

УДК 553.6+551.2

ГАЗОГИДРАТЫ В ОСАДОЧНОМ ЧЕХЛЕ ПАССИВНЫХ ОКЕАНИЧЕСКИХ ОКРАИН: ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗА ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ АЛЬТИМЕТРИИ В АТЛАНТИКЕ И АРКТИКЕ

© 2009 г. С. Ю. Соколов, А. О. Мазарович

Геологический институт РАН
119017 Москва, Пыжевский пер., 7;
E-mail: sysokolov@yandex.ru, amazarovich@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.12.2008 г.

Проведен анализ фактических данных по акустическим признакам флюидных проявлений, отрицательным гравитационным аномалиям, рассчитанным на основе спутниковой альтиметрии, тектоническим деформациям и находкам ультраосновных пород и серпентинитов. Эти данные устойчиво формируют в Атлантике субширотные группы, которые прослеживаются поперек акватории океана. Полученная картина выявляет следующую причинно-следственную цепочку процессов: 1 – тектонические деформации –>2 – серпентинизация ультраосновных пород и генерация метана –>3 – аккумуляция газогидратов в осадочном чехле у континентальной окраины. 2-ой процесс сопровождается формированием отрицательных гравитационных аномалий, а 3-ий – специфическим отображением флюидов в акустическом волновом поле. Это создает основу для прогноза наличия газогидратов по редукции данных спутниковой альтиметрии и картам осадочного чехла регионального масштаба в Атлантике и Арктике.

ПРЕДПОСЫЛКИ МЕТОДА ПРОГНОЗА

В начале 1980-х годов на дне Мирового океана были исследованы два типа источников abiогенного метана. Первый тип связан с высокотемпературными (до 400°C) гидротермальными системами, приуроченными к осевым частям срединно-океанических хребтов (СОХ), описание которых можно найти в многочисленных публикациях, например [Rona, Scott, 1993]. Тектонические особенности расположения этих систем свидетельствуют об их взаимосвязи с областями повышенной трещиноватости коры в области СОХ, облегчающей циркуляцию вод [Мазарович, Соколов, 1998], что выявляется, в частности, по зонам пониженного фона сейсмичности с магнитудами более 3 по шкале Рихтера [Mazarovich, Sokolov, 2002]. По ряду геохимических признаков [Charlou et al., 1998] метан этого типа образуется в результате взаимодействия морской воды преимущественно с базальтами.

Генерация метана второго типа, а также водорода происходит в процессе серпентинизации мантийных перidotитов [Charlou et al., 1991, 1998; Donval et al., 1997; Симонов и др., 1999] и приурочена к выходам массивных мантийных гипербазитов вблизи некоторых трансформных разломов Срединно-Атлантического хребта (САХ). В работе [Charlou et al., 1998] сделан вывод о том, что такие явления обычны для участков САХ, где в условиях медленного спрединга и низкопродуктивного базальтового магматизма образуется ко-

ра с широким распространением остаточных мантийных гипербазитов (кора “Хессовского типа” [Cannat et al., 1995]).

В работе [Дмитриев и др., 1999] приведены данные по геохимическим особенностям процесса серпентинизации и количественной оценке потенциальных объемов генерации метана – из 1 км³ ультраосновной породы, участвовавшей в реакции, было выделено – 2.5×10^5 т метана при отношении вода/порода равном 2 и содержании в морской воде в среднем 2.4 ммоль/кг углекислоты. Оптимальный температурный диапазон для данного процесса – 150–350°C при наличии проницаемости пород, обусловленной их тектонической трещиноватостью. Величина отношения вода/порода может меняться в диапазоне от первых десятков до нескольких тысяч в зависимости от геодинамической обстановки, формирующей трещиноватость. Постепенное погружение изотермы 400°C от СОХ к пассивным окраинам увеличивает эффективную мощность слоя потенциальной генерации метана. Таким образом, по мере удаления от СОХ главным фактором, влияющим на процесс, является наличие тектонических деформаций, формирующих систему трещин, и доступ к воде с необходимым количеством растворенной углекислоты.

В работе [Дмитриев и др., 1999] также приведена оценка объема метана, который может образоваться в процессе аккреции литосферы Атлантического океана в сегменте от экватора до

~35° с.ш. Эффективная глубина подошвы слоя, где может происходить серпентинизация, с приближением к пассивной окраине океана с возрастом около 150–170 млн лет может достигать 10–15 км. При этом литосферные перидотиты, не испытавшие серпентинизации под осевой зоной СОХ, где по статистике драгирования [Дмитриев и др., 1999] выходы перидотитов составляют примерно 10% площади, за его пределами остаются до температур, при которых становится возможной их серпентинизация. Площадь коры “Хессовского типа” при ширине океана порядка 4000 км и протяженности параллельно оси хребта 3000 км равна 12×10^6 км². Принимая среднюю мощность пород, где возможна дополнительная серпентинизация, равной 5 км при содержании в их составе перидотитов в 10%, “объем слоя потенциальной серпентинизации составит 6×10^6 км³ с выделением 3×10^{12} т Н₂ и 1.5×10^{12} т СН₄, что близко к оценкам, сделанным для открытой рифтовой зоны. Это означает, что общий баланс выхода водорода и метана при формировании литосферы с пассивными окраинами может быть удвоен по сравнению с оценкой для открытой рифтовой зоны” [Дмитриев и др., 1999, стр. 515].

Существует проблема доступа океанской воды к неизмененным перидотитам, так как они перекрыты слоем серпентинитов, метагаббро, метабазальтов и вышележащим чехлом осадков. В этом случае проницаемость коры в сильной степени зависит от наличия в ней трещин и разломов разного масштаба, что контролируется тектоническим режимом внутри океанических плит. Согласно [Мазарович, Соколов, 1998], их формирование сопровождается постоянной сменой тектонических напряжений разного направления, осложненных периодическими проявлениями магматизма.

Осадочный чехол на магматическом субстрате препятствует просачиванию воды в фундамент. Однако в случае быстрого образования осадочного чехла вода захороняется вместе с осадками и может поступать в фундамент по системе трещин, образованных в субстрате. Обычно осадочный чехол играет роль флюидоупора, препятствующего дегазации водорода и метана и способствующего их аккумуляции, в частности, в виде газогидратов.

