

На правах рукописи

РГБ ОД

30 МАЯ 2000

Буряк Сергей Владимирович

**ИЗУЧЕНИЕ ГАЗОНАСЫЩЕННОСТИ МОРСКИХ ОСАДКОВ ПРИ
ПОМОЩИ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ**

Специальность: 04.00.12 - геофизические методы поиска и
разведки месторождений полезных
ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МОСКВА – 2000

Работа выполнена на кафедре сейсмометрии и геоакустики и в Учебно-научном Центре ЮНЕСКО по морской геологии и геофизике геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Научные руководители: доктор физико-математических наук профессор В.В. Калинин

доктор геолого-минералогических наук доцент М.К. Иванов

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук Ю.П. Ампилов (ВНИИГаз)

кандидат геолого-минералогических наук О.В. Левченко (Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН)

Ведущая организация: Объединенный институт физики Земли РАН (Москва)

Защита состоится 17 мая 2000 года в 14:30 на заседании диссертационного совета Д.053.05.24 при Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119899, Москва, Воробьевы горы, Главное здание МГУ, зона «А», геологический факультет, аудитория 308.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке геологического факультета МГУ (ГЗ МГУ, 6 этаж)

Автореферат разослан 14 апреля 2000 года.

Ученый секретарь диссертационного совета  Б.А. Никулин

Д 543.4 с 47, 0

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Промышленная активность человека в морях и океанах постоянно возрастает. При этом в последние годы наблюдается смещение области интересов с относительно мелководных шельфовых зон к все более и более глубоководным участкам мирового океана. Так нефтегазовая индустрия уже сейчас рассматривает глубоководные окраины континентов как новый перспективный источник сырья. Уже несколько лет ведется успешная эксплуатация нефтяных месторождений на континентальной окраине Бразилии на глубинах океана 1500-2000 м. Недавно было обнаружено несколько новых глубоководных месторождений нефти и газа на континентальном склоне к западу от Шетландских островов, к западу от Внешних Гебрид, а также в районе бассейна Поркупайн. Транснациональные нефтяные компании ведут активные поисковые работы на глубоководном плато Рокколл, Фарерской окраине, в Норвежском море и многих других районах. В России ведется разведка и добыча углеводородного сырья на шельфе Баренцева моря, а также у побережья полуострова Сахалин.

Эта активность делает актуальным вопрос детального и всестороннего изучения осадочного чехла окраинных частей Мирового океана, в частности в своем представляющих мощные осадочно-породные бассейны. Изучение верхней части разреза субмаринного осадочного чехла, помимо чисто научного интереса, имеет и практическое значение. Донные осадки все чаще рассматриваются как перспективный источник различных видов сырья (рассыпные месторождения различных металлов, фосфориты, гидраты углеводородных газов, и т.д.). Уже сейчас требуются исследования инженерных свойств морских осадков, а также факторов, влияющих на так называемую «стабильность склонов».

В этой связи, особый интерес представляет проблема достоверного выявления и изучения газонасыщенных участков донных осадков, а также скоплений природного газа в верхней части разреза. Эти скопления, как правило не имеющие промышленного значения сами по себе, могут являться разведочным признаком, указывающим на наличие глубинных промышленных месторождений углеводородов. С другой стороны, неглубокие скопления природного газа, изменяя механические свойства осадков, могут представлять определенную опасность для донных инженерных сооружений, таких как буровые платформы. В районах с повышенной сейсмичностью, где существует опасность развития оползневых процессов на склонах, неглубоко залегающие скопления природного газа могут явиться фактором, усиливающим нестабильность склонов.

Методика одноканального и малоканального сейсмоакустического профилирования как нельзя лучше подходит для выявления и изучения непромышленных скоплений природного газа в верхней части разреза морских осадков. Сочетание более высокой, по сравнению с морской сейсморазведкой методом общей глубинной точки (МОВ ОГТ), разрешающей способности с характерной для сейсмоакустического профилирования глубиной проникновения в несколько сот миллисекунд позволяют выявлять и изучать газонасыщенные участки в верхней части разреза наиболее эффективно и детально.

Однако в настоящее время использование сейсмоакустического профилирования при изучении газонасыщенности морских осадков, как

правило ограничивается проведением визуальной интерпретации полученных временных разрезов. При этом, из-за принципиальной неоднозначности визуальной интерпретации, достоверность получаемой в результате геологической информации часто может вызывать определенные сомнения. В силу того распространения, которое в последнее время получила многоканальная сейсморазведка методом общей глубинной точки, методы анализа данных одноканальных и малоканальных сейсмоакустических исследований практически не разрабатываются.

Цель работы. В настоящей работе сделана попытка показать более широко возможности метода сейсмоакустического профилирования при изучении газонасыщенности морских осадков. Для повышения достоверности интерпретации, а также для получения некой количественной информации об изучаемых газонасыщенных участках разреза предлагается использовать схему оценки поглощения акустических волн в осадках, основанную на комплексировании одного качественного и двух количественных методов, обладающих различной точностью, достоверностью и устойчивостью. Кроме того, разработан относительно простой метод получения информации о скоростных характеристиках предположительно газонасыщенных участков разреза. При выборе методов и их модификации, немалую роль играл фактор простоты их практической реализации, а также необходимые для работы того или иного метода затраты компьютерного времени. Автор ставил себе целью повысить достоверность получаемой при помощи сейсмоакустических исследований геологической информации, не теряя при этом такого немаловажного преимущества данной методики, как простота постановки, невысокая стоимость проведения работ и наглядность получаемого результата.

Защищаемые положения. (1) Для повышения достоверности выявления и изучения газонасыщенных участков разреза предложена схема оценки поглощения акустических волн в осадках, основанная на комплексировании одного качественного и двух количественных методов, обладающих различной точностью, достоверностью и устойчивостью. (2) Разработан относительно простой метод получения информации о скоростных характеристиках предположительно газонасыщенных участков разреза по сейсмоакустическим данным, основанный на принципе «инверсии отдельных пиков». (3) Работоспособность и эффективность предлагаемых методов была подтверждена проверкой на реальном материале, полученном в двух районах с различными сейсмогеологическими условиями. Это позволило выявить их преимущества, недостатки и принципиальные ограничения, связанные с тем или иным характером геологического строения изучаемых районов, а также провести с использованием предлагаемых методов комплексную интерпретацию сейсмоакустических данных, направленную на изучение газонасыщенности морских осадков, и сделать по каждому из районов геологические выводы.

Научная новизна и практическое значение. Впервые предложена применимая к данным сейсмоакустического профилирования схема оценки поглощения в осадках, основанная на комплексировании одного качественного и двух количественных методов, обладающих различной точностью, достоверностью и устойчивостью. Впервые предложен простой и устойчивый алгоритм инверсии сейсмоакустических данных, не требующий их

предварительной обработки и позволяющий определять скоростные характеристики предположительно газонасыщенных участков разреза.

Все предлагаемые методы были реализованы автором на персональном компьютере, совместимом с IBM PC, с использованием языка программирования Pascal и опробованы на реальном материале.

Результаты настоящей работы могут быть использованы для повышения эффективности изыскательских работ при строительстве донных инженерных сооружений, а также при поисках месторождений нефти и газа. Расширение возможностей такого относительно дешевого дистанционного метода, как сейсмоакустические исследования, а также повышение достоверности интерпретации сейсмоакустических данных при изучении газонасыщенности морских осадков позволит расширить область применения одноканального и малоканального сейсмоакустического профилирования и тем самым, при решении целого ряда задач, снизить общую стоимость работ за счет сокращения объема более дорогих методов.

Апробация работы. Основные результаты работы неоднократно докладывались автором на семинарах Центра ЮНЕСКО-МГУ по морской геологии и геофизике при геологическом факультете МГУ, на семинарах на борту судна во время проведения морских экспедиций, на конференциях «День научного творчества» на кафедре сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ, а также были опубликованы в материалах нескольких международных конференций: (1) Третья международная конференция «Газ в морских осадках» (Тексел, Нидерланды, сентябрь 1994 г.); Третья конференция программы «Обучение в процессе исследований» (Кардиф, Великобритания, январь 1995 г.); Конференция «Газовые гидраты: влияние на склоновые процессы на континентальных окраинах и климатические изменения» (Гент, Бельгия, сентябрь 1996 г.); Международный конгресс и пятая конференция программы «Обучение в процессе исследований» «Газы и флюиды в морских осадках: газогидраты, грязевые вулканы, тектоника, литология и геохимия в Средиземном и Черном морях» (Амстердам, Нидерланды, январь 1997 г.); Международный конгресс и шестая конференция программы «Обучение в процессе исследований» «Взаимодействие геосферы и биосферы: глинисто-карбонатные постройки и холодноводные рифы» (Гент, Бельгия, январь 1998 г.); Международная научная семинар «Геологические, геофизические и геохимические исследования в Черном море» (Тбилиси, Грузия, декабрь 1999 г.).

Кроме того, некоторые результаты настоящей работы легли в основу трех реферируемых публикаций в международных научных изданиях.

Материалы. В работе были использованы материалы, полученные в ходе международных геолого-геофизических экспедиций на российском НИС «Геленджик», которые проводились в рамках программы ЮНЕСКО-МОК «Обучение через исследования» («Плавучий университет») в 1991 и 1996 гг.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, основных выводов и списка литературы. Объем работы – 128 страниц, диссертация иллюстрирована 39 рисунками и содержит библиографию из 84 наименований.

Благодарности. Автор глубоко признателен профессору В.В. Калинину (кафедра сейсмометрии и геоакустики, геологический факультет МГУ) и доценту М.К. Иванову (Центр ЮНЕСКО-МГУ по морской геологии и геофизике), осуществлявшим совместное научное руководство настоящей

работой. Автор искренне благодарит сотрудников кафедры сейсмометрии и геоакустики М.Ю. Токарева, Л.М. Кульницкого, В.Г. Гайнанова, И.П. Короткова за помощь и содействие; которое они оказывали на различных этапах выполнения работы; сотрудников Центра ЮНЕСКО-МГУ А.Ф. Лимонова, А.М. Ахметжанова за конструктивное обсуждение геологических результатов, а также всех сотрудников и аспирантов Центра ЮНЕСКО-МГУ по морской геологии и геофизике, чью поддержку автор постоянно чувствовал. Автор признателен проректору МГУ профессору В.Т. Трофимову, заместителю Министра природных ресурсов РФ профессору И.Ф. Глумову, сотруднику Министерства науки и технологий РФ В.Н. Живаго, сотруднику отдела ЮНЕСКО по морским и береговым исследованиям А.Е. Сузюмову, коллективам ПО Южморгеология и ГП ПМГРЭ, а также всем другим лицам и организациям, без помощи и поддержки которых программа «Обучение через исследования» («Плавучий университет») не была бы реализована.

