

Физико-геологические основы и методология сейсморазведки сложнопостроенных сред рудных районов

Н.А. Караев (ФГУНПП «Геологоразведка»)

В начале 60-х годов в связи с резким сокращением фонда легко открываемых рудных месторождений возникла проблема поиска глубокозалегающих рудных объектов. Были выдвинуты новые задачи, связанные со структурным картированием рудоперспективных площадей. Вопрос об использовании метода отраженных волн при решении рудно-поисковых задач многими был воспринят неоднозначно. С одной стороны, ряд исследователей с понятием *рудная сейсморазведка* связывали решение малоглубинных задач, ориентированных на прямые поиски рудных тел, и поэтому к использованию метода отраженных волн в рудных районах отнеслись отрицательно. С другой стороны, из-за отсутствия достаточного фактического материала многие исследователи полагали, что в средах, являющихся объектами изучения в рудных районах, отсутствуют границы, с которыми могли быть связаны отраженные волны. Поэтому метод отраженных волн был отнесен к числу бесперспективных направлений в рудных районах.

В этот же период практически одновременно в трех крупных металлогенических провинциях: Рудный Алтай (Н.А. Караев, В.Н. Тростников), Балтийский щит (И.В. Литвиненко, К.А. Некрасова), Урал (В.Н. Шмаков, Б.В. Дорофеев) [1] впервые в мировой практике были зарегистрированы отраженные волны, связанные с внутренними границами в верхней части консолидированной земной коры. Учитывая чрезвычайную важность проблемы и ее значимость при изучении принципиально нового класса сейсмических моделей методом отраженных волн, приведу фрагменты из письма Николая Никитовича Пузырева к директору ВИРГа Владимиру Васильевичу Алексею: ...*«В последних числах марта я находился в Ленинграде и знакомился в Вашем институте с сейсмическими материалами отраженных волн, полученными в 1962 году Н.А. Караевым в районе Зырянска. Они произвели на меня весьма сильное впечатление. Насколько я знаю, равные по четкости материалы МОВ в горных районах нигде ранее не были получены. Исследования подобного рода, как мне представляется, должны в ближайшем будущем иметь большое значение, с одной стороны, как региональные при поисках рудных месторождений, а с другой – как надежная база для общетеоретических построений в рудной геологии...»*.

Заключение Н.Н.Пузырева имело решающее значение в определении дальнейшего направления работ ВИРГа и явилось серьезной заявкой на постановку широкомасштабных научных и экспериментальных исследований по разработке физических основ и технологии метода отраженных волн (МОВ) в решении разнообразных проблем рудной сейсморазведки. По инициативе В.В. Федынского (Алма-Ата, 1964) ВИРГом совместно с ИФЗ АН СССР было организовано первое Всесоюзное совещание по рудной сейсморазведке, которое определило главные направления развития метода в рудных районах. Существенными являются уточнения, внесенные совещанием в понятие *рудная сейсморазведка*, в которое были включены любые сейсморазведочные работы, в том числе и региональные исследования, проводимые в металлогенических провинциях, в пределах рудных районов, полей и месторождений, способствующих повышению эффективности геолого-геофизических работ, связанных с поисками и разведкой рудных полезных ископаемых