

На правах рукописи

Бочарова Алина Александровна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КАРТИРОВАНИЯ ЗОН РАСПРОСТРАНЕНИЯ
ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА
МОРСКИХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

25.00.10 Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва – 2013 г.

Работа выполнена в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель: Кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник
Шалаева Наталья Владимировна

Официальные
оппоненты: Никитин Алексей Алексеевич,
Доктор физико-математических наук, профессор,
Московский государственный геологоразведочный
университет имени С. Орджоникидзе, профессор

Петров Евгений Игнатьевич
кандидат физико-математических наук,
ОАО «Севернефтегаз», главный геофизик

Ведущая организация: Институт Океанологии РАН им. П.П. Ширшова

Защита диссертации состоится 17 апреля 2013 года в 14 часов 30 минут на заседании Диссертационного совета Д.501.001.64 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, д.1, ГЗ МГУ, зона «А», Геологический факультет, аудитория 308.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале отдела диссертаций Фундаментальной библиотеки (Ломоносовский проспект, 27, сектор А, 8 этаж, к. 812)

Автореферат разослан 15 апреля 2013 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Никулин Борис Александрович

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Обнаружение свойства природных газов образовывать в земной коре залежи в твердом газогидратном состоянии стало важным научным открытием в конце 60х годов и стимулировало начало масштабных исследований природных газовых гидратов во всем мире. С тех пор гидраты представляют интерес для исследователей в разных областях науки.

К наиболее важным причинам изучения гидратов относятся следующие:

1. Гидраты могут составить конкуренцию традиционным месторождениям углеводородов в силу широкого распространения, относительно неглубокого залегания и содержания большого количества газа.
2. В ряде случаев гидраты играют роль крышки для нижележащих залежей и поэтому служат индикатором более глубоких залежей углеводородов.
3. Гидраты являются негативным фактором при инженерных и буровых работах на акваториях. Образование большого количества газа из газовых гидратов вследствие техногенного воздействия может привести к разрушению добывающих платформ и других инженерных объектов.

Кроме того, гидраты представляют интерес для биологов как источник питания для живых организмов на больших глубинах в акваториях (Иванов, 2010). Разложение гидратов, по мнению экологов, может привести к изменению климата.

По данным (Макагон, 2003) подавляющее большинство известных на сегодняшний день скоплений гидратов было обнаружено на акваториях. Значительная часть исследований природных гидратов на акваториях посвящена проблемам выявления зон их распространения и оценки запасов газа как содержащегося в виде гидратов в пределах зоны стабильности, так и удерживаемого в поровом пространстве породы ниже зоны стабильности.

При решении перечисленных проблем применяются различные методы: пробоотбор, бурение, геохимический анализ, гидролокация бокового обзора, а также сейсмические методы (ВСП, 2D/3D МОГТ и т. д.). Преимуществом

сейсмических методов перед остальными перечисленными является относительно низкая стоимость работ, возможность проведения работ в труднодоступных для других методов областях, а также охват исследованиями обширной территории, что необходимо для оценки запасов природного газа в недрах. Для анализа сейсмических данных на предмет поиска индикаторов проявления гидратов и свободного газа применяется множество стандартных технологий анализа сейсмических данных.

Основным сейсмическим признаком наличия гидратонасыщенных толщ является BSR (от английского «Bottom Simulating Reflector»- отражение, повторяющее дно) – ось синфазности отраженной волны, соответствующая подошве зоны стабильности газовых гидратов и характеризующаяся следующими признаками: обратной полярностью по отношению к отражению от дна и формой, примерно повторяющей рельеф дна. Анализ распространения и поведения BSR на сейсмическом разрезе может быть дополнен результатами скважинных измерений при наличии скважин на территории исследований. Следует отметить, что большинство из перечисленных методов в первую очередь ориентировано на поиск газа ниже зоны стабильности, нежели на поиск непосредственно гидратов. Эта особенность объясняется большим контрастом физических свойств газонасыщенных толщ по отношению к гидратонасыщенным и водонасыщенным. Кроме того, ни один из перечисленных методов не является самостоятельным и универсальным для выявления гидратов без привлечения априорной геологической информации.

К настоящему времени накоплен большой объем сейсмических и каротажных данных, посвященных проблеме исследований, существуют различные способы поиска и количественной оценки гидратов сейсмическими методами, в основном, эффективные только для конкретных типов данных и локальных районов исследования. В силу опасности проведения инженерных работ и бурения на территориях распространения

гидратов, многие районы исследований характеризуются отсутствием скважинной информации и тем более результатов пробоотбора. Таким образом, несмотря на большое количество публикаций по данной тематике, проблема картирования зон распространения гидратов и выявления участков их повышенного насыщения остается открытой.

Цель работы. Целью работы является разработка методики картирования зон распространения газовых гидратов на основе спектрального анализа морских сейсмических данных.

Основные задачи исследований:

1. Изучение современных представлений о сейсмических методах изучения гидратонасыщенных толщ, о природе неупругого поглощения в многофазных средах, которыми являются гидратонасыщенные породы, и экспериментальных данных о поглощении в газовых гидратах.
2. Анализ совместного влияния эффектов интерференции и неупругого поглощения на спектральные характеристики отраженных волн в условиях распространения газовых гидратов.
3. Исследование возможности разделения волновых полей кратных волн, волн-спутников и однократных отражений в области BSR.
4. Разработка алгоритма прослеживания BSR в условиях сильной интерференции.
5. Разработка методики картирования областей с повышенным содержанием гидратов и свободного газа на основе спектрального анализа данных.
6. Опробование предложенной методики на морских данных МОГТ.