ГЛАВА 1. ОБЗОР МЕТОДИКИ И ТЕХНИКИ ОДНОКАНАЛЬНОГО И МАЛОКАНАЛЬНОГО СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ

Морское одноканальное и малоканальное сейсмоакустическое профилирование является разновидностью морской сейсморазведки методом отраженных волн (МОВ), в которой источник упругих волн и приемник (приемники) совмещены с точки зрения близости траекторий падающего и отраженного лучей. Используемые сигналы при этом могут быть в диапазоне частот от сейсмического (десятки герц) до акустического (первые килогерцы). Такого рода исследования принято называть также непрерывным сейсмическим профилированием (НСП).

В качестве излучателя упругих волн используются невзрывные, чаще всего либо электроискровые, либо относительно маломощные пневматические источники. В качестве приемного устройства используют пьезоэлектрические датчики давления. Для сохранения близости траекторий падающего и отраженного лучей, расстояние между источником и приемником должно оставаться существенно меньшим, чем глубина до первой исследуемой границы (дна). Измерительная установка источник-приемник буксируется по профилю за непрерывно движущимся судном, источник возбуждает упругие импульсы через равные промежутки времени. Более подробно вопросы методики и техники проведения морского сейсмоакустического профилирования рассмотрены в работе А.В. Калинина и др. [1983].

Благодаря совмещению источника и приемника все однократные волны, регистрируемые при сейсмоакустических исследованиях, отражаются при нормальном падении волны на каждую из отражающих границ. При этом амплитуда отраженной волны определяется только контрастом акустического импеданса на данной границе, и, таким образом, в отличии от метода ОГТ, зависимостью коэффициента отражения от угла падения волны можно пренебречь и считать, что динамика отраженных волн напрямую связана с распределением акустического импеданса и поглощением в разрезе.

Зависимость коэффициентов отражения и размеров зон Френеля от угла падения волны приводит к тому, что при суммировании по ОГТ каждая из волн, участвующих в суммировании, имеет свою амплитуду и несет свою степень осреднения реального рельефа в пределах своей зоны, существенной для отражения. Таким образом, на суммарной сейсмограмме

ОГТ, которая в первом приближении должна совпадать с сейсмограммой сейсмоакустического профилирования, значительная часть как динамической, так и кинематической информации оказывается потерянной.

Еще одним преимуществом одноканального и малоканального сейсмоакустического профилирования перед методом ОГТ можно считать тот факт, что из-за совмещения источника и приемника, даже в том случае, когда исследуемый разрез существенно отличается от горизонтально-слоистой модели, вклад волн иной, кроме Р-волн, природы в сейсмограмму сейсмоакустического профилирования в как правило остается незначительным [Калинин и др., 1983]. Этот факт существенно облегчает интерпретацию получаемых данных, а также позволяет в настоящей работе исключить из рассмотрения любые волны, отличные от продольных. По этой причине в дальнейшем под словами «скорость», «акустический импеданс» и «поглощение» в настоящей работе будут пониматься скорость, акустический импеданс и поглощение Р-волн.

ГЛАВА 2. ГАЗЫ В МОРСКИХ ОСАДКАХ

Наличие природного газа в морских осадках, включая самые верхние их горизонты, является давно признанным и широко известным фактом.

Метан, как правило, присутствует в морских осадках в наибольших количествах [Davis, 1992]. Формирование метана и других углеводородных газов из рассеянного органического вещества происходит на всех стадиях литогенеза, начиная с раннего диагенеза и вплоть до позднего катагенеза [Вассоевич и др., 1967]. Переработка органического вещества при этом может происходить как биохимическим путем, так и за счет термокаталитических процессов [Бакиров и др., 1993]. Происхождение газа отражается в его химическом и изотопном составе. Вопросы, связанные с механизмом и вертикальной зональностью генерации углеводородов, подробно рассматриваются в классических работах Н.Б. Вассоевича и др. [1967] и И.В. Высоцкого [1967].

Поскольку осадочные породы и осадки всегда в той или иной степени проницаемы, газ мигрирует из мест своей генерации, образуя скопления, а также проникают в самую верхнюю часть осадочного чехла и разгружаются на поверхности морского дна. Миграция происходит в основном в вертикальном направлении, однако латеральная миграция также имеет место, и иногда газ мигрирует по простиранию слоев на значительные расстояния [Schumacher and Abrams, 1994]. В настоящее время считается, что основную роль играет миграция газа в свободной форме [Schumacher and Abrams, 1994].

Практически все нефтегазовые месторождения характеризуются наличием зон разгрузки флюидов на поверхности, а также присутствием вторичных непромышленных скоплений газа в верхней части разреза [Schumacher and Abrams, 1994]. Такие поверхностные и приповерхностные газопроявления могут служить и, в действительности, активно используются в качестве поискового признака глубинных промышленных нефтегазовых месторождений. Однако характер и интенсивность поверхностных и приповерхностных газопоявлений, как правило, не связаны напрямую с размерами залежи. Кроме того, за счет наличия латеральной миграции, связь поверхностных геохимических аномалий с глубинными нефтегазовыми скоплениями может носить очень сложный характер. Для получения адекватной интерпретации необходимо комплексирование данных прямых

методов поиска углеводородов с геофизическими (прежде всего сейсмическими и сейсмоакустическими), геологическими и гидрогеологическими данными [Schumacher and Abrams, 1994].

ГЛАВА 3. ВЛИЯНИЕ ГАЗОНАСЫЩЕННОСТИ НА АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОСАДКОВ

Газ, находящийся в свободном состоянии в поровом пространстве осадков или зернистых (кластических) пород, существенно влияет на акустические свойства среды, такие как плотность, скорость, акустический импеданс и поглощение.

3.1. Плотность

С увеличением содержания газа в порах плотность породы уменьшается. Это уменьшение происходит по линейному закону и достаточно медленно. [Шериф и Гелдарт, 1987]

3.2. Скорость продольных волн

Как теоретические исследования этого вопроса [Domenico, 1974], так и лабораторные эксперименты [Domenico, 1976, 1977] показывают, что даже небольшое (несколько процентов) количество свободного газа в поровом пространстве зернистых (кластических) пород ведет к существенному уменьшению скорости продольных волн.

3.3. Акустический импеданс

Акустическая импеданс (акустическая жесткость) определяется произведением скорости волн на плотность среды. Характер зависимости акустического импеданса от газонасыщенности среды в основном определяется зависимостью скорости. Акустическая жесткость зернистых (кластических) пород/осадков резко падает уже при наличии нескольких процентов свободного газа в их поровом пространстве.

3.4. Поглощение

В литературе получило распространение описание поглощения через добротность (Q), которая определяется как отношение полной упругой энергии одного периода распространяющейся гармонической волны к энергетическим потерям за один период [Johnston and Toksoz, 1981]). Чем меньше добротность, тем больше поглощение, поэтому часто поглощение удобнее измерять обратной величиной $1/Q$.

Согласно многочисленным лабораторным исследованиям, частично подтвержденным измерениями поглощения по полевым данным [Дортман, 1984; Klimentos, 1995], в диапазоне частот от первых Гц до первых десятков кГц, как в абсолютно сухих, так и в полностью водонасыщенных породах поглощение мало [Clark and Spencer, 1981; Murphy, 1983; Winkler and Nur, 1982] и оказывается максимальным в частично водонасыщенных породах. Даже при 90% водонасыщения образцов кластических пород поглощение остается на порядок больше, чем в том случае, когда поры заполнены водой полностью [Winkler and Nur, 1982]. Таким образом, в реальных условиях газонасыщенным участкам разреза (которые, фактически, являются частично водонасыщенными) должны соответствовать повышенные значения поглощения. Это дает основания для использования значений поглощения при выделении по полевым сейсмоакустическим данным участков повышенной газонасыщенности в разрезе. При этом важны не столько абсолютные значения поглощения, которые будут зависеть от глубины изучаемых участков и частоты используемого сигнала, сколько его

относительные значения - существенное увеличение поглощения на отдельных локальных участках, по сравнению со средними ("нормальными") значениями для данной глубины.

В породах, содержащих свободную жидкую фазу, добротность существенно зависит от частоты [Spencer, 1981; Winkler and Nur, 1982; Murphy, 1983; Jones, 1986]. Однако реальные полевые сейсмоакустические данные, как правило, характеризуются относительно узким частотным диапазоном, который расположен вдали от так называемого «пика поглощения», и всегда в той или иной степени осложнены помехами. Поэтому, когда поглощение определяют по таким записям, частотную зависимость $1/Q$ обнаружить практически невозможно [Jones, 1986]. Ею можно пренебречь, считая, что добротность от частоты не зависит. Ошибки за счет использования такой упрощенной модели обычно не превышают погрешности измерений [Калинин и др., 1983; Jannsen et al., 1985].

ГЛАВА 4. ВЛИЯНИЕ ГАЗОНАСЫЩЕННОСТИ НА ХАРАКТЕР АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ОТРАЖЕННОМ ПОЛЕ. ОСНОВНЫЕ ИНДИКАТОРЫ ГАЗОНАСЫЩЕННОСТИ

Влияние газонасыщенности на основные акустические свойства осадков проявляется на характере сейсмической и акустической записи, приводя к локальным изменениям динамических характеристик отражений – амплитудным и частотным аномалиям, различимым визуально на сейсмоакустических разрезах. Такие аномалии, называют индикаторами углеводородов [Шериф, Гелдарт, 1987], хотя поскольку, как правило, они связаны не с нефтью, а именно со свободным газом, вероятно правильнее было бы их называть индикаторами газонасыщенности. Их конкретный вид зависит от многих факторов, среди которых свойства вмещающей и покрывающей толщ, геометрия границ, мощности слоев, частоты на которых проводятся работы и др.

4.1. Индикаторы газонасыщенности, связанные с изменением коэффициента отражения сейсмических волн от границы флюидоупор-коллектор

В зависимости от количества свободного газа в порах коллектора, а также от соотношения акустических свойств коллектора и покрышки, газонасыщенные участки на сейсмическом разрезе могут проявляться в виде аномалий трех основных типов [Шериф и Гелдарт, 1987; Howland and Judd, 1988]:

1. Локальное ослабление амплитуды отражений вплоть до их полного исчезновения – «тусклые пятна», «акустические пустоты», «акустически прозрачные вертикальные нарушения».
2. «Обратная полярность» без существенного изменения амплитуды отражения на кровле газонасыщенного участка разреза.
3. Локальное высокоамплитудное отражение обратной полярности – «яркое пятно». Когда полярность сигнала определить невозможно используют также термин «усиленное отражение».