“В целом данная обстановка не благоприятствует развитию процесса серпентинизации из-за дефицита воды, проникающей в фундамент. Однако именно дефицит воды позволяет предполагать, что если в этой обстановке происходит серпентинизация перидотитов, то она протекает при низком отношении вода/порода и сопровождается максимальным уровнем генерации водорода и метана” [Дмитриев и др., 1999, стр. 515].

Ультраосновные породы, состоящие из минералов с плотностью около 3.25 г/см³ в процессе их серпентинизации замещаются породами с плотностью около 2.55 г/см³, то есть происходит уменьшение на 20 % их плотности, а, следовательно, и увеличение объема [Физические..., 1984]. Данный фактор может являться одним из поисковых признаков при прогнозе скоплений метана на акваториях в осадочном чехле. При уменьшении плотности на 0.7 г/см³ и мощности серпентинитового слоя до 5 км максимальная величина гравитационных аномалий, связанных с зонами серпентинизации, может достигать 140 мГал по сравнению с зонами, где ультраосновные породы не подвержены изменениям. Особо отметим, что это оценка верхнего предела и касается она аномалий Буге и их пересчета в остаточные аномалии, а не аномалий в свободном воздухе, в которых гравитационный эффект рельефа еще не компенсирован. Данная величина более чем на порядок превышает оценку точности гравитационных аномалий, полученных для акватории Мирового океана по данным спутниковой альтиметрии и равную 7–10 мГал [Sandwell, Smith, 1997]. Исследование гравитационного поля дна океана по спутниковым данным позволит выявить области, где прогноз обнаружения зон серпентинизации и генерации метана является положительным. Данное исследование, проведенное на акватории хорошо изученной Атлантики с подтвержденным наличием газогидратов, драгированных серпентинитов и метановых аномалий в воде, коррелируемых с гравитационными аномалиями, позволит сделать по аналогичным аномалиям прогноз для акватории Арктики.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ГРАВИТАЦИОННЫХ ДАННЫХ

Данные альтиметрии [Sandwell, Smith, 1997] представляют собой высоты уровня океана, пересчитанные в гравитационные аномалии в свободном воздухе. Основной вклад в вариабельность этих аномалий вносится рельефом дна, а на долю плотностных неоднородностей приходится около 35%. Первым шагом в обработке данных является расчет аномалий Буге, физический смысл которых состоит в удалении гравитационного влияния рельефа из данных альтиметрии. Рельеф измерен эхолотными промерами и является независимым параметром [ETOPO5, 1993], никак не связанным с альтиметрией, что делает расчет объективным. Вариабельность аномалий Буге связана в основном с плотностными неоднородностями коры и мантии. Для большинства геологических задач интерес представляют неоднородности коры, создающие аномалии с поперечными размерами до 30–35 км. По приблизительным, но весьма эффективным оценкам поперечные раз-

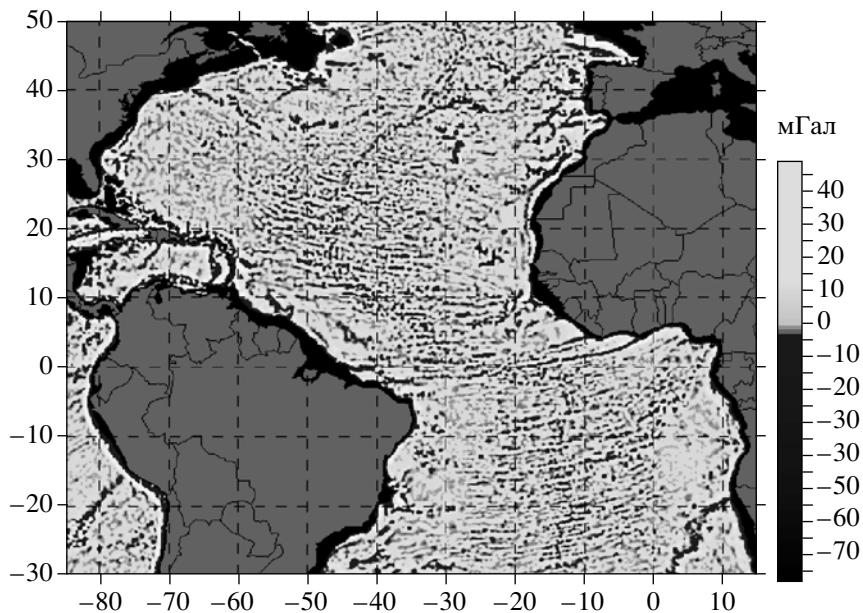


Рис. 1. Остаточные аномалии Буге в Атлантическом океане.

меры и глубина источника аномалии соотносятся как 3 к 1, а при средней глубине океана 4 км и мощности коры 5–7 км мы получим именно эти поперечные размеры. Размеры аномалий, создаваемых температурными неоднородностями в мантии, существенно превышают указанные значения. В неразделенном виде гравитационный эффект коры в сильной степени маскируется влиянием мантии, которое устраняется путем введения компенсации за термические эффекты. Оставшаяся часть аномалий, называемая остаточными аномалиями Буге, представляет эффект коровых неоднородностей в максимальной степени “очищенный” от влияния других факторов (рис. 1).

Полученные аномалии отражают влияние переменных мощности и плотности коры, в общем виде неразделяемых используемыми редукциями гравитационного поля. Предложен способ расчета аномалий, в которых эффект плотностных вариаций был бы выражен в максимальной степени. Суть его состоит в том, что осуществляется вариационный подбор плотности, которая в некоторой окрестности точки дает наилучшую компенсацию рельефа при расчете аномалий Буге. В данном случае был проведен расчет для каждой точки покрытия акватории в радиусе 35 км. Перебор плотностей проводился в диапазоне от 1 до 6 г/см³ с шагом 0.01 г/см³. Для заведомо низких значений плотности компенсация рельефа практически отсутствует, и коэффициент корреляции рельефа и аномалий Буге близок к 1. Для заведомо больших значений плотности получается избыточная компенсация рельефа, и форма анома-

лии становится инверсной с коэффициентом корреляции близким к –1. Это означает, что имеется переход через ноль, что позволяет определить оптимальную плотность в окрестности рассчитываемой точки. Данный метод не применим в случае, если большая часть площади покрыта осадочным чехлом мощностью более 200 м, при этом нарушается корреляционная связь рельефа и главной гравитирующей поверхности, какой является акустический фундамент. Полученные в результате расчета плотностные аномалии представлены на рис. 2.