Основные защищаемые положения:

1. Предложенный способ выделения подошвы газовых гидратов на участках записи, осложненных волнами-помехами и интерференцией с отражениями от других границ, позволяет получить более детальную

информацию о зонах распространения гидратов и уточнить положение этих зон на картах.

2. Предложенный спектральный атрибут, рассчитываемый как отношение амплитудных спектров от одного и того же отражения для гидратонасыщенных и газонасыщенных пород, позволяет локализовать и детально изучать эффект гидратонасыщенности и газонасыщенности породы вблизи подошвы зоны стабильности.

3. Предложенная методика картирования на основе использования устойчивого спектрального атрибута позволяет выделять области повышенной концентрации гидратов и свободного газа.

Научная новизна. Впервые для анализа осложненных интерференцией сейсмических данных, полученных в условиях распространения газовых гидратов, на основе адаптивного вычитания предложен алгоритм разделения волновых полей на составляющие, ответственные за поле однократных отражений от литологических границ, поле кратных волн, поле волн-спутников, а также поле BSR.

Предложена методика картирования областей распространения и областей с повышенным содержанием гидратов на основе расчета устойчивого спектрального атрибута.

Впервые для выявления зон с повышенным содержанием свободного газа и гидрата предложено использовать спектральные характеристики волн, отраженных от литологической границы, пересекающей подошву зоны стабильности гидратов.

Практическая значимость

1. Разработанная методика определения поглощающих характеристик разреза после разделения волновых полей на основе адаптивного вычитания может быть использована для картирования гидратонасыщенных зон, а также зон с повышенным содержанием свободного газа под BSR.

2. Разработанная методика картирования зон повышенной газонасыщенности в условиях сложной интерференции в области границы BSR была опробована на примерах сейсмических данных, полученных на акваториях Северного, Черного и Баренцева морей. На основании предложенного атрибута с привлечением априорных представлений о геологии района для каждой исследуемой площади были получены карты распределения газонасыщенных зон, хорошо согласующиеся с априорной информацией о распространении гидратонасыщенных и газонасыщенных пород в районах исследования.

Результаты, полученные в работе, были использованы в геологических отчетах МГУ имени М.В. Ломоносова для компании ОАО «НК Роснефть Шельф-Юг».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 работ, в том числе 1 статья в журнале, рекомендованном ВАК.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на следующих конференциях: 9я международная научно-практическая конференция «Геомодель», Геленджик, 2007 г.; 3-я Международная конференция и выставка, Санкт-Петербург, 2008 г.; 70я Международная конференция и выставка EAGE, Рим, 2008 г.; 10я международная научно-практическая конференция «Геомодель», Геленджик, 2008 г.; конференция молодых ученых и инженеров «Геоперспектива», Москва, 2008 г.; 71я Международная конференция и выставка EAGE, Амстердам, 2009 г.; 7я международная конференция и выставка «Инженерная геофизика», EAGE, Москва 2011 г.; 13я международная научно-практическая конференция по проблемам комплексной интерпретации геолого-геофизических данных при геологическом моделировании месторождений углеводородов «Геомодель», г. Геленджик, 2011 г.; 6й Конгресс Балканского геофизического сообщества, Будапешт, 2011 г.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, содержит 140 страниц текста, включая 90 рисунков и список литературы из 90 наименований.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность своему научному руководителю – кандидату геолого-минералогических наук Н.В. Шалаевой за всестороннюю помощь в написании работы, ценные советы и консультации. Автор благодарен коллективу кафедры геологии и геохимии горючих ископаемых МГУ, особенно М.К. Иванову и А.Л. Волконской за критические замечания и помощь. Автор благодарит заведующего кафедрой сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова М.Л. Владова за ценные советы и консультации. Автор признателен коллективу компании ООО «Сеймотек» и особенно Д.Б. Финикову и О.А. Силаенкову за ценные консультации и моральную поддержку. Автор благодарит Р.Л. Певзнера за помощь при выступлениях на конференциях, критические замечания и советы. За предоставленные материалы автор благодарит компанию ОАО «Роснефть Шельф-Юг». Автор благодарит коллективы компаний ООО «Деко-геофизика» и «Деко-геофизика СК» за предоставленную возможность использовать программное обеспечение. За возможность принять участие в лабораторных экспериментах, автор благодарен Е.М. Чувилину и А.Н. Ошкину. Автор выражает благодарность всему коллективу кафедры сейсмометрии и геоакустики за знания, полученные в период обучения.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, формулируется цель и задачи исследований, охарактеризована научная новизна работы, проблемы картирования зон распространения гидратов на основе спектрального анализа морских сейсмических данных.

В первой главе содержатся краткие сведения о строении и распространении газогидратов, представлен обзор известных на сегодняшний день способов изучения осадков, содержащих газовые гидраты, сейсмическими методами.

Газовые гидраты образуются и длительно существуют в зоне стабильности - диапазоне глубин с соответствующими благоприятными значениями температуры и давления при достаточном количестве воды и газа в поровом пространстве породы. Газовые гидраты распространены в акваториях всего мира. Сейсмогеологические модели, отвечающие за положение скоплений гидрата и газа в разрезе для различных районов исследований, могут существенно отличаться друг от друга.