Отдельно следует сказать о так называемой BSR (англ. bottom simulating reflector) – отражающей границе обратной полярности, примерно повторяющей рельеф дна, не редко наблюдаемой на данных морских сейсмических и сейсмоакустических исследований в различных районах мирового океана. Такого рода граница в большинстве случаев интерпретируется, как подошва газогидратоносного слоя. Поскольку

стабильность газовых гидратов контролируется термобарическими условиями, рост температуры с глубиной приводит к тому, что подошва зоны стабильности газовых гидратов проходя по определенной изотерме, примерно повторяет рельеф дна и часто сечет обычные литологические границы. Считается, что наличие кристаллов газовых гидратов в порах осадков увеличивает акустический импеданс гидратоносного слоя. Кроме того, гидратоносный слой характеризуется пониженной проницаемостью [de Voeg, et al., 1985] и является своего рода крышкой, эффективно препятствующей миграции газа вверх по разрезу, что приводит к скоплению свободного газа непосредственно под гидратоносным слоем. Таким образом, можно считать, что границы типа BSR во многих случаях также являются индикаторами газонасыщенности и по своей физической природе схожи с «яркими пятнами».

4.2 Влияние поглощения на акустический сигнал и индикаторы газонасыщенности, связанные с изменением поглощающих свойств газонасыщенных участков разреза

Модуль спектра плоской упругой волны, распространяющейся в поглощающей среде, изменяется по формуле:

$$S(\omega, z) = S(\omega, 0) e^{-\beta(\omega) z} \quad (4.2-1)$$

где $S(\omega, 0)$ - модуль спектра волны в начальной точке; $S(\omega, z)$ - модуль спектра волны на расстоянии z от данной начальной точки; $\beta(\omega) = \omega / 2VQ(\omega)$ - коэффициент поглощения; V - скорость звука в среде.

Если считать, что в исследуемом диапазоне частот Q от частоты не зависит, т.е. $Q(\omega) = Q$ (правомерность такого предположения обсуждалась в Главе 3), то зависимость коэффициента поглощения от частоты в этом диапазоне будет линейной (так называемое "линейное поглощение"):

$$\beta(\omega) = \beta \cdot \omega \quad (4.2-2)$$

где $\beta = 1/(2VQ)$ - константа поглощения.

Таким образом, различные гармоники сигнала будут поглощаться по разному, что приведет не только к уменьшению амплитуды сигнала, но и к изменению его формы, сужению его спектра за счет уменьшения вклада высокочастотных составляющих, а также к смещению в сторону низких частот максимумов модуля спектра, в том числе абсолютного максимума модуля спектра - центральной частоты.

По этой причине, с повышенным поглощением связаны индикаторы газонасыщенности двух типов:

1. Ослабление амплитуд отражений от границ, находящихся в разрезе ниже газонасыщенного участка - «акустическая тень» или «амплитудная тень» (лучше всего выражено на данных высокоразрешающих акустических исследований).
2. Уменьшение видимой частоты сигнала, отраженного от границ, находящихся ниже газонасыщенного участка - «частотная тень». На реальных данных, как правило, саму по себе частотную тень при визуальной интерпретации выделить практически невозможно. Иногда ее наблюдают непосредственно под яркими пятнами.

ГЛАВА 5. ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ СПОСОБОВ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ ИЗ ПРЕДПОЛОЖИТЕЛЬНО ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ УЧАСТКОВ РАЗРЕЗА

5.1. Наиболее распространенная последовательность цифровой обработки одноканальных и многоканальных сейсмических данных с последующей визуальной интерпретацией

Как правило, данные одноканальных и многоканальных исследований подвергаются лишь самой простейшей обработке. Помимо ввода кинематических поправок и суммирования, необходимых в случае более чем одного канала, такая обработка чаще всего включает в себя регулировку амплитуд и полосовую фильтрацию. При необходимости, применяют также деконволюцию и миграцию.

Визуальная интерпретация сейсмических данных с целью изучения газонасыщенности разреза позволяет с той или иной степенью вероятности выявлять скопления газа, при достаточно частой сети профилей картировать их, делать предположения о вероятных путях миграции и зонах разгрузки. Однако такая интерпретация требует очень хорошего знания геологической ситуации в районе работ. Практически все, описанные в предыдущей главе индикаторы газонасыщенности, помимо газа могут вызываться и другими причинами, поэтому достоверность визуальной интерпретации часто может вызывать сомнения. Во многих случаях для уточнения природы наблюдаемых аномалий необходим дополнительный анализ. Кроме того, при визуальной интерпретации не представляется возможным получить количественные характеристики изучаемых скоплений газа.

5.2. Способы оценки поглощающих свойств разреза

Существующие методы определения поглощения по данным сейсмоакустического профилирования методом отраженных волн можно разделить на три основные группы: (1) методы, основанные на анализе формы отраженного сигнала во временной области; (2) методы, основанные на анализе частотного состава отраженного сигнала; (3) методы подбора, основанные на построении синтетических сейсмограмм максимально похожих на полевые, либо во временной, либо в частотной области.

Методы подбора, хотя и являются наиболее устойчивыми к низкому отношению сигнал/шум [Jannsen et al., 1985], при обработке существенного объема данных требуют огромных затрат машинного времени, поэтому автор был вынужден отказаться от их использования.

Среди первой группы методов, наиболее интересным представляется метод, впервые предложенный М. Гладвином и Ф. Стэйси [Gladwin and Stacey, 1974]. Поскольку упругий импульс при распространении в поглощающей среде становится длиннее, была предложена величина τ , описывающая длину импульса и определяемая как отношение амплитуды первого максимума отраженного импульса к максимальной крутизне его начальной части, предшествующей этому первому максимуму. В работе [Gladwin and Stacey, 1974] приводится формула, позволяющая определить поглощение по изменению величины τ с глубиной. При расчете значений τ используется только первая, связанная с квази-полупространством часть отраженного импульса. Таким образом удастся снизить влияние интерференции на точность определения Q . Однако данный метод налагает исключительно жесткие требования на качество полевых материалов [Jannsen et al., 1985]. Кроме того, сама возможность выделения отдельного отраженного импульса

на реальных сейсмотрассах в подавляющем большинстве случаев представляется сомнительной. Все это делает данный метод совершенно неприменимым на практике.

Методы второй группы более помехоустойчивы. Большинство этих методов основаны на том, что если взять натуральный логарифм левой и правой части формулы (4.2-1), то из полученного выражения $(\ln S(\omega, z) = \ln S(\omega, 0) - \beta \omega z)$, зная спектр падающей волны, можно найти β , а из него, соответственно, Q . Возможно также определение поглощения по изменению положения центральной частоты отраженного сигнала. Общей проблемой этих методов является искажающее влияние интерференции, которое однако удается существенно ослабить, применяя более устойчивые качественные методы, либо вводя в количественные методы элементы статистики. Именно этот путь определения поглощения представляется наиболее целесообразным, принимая во внимание обычное качество полевых материалов, а также необходимое для применения того или иного метода компьютерное время.

5.3 Методы инверсии

В сейсморазведке под инверсией подразумевают методы преобразования сейсмотрассы в функцию распределения акустического импеданса, скорости сейсмических волн или плотности с глубиной [Sheriff, 1991].

Существующие методы инверсии, применимые к данным сейсмоакустического профилирования, можно разделить на три основные группы: (1) рекурсивная инверсия; (2) инверсия «отдельных пиков» (англ. sparse-spike inversion); (3) инверсия путем корректировки начальной модели.

Методы рекурсивной инверсии являются наиболее распространенными. Впервые алгоритм был предложен в работе [Delas et al., 1970], а затем развит в работах [Lindseth, 1972, 1979; Lavergne, 1975; Lavergne and Willm, 1977]. Основная процедура рекурсивного алгоритма основана на формуле

$$Z_{i+1} = Z_i (1 + R_i) / (1 - R_i) \quad (5.3-1)$$

позволяющей, зная акустический импеданс первого слоя и распределение коэффициентов отражения (R_i), последовательно рассчитывать значения акустического импеданса во всех слоях (Z_i). Затем, либо зная распределение плотностей, либо при помощи известных эмпирических формул, связывающих значения акустического импеданса и скорости, полученное распределение акустического импеданса можно пересчитать в распределение скорости.

При этом, считая, что функция распределения коэффициентов отражения случайна (т.е. является «белой») в качестве такой функции используют непосредственно сейсмическую трассу. Однако полезный частотный диапазон сейсмической трассы существенно ограничен. Это приводит к тому, что полученное в результате рекурсивной инверсии распределение акустического импеданса или скорости будет также иметь ограничения в полезном частотном диапазоне. Удаление высокочастотной составляющей скоростной функции приводит к уменьшению разрешающей способности при визуальной интерпретации, в то время как низкочастотная составляющая имеет смысл общего тренда скоростной функции, без которого невозможно оценить абсолютные значения скорости. Низкочастотную компоненту приходится находить отдельно (привлекая априорную информацию) и прибавлять к скоростной функции, полученной в результате инверсии. Еще одним недостатком метода является его невысокая помехоустойчивость. Предположение о том, что сейсмотрасса есть

последовательность коэффициентов отражений, а также, вытекающее из природы формулы (5.3-1) накопление ошибки с глубиной, требует очень высокого качества полевых данных, а также их тщательной предварительной обработки [Russel, 1996].

Предположении, что последовательность коэффициентов отражения является «белой» также не вполне соответствует действительности. На самом деле ее характерный вид – отдельные разрозненные пики, выделяющиеся на общем фоне, которые отражают поверхности несогласия и основные литологические границы. В инверсии «отдельных пиков» сначала по сейсмической трассе оценивают, где находятся эти основные пики и какова их величина, а затем уже только эти разрозненные значения коэффициентов отражения подставляют в рекурсивную формулу (5.3-1). При этом получается так называемая «ступенчатая» скоростная функция с широкой полосой частот. Из-за существенно меньшего числа рекурсий, эффект накопления ошибки проявляется в меньшей степени. Требования к качеству исходных данных и их предварительной обработке также ниже. К данной группе относится, например, такой метод, как инверсия «по принципу максимальной вероятности» [Korniylo and Mendel, 1983; Chi et al, 1984; Hampson and Russel, 1985]. Недостатком этих методов можно считать меньшую, чем в рекурсивной инверсии, детальность результата.

В методы инверсии путем корректировки начальной модели сначала строится начальная модель распределения скорости или импеданса с глубиной, затем по ней рассчитывается синтетический разрез, и, в случае его плохого совпадения с полевыми данными, начальная модель путем последовательных итераций корректируется таким образом, чтобы добиться максимального совпадения синтетических и полевых данных [Russel, 1996]. Этот подход также содержит ряд недостатков и принципиальных сложностей. Во-первых, итерационный процесс может и не сойтись, и тогда решение не будет получено. Во-вторых, полученное решение может хорошо удовлетворять полевым данным и при этом не соответствовать действительности (множественность решений обратной задачи). И, наконец, при собственных сейсморазведке объемах полевых данных, процесс подбора часто требует чрезмерно больших затрат компьютерного времени. К инверсии путем корректировки начальной модели относятся такие методы, как обобщенная линейная инверсия [Cooke and Schneider, 1983], а также так называемое «сейсмо-литологическое моделирование» [Gelfand and Lerner, 1983].