Эти аномалии имеют реалистичный средний уровень, равный 2.62 г/см³; положительные и отрицательные отклонения от этого уровня показывают качественную картину распределения плотности в коре, количественная калибровка которой выходит за рамки данной работы. Как по остаточным аномалиям (см. рис. 1), так и по плотностным (см. рис. 2), хорошо видно обосновление сегмента центральной Атлантики с корой “Хессовского” типа, в состав которой входят перидотиты, подверженные серпентинизации и создающие отрицательный плотностной фон на флангах САХ. Отметим, что области существенного отрицательного фона имеются в южной Атлантике, которая изучена драгированием хуже, чем северная.

СОПОСТАВЛЕНИЕ АНОМАЛИЙ ПЛОТНОСТИ С ПРОЯВЛЕНИЯМИ ПЕРИДОТИТОВ И ГАЗОГИДРАТОВ

Анализ пространственного положения проявлений газогидратов (рис. 3) показывает следующее. На акватории Атлантики – океана с пассив-

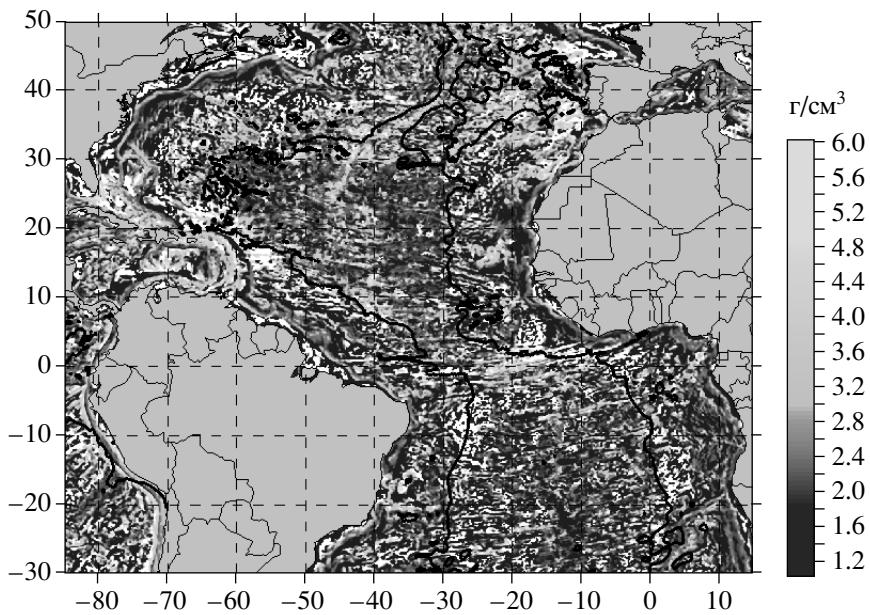


Рис. 2. Плотностные аномалии в Атлантическом океане и изопахита 200 м, по [Divins, 2003], показывающая границу применимости метода расчета плотностных аномалий.

ными окраинами – основные проявления газогидратов имеют место вблизи западных континентальных окраин в сегменте от экватора до 35° – 40° с.ш., то есть в полосе, где по результатам исследований пород САХ проявлена кора “Хессовского” типа. Кроме того, отрицательные плотностные аномалии (см. рис. 2), связанные, скорее всего, с серпентинизацией пород в котловинах, трассируют данный тип коры от САХ до континентов в этих же широтных пределах. На наш взгляд, это не может быть случайным совпадением.

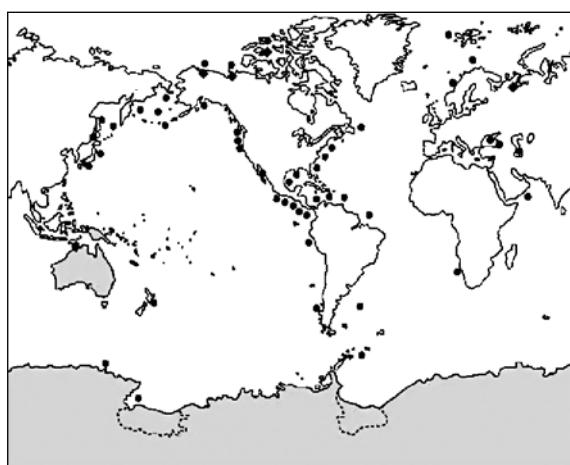


Рис. 3. Местоположение проявлений газогидратов в океанах, по [Downey et al., 2001] с изменениями.

Проявления газогидратов отмечаются и в южной Атлантике, но значительно реже. Это может быть связано с существенно меньшей изученностью региона к югу от экватора по всем методам исследования: опробованию дна, акустическому профилированию, гидрохимии и т.д. Но при этом плотностные и остаточные аномалии гравитационного поля свидетельствуют в пользу существования в этом регионе подобных проявлений.

Изученность региона донным опробованием представлена на рис. 4, где показаны находки ультраосновных пород, серпентинитов и метановых

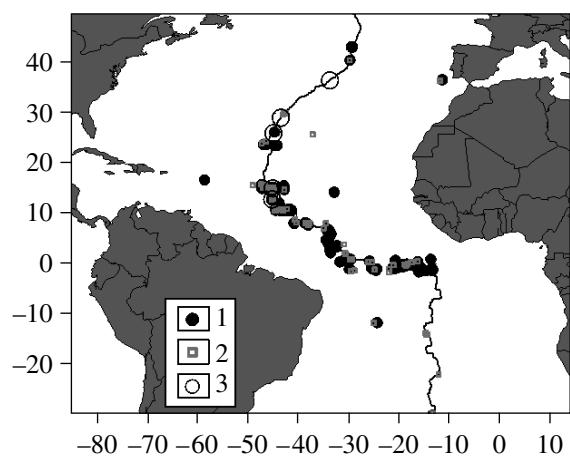


Рис. 4. Местоположения проявлений перидотитов (1), серпентинитов (2) и метановых плюмов (3) по литературным данным.