Изучению гидратонасыщенных пород посвящено множество работ, в которых описаны наиболее эффективные сейсмические методы, основанные на анализе скоростных характеристик, амплитуд, частот, акустических импедансов и т.д. (Clennell и др., 2006; Collet и др., 2004; Zillmer и др., 2005). Следует подчеркнуть, что ни один из них не является универсальным для любой площади исследований и не дает исчерпывающую информацию о распространении гидратов по площади без комплексирования с другими методами и использования априорной геологической информации.

Основным сейсмическим признаком наличия газовых гидратов в разрезе является BSR -отражение от подошвы зоны стабильности газовых гидратов. Отражение этого типа связано с наличием гидратов в зоне стабильности и свободного газа ниже зоны стабильности. Признак BSR является одним из самых эффективных и потому обязательных признаков при анализе сейсмических данных на предмет картирования зон распространения гидратов. (Clennell и др., 2006). Отражение BSR часто хорошо прослеживается на данных, коррелируется между профилями. Однако метод анализа BSR имеет и ряд недостатков: 1 - BSR может быть связано не только с наличием гидратов, но и с наличием диагенетических переходов в разрезе; 2 - на сейсмических данных могут присутствовать множественные BSR, один из которых соответствует текущему положению подошвы зоны стабильности, а остальные являются палео-BSR, что вызывает

дополнительные трудности в оценке степени флюидонасыщенности. З – BSR не всегда хорошо выделяется на сейсмических разрезах.

Группа методов, связанных с сейсмическими исследованиями в скважинах (ВСП, ГИС, отбор керна, межскважинная томография), позволяют получать информацию высокой степени детальности, но только в локальных окрестностях скважины (Minshull и др., 2005). Кроме того, эффект техногенного воздействия на гидратонасыщенные породы может негативно сказаться на результатах последующих измерений концентрации гидратов.

Для изучения природных гидратов и картирования их распространения также используются аномалии скоростей упругих волн. Считается, что наличие гидрата в поровом пространстве повышает скорости упругих волн, а наличие свободного газа – понижает (Dillon и др., 2000). При этом установить однозначное соответствие между скоростями упругих волн и концентрацией флюида в поровом пространстве невозможно без привлечения скважинных данных и петрофизического моделирования.

В литературе встречаются примеры использования динамических характеристик волнового поля в методах AVO-анализа, акустической и упругой инверсий. Перечисленные методы эффективны, прежде всего для поиска газонасыщенных пород, ниже подошвы зоны стабильности (Adreassen и др., 1997). Для корректной работы методов требуется достаточное количество сейсмических данных по разным удалениям, высокое соотношение сигнал/шум, отсутствие в данных когерентных помех, а также скважинные данные.

В ряде случаев массивные скопления гидратов присутствуют непосредственно на морском дне. Для картирования их положения может использоваться анализ донного коэффициента отражения. Различия в коэффициентах отражения от чистого гидрата и неконсолидированного морского осадка на дне могут быть существенными (Clennell и др., 2006).

Однако гидраты присутствуют на дне не всегда, что является основным ограничением метода.

Еще одним признаком наличия гидратов считают экранирование отражений на сейсмической записи в пределах зоны стабильности. Причиной экранирования является цементация порового пространства гидратом, что делает породу более однородной, а сейсмическую запись в соответствующих участках – акустически прозрачной. Этот признак является вспомогательным, так как потеря отражений на сейсмической записи может быть обусловлена множеством причин, не связанных с влиянием порового флюида (Hyndman, 1992).

Наличие свободного газа в поровом пространстве породы выражается на сейсмических разрезах повышенным поглощением упругих волн преимущественно вблизи BSR. По мнению некоторых авторов, наличие гидрата в поровом пространстве приводит к аналогичному, но не столь ярко выраженному эффекту (Dvorkin и др., 1994). При выявлении зон повышенного поглощения эффективен анализ спектральных характеристик записи. Преимуществом анализа спектральных характеристик является наличие большого количества инструментов спектрального атрибутивного анализа. К недостаткам можно отнести неустойчивость методов этой группы к помехам и неэффективность при работе в условиях сильной интерференции волн (Рыжков, 2009).

Выполненный в главе литературный обзор свидетельствует о том, что вопросы разработки методики картирования зон распространения гидратов, а также способы выявления зон повышенной гидратонасыщенности остаются актуальными.

Во второй главе приводится обзор теоретических представлений о природе неупругого поглощения, особое внимание уделяется поглощению в многофазных средах, которыми являются гидратонасыщенные породы, в

главе также приводятся экспериментальные данные о поглощении в газовых гидратах.

В главе рассмотрены основные модели и способы описания сплошных изотропных и сплошных многофазных сред. Классические теории поглощения для модели сплошной среды исходят из представлений о реальной среде как о сплошном твердом теле, в котором наряду с чистой упругостью имеется некоторый механизм диссипации сейсмической энергии.

Теоретические работы этого направления можно разделить на две основные группы. В первой группе рассмотрен механизм поглощения вязкоупругих сред, в которых к упругим напряжениям добавляются силы вязкости или внутреннего трения. Во второй группе методов рассматривается механизм поглощения сред с упругим последствием, в которых предполагается наличие “механической памяти”, а напряжения в данный момент времени считаются обусловленными не только существующей деформацией, но и всеми предшествующими состояниями деформированного тела (Кондратьев, 1986). Зависимости коэффициента поглощения от частоты для описанных теорий плохо согласуются с экспериментальными данными (Кондратьев, 1986).