ГЛАВА 6. ПРЕДЛАГАЕМЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ ИЗ ПРЕДПОЛОЖИТЕЛЬНО ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ УЧАСТКОВ РАЗРЕЗА

В главе описываются методы анализа сейсмоакустических данных, предлагаемые автором для использования при изучении предположительно газонасыщенных участков разреза.

6.1 Методы оценки поглощения

В данном разделе для уточнения природы наблюдаемых на сейсмоакустических разрезах индикаторов газонасыщенности предлагается схема оценки поглощения внутри и вне аномальных участков, основанная на комплексировании трех методов (одного качественного и двух количественных) различной точности, достоверности и устойчивости.

Для качественной оценки поглощения предлагается использовать ZPS (от *англ.* zero per second) трансформацию - пересчет волнового поля в поле обобщенных частот. В дальнейшем, вместо термина "поле обобщенных частот" в настоящей работе будет употребляться термин "поле частот". Понятие обобщенной частоты (f_{zps}) вводится как половина среднего числа пересечений функцией нулевого уровня за единицу времени [Хармут, 1975]. Обобщенная частота имеет размерность частоты и характеризует частотный состав произвольной функции. При ZPS-трансформации для каждой сейсмотрассы в скользящем временном окне определяется число переходов сигнала через ноль, которое затем пересчитывается в f_{zps} . Понятно, что под участком, обладающим аномально высоким для данной глубины поглощением, значения f_{zps} должны оказаться аномально низкими. Тогда появление в поле частот низкочастотной аномалии («частотной тени») можно расценивать как признак повышенного поглощения в вышележащей толще.

Первым методом, который предлагается использовать для получения количественной оценки поглощающих свойств разреза, является спектрально-статистический метод [Кульницкий, 1979; Калинин и др., 1983]. В рамках описываемой схемы метод предлагается использовать практически без изменений. Суть метода в том, что величина параметра поглощения $m = \beta z$ для интервала записи, соответствующего текущему положению скользящего окна, определяется как коэффициент линейной регрессии функции:

$$Y(\omega) = 1/2 \left\{ \ln(1/N \sum_{i=1}^N S_i^2(\omega)) - \ln(1/N \sum_{i=1}^N S_{oi}^2(\omega)) \right\} \quad (6.1-1)$$

где: $S_{oi}^2(\omega)$ - энергетический спектр донного отражения, не искаженного влиянием поглощения на каждой из N соседних трасс, по которым производится усреднение; $S_i^2(\omega)$ - энергетический спектр интервала записи, соответствующего текущему положению скользящего окна, на каждой из N соседних трасс, по которым производится усреднение.

Интерпретация проводится на основании следующих соображений: (1) функция $m(z)$ должна монотонно возрастать с глубиной; (2) доверительные интервалы используемых при интерпретации значений m должны быть как можно меньше; (3) должна быть уверенность в том, что значение m , используемое при интерпретации, характеризует не шум, но сигнал (сигнал должен быть визуально различим на временном разрезе). Отобранные для интерпретации значения m аппроксимируются ломаной линией. Каждый ее отрезок соответствует слою в разрезе, константа поглощения внутри которого постоянна и может быть найдена как разность значений m в конце и в начале отрезка, деленная на удвоенную мощность слоя. Далее для каждого слоя можно определить значение Q .

Другой метод, предлагаемый для использования с целью получения количественной оценки поглощения, основан на работе [Лоссовский, 1994] и был усовершенствован автором. Е.К. Лоссовский [1994] предложил формулу определения поглощения по положению центральной частоты отраженного сигнала, выведенную для многослойной тонкослойистой среды, на которую падает волна, имеющая форму функции Дирака:

$$\beta_{tm}(H) = 1/H \quad (6.1-2)$$

где β_{fm} - средний коэффициент поглощения толщи мощности H на центральной частоте (f_m) амплитудного спектра однократной волны, отраженной от границы на глубине H .

Для ситуации, когда волна, формирующая сейсмотрассу отлична от импульса и имеет ограниченный спектр, при помощи простейшего моделирования на основе выражения (6.1-2) автором была получена полуэмпирическая формула, позволяющая определять значения средней константы поглощения β всей толщи до глубины H :

$$\beta = (10/\pi t_0 V) \cdot (1/f_m - 1/f_{m0}) \quad (6.1-3)$$

где f_{m0} - центральная частота амплитудного спектра волны, формирующей сейсмотрассу; t_0 - время вступления волны, отраженной от границы на глубине H ; V - эффективная скорость в толще. При моделировании формула позволяет определять значения β порядка 10^{-6} с/м с точностью около 20%

При работе с реальным материалом возникают обычные для определения поглощения проблемы, связанные с разнообразием причин, вызывающих частотно-зависимые энергетические потери, с тем, что частотная зависимость коэффициента поглощения, в принципе, на отдельных участках может быть и нелинейной, а также с наличием интерференции.

В окончательном варианте метод был дополнен элементами статистики и приобрел следующий вид: на каждой из N соседних трасс для каждого положения скользящего окна находится центральная частота амплитудного спектра, и по формуле (6.1-3) рассчитываются соответствующие значения β . Далее, рассчитывается оценка математического ожидания величины β и ее доверительный интервал. Отдельно для той же выборки вычисляется логическое (медианное) среднее и если значение логического среднего не попадает в доверительный интервал для оценки математического ожидания, то полученное на данной глубине значение β отбраковывается. В противном случае за значение β на данной глубине принимается оценка математического ожидания. Применение данного критерия отбраковки на практике подтвердило его целесообразность, значительно повысив устойчивость метода.

Понятно, что для эффективного практического применения, как спектрально-статистического метода, так и метода, основанного на определении положения центральной частоты, сейсмогеологическая модель среды должна удовлетворять одним и тем же основным условиям: частотная зависимость коэффициента поглощения во всем исследуемом разрезе должна быть линейной в рабочей полосе частот; значение константы поглощения на каждой глубине можно считать неизменным в пределах ансамбля трасс, по которым проводится усреднение; в пределах участка профиля, на котором этот ансамбль получен, взаимное расположение отражающих границ можно считать близким к горизонтально-слоистой модели.

Спектрально-статистический метод является более информативным, позволяя по параметру m выделять слои с постоянным поглощением, в то время как по изменению с глубиной значения средней константы поглощения однозначно это сделать невозможно. Кроме того, спектрально-статистический метод лишен ограничений, связанных с величиной поглощения. Однако для спектрально-статистического метода крайне нежелательным является наличие в разрезе большого количества близко расположенных отражающих границ. В идеале, поглощение должно определяться по одиночному

отражению. Метод, основанный на определении положения центральной частоты, как показал опыт его применения на реальном материале, является более устойчивым по отношению к этому фактору. Кроме того, поскольку в нем из всего спектра отраженного сигнала определение поглощения производится по одной точке (центральной частоте), на полученные значения меньше влияют случайные шумовые флуктуации спектров. Это позволяет применять данный метод на большем, по сравнению со спектрально-статистическим, количестве участков, получая пусть менее точный, но более устойчивый результат.

Метод анализа полей частот, полученных с помощью ZPS-трансформации, является наиболее устойчивым, не предъявляя жестких требований к сейсмогеологической модели изучаемого разреза. Однако он позволяет произвести только качественную сравнительную оценку поглощающих свойств разреза.

Таким образом, суть схемы, предлагаемой для определения участков аномально высокого поглощения состоит в следующем. К отобранным в результате визуальной интерпретации предположительно газонасыщенным участкам последовательно применяются все три описанных метода. В наиболее благоприятных участках определяются значения поглощения с наибольшей точностью и достоверностью при помощи спектрально-статистического метода. Затем при помощи менее достоверного, но более устойчивого метода, основанного на определении положения центральной частоты, проверяется правомерность экстраполяции полученных значений на большее количество участков. И, наконец, при помощи ZPS-трансформации качественно определяется соответствие полученных значений остальной части полевого материала, что фактически дает возможность экстраполировать оценки на весь район исследований и позволяет сделать вывод о наиболее вероятной физической природе наблюдаемых в данном районе аномалий, возможно указывающих на газонасыщенные участки разреза. Естественно, возможно также применение этих методов по отдельности. Так, если необходимость в количественных оценках поглощения отсутствует, то наличие низкочастотных аномалий в полученных значениях при помощи ZPS-трансформации полей частот под несколькими яркими пятнами из одного района может оказаться достаточным доказательством того, что в данном районе аномалии такого рода следует интерпретировать как индикаторы газонасыщенности.

6.2 Инверсия сейсмоакустических данных с целью изучения предположительно газонасыщенных участков разреза

Предлагаемый в настоящем разделе метод является разновидностью инверсии «отдельных пиков».

На рис. 6.1 показан принципиальный алгоритм предлагаемого метода. На специально выбранном наиболее благоприятном участке профиля при помощи синфазного суммирования донных отражений по ряду соседних трасс определяется импульс, который можно с достаточной степенью точности принять за исходный сигнал – волну, формирующую сейсмотрассу. Исходя из предположения стабильности условий возбуждения и приема вдоль профиля, форма этого импульса используется в фазовой деконволюции всего профиля для приведения отраженных сигналов к нуль-фазовому виду.

В том случае, когда рабочие частоты исследования достаточно низкие (близкие к сейсмическим) и в разрезе отсутствуют сколь либо значительные

сильно поглощающие области, можно считать, что простое вычитание фазового спектра исходного импульса из фазового спектра сейсмоотрассы, приведет к тому, что все отраженные сигналы на трассе окажутся нуль-фазовыми, и такое предположение не повлечет за собой существенных ошибок при дальнейших вычислениях.

Далее, по трассе с сигналами, которые считаем близкими к нуль-фазовым, в ходе итерационного процесса определяется соответствующая ей последовательность видимых коэффициентов отражения. Максимальная амплитуда приведенного к нуль-фазовому виду сигнала соответствует моменту его первого вступления. На этом и построен итерационный процесс – по всей трассе находится максимальная по модулю амплитуда, ей ставится в соответствие коэффициент отражения, методом подбора определяется его значение. Таким образом, после первой итерации последовательность коэффициентов отражения содержит только одно отличное от нуля значение – оно соответствует времени прихода самого сильного отражения на полевой трассе. Затем последовательность коэффициентов отражения сворачивается с исходным сигналом, и полученная таким образом синтетическая сейсмоотрасса сравнивается с полевой. Если ошибка превышает допустимую, то синтетическая трасса вычитается из полевой, и их разность используется в следующей итерации – на разности полевой и синтетической трасс находится отсчет с максимальной амплитудой (т.е. самое сильное из еще не подобранных отражений), на соответствующем времени в последовательность коэффициентов отражения добавляется еще одно не нулевое значение, подбирается его величина, рассчитывается синтетическая трасса, сравнивается с полевой и т.д. Результат, получаемый на каждой из итераций, изображен на рис. 6.2.