плюмов, по многочисленным литературным данным, собранным в базу данных Лаборатории геоморфологии и тектоники дна океанов Геологического института РАН (347 записей с указанными типами пород в данном сегменте океана).

Из анализа распространенности ультраосновных пород и продуктов их преобразования (далее – целевой комплекс) и сопоставления их с гравитационными аномалиями следуют выводы, важные для прогноза газогидратов в Арктике – акватории, которая в отличие от Атлантики практически не изучена донным опробованием. Массовые проявления целевого комплекса приурочены к сегменту хребта, имеющему максимальный радиус кривизны и увеличенное отношение длины оффсетных зон к разделенным сегментам САХ. Именно в этих зонах лучше всего выражены тектонические деформации САХ и его флангов. Как отмечено в ряде работ на основании геологических данных драгирования, например [Разницын, 2004], многие обнажения целевого комплекса могли сформироваться в результате горизонтальных тектонических перемещений блоков коры в субмеридиональном направлении и частичном надвигании вдоль линий трансформных разломов. Кроме того, именно в этом сегменте наблюдается максимальная плотность мультитрансформных систем со спаренными (Марафон, Меркурий), строенными (Архангельский, Долдрамс, Вернадский) и даже учетверенными системами трогов (Сан-Паулу). Это говорит о том, что макротрешиноватость коры в данном районе может быть существенно больше, чем в других районах акватории, и, как следствие этого, более интенсивно протекает процесс серпентинизации по системе трещин, в том числе на флангах хребта. Аномальные поля (см. рис. 1 и 2) имеют в данном сегменте обширные отрицательные зоны, происхождение которых логически связывается с тектонической картиной района, где проявлен целевой комплекс. Таким образом, геодинамическая обстановка, отражающая раздробленность района, способствует интенсификации серпентинизации мантийного субстрата. Поисковым признаком на метан являются обширные отрицательные поля на плотностных и остаточных аномалиях, рассчитываемых по данным спутниковой альtimетрии.

Интересной особенностью распределения целевого комплекса в пространстве является выделение 4-х обособленных групп, расположенных от экватора до 6° с.ш. (наиболее многочисленная), от 10° с.ш. до 16° с.ш. (ассоциация разлома $15^{\circ}20'$), от 24° с.ш. до 30° с.ш. и от 35° с.ш. до 45° с.ш. в районе Азоро-Гибралтарского порога. В работе [Sokolov et al., 2008] после проведения кластерного анализа 10 геофизических параметров было выделено на акватории Атлантики несколько субширотных зон, которые отличаются устойчивым контрастным сочетанием повышенных зна-

чений аномалии Буге и пониженных значений изостатической аномалии, подобное которому встречается в преддуговых областях Тихого океана. Субширотный характер этих зон и наличие в них надвигов, выявляемых по сейсмическим профилям меридиональной ориентации [Sokolov, 2007], захватывающим весь осадочный комплекс, позволяют предположить в них наличие современной тектонической активизации, порожденной субмеридиональным движением блоков океанической коры. Отмеченные выше пространственные группы целевого комплекса попадают именно в эти обособленные зоны, выделенные при независимом исследовании литосферы океана. Скорее всего, это означает, что активизация нового вектора движения литосферных блоков происходит вдоль разломных зон, существовавших ранее, и возможно появление новых обнажений целевого комплекса вдоль старых линеаментов.

ПРИЗНАКИ НАЛИЧИЯ ФЛЮИДОВ В СЕЙСМИЧЕСКИХ И АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЯХ

На удаленных флангах САХ и далее к континентальной окраине формируется осадочный чехол, который способен аккумулировать газообразные продукты серпентинизации и сохранять их в виде газогидратов при определенных Р-Т условиях. В том случае, когда зоны серпентинизации обнажены на дне, происходит выделение метана в морскую воду и формирование метановых плюмов и скоплений пузырей. Эти объекты достаточно хорошо фиксируются в акустическом поле эхолотов и высокочастотных профилографов в виде характерных картин дифракции волн.

На рис. 5 приведены примеры акустической записи разгрузки флюидов в водную толщу. Данные объекты расположены в одной из субширотных зон, выявленных по кластерному анализу в южной Атлантике, и также находятся в пределах отрицательных остаточных и плотностных аномалий (см. рис. 1, 2). Это достаточная убедительная иллюстрация того, что дегазация может происходить в котловине, расположенной в 1150 км восточнее САХ. В экспедиции анализ проб воды и газов не проводился, и подтвердить, что наблюдаемый выброс состоит именно из продуктов серпентинизации, мы не можем. Но бесспорным являются факты тектонической и флюидной (и, возможно, магматической) активности в котловинах, коррелируемые друг с другом в пространстве. Необходимо целенаправленное изучение этих данных также и потому, что в современной тектонической теории отсутствует непротиворечивое объяснение подобных явлений на большом удалении от краевых частей плит. Следует особо отметить, что обсуждаемая в статье причинно-следственная цепочка для метановой дегазации

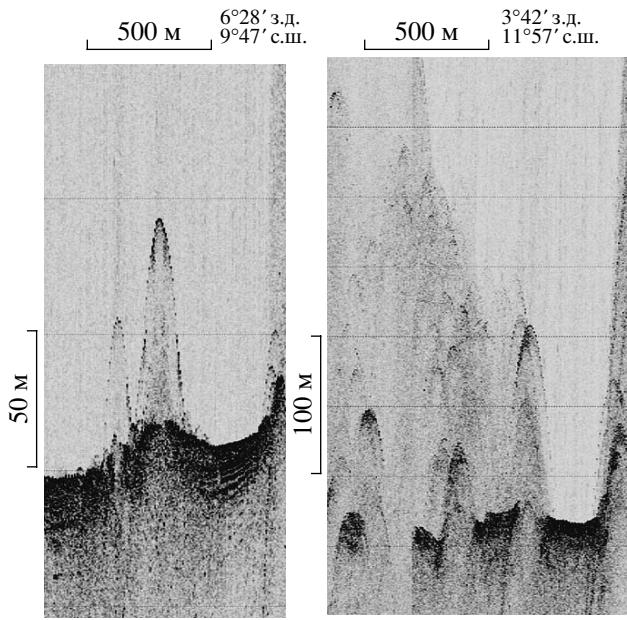


Рис. 5. Акустические изображения разгрузки флюидов в водную толщу (записи 3.5 кГц профилографа EdgeTech 3300, 23-й рейс НИС “Академик Николай Страхов”, 2006 г.).