Теоретические модели несплошных поглощающих сред включают в себя модель Френкеля-Био (Biot, 1956) и ее модификации, а также модель BISQ (Dvorkin и др., 1994) и т. д. Эта группа моделей предназначена для выявления эффектов флюида в поровом пространстве и рассматривает взаимоотношение отдельных компонент породы между собой, различия в скоростях их относительного перемещения. Позднее выяснилось, что модель Био на два-три порядка недооценивает реальное поглощение, наблюдаемое на сейсмических частотах. Однако базовая идея о связи энергозатрат с относительным перемещением жидкой и твердой фаз – оказалась настолько плодотворна, что последующие продвижения в теории дискретных неупругих сред могут рассматриваться как продолжение этой идеи.

В главе помимо широко известных теорий поглощающих сред рассмотрено описание сложных многофазных сред при помощи микроэффектов механики и динамики (Николаевский, 1970). Согласно такому подходу любые многофазные среды (в том числе гидратонасыщенные и газонасыщенные породы) могут рассматриваться как сложные среды с комплексным флюидом (например, среды насыщенные водой с примесью газовых пузырьков и кристалликов гидрата). Для описания сред данного типа привлекаются законы механики и динамики флюидов - рассматриваются микроскопические эффекты перетоков флюидов, трение вследствие различных скоростей перемещения компонент породы, сжатие пузырьков газа, передача энергии между фазами и переход кинетической энергии в тепловую.

Наличие газовых гидратов и газа в поровом пространстве вносит определенную специфику в проблему изучения поглощения. Специфика объясняется самой природой образования гидратов и разнообразием возможных способов их взаимодействия с минеральным скелетом и флюидом на микроуровне. Структура вмещающей породы, объем и конфигурация порового пространства, поровый флюид, способ образования кристаллов гидратов в порах, близость к подошве зоны стабильности и процент разложившихся на свободный газ и воду кристаллов - это лишь часть микро-факторов, способных существенно влиять на волновую картину и спектральные характеристики. Значения добротности - величины, обратной поглощению, в гидратонасыщенных и газонасыщенных породах варьируются в зависимости от диапазона используемых частот и выбора моделей, использованных для численных оценок. Данные, полученные в лабораторных условиях или путем замеров в скважинах, часто не согласуются с результатами, полученными по сейсмическим данным. Различные модели поглощения приводят к значительным вариациям полученных величин. Таким образом, однозначное восстановление свойств

породы по величинам добротности невозможно без привлечения априорной информации.

В литературных источниках (Barton, 2007; Matsushima, 2005) приводятся величины добротности, характерные для гидратонасыщенных и газонасыщенных пород. Значения варьируются в зависимости от площади исследований, метода определения поглощения и множества других факторов. Для газонасыщенных пород значения добротности всегда низкие и лежат в диапазоне от первых единиц до нескольких десятков, для гидратонасыщенных пород значения добротности лежат в диапазоне от нескольких десятков до нескольких сотен. Мнения исследователей сходятся в том, что поглощение повышается при появлении в поровом пространстве хотя бы небольшого количества свободного газа, относительно влияния гидратов на поглощение - единого мнения нет (Dvorkin и др., 2004). В ряде случаев в гидратонасыщенных породах было выявлено повышенное поглощение, в некоторых случаях поглощение в гидратонасыщенных породах не отличалось от поглощения в водонасыщенных породах. Таким образом, при наличии на сейсмическом разрезе BSR в окрестности этого отражения можно ожидать проявления эффекта повышенного поглощения, обусловленного наличием гидратов выше подошвы зоны стабильности и свободного газа ниже нее.

Проведенный анализ теоретических представлений о природе неупругого поглощения приводит к выводу о том, что разработка методики картирования зон распространения газовых гидратов на основе спектрального анализа морских сейсмических данных теоретически обоснована.

В третьей главе описана методика разделения волновых полей на основе адаптивного вычитания, приводится обоснование необходимости разделения волновых полей для улучшения качества спектрального анализа, приводятся результаты применения методики к сейсмическим данным.

Частотный состав записи зависит от следующих факторов: методика проведения работ, геологическая среда, процедуры математической обработки.

Влияние геологической среды выражается в затухании волн, посредством поглощения, рассеянии на неоднородностях, расхождении, многократном переотражении, преломлении и реверберациях волн в тонкослоистых средах.

Анализ спектральных характеристик записи исключает возможность предварительного применения процедур, непосредственно направленных на изменение спектрального состава или компенсацию эффектов поглощения (Q-фильтры, спектральное отбеливание). Также искажают частотный состав сейсмической записи потрассные процедуры предсказывающей деконволюции и автоматическая регулировка усиления в диапазоне так называемых полезных частот сигнала. Остальные процедуры также могут оказывать влияние на спектральные характеристики, но в ряде случаев их применение является необходимым, например, подавление интенсивных волн помех, интерферирующих с полезными отражениями.

В литературе достаточно подробно описано использование стандартных спектральных атрибутов для оценки флюидонасыщенности пород (Копилевич и др., 2006). Однако проблема корректности их применения зачастую связана преимущественно с наличием в волновом поле сильной интерференции отраженных волн от различных границ: литологических и нелитологических (BSR, отражение от газовой контакта), когерентных и некогерентных шумов. Кроме того, на результат измерения динамических параметров записи большое влияние оказывает способ определения и его устойчивость к помехам.

Перечисленные проблемы могут быть частично устранены в процессе обработки за счет упрощения волновых полей, и последующего применения более устойчивых методов оценки спектральных составляющих.