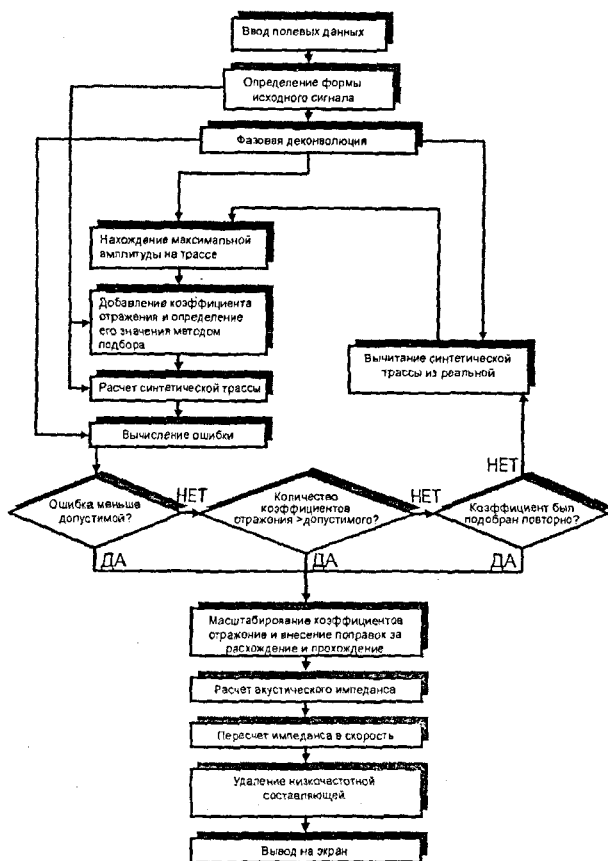


Рис. 6.1. Принципиальный алгоритм предлагаемого метода инверсии сейсмоакустических данных.

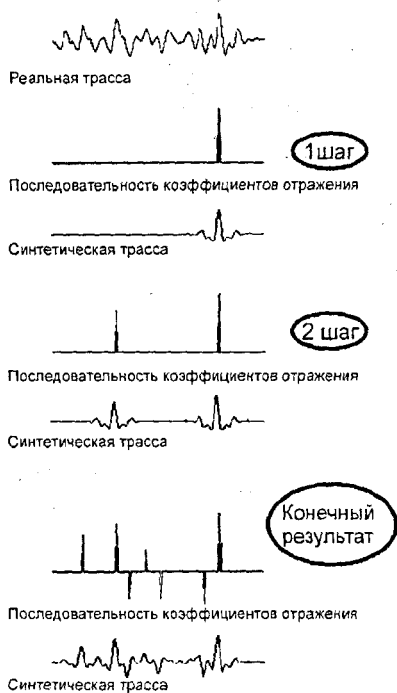


Рис. 6.2. Определение последовательности видимых коэффициентов отражения в ходе итерационного процесса.

Итерационный процесс прерывается, когда ошибка между полевой и синтетической сейсмотрассами становится меньше предельно допустимой, установленной оператором. Однако поскольку подбор значений коэффициентов отражения происходит с некоторым шагом, величина предельно допустимой ошибки должна быть каким-то образом увязана с величиной этого шага. Кроме того, при высоком уровне шума данный алгоритм в какой-то момент может начать подбирать шумовой максимум, а поскольку форма шума в общем отлична от формы сигнала, то это приведет к появлению на разности реальной и синтетической трасс ложных максимумов, часто на месте уже подобранных отражений. Естественно, это приведет к неоднократному подбору одних и тех же коэффициентов и, как результат, к «зависанию» итерационного процесса.

Для того чтобы избежать подобных ситуаций, сделать метод более гибким и одновременно упростить задачу оператора, в алгоритм были внесены два

дополнительных условия прерывания итерационного процесса: (1) неоднократный подбор одного и того же коэффициента отражения и (2) достижение устанавливаемого оператором максимального количества ненулевых элементов последовательности коэффициентов отражения. Второе условие фактически вводит ограничение на количество слоев в разрезе и, тем самым, позволяет учитывать в процессе инверсии априорную геологическую информацию. Помимо этого, варьируя максимальным количеством ненулевых элементов последовательности коэффициентов отражения можно регулировать степень детальности метода.

В результате итерационного процесса определяется соответствующая данной трассе последовательность видимых коэффициентов отражения. Кроме того, по этой последовательности рассчитывается синтетическая сейсмотрасса, которая может использоваться для визуального контроля качества подбора.

Видимые коэффициенты отражения пересчитываются в реальные. Для этого нужно исключить влияние расстановки и учесть эффекты расхождения и прохождения. Для исключения влияния расстановки необходимо знать полученное независимым методом значение коэффициента отражения хотя бы на одной сильной границе. Из отношения опорного значения

коэффициента отражения к значению, полученному для той же границы в результате итерационного процесса, определяется масштабный коэффициент, на который умножаются все значения полученной последовательности. Далее по известным формулам рассчитываются поправки за расхождение и прохождение. В том случае, если опорное значение определить невозможно, возможности метода ограничиваются определением относительных скоростей, т.е. перепадов скоростей на каждой из границ.

После масштабирования и внесения необходимых поправок последовательность коэффициентов отражения по формуле (5.3-1) пересчитывается в акустический импеданс, который затем можно пересчитать в скоростную функцию, воспользовавшись одной из многочисленных эмпирических формул. В настоящей работе использовалась формула Гарднера [Gardner et al., 1974].

Несмотря на то, что предлагаемый метод относится к методам инверсии «отдельных пиков», где накопление ошибки с глубиной существенно меньше чем в классической рекурсивной инверсии, в силу рекуррентной природы формулы (5.3-1) полностью этот эффект исключить не удастся. За счет этого, хотя перепады скоростей на каждой из границ определяются достаточно точно, общий тренд скоростной функции может оказаться существенно искажен. Этот эффект усиливается, когда в отсутствие опорного коэффициента отражения, масштабирование всей последовательности проводится неточно. К искажению низкочастотной составляющей скоростной функции ведет также и сам способ выбора «отдельных пиков» последовательности коэффициентов отражения по принципу максимальной амплитуды отражений.

Для повышения устойчивости метода, полученную «ступенчатую» скоростную функцию во многих случаях (особенно при неточном масштабировании коэффициентов отражения) представляется целесообразным отфильтровать фильтром высоких частот (ФВЧ), удалив низкочастотную составляющую, и оставив лишь информацию об относительных перепадах скорости на каждой из границ, которая и является наиболее достоверной. Далее, при необходимости получения абсолютных значений скоростей, к отфильтрованной скоростной функции можно добавить низкочастотную компоненту, полученную при помощи независимого метода, однако для многих задач знание относительных перепадов скоростей на границах оказывается вполне достаточным.

ГЛАВА 7. КОМПЛЕКСНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГАЗОНАСЫЩЕННОСТИ ОСАДКОВ В ЧЕРНОМ МОРЕ (ЦЕНТРАЛЬНАЯ ЧАСТЬ И ПРОГИБ СОРОКИНА)

7.1. Центральная часть Черного моря

7.1.1 Геологическое строение района

Исследуемый район располагается в глубоководной части Черного моря (глубины воды более 2000 м) в пределах абиссальной равнины к югу от полуострова Крым. Район характеризуется очень плоским рельефом дна. Верхняя часть осадочного покрова имеет субгоризонтальное залегание, исключительно выдержанный по площади характер и характеризуется

многочисленными хорошо следящимися на сейсмических разрезах границами.

Грязевые вулканы и глиняные диапиры распространены в этом районе без какой-либо видимой системы. Их происхождение очевидно связано с пластичными глинами майкопской серии [Ivanov, et al., 1996].

Осадочный разрез в этом районе Черного моря характеризуется высокой степенью газонасыщенности и явными признаками миграции углеводородных газов с больших глубин [Иванов и др., 1989; Limonov et al., 1995].

7.1.2 Методика получения первичного материала

Использовались материалы одноканального сейсмоакустического профилирования по методике НСП, полученные в 1991 году в ходе 1-го рейса НИС «Геленджик» по программе ЮНЕСКО «Обучение через исследования». В качестве источника упругих волн использовались два спаркера с общей энергией 30 кДж, возбуждавшие (при погружении на рабочую глубину) импульс, характеризующийся спектром 40-120 Гц с центральной частотой около 80 Гц. Прием осуществлялся пьезокосой длиной 96 м. Буксировка системы источник-приемник производилась на скорости примерно 6 узлов, интервал возбуждения импульсов составлял 10 секунд. Цифровая регистрация велась в диапазоне частот 30-250 Гц с шагом дискретизации 1 мс, длительность записи составляла 4 с.

7.1.3 Проявления газонасыщенности осадков на сейсмоакустических данных

В районе развития грязевого вулканизма в центральной части Черного моря при визуальной интерпретации сейсмоакустических данных было выявлено большое количество вероятных индикаторов газонасыщенности, в основном ярких пятен, расположенных, главным образом, на глубинах 400-600 мс (300-500 м) по разрезу. Большая часть из них располагается вблизи подводных каналов грязевых вулканов, другие очевидно связаны с разрывными нарушениями. В отдельных местах были также зафиксированы участки ослабления отражений различной конфигурации, которые, возможно, также указывают на газонасыщенные участки разреза и пути миграции углеводородов через осадочную толщу. Для уточнения природы выявленных при помощи визуальной интерпретации возможных индикаторов газонасыщенности, при помощи схемы, описанной в Главе 6, п. 6.1 в отдельных местах была проведена оценка поглощающих свойств разреза. Для получения скоростной информации был опробован предложенный в Главе 6, п.6.2 метод инверсии.

7.1.4. Результаты оценки поглощения

По результатам спектрально-статистического метода на тех участках, где его удалось эффективно применить, по параметру поглощения m можно выделить два основных слоя. Верхний - высоко поглощающий, мощностью не более 200 мс; для него характерны значения константы поглощения порядка 10^{-5} с/м. Очевидно, он соответствует верхнему относительно тонкому слою молодых, слабо консолидированных флюидонасыщенных осадков. Для нижнего слоя характерны значения константы поглощения порядка 10^{-6} с/м - это слабо поглощающая толща плотных осадков (пород) (рис. 7.1).