является частным случаем общей дегазации Земли, и акустические записи с признаками существования газов в воде теоретически могут иметь и иную природу, которую в данной статье мы не рассматриваем.

Сейсмическая запись предоставляет несколько возможностей для детекции аномального флюидного режима в океанических осадках. По данным [Панаев, Митулов, 1993, стр. 85] существуют следующие три признака наличия флюидов: появление акустической прозрачности слоев; “проседание” осей синфазности, вызванное локальным уменьшением скорости звука в осадках; проявление узких вертикальных зон акустического освещения, связанных с прорывом флюидов. Кроме того, отметим акустическое освещение осадков, примыкающих к фундаменту, проходящее сквозным образом через разные сейсмоакустические осадочные комплексы, налегающие на фундамент. Отметим, что первый упомянутый признак похож на фациальное замещение вдоль отражений от хорошо стратифицированных и контрастных до освещенных и хаотичных. В работе [Панаев, Митулов, 1993, стр. 102] отмечено, что эти признаки могут быть объяснены насыщенностью осадочных отложений свободными, “не запаянными в кристаллы газами”, образовавшимися в результате разложения газогидратов под воздействием повышенного теплового потока и гидротермальной переработки осадочного чехла. В этой же работе аномалии сейсмической записи объясняются также наличием силл, даек и

базальтовых покровов. Но последние приводят, как правило, не к освещению записи, а наоборот к ее хаотизации и “потемнению”. Кроме того, структуры протыкания, как правило, задирают вверх края осей синфазности. Таким образом, осложнения сейсмической записи бывают двух типов: связанных с флюидным режимом в осадках и с появлением инородных магматических тел, которые необходимо отличать друг от друга. Тем не менее отметим, что ситуации, когда оба типа осложнения сопутствуют друг другу, вполне реальны. Как отмечают В.А. Панаев и С.Н. Митулов в историческом обзоре исследований данного феномена, флюидное освещение осадочных пород, прилегающих к акустическому фундаменту, является надежно установленным фактом, распространенным на обширных площадях во всех океанах. По нашему мнению, данное явление связано преимущественно с серпентинизацией магматических пород фундамента и химическим взаимодействием этих пород с водой. Особо отметим, что эффект, аналогичный генерации метана при переработке ультрабазитов, для базальтов всего лишь в 2 раза менее выраженный [Дмитриев и др., 1999].

На рис. 6 показан образец субмеридиональной сейсмоакустической записи в районе уступа Кабо-Верде, отражающей деформации осадочного чехла и вертикальный прорыв флюидов, выраженный освещением записи и формированием плоской акустически контрастной кровли в месте прорыва приблизительно в 40 м от поверхности дна. Интересно отметить, что и деформации и вертикальное освещение записи происходят в области отрицательных плотностных аномалий (см. рис. 2), совпадающей с субширотной аномальной зоной, выявленной в результате кластерного анализа [Sokolov et al., 2008].

Причина совпадения подобных данных – мелкомасштабных аномальных зон в котловинах и акустических записей с флюидными и деформационными признаками – пока неизвестна. Но проведенные сопоставления начинают выявлять картину с четкой причинно-следственной цепочкой: 1 – тектонические деформации – >2 – серпентинизация ультраосновных пород (с формированием отрицательных аномалий в гравитационном поле) и генерация метана – >3 – его аккумуляция в форме газогидратов в осадочном чехле (с формированием специфических форм акустического волнового поля). В результате процессов 2 и 3 формируются вышеупомянутые признаки, по которым может проводиться дистанционная детекция искомых зон. Тектонические деформации также имеют четкую выраженность в акустическом изображении, что прекрасно иллюстрируется данными по котловине Зеленого Мыса (см. рис. 6). Совпадение аномальных гравитационных зон с результатами геодинамического рай-

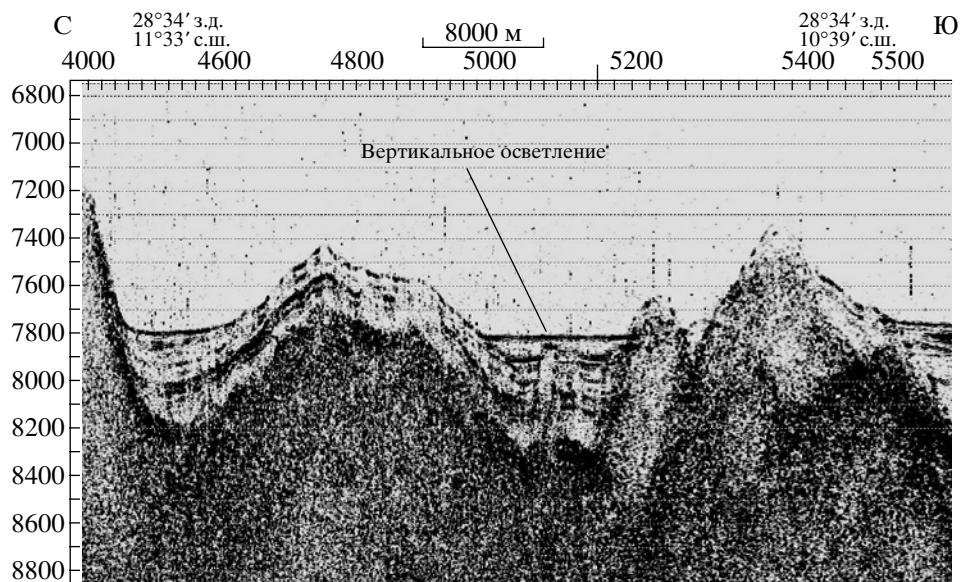


Рис. 6. Субмеридиональная сейсмоакустическая запись с вертикальным акустическим освещением в осадочной толще из-за разгрузки флюидов и пликативные тектонические деформации (22-й рейс НИС “Академик Николай Страхов”, 2000 г.).