Сейсмические разрезы, содержащие BSR, представляют довольно сложную для анализа картину. Волновое поле содержит не только интерферирующие отражения, соответствующие геологическим границам разной литологии и шероховатости, но и набор интерферирующих с ними отражений, соответствующих нелитологическим границам: однократные или множественные отражения BSR. В случаях плохого согласования приемно-излучающей группы, волны-спутники могут быть также серьезной помехой.

Спектральные оценки могут претендовать на достоверность в том случае, если будут рассчитаны без негативного влияния интерференции. Для решения этой задачи в работе рекомендуется предварительное разложение волнового поля на различные составляющие, ответственные за отражение BSR, волны-спутники, кратные волны и непосредственно волновое поле от литологических границ.

Автор предлагает использовать способ разделения волнового поля на составляющие (поле кратных волн, поле волн-спутников, BSR и остаточное волновое поле) при помощи адаптивного вычитания (Денисов и др., 2006; Никитин, 2008). Суть метода заключается в том, что из исходного волнового поля путем адаптивного вычитания последовательно устраняются предварительно смоделированные волновые поля, которые необходимо выделить или вычесть. Энергия когерентных помех может быть существенно уменьшена, спектральный состав полезных отражений сохранен, а отражение BSR может быть локализовано и подробно изучено. Разделение волнового поля на составляющие может быть полезно для последующего определения спектральных характеристик разреза, а также при прогнозе распространения газовых гидратов на участках записи без интенсивного или регулярно-прослеживаемого BSR.

Описанная выше методика демонстрируется на примере морских одноканальных данных применительно к подавлению интенсивных волн-спутников (Рис.1, Рис.2).

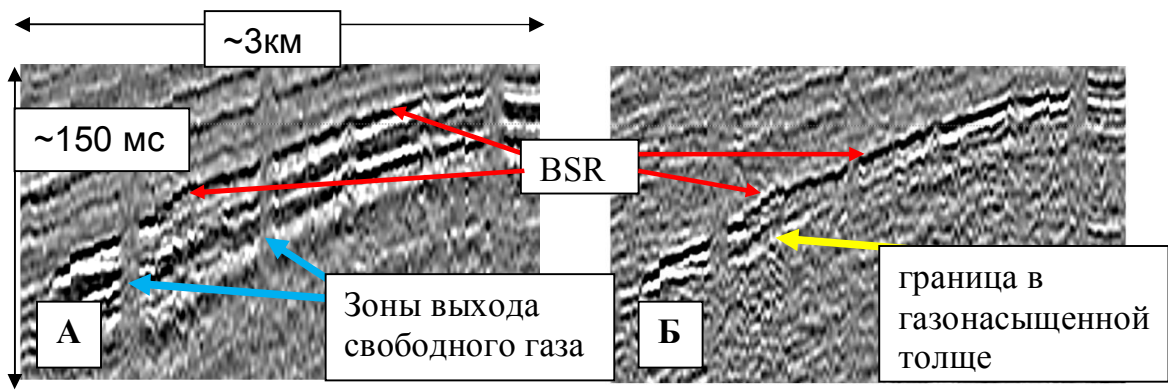


Рис.1. Фрагмент сейсмических данных до (А) и после (Б) подавления волн-спутников.