Результаты, полученные на участках, содержащих яркие пятна, дают иную картину. Отчетливо выделяются те же два основных слоя, но внутри нижней слабо поглощающей толщи присутствует еще один слой,

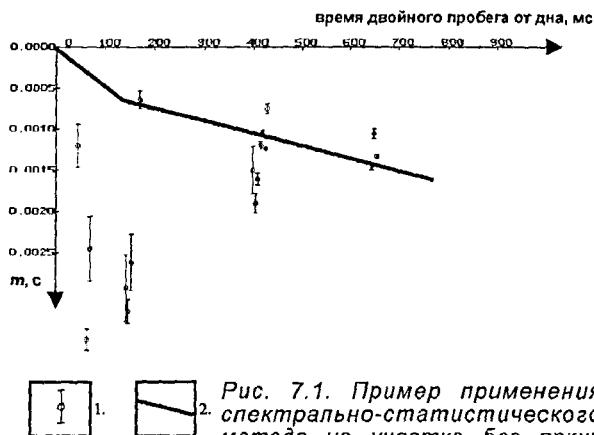


Рис. 7.1. Пример применения спектрально-статистического метода на участке без ярких пятен. 1. - значения параметра поглощения m с доверительными интервалами; 2. - интерпретация.

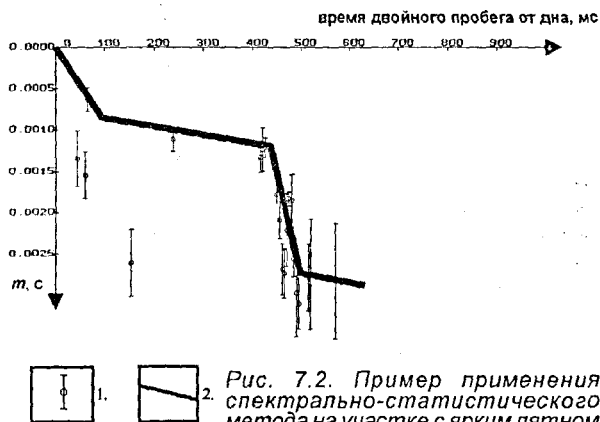


Рис. 7.2. Пример применения спектрально-статистического метода на участке с ярким пятном на глубине 450 мс. 1. - значения параметра поглощения m с доверительными интервалами; 2. - интерпретация.

соответствующий яркому пятну (рис. 7.2). Этот слой характеризуется повышенным поглощением - константа поглощения в нем имеет значения порядка 10^{-5} с/м, что на порядок выше ее "нормального" значения, полученного на той же глубине на участках без ярких пятен. Данный метод удалось успешно применить лишь на отдельных, наиболее благоприятных участках записи с яркими пятнами.

На рис. 7.3, 7.4 приведены примеры результатов применения метода, основанного на определении положения центральной частоты для "нормального" участка без ярких пятен и для участка с ярким пятном на глубине 450-500 мс. Видно, что до глубины 450 мс, т.е. выше яркого пятна, в обоих случаях получается

схожая картина. Сначала значения β быстро возрастают, после 150 мс - убывают до порядка 10^{-5} с/м. Насколько велики значения β в верхней части разреза определить невозможно, однако тот факт, что полученные значения высоки и очень неустойчивы, уже сам по себе является указанием на то, что для верхней части разреза характерны значения β большего чем 10^{-6} порядка.

Значения, полученные для глубин больших 450 мс, т.е. ниже яркого пятна, на рис. 7.3 и 7.4 существенно отличаются. Если для "нормального" участка значения β остаются на уровне $1-3 \cdot 10^{-6}$ с/м, несколько убывая с глубиной, то для участка с ярким пятном на глубине 450 мс наблюдается быстрый рост β до уровня $5-7 \cdot 10^{-6}$ с/м. Далее значения плавно убывают с глубиной, выходя на уровень $3 \cdot 10^{-6}$ с/м только после 700 мс. Расчеты показывают, что если такой рост β вызван слоем мощностью 50 м, то

константа поглощения в этом слое должна не менее, чем на порядок превышать свое среднее по разрезу значение. Этот результат хорошо согласуется со значениями поглощения, полученными спектрально-статистическим методом, но, при этом, метод, основанный на положении центральной частоты удалось применить на большем количестве аномальных участков.

В результате применения ZPS-трансформации почти под всеми яркими пятнами, зафиксированными в данном районе, в поле частот были замечены отчетливые низкочастотные аномалии. Это можно расценивать как признак того, что те части разреза, которые соответствуют ярким пятнам, обладают аномально высокими поглощающими свойствами. В силу повторяемости результата, эту качественную оценку можно считать достаточно достоверной - в районе исследований

яркие пятна на временных разрезах действительно соответствуют участкам повышенного поглощения, скорее всего, зонам сильной газонасыщенности. Этот вывод подтверждается полученными количественными оценками.

Таким образом, полученные две различные количественные и качественная оценки поглощающих свойств разреза хорошо согласуются между собой. В районе работ присутствует верхний относительно тонкий

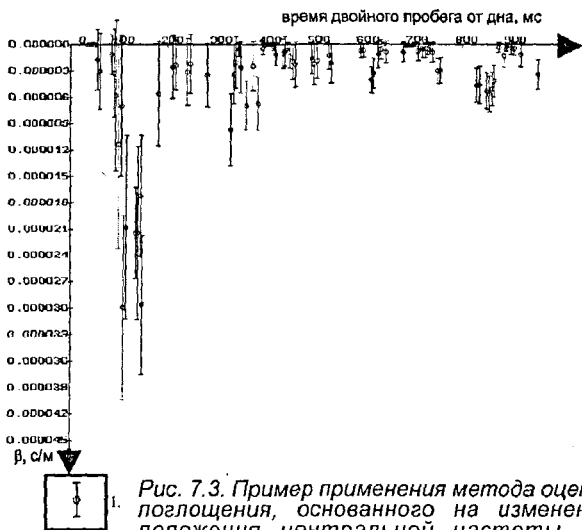


Рис. 7.3. Пример применения метода оценки поглощения, основанного на изменении положения центральной частоты, на участке без ярких пятен. 1. - значения средней константы параметра поглощения с достоверными интервалами.

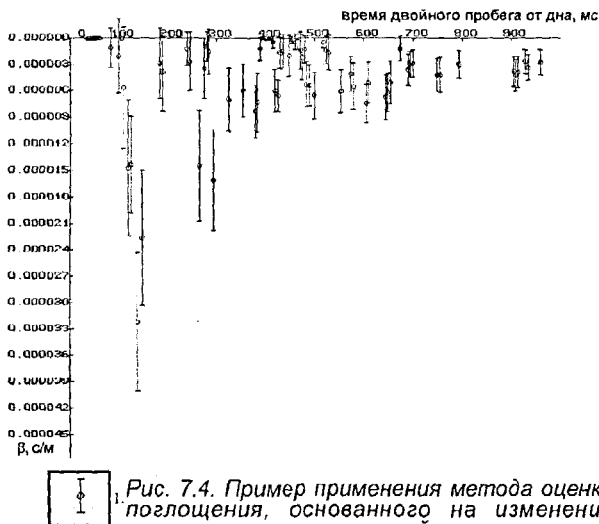


Рис. 7.4. Пример применения метода оценки поглощения, основанного на изменении положения центральной частоты, на участке с ярким пятном на глубине 450 мс. 1. - значения средней константы параметра поглощения с достоверными интервалами.

сильно поглощающий слой ($\beta_1 \sim 10^{-5}$ с/м, $Q_1 \sim 25$), подстилаемый почти не поглощающей толщей ($\beta_2 \sim 10^{-6}$ с/м, $Q_2 \sim 250$). Участки, соответствующие ярким пятнам на временных разрезах НСП, характеризуются аномально высоким поглощением ($\beta_{bs} \sim 10^{-5}$ с/м, $Q_{bs} \sim 25$), на порядок превышающим "нормальное" для данных глубин. Это подтверждает правомерность интерпретации этих зон как газонасыщенных участков.

7.1.5 Результаты инверсии

Описанный в Главе 6, п.6.2 метод инверсии сейсмоакустических данных был опробован на участке профиля НСП, содержащем яркое пятно на глубине 450 мс по разрезу. На рис. 7.5а,б представлены исходный временной разрез после фазовой деконволюции (а), и синтетический разрез, полученный в процессе инверсии (б). Видно, что синтетический разрез по сравнению с исходным обладает гораздо меньшей детальностью, однако яркое пятно на нем отчетливо выражено.

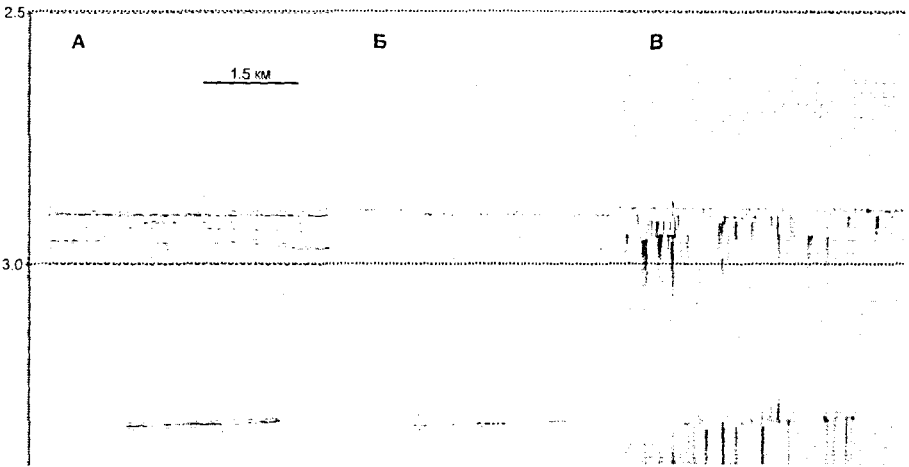


Рис. 7.5. Участок профиля НСП, содержащий яркое пятно на глубине около 450 мс. А - исходный временной разрез после фазовой деконволюции; Б - синтетический разрез, полученный в процессе инверсии; В - результат инверсии-разрез относительных скоростей (темный цвет соответствует высоким скоростям, светлый - низким).

На рис. 7.5в показан результат инверсии – разрез относительных скоростей. Поскольку данные об опорном значении коэффициента отражения отсутствовали, рассчитанные «ступенчатые» скоростные функции не содержат в себе сколь либо достоверной информации об абсолютных значениях скоростей и поэтому были отфильтрованы ФВЧ. Таким образом рис. 7.6 содержит в себе лишь информацию о перепадах скорости на каждой из границ, т.е. об «относительных скоростях». Видно, что яркое пятно на исходном временном разрезе (рис. 7.5 а), на разрезе относительных скоростей (рис. 7.5в) соответствуют границе, на которой значения скорости уменьшаются.