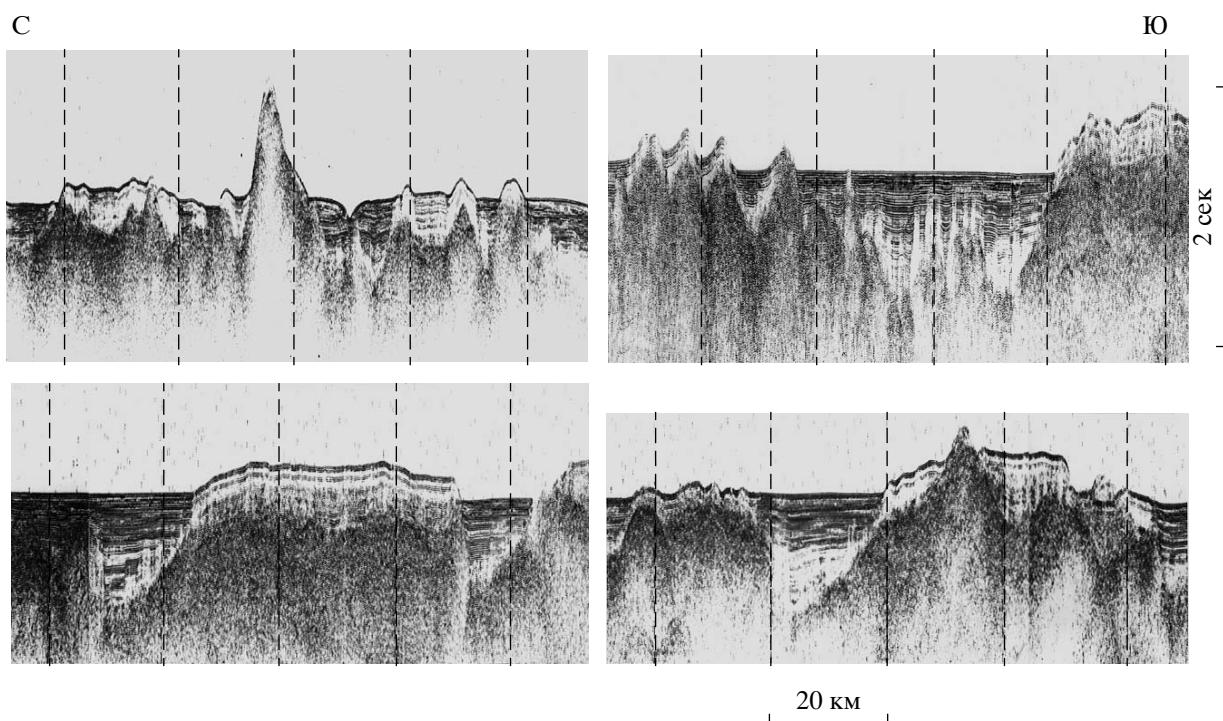


Рис. 7. Субмеридиональные сейсмоакустические записи, иллюстрирующие деформации осадочного чехла на восточных флангах разломов Архангельского, Долдрамс и Вернадского и связанные с флюидным режимом освещения записи (9-й рейс НИС “Академик Николай Страхов”, 1989 г.).

онирования по кластерному анализу [Sokolov et al., 2008] позволит пролить свет на причины возникновения деформаций, но это не тема данной работы.

На рис. 7 приведен пример сейсмоакустической записи, где сочетаются деформации и сопряженные с ними освещения записи, связанные с

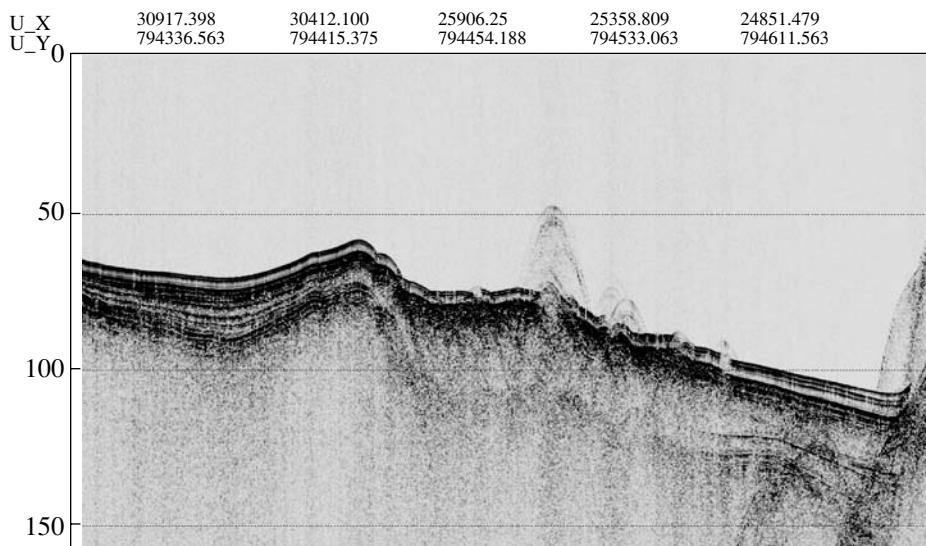


Рис. 8. Акустическое изображение разгрузки флюидов в водную толщу в районе разлома Моллой (запись 3.5 кГц профилографа EdgeTech 3300, 24-й рейс НИС “Академик Николай Страхов”, Геологический институт РАН, Норвежский нефтяной директорат, 2006 г.).

флюидным режимом в осадках. Район, где сделана эта запись, расположен в области трех разломов – Архангельского, Доддрамс и Вернадского [Мазарович, Соколов, 1997], около которых наблюдается “линза” отрицательного значения плотностных аномалий (см. рис. 2).