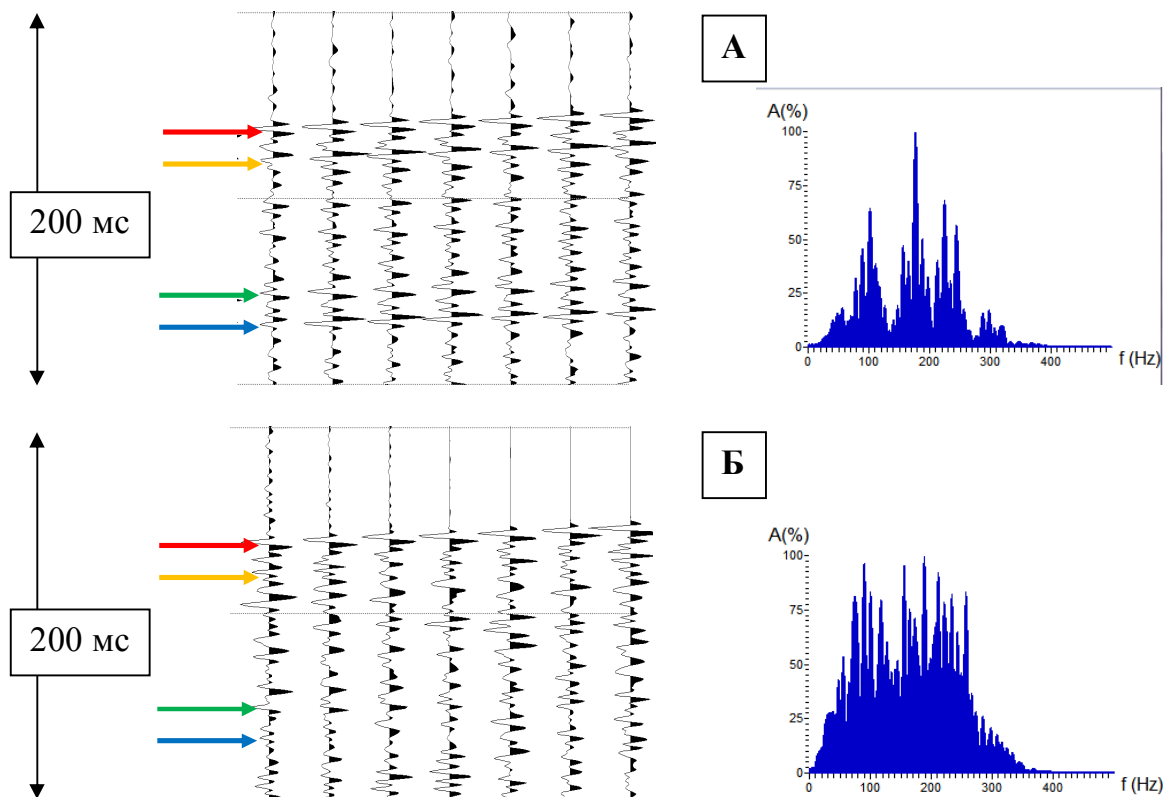


Рис.2. Форма и амплитудный спектр сигнала до (А) и после (Б) подавления волн-спутников. Красные стрелки указывают время вступления импульса, отраженного от дна, стрелки других цветов - волн-спутников.

На Рис.3. приведен пример выделения отражения BSR из интерференционного волнового поля. Слева направо показаны: исходное волновое поле, модель BSR, а также результат вычитания модели из

исходного поля и соответствующие им амплитудные спектры. Модель BSR получена путем обнуления сейсмической записи ниже и выше донного отражения, и последующим статическим сдвигом выделенного донного отражения на время, предположительно отвечающее BSR.

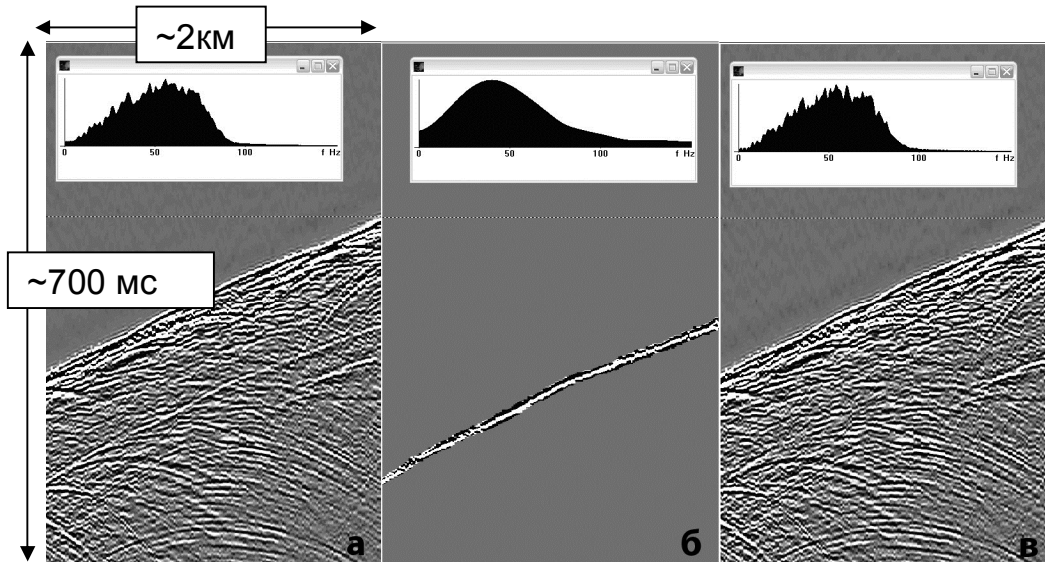


Рис. 3. Исходное волновое поле (а), модель BSR (б) и результат вычитания модели из исходного поля (в) и соответствующие им амплитудные спектры.

Анализ спектральных характеристик до и после вычитания BSR позволяет сделать вывод о том, что применение адаптивного вычитания практически не искажает спектральные характеристики записи. Методика разделения волновых полей предназначена в ряде случаев для уточнения положения BSR на тех фрагментах сейсмической записи в условиях сильной интерференции. В основном это касается ситуаций, когда BSR имеет тот же наклон, что и отражения от литологических границ и интерферирует с ними.

Таким образом, применение алгоритма разделения волновых полей на основе адаптивного вычитания может быть полезным для упрощения волновой картины и устранения интерференции на этапе подготовки данных к спектральному анализу.

В главе 4 описана методика картирования газовых гидратов на основе спектрального анализа морских сейсмических данных. Методика состоит из перечисленных ниже этапов:

1. Подготовка данных (подавление когерентных и некогерентных помех с использованием методики адаптивного вычитания).
2. Прослеживание BSR по всей площади исследований в условиях сильной интерференции при помощи алгоритма разделения волновых полей.
3. Выбор хорошо прослеживаемых отражений по возможности не интерферирующих с другими отражениями от литологических границ на всей площади исследования для последующего спектрального анализа. Выбор оптимального окна расчета спектров. Применение нижнего и верхнего мьютинга сейсмической записи в радиусе отражения для устранения влияния интерференции на расчет спектральных характеристик.
4. Оценка амплитудных спектров в окнах выше и ниже BSR. Расчет эмпирического атрибута гидратонасыщенности по наблюдаемым спектрам.
5. Сопоставление рассчитанных значений с априорной информацией. Интерполяция значений по всей площади, выделение зон повышенной гидратонасыщенности.

Анализ изменения спектральных характеристик на различных участках записи позволил сконструировать некоторый численный эмпирический атрибут, позволяющий выделить зоны повышенной гидратонасыщенности на площади, где зафиксировано наличие BSR. Требования, которым должен удовлетворять атрибут, можно сформулировать следующим образом: широкий диапазон значений, необходимый для точного выделения зон повышенной флюидонасыщенности, эффективность в случаях интерференционных волновых полей и сложной формы зондирующего импульса, устойчивость к погрешностям эксперимента и случайным помехам.