Рисунок 7.6 демонстрирует в увеличенном масштабе фрагмент границы, соответствующей яркому пятну, как она выглядит на разрезе относительных скоростей. Скоростные функции выведены методом отклонений. Уменьшение скорости на данной границе составляет в среднем 250-300 мс, что, скорее всего, говорит о наличии по крайней мере нескольких процентов свободного

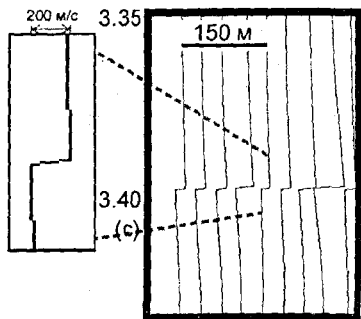


Рис. 7.6. Участок разреза относительных скоростей, соответствующий фрагменту яркого пятна, показанный в увеличенном масштабе методом отклонений.

газа в порах осадков нижележащего слоя. Низкая детальность результата не позволяет определить мощность газонасыщенного просоя.

Низкая детальность результатов инверсии в данном районе очевидно обусловлена наличием в разрезе большого количества отражающих границ примерно одинаковой амплитуды. Фактически, распределение коэффициентов отражения с глубиной здесь ближе к модели случайной последовательности, чем к модели «отдельных пиков», на которой основан предлагаемый алгоритм. Однако, поскольку целью применения данного метода являлось выяснение природы именно высокоамплитудной аномалии –

яркого пятна, то для решения поставленной задачи, полученной детальности оказывается вполне достаточной.

7.1.6 Обобщение полученных результатов и основные выводы к разделу 7.1.

В результате проведенного исследования правомерность визуальной интерпретации ярких пятен в районе развития грязевого вулканизма в центральной части Черного моря, как газонасыщенных участков разреза была подтверждена полученными оценками поглощения и скорости сейсмических волн в аномальных зонах.

Расположение этих газонасыщенных участков (вблизи грязевых вулканов, на крыльях разрывных нарушений), очевидно, говорит о том, что газ здесь является переотложенным, проникая либо через зоны разломов, либо через питающие каналы грязевых вулканов вместе с грязевулканической брекчией во время их извержений. Таким образом, на основании сейсмоакустических данных, можно предположить, что газ в этих скоплениях, имеет глубинную природу.

7.2 Прогиб Сорокина

7.2.1 Геологическое строение района

Прогиб Сорокина, один из наиболее крупных олигоценовых прогибов в глубоководной части Черного моря, протягивается на 150 км вдоль юго-восточной окраины Крыма на глубинах воды 800-2000 м и имеет ширину 45-50 км [Туголесов и др. 1985]. Считается, что он является передовым прогибом Горно-Крымского сооружения [Андреев, 1976]. За счет развития в районе диапиров (сложенных майкопскими, т.е. олигоцен - нижний миоценовыми, глинами) верхняя часть разреза (плиоцен-четвертичный комплекс) также сильно дислоцирована складками и разрывными нарушениями [Лимонов и др. 1997].

Впервые наличие грязевых вулканов в районе было документально подтверждено в 1996 году [Woodside et al., 1997; Лимонов и др., 1997; Ivanov, et al., 1998].

В ходе пробоотбора, проведенного в 1996 году были получены доказательства наличия на дне активных выходов углеводородных газов. Из 15 кернов, взятых прямоочной ударной гравитационной трубой, 12 были

сильно газонасыщенны. При этом 10 из 12 сильно газонасыщенных кернов были взяты из грязевых вулканов и содержали то или иное количество сопочной брекчии. В семи из них были зафиксированы кристаллы газовых гидратов [Ivanov et al., 1998; Bouriak and Akhmetjanov, 1998]. Ранее, газовые гидраты отбирались в этом районе в 1988 году [Кремлев и Гинсбург, 1989].

7.2.2 Методика получения первичного материала

Материалы сейсмоакустического профилирования по методике НСП были получены в 1996 году в ходе 6-го рейса НИС «Геленджик» по программе ЮНЕСКО «Обучение через исследования».

В качестве источника упругих волн использовалась пневмопушка Пульс-5 объемом 3 л с рабочим давлением 15 мПа. Возбуждаемый импульс обладал спектром 40-120 Гц с центральной частотой 100 Гц (при глубине буксировки около 3 м). Прием осуществлялся шестиканальной пьезокосой, все каналы которой были соединены параллельно. Длина приемной секции косы составляла 50 м, вынос – 300 м. Буксировка системы источник-приемник производилась на скорости 7-7.5 узлов, интервал возбуждения импульсов составлял 10 секунд. Цифровая регистрация велась в диапазоне частот 15-250 Гц с шагом дискретизации 1 мс, длительность записи составляла 3 с.

При проведении геологической интерпретации также использовались данные придонного профилографа (рабочая частота 4.9 кГц) акустической системы МАК-1, а также результаты пробоотбора.

7.2.3 Проявления газонасыщенности осадков на сейсмоакустических данных

Визуальной интерпретации сейсмоакустических данных показала наличие большого количества различных индикаторов газонасыщенности на временных разрезах. Яркие пятна располагаются в основном на флангах диапировых складок. Над многими диапировыми структурами видны так называемые «акустически прозрачные вертикальные нарушения», вероятно связанные с путями вертикальной миграции газа через ослабленные зоны, вызванные развитием нижележащих диапиров. Аналогичные особенности сейсмической записи были обнаружены вблизи всех станций пробоотбора, где были вскрыты гидратоносные осадки.

Не смотря на то, что в семи из пятнадцати взятых в этом районе кернов были зафиксированы газовые гидраты, ничего, похожего на границу типа BSR, на сейсмоакустических данных обнаружено не было. Хотя присутствие газа в донных осадках во многих местах было подтверждено пробоотбором, вероятные индикаторы газонасыщенности и миграции газов на сейсмоакустических данных, зафиксированные на больших глубинах при визуальной интерпретации, строго говоря, в силу принципиальной неоднозначности визуальной интерпретации, сами по себе еще не являются доказательством того, что газонасыщенные осадки присутствуют где либо в разрезе, помимо его самого верхнего слоя, и формально требуют подтверждения путем оценки акустических свойств осадков хотя бы в отдельных местах, где какие-либо из описанных выше аномалий сейсмической записи были зафиксированы.

7.2.4 Результаты оценки поглощения

Данный район является неблагоприятным для использования в полном объеме схемы оценки поглощения, описанной в Главе 6, п. 6.1. Оба описанных в этой главе количественных метода требуют, чтобы сейсмогеологическая модель среды в пределах ансамбля трасс, по которым проводится определение поглощения, удовлетворяла условию близости

взаимного расположения отражающих границ к горизонтально-слоистой модели. В прогибе Сорокина верхняя часть осадочного чехла сильно деформирована, а предполагаемые индикаторы газонасыщенности в основном располагаются непосредственно над фланговыми частями диапиров, т.е. в тех местах, которые подверглись наиболее сильной дислокации, и где говорить о горизонтально-слоистой модели практически невозможно даже в пределах нескольких соседних трасс. По этой причине, количественные оценки поглощения в данном районе получить не удалось.

Дополнительные трудности были вызваны тем, что ниже предполагаемых индикаторов газонасыщенности прослеживаемые отражения часто отсутствовали. Это связано главным образом с близостью этих аномалий к диапировым телам, характеризующимся хаотическим характером сейсмической записи. Однако, в отдельных местах качественный метод оценки поглощения, ZPS-трансформацию, все-таки удалось применить, зафиксировав «частотную тень» в нижних частях ярких пятен.

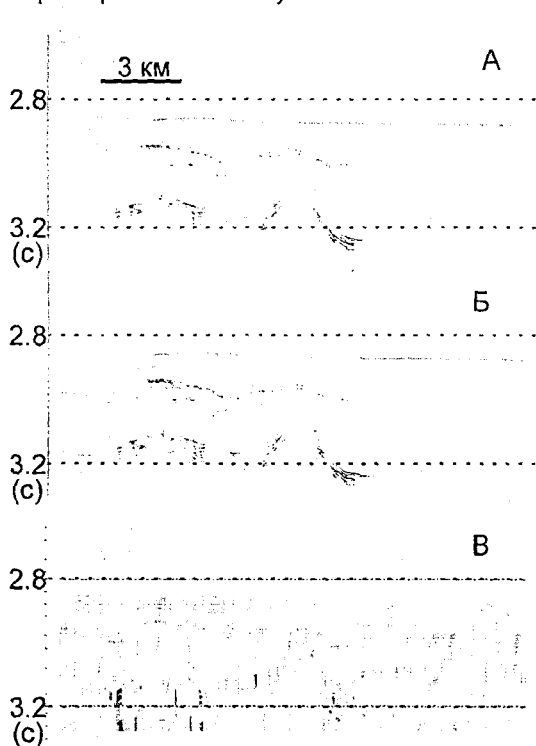


Рис. 7.7. Исходный временной разрез после фазовой деконволюции (а), синтетический разрез, полученный в процессе инверсии (б), и (в)-разрез относительных скоростей (темный цвет соответствует высоким скоростям, светлый - низким).

коэффициента отражения и провести соответствующее масштабирование, полученные в результате инверсии сейсмотрасс «ступенчатые» скоростные функции были отфильтрованы ФВЧ и содержат в себе лишь информацию о перепадах скорости на каждой из границ. Отчетливо видно, что яркие пятна на исходном временном разрезе (рис. 7.7а), на разрезе относительных скоростей

7.2.5. Результаты инверсии

В прогибе Сорокина, описанный в Главе 6, п.6.2 метод инверсии сейсмоакустических данных был опробован на участке одного из профилей. На рис. 7.7а,б представлены исходный временной разрез после фазовой деконволюции (а), и синтетический разрез, полученный в процессе инверсии (б). Видно, что синтетический разрез практически совпадает с исходным, что говорит о хорошей точности и достаточно высокой детальности подбора коэффициентов отражения, при благоприятных условиях высокого соотношения сигнал/шум и хорошей «контрастности» исходных данных.

Рисунок 7.7в демонстрирует разрез относительных скоростей. В отсутствие информации, позволяющей определить опорное значение

(рис. 7.7в) соответствуют границам, на которых значения скорости уменьшаются.

На рис. 7.8 в увеличенном масштабе методом отклонений показан участок разреза относительных скоростей, соответствующий одному из ярких пятен на фланге диапировой складки. Видно, что данное яркое пятно соответствует двум низкоскоростным прослоям.

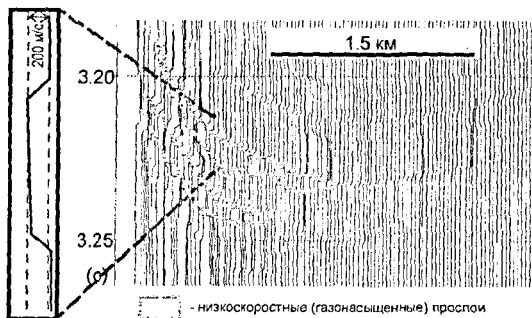


Рис. 7.8. Участок разреза относительных скоростей, соответствующий одному из ярких пятен на фланге диапировой складки, показанный в увеличенном масштабе методом отклонений.

Перепад скоростей на границах этих прослоев вблизи диапира составляет 250-300 мс, уменьшается до 200 мс в центральной части, и

далее, постепенно уменьшаясь по мере удаления от диапировой складки, на некотором расстоянии от нее практически исчезает.

Очевидно, что эти прослои следует интерпретировать, как газонасыщенные участки. Наблюдаемое латеральное изменение скорости в них вероятно говорит о постепенном уменьшении газонасыщения по мере удаления от тела диапира. Наблюдаемый контраст скоростей может говорить о присутствии нескольких процентов свободного газа в порах осадков в исследуемых участках разреза.

7.2.6 Обобщение полученных результатов и основные выводы к разделу 7.2.

В результате проведенного исследования было выявлено, что изучаемый район характеризуется наличием скоплений газа в отложениях плиоцен-четвертичного комплекса, вероятно связанных с развитием глиняного диапиризма на данной территории. Часть наблюдаемых на сейсмоакустических данных индикаторов газонасыщенности были подтверждены результатами инверсии и, в определенной степени, результатами качественной оценки поглощения. Были также зафиксированы признаки миграции газа вверх по разрезу. Таким образом, можно предположить, что обнаруженные по данным прободобора участки повышенного газонасыщения донных осадков связаны с зонами разгрузки более глубинных скоплений природного газа.

Полученные данные также позволяют сделать предположения о природе газовых гидратов, зафиксированных в нескольких поднятых кернах. Поскольку, ничего похожего на BSR на данных сейсмоакустического профилирования обнаружено не было, вероятно сколь либо протяженный гидратоносный слой в данном районе отсутствует, а газовые гидраты формируются в виде локальных скоплений. Наблюдаемые на сейсмоакустических данных под теми станциями прободобора, где были подняты газовые гидраты, признаки миграции газа, говорят о том, что эти скопления скорее всего контролируются локальными зонами активной разгрузки флюидов, а следовательно, газовые гидраты в районе прогиба Сорокина образованы аллохтонным газом и имеют фильтрогенную природу.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Для уточнения природы наблюдаемых на сейсмоакустических разрезах индикаторов газонасыщенности предложена схема оценки поглощения внутри и вне аномальных участков, основанная на комплексировании трех методов (одного качественного и двух количественных) различной точности, достоверности и устойчивости.

2. Для получения информации о скоростных характеристиках предположительно газонасыщенных участков разреза предложен простой метод инверсии сейсмоакустических данных, основанный на принципе инверсии «отдельных пиков». Метод легко реализуется на персональном компьютере, совместимом с IBM PC, и не требует предварительной обработки сейсмоакустических данных.

3. Предлагаемые методы были реализованы автором и опробованы на реальном материале из двух районов в акватории Черного моря, характеризующихся различными сейсмогеологическими условиями. Это позволило проверить работоспособность и эффективность предлагаемых методов, а также выявить их преимущества, недостатки и принципиальные ограничения связанные с тем или иным характером геологического строения изучаемых районов.

4. Предлагаемая схема оценки поглощения показала хорошие результаты в условиях монотонного разреза, близкого к горизонтально-споистой модели среды, с большим количеством отражений примерно одинаковой амплитуды. Однако, в условиях сильно дислоцированного разреза, данная схема не может быть применена в полном объеме, хотя в отдельных случаях получение качественной оценки поглощения все же оказывается возможным. Эти ограничения безусловно сужают область использования данной схемы оценки поглощения при изучении газонасыщенности морских осадков, однако во многих районах ее применение вполне целесообразно и способно дать положительный результат.

5. Разработанный метод получения информации о скоростных характеристиках предположительно газонасыщенных участков разреза демонстрирует большую детальность в условиях высокой «контрастности» исходных данных, т.е. в тех случаях, когда сейсмическая запись характеризуется наличием отдельных высокоамплитудных отражений, чередующихся с отражениями меньшей амплитуды. Однако даже в том случае, когда это условие в целом не выполняется, метод может быть успешно применен для исследования природы амплитудных аномалий, предположительно связанных с газонасыщенностью осадков. Хотя для определения при помощи данного метода абсолютных значений скоростей необходимо привлечение дополнительной информации, в ее отсутствие метод позволяет определять перепады скоростей на отражающих границах, что является вполне достаточным для решения многих реальных геологических задач, связанных с изучением газонасыщенности осадков.

6. С использованием предлагаемых методов проведена комплексная геологическая интерпретация сейсмоакустических данных из района развития грязевого вулканизма в центральной части Черного моря, а также из района в прогибе Сорокина, продемонстрированы возможности методов при решении конкретных геологических задач.

7. В центральной части Черного моря полученные оценки поглощения и скорости продольных волн подтвердили правомерность интерпретации

наблюдаемых на сейсмоакустической записи ярких пятен как газонасыщенных участков разреза.

8. Расположение этих газонасыщенных участков (вблизи грязевых вулканов, на крыльях разрывных нарушений), позволяет предположить, что газ здесь является переотложенным, проникая либо через зоны разломов, либо через питающие каналы грязевых вулканов. Таким образом, на основании сейсмоакустических данных, можно предположить, что газ в этих скоплениях, имеет глубинную природу.

9. В районе, расположенном в пределах прогиба Сорокина, в результате проведенного исследования было выявлено, что изучаемый район характеризуется наличием скоплений газа в отложениях плиоцен-четвертичного комплекса, вероятно связанных с развитием глиняного диапиризма на данной территории. В отдельных местах природа наблюдаемых на сейсмоакустических данных индикаторов газонасыщенности была подтверждена результатами инверсии и, в определенной степени, результатами качественной оценки поглощения. Были также зафиксированы признаки миграции газа вверх по разрезу. Таким образом, можно предположить, что обнаруженные по данным пробоботбора участки повышенного газонасыщения донных осадков связаны с зонами разгрузки более глубоких скоплений природного газа.

10. Полученные данные также позволяют сделать предположения о природе газовых гидратов, зафиксированных в нескольких поднятых кернах в прогибе Сорокина. Поскольку, ничего похожего на BSR на данных сейсмоакустического профилирования обнаружено не было, вероятно сколь-либо протяженный гидратоносный слой в данном районе отсутствует, а газовые гидраты формируются в виде локальных скоплений. Наблюдаемые на сейсмоакустических данных под теми станциями пробоботбора, где были подняты газовые гидраты, признаки миграции газа, говорят о том, что эти скопления скорее всего контролируются локальными зонами фокусированной разгрузки флюидов, а следовательно, газовые гидраты в районе прогиба Сорокина образованы аллохтонным газом и имеют фильтрогенную природу.

11. Следует отдельно подчеркнуть, что предлагаемый в работе метод инверсии сейсмоакустических данных нацелен на изучение скоростных характеристик целевых горизонтов - предположительно газонасыщенных участков разреза. Автор не ставил перед собой задачу полного восстановления скоростных характеристик всего исследуемого разреза при помощи данного метода. Такое ограничение существенно сузило круг проблем, которые было необходимо решить. Например, при разработке алгоритма практически не рассматривалась проблема влияния на результаты инверсии многократных и неполнократных отражений – считалось, что то конкретное целевое отражение, которое предполагается изучать, априори является однократным. Это позволило добиться относительной простоты алгоритма, повысить устойчивость его работы и избежать предварительной обработки исходных данных, однако за счет такого упрощения при решении задач иного рода метод следует применять с осторожностью. Еще одно ограничение данного метода связано с соотношением целевого интервала изучаемого разреза и глубин воды, на которых проводятся исследования. В силу описанных выше причин, метод не позволяет изучать горизонты, время прихода отражений от которых превышает время прихода первого кратного отражения от дна. Также следует учитывать тот факт, что из-за присутствия в записи так называемых кратных волн с малой задержкой, влияние которых нарастает с глубиной, точность определения скоростных характеристик при помощи данного метода тем меньше, чем больше глубина исследуемого целевого горизонта.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

а) статьи:

1. Bouriak, S.V. and Akhmetjanov, A.M. 1998. Origin of gas hydrate accumulations on the continental slope of the Crimea from geophysical studies. In: Henriot, J.-P. and Mienert, J. (eds) Gas Hydrates: Relevance to World Margin Stability and Climate Change. Geological Society, London, Special Publications, 137: 215-222
2. Gaynanov, V.G., Bouriak, S.V., and Ivanov, M.K., 1998. Seismic evidence for gas accumulation related to the area of mud volcanism in the deep Black Sea. *Geo-Marine Letters*, 18, 2.
3. Bouriak, S., Vanneste, M., and Saoutkine, A., 2000. Inferred gas hydrates and clay diapirs near the Storegga Slide on the southern edge of the Vøring Plateau, offshore Norway. *Marine Geology*, 163/1-4: 125-148

б) тезисы:

4. Bouriak, S., 1994. Bright spots on seismic profiles of the deepest part of the Black Sea mud volcano area. In: Abstracts of Third International Conference "Gas in Marine Sediments", September 25-28, 1994, NIOZ, Texel, The Netherlands.
5. Bouriak, S., 1995. Black Sea mud volcano area: seismic and acoustic images probably connected with gas charge. The evidence of gas responsibility for bright spots (data from the 1st and 3rd TTR Cruises). In: Deep-sea depositional systems and mud volcanism in the Mediterranean and Black Seas. Abstracts of the 3rd post-cruise meeting, Cardiff, 30 January - 3 February 1995, Marinf/99, UNESCO.
6. Bouriak, S., 1996. Accumulations of gas hydrates on the continental slope of the Crimea from the seismic standpoint. In: Abstracts book of the 1st MASTER Workshop "Gas Hydrates: Relevance to World Margin stability and climatic Change", September 18-20, 1996, Het Pand, Gent, Belgium.
7. Bouriak, S. and Akhmetzhanov, A., 1997. Distribution and nature of gas hydrate accumulations on the continental slope of the Crimea from the geophysical standpoint. In: "Gas and Fluids in Marine Sediments: Gas Hydrates, Mud volcanoes, Tectonics, Sedimentology and Geochemistry in Mediterranean and Black Seas" Fifth Post-Cruise Meeting of the Training Through Research Programme and International Congress. Amsterdam, the Netherlands, 27-29 January 1997, UNESCO/IOC, workshop Report, 129.
8. Bouriak, S., 1998. Seismic manifestations of gas in the Sorokin Trough (Black Sea): analysis of velocity model obtained by inversion of seismic data. In: Abstracts book of "Carbonate Mud Mounds and Cold Water Reefs – Deep Biosphere-Geosphere Coupling" TTR-7 Post Cruise conference, 7-11 February 1998, Gent, Belgium.
9. Буряк С., Ахметжанов А., 1999. Природа газовых гидратов в прогибе Сорокина по геофизическим данным. Тезисы докладов Международного научного семинара «Геологические, геофизические и геохимические исследования в Черном море», декабрь 1999 г., Тбилиси, Грузия.