22
- 6 Макогон Ю.Ф. Особенности эксплуатации месторождений природных газов в зоне вечной мерзлоты. - ЦНТИ Мингазпрома, 1966.
- 7 Кузнецов Ф.А., Истомина В.А., Родионова Т.В. Газовые гидраты: исторический экскурс, современное состояние, перспективы исследований // Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева). - 2003. - т. XLVТІ, № 3. – С. 5-18
- 8 Тохиди Б., Андерсон Р., Масоуди А., Арджманди Дж., Бургасс Р., Янг Дж. Газогидратные исследования в университете Хериот-Ватт (Эдинбург) // Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева). - 2003. - т. XLVТІ, № 3. – С. 49-58
- 9 Клеркс Я., Марк Де Батист, Гранин Н., Земская Т., Хлыстов О. Газогидраты пресноводного «Океана» // Геология озера Байкал. - С. 82-91
- 10 Шнюков Е. Ф., Старостенко В. И., Коболев В. П. Газогидратоносность донных отложений Черного моря // Геофизический журнал. 2006. - Т. 28, № 6. - С. 29-38
- 11 Дмитриевский А.Н., Каракин А.В., Баланок И.Е., Матвеевков В.В. Гидротермальный механизм образования углеводородов в срединно-океанических хребтах (на примере Баренцева и Норвежского

- морей) // Геология нефти и газа. 1997. - №08 - <http://geolib.narod.ru/Journals/OilGasGeo/1997/08/Stat/01/stat01.html>
- 12 А.И. Гончар, С.И. Донченко, А.Г. Мартынюк, Л.И.Шлычек Вероятные характеристики рассеяния факелов выброса газа с подводного трубопровода // Гидроакустический журнал (Проблемы, методы и средства исследований Мирового океана): Сб. науч. тр. – Запорожье: НТЦ ПАС НАН Украины. – 2008. - №5. - С. 104-11
 - 13 Урик Роберт Дж. Основы гидроакустики/ пер. с англ. – Л.: Судостроение, 1978. – 448 с.
 - 14 Зубова М.А. Гидраты природных газов в недрах Мирового океана // Морская геология и геофизика: обзор ВНИИ экономики минерального сырья и геолого-разведочных работ. - М., 1988.
 - 15 Горчилин В.А., Лебедев Л.И. О признаках газогидратов в осадочной толще Черного моря и возможном типе ловушек углеводородов // Геологический журнал. – 1991. - №5.
 - 16 Tucholke В.Е., Bryan G.M., Ewing J.I. Gas-hydrate horizons detected in seismic-profiler data from the western North Atlantic // AAPG Bull. 1977, vol.61, №5, p.628-707.
 - 17 Корсаков О.Д., Ступак С.Н., Беков Ю.А. Черноморские газогидраты - нетрадиционный вид углеводородного сырья // Геологический журнал. – 1991. - №5.
 - 18 Номотканов В.П., Ступак С.Н. Признаки газогидратных залежей в Черном море // Изв. ВУЗов, Геология и разведка. – 1988. - №3.
 - 19 Акустика дна океана / Под ред. Купермана У. и Енсена Ф. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
 - 20 Taylor C. Formation Studies of Methane Hydrates with Surfactants. 2nd International Workshop on Methane Hydrates. October 2002, Washington