Предложенный атрибут вычисляется для одного отражения, пересекающего BSR, на основании двух амплитудных спектров, рассчитанных в окнах выше BSR и ниже него:

$$K = \frac{\int_{f_1}^{f_2} A_1(f) df}{\int_{f_1}^{f_2} A_2(f) df}$$

Где f_1 - пиковая частота в спектре над BSR, максимально близкая по величине к центральной частоте спектра, f_2 - частота, ограничивающая частотный состав полезного сигнала справа, $A_2(f)$ - функция зависимости амплитуды от частоты в нормированном спектре, измеренном над BSR, $A_1(f)$ - функция зависимости амплитуды от частоты в нормированном спектре, измеренном под BSR. Смысл атрибута – отношение площадей правых частей нормированных спектров, наиболее подверженных высокочастотному поглощению. Косвенным образом при его расчете учитываются стандартные спектральные атрибуты: пиковые частоты, ширина спектра, склон спектра. Пример расчета атрибутов приведен на рисунке 4.

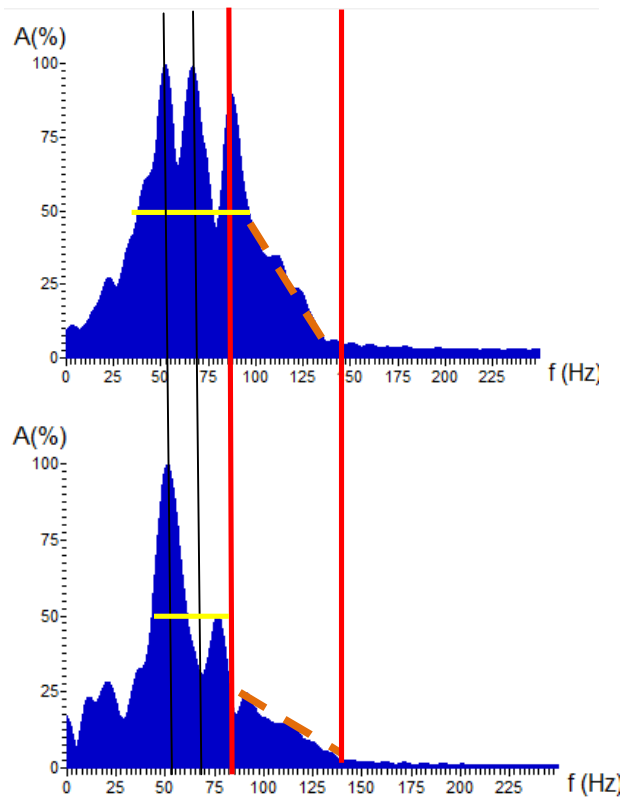


Рис 4. Схема определения спектральных характеристик для области. Черными линиями обозначены доминирующие частоты, желтой - ширина спектра, пунктиром-наклон спектра, красными линиями обозначены пределы интегрирования для расчета эмпирического атрибута. Рассчитанный в данной ситуации эмпирический атрибут равен 2,4.

Оптимальный размер окна для расчета спектра по времени должен быть таким, чтобы длина зондирующего импульса не превышала длину окна, но влияние интерференции с другими отражениями на результат спектрального анализа было минимально. Оптимальный размер окна расчета импульса по латерали должен быть таким, чтобы случайные шумы и индивидуальные особенности отдельных трасс не искажали результат определения спектральных характеристик, но в то же время, результат определения спектральных характеристик относился к локальному участку профиля, а не усреднялся на большие расстояния.

В главе описано теоретическое и экспериментальное обоснование возможности использования интерференционных спектров для спектральных оценок. Рассчитанные значения эмпирического атрибута сопоставлены с величинами добротности, вычисленными путем моделирования спектров с поглощением. Спектрам, рассчитанным в окнах выше и ниже BSR, соответствуют значения добротности, хорошо согласующиеся с литературными данными о поглощении в гидратонасыщенных и газонасыщенных толщах.

Расчет эмпирического спектрального атрибута произведен для наборов данных: Гидрат Ридж (один профиль), Туапсинский прогиб Черного моря (сеть профилей 2D) и хребет Вестнеса (сеть профилей 2D). При этом данные, полученные в районах Гидрат Ридж и хребет Вестнеса, были более высокочастотными (центральная частота в спектре ~ 100 Гц и 200 Гц соответственно), а данные полученные по Черному морю характеризовались сложной формой спектра с несколькими экстремумами и частотным составом до 150 Гц.

Величина спектрального атрибута для района Гидрат Ридж колебалась в диапазоне $\sim 3-15$, а для данных в районе хребта Вестнеса эти значения составили $\sim 1-14$. Максимальные значения соответствовали участкам, расположенным вблизи выходов свободного газа на поверхность. Величина

спектрального атрибута для района в Черном море колебалась в диапазоне ~1-10. Для всех трех площадей расчет спектрального атрибута для отражений от литологических границ, не пересекающих BSR, позволил получить значения, не превышающие 1,2. (порядка 1) Для получения приблизительных грубых оценок диапазонов возможной добротности проводилось моделирование на основе закона линейного изменения добротности с частотой. В результате для высокочастотных данных (Гидрат Ридж, Вестнесса) величине спектрального атрибута меньшей 3 соответствовали зоны с добротностью второго порядка величины, для остальных значений добротность была ниже. Для данных, полученных по Черному морю, в диапазоне частот до 150 Гц, первый порядок величин добротности соответствовал значениям атрибута большим либо равным 2.

Для набора данных, полученных в районе Вестнесса, были получены карты отношений стандартных атрибутов (эффективной ширины спектра, средней частоты, определенной по пересечениям через ноль, пиковой частоты, спектрального склона), рассчитанных на близких по времени участках записи для отражения от горизонтальной границы, близкой к дну и не пересекающей BSR, а также карты для отношений атрибутов для отражения от границы, пересекающей BSR. Полученные карты анализировались совместно с картами предложенного атрибута для оценки корректности применения того или иного атрибута. Полученные результаты позволили установить, что предложенный спектральный атрибут оказался более устойчивым к влиянию случайных шумов. Пример карты спектрального атрибута приведен на рисунке 5.

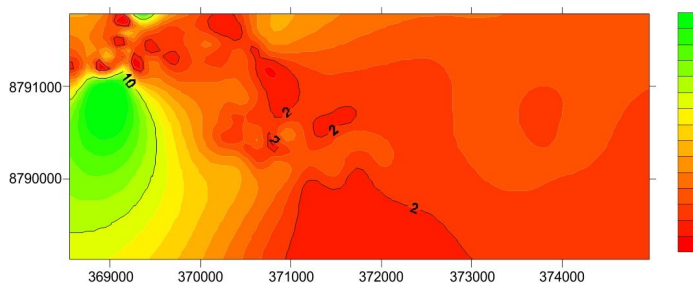


Рис 5 Пример карты спектрального атрибута.

Результаты определения спектральных характеристик сопоставлены с априорной информацией о поглощении и концентрациях гидратов и газа, полученных по данной площади. Результаты согласуются с априорной информацией и могут быть полезными при уточнении результатов, полученных по другим методам.

Заключение

Основные результаты работы могут быть сформулированы следующим образом.

Предложена и успешно опробована методика, основанная на разделении волновых полей однократных волн, волн-спутников и BSR применительно к данным, полученным в зоне развития гидратов, позволяющая повысить качество спектрального анализа данных и уточнить положение BSR на разрезе в условиях сильной интерференции.

Разработана и опробована методика картирования зон с повышенным содержанием свободного газа и гидрата на основе использования устойчивого спектрального атрибута, рассчитываемого по спектральным характеристикам волн, отраженных от литологической границы, пересекающей подошву зоны стабильности гидратов.

Применение разработанной методики позволило получить сведения о распространении гидратов, подтвержденные априорными данными о наличии газонасыщенности на площади исследований.

Основные положения диссертации отражены в следующих публикациях:

1. Бочарова А.А., Шалаева Н.В. О возможностях изучения подошвы толщи газовых гидратов на морских данных с использованием адаптивного вычитания волновых полей, 2011, Вестник Московского университета, Секция №4. Геология, научный журнал, №4, 2011, июль-август.
2. Бочарова А.А., 2007, Петрофизическое моделирование осадков, содержащих газы гидраты, тезисы 9й международной научно-практической конференции «Геомодель-2007».
3. Pevzner, R., A. Volkonskaya, S. Bouriak, A. Bocharova, and V. Blinova. 2008. "Using the dynamics of bottom simulating reflector (BSR) for prediction of gas hydrate content in marine sediments." Paper presented at *Saint Petersburg 2008, Apr 7, 2008*, Saint Petersburg, Russia.
4. Pevzner, R., A. Volkonskaya, S. Bouriak, A. Bocharova, and V. Blinova. 2008. "Prediction of properties of gas hydrate bearing sediments from the dynamic of reflected waves without borehole data." Paper presented at *70th EAGE Conference & Exhibition, Jun 9, 2008*, Rome, Italy.
5. Губанова Я.Е., Попова Е.В., Бочарова А.А., Колубакин А.А., Логинов А.К., Вакуленко С.А., 2008, Возможности определения физических свойств придонных осадков по данным многоканальных сейсмоакустических исследований в Кандалакшском заливе Белого моря., тезисы 10й международной научно-практической конференции Геомодель-2008.
6. Bocharova, A.A., 2008. A seismic study of methane hydrate bearing sediments: case study from Tuapse Trough, Black Sea. (Conference of young scientists and engineers "Geoperspectiva-2008", abstracts) (In Russian)
7. Bocharova A. 2009, Orion of Multiple Bottom-Simulating Reflectors in the Black Sea, Paper presented at 71st EAGE Conference & Exhibition, 08 June 2009, Amsterdam, The Netherlands.
8. Бочарова А.А., Полубояринов М.А., Буряк С.В., Токарев М.Ю., 2011, Подавление кратных волн и волн-спутников на морских одноканальных

данных методом устойчивого адаптивного вычитания, тезисы 7й международной конференции и выставки «Инженерная геофизика-2011», EAGE, 25-29 апреля 2011, Москва, Россия.

9. Бочарова А.А., Логинов А.К., Митюков А.В., 2011. Изучение распространения газовых гидратов в морских осадочных толщах с помощью моделирования границы BSR, тезисы 13й международной научно-практической конференции «Геомодель-2011», г. Геленджик, Россия, 12-15 сентября, 2011 г.

10. Bocharova A.A., Poluboyarinov M.A., 2011, Deghosting of Seismic Data Based on Adaptive Subtraction Algorithm, Paper presented at 6th Congress of Balkan Geophysical Society, Budapest, Hungaria, 3 October, 2011.