ПРОГНОЗ НАЛИЧИЯ ГАЗОГИДРАТОВ В ОСАДКАХ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА

Как показано на рис. 3, проявления газогидратов в Арктике известны в Канадской котловине у берегов Аляски и к западу от архипелага Шпицберген. В районе последнего в 2006 г. был проведен 24 рейс НИС “Академик Николай Страхов” (Геологический институт РАН, Норвежский нефтяной директорат). Система наблюдений этой экспедиции пересекала область известных газогидратных проявлений, описанных в [Knies et al., 2004]. По результатам работ была опубликована статья [Чамов и др., 2008], в которой показано, что тектонические нарушения, приводящие к дестабилизации газогидратных залежей и разгрузке флюидов, отражаются в осветлении акустических записей разной формы, в том числе приуроченных к дизъюнктивным нарушениям. Кроме того, сонарные изображения участков дна в местах разгрузки флюидов изобилуют воронкообразными “кальдерами” (rockmarks), образовавшимися в результате проседания грунта, а также конусообразными постройками, связанными с дегазацией и попутным выносом осадочного материала. К северу от упомянутого выше участка, в окрестностях разломной зоны Моллой, нами был обнаружен участок с интенсивными тектониче-

скими нарушениями, осветлениями записи и со следами газов в водной толще (рис. 8).

Таким образом, явление дегазации осадков, свидетельствующее об их газонасыщенности, в Арктике имеет место, причем в районах, непосредственно прилегающих к шельфу и подверженных тектоническим деформациям. Принимая во внимание причинно-следственную цепочку, упомянутую в предыдущем разделе, а также ее обоснованность для прогноза проявлений дегазации, мы провели расчет аналогичных плотностных аномалий для Арктического региона. Полученный результат представлен на рис. 9. Данный расчет проводился для гравитационных данных [Forsberg, Kenyon, 2005] и данных по рельефу [IBCAO, 2005]. Отсутствие детальной информации по осадочному чехлу, аналогичной имеющейся данным для Атлантического океана, не позволяет нам провести положение изопахиты 200 м. В качестве промежуточной границы применимости метода расчета плотностных аномалий было использовано положение бровки шельфа, при этом учитывалось, что на акватории Арктики имеются огромные (мощностью до 20 км) осадочные тела, где данный метод не работает. Кроме того, оговоримся что, как и в случае, изображенном на рис. 2 значения плотностей показывают качественную картину их вариации и не калиброваны количественно.

Участок дегазации, представленный на рис. 8, расположен вблизи разломной зоны Моллой в области отрицательного аномального плотностного поля. В пределах аномального поля расположена также точка дегазации с координатами 16°20' в.д. и 80°46' с.ш. на северной кромке архи-

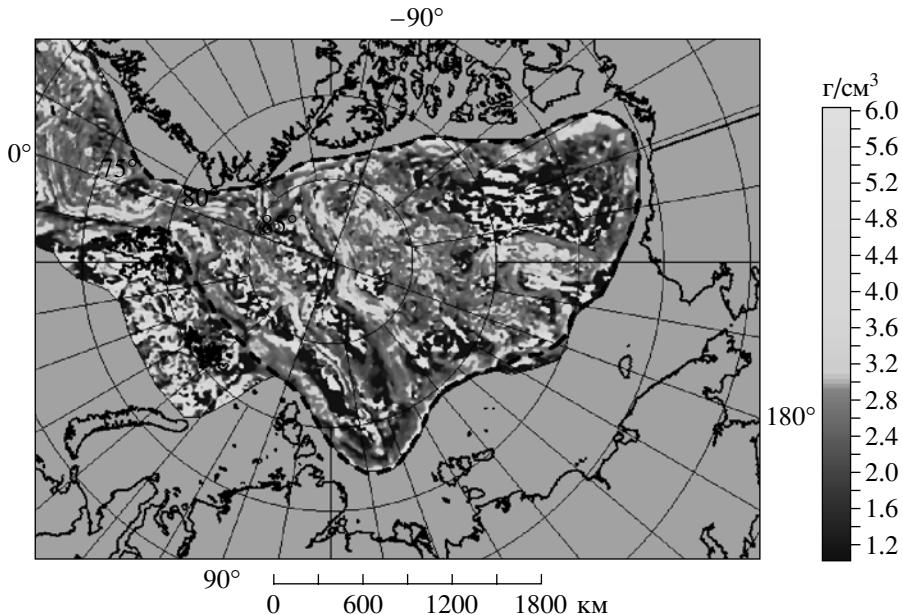


Рис. 9. Плотностные аномалии в Арктическом регионе и бровка шельфа.
Серое поле – области, где метод расчета плотностных аномалий в настоящем виде неприменим.

пелага Шпицберген. Авторы не располагают таким большим количеством фактического материала по Арктическому региону, какое имеется для Атлантики, но рост интереса к нему и увеличение числа экспедиционных работ должны исправить положение и упрочить надежность прогнозных оценок, в том числе для газогидратов.

Весьма перспективным с этой точки зрения представляется континентальное подножие Евразии от моря Лаптевых до Чукотского плато в полосе шириной около 200 км. Отметим, что данная полоса примыкает к Хатангско-Ломоносовской трансформной зоне, что подразумевает наличие деформаций и макротрещиноватости коры. Кроме того, по данным, приведенным в работе [Соколов, 2009], район пересечен рядом разломных зон северо-восточной ориентации, и если принять, что Чукотское плато и южная часть хребта Менделеева являются континентальными отторженцами, то с юга от этих структур должны существовать зоны растяжения. Северная часть моря Лаптевых и поднятие Де-Лонга осложнены серией грабенов, параллельных сегменту хребта Гаккеля около его утыкания в континентальный склон. Таким образом, часть котловины, примыкающая к континентальному склону, обладает набором тектонических деформаций, увеличивающим в совокупности общую трещиноватость коры. Это должно облегчить доступ воды к ультраосновным породам мантии и инициировать процесс серпентинизации с последующим образованием метана и поступлением его в осадки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Совокупность фактических данных по акустическим признакам флюидных проявлений, отрицательным гравитационным аномалиям, тектоническим деформациям и находкам ультраосновных пород и серпентинитов свидетельствует о том, что они приурочены к субширотным зонам (в Атлантическом океане), которые по данным спутниковой альtimетрии прослеживаются от континентальных окраин поперек акватории океана.

2. В результате проведенных исследований установлена следующая причинно-следственная цепочка следующих процессов: 1 – тектонические деформации –>2 – серпентинизация ультраосновных пород и генерация метана –>3 – аккумуляция его в форме газогидратов в осадочном чехле у континентальной окраины. Второй процесс сопровождается формированием отрицательных гравитационных аномалий, а третий – признаками флюидогенерации, имеющими специфическое отображение в акустическом волновом поле. Это создает основу для прогноза наличия газогидратов в осадках по данным спутниковой альтиметрии и картам осадочного чехла регионального масштаба.

3. Для прогноза развития газогидратов в глубоководных осадках Арктического региона рассчитана карта плотностных аномалий, которая позволяет выделить наиболее перспективную зону, расположенную вдоль континентального склона от моря Лаптевых до Чукотского плато.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 06-05-65223 и темы ОНЗ № 14 Президиума РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дмитриев Л.В., Базылев Б.А., Силантьев С.А. и др.* Образование водорода и метана при серпентинизации мантийных гипербазитов океана и происхождение нефти // Российский журнал наук о Земле. 1999. Ноябрь. Т. 1. № 6. (doi: 10.2205/2000ES000030).
- Мазарович А.О., Соколов С.Ю.* Новейшие деформации осадочного чехла в пассивных частях разломов Архангельского, Долдрамс и Вернадского (Атлантический океан) // ДАН. 1997. Т. 357. № 6. С. 801–804.
- Мазарович А.О., Соколов С.Ю.* Тектоническое положение гидротермальных полей на Срединно-Атлантическом хребте // Литология и полез. ископаемые. 1998. № 4. С. 436–439.
- Панаев В.А., Митулов С.Н.* Сейсмостратиграфия осадочного чехла Атлантического океана. М.: Недра, 1993. 247 с.
- Разницин Ю.Н.* Тектоническая расслоенность литосферы молодых океанов и палеобассейнов. М.: Наука, 2004. 270 с.
- Симонов В.А., Колобов В.Ю., Пейве А.А.* Петрология и геохимия геодинамических процессов в Центральной Атлантике. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 227 с.
- Соколов С.Ю.* Тектонические элементы Арктики по данным мелкомасштабных геофизических полей // Геотектоника. 2009. № 1. С. 23–38.
- Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика / Под ред. Дортман Н.Б. М.: Недра, 1984. 455 с.
- Чамов Н.П., Добролюбова К.О., Пейве А.А., Соколов С.Ю.* Признаки присутствия газогидратов в верхней части осадочного чехла на бортах разломной зоны Моллой (пролив Фрама, Норвежско-Гренландский бассейн) // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 2008. Т. 83. Вып. 2. С. 51–60.
- Cannat M., Mevel C., Maia M. et al.* Thin crust, ultramafic exposures, and rugged faulting patterns at the Mid-Atlantic Ridge (22° – 24° N) // Geology. 1995. V. 23. P. 49–52.
- Charlou J.L., Bougault H., Appriou P. et al.* Different TDM/CH₄ hydrothermal plume signatures: TAG site at 26° N and serpentinized ultrabasic diapir at $15^{\circ}05'$ N on the Mid-Atlantic Ridge // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1991. V. 55. P. 3209–3222.
- Charlou J.L., Fouquet Y., Bougault H. et al.* Intense CH₄ plumes generated by serpentinization of ultramafic rocks at the intersection of the $15^{\circ}20'$ N fracture zone and the Mid-Atlantic Ridge // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1998. V. 62. № 13. P. 2323–2333.
- Divins D.L.* NGDC Total Sediment Thickness of the World's Oceans and Marginal Seas. 2003. (<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/sedthick/sedthick.html>).
- Donval J.P., Charlou J.L., Douville E. et al.* High H₂ and CH₄ content in hydrothermal fluids from Rainbow site newly sampled at $36^{\circ}14'$ N on the Amar segment, Mid-Atlantic Ridge (diving FLORES cruise, July 1997). Comparison with other MAR sites // Eos Trans. 1997. V. 78. F. 832.
- Downey M.W., Morgan W.A., Threet J.C.* Petroleum Provinces of the Twenty-first Century. N.Y.: Datapages, 2001. 573 p.
- ETOPO5 Set. Global Relief Data CD. NOAA Product # G01093-CDR-A0001. 1993.
- Forsberg R., Kenyon S.* Gravity and Geoid in the Arctic region – the northern polar gap now filled. 2005. (http://earthinfo.nga.mil/GandG/wgs84/agp/readme_new.html) IBCAO (International Bathymetric Chart of Arctic Ocean). 2005. (<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/arctic/arctic.html>)
- Knies J., Damm E., Gutt J. et al.* Near-surface hydrocarbon anomalies in shelf sediments o. Spitsbergen: Evidences for past seepages // Geochem. Geophys. Geosyst. 2004. V. 5. Q06003, doi: 06010.01029/02003 GC000687.
- Mazarovich A.O., Sokolov S.Yu.* Hydrothermal fields in the Mid-Atlantic ridge: Setting and prospects for futher discoveries // Russian Journal of Earth Sciences. 2002. V. 4. № 6. P. 423–431. (doi 10.2205/2002ES000104).
- Rona P.A., Scott S.D.* Preface, A special issue on sea-floor Hydrothermal Mineralization: New Perspectives // Economic Geology. 1993. V. 88. № 5. P. 1934–1976.
- Sandwell D.T., Smith W.H.F.* Marine Gravity Anomaly from Geosat and ERS-1 Satellite Altimetry // J. geophys. res. 1997. V. 102. № B5. P. 10039–10054. (<ftp://topex.ucsd.edu/pub/>).
- Sokolov N.S.* Correlation of the geological and geophysical parameters along the axis of the Mid-Atlantic Ridge and Pre-Arc settings on its eastern flank // Moscow University Geology Bulletin. 2007. V. 62. № 6. P. 404–409.
- Sokolov S.Yu., Sokolov N.S., Dmitriev L.V.* Geodynamic zonation of the Atlantic Ocean lithosphere: Application of cluster analysis procedure and zoning inferred from geophysical data // Russian Journal of Earth Sciences. 2008. V. 10. P. 1–30. doi:10.2205/2007ES000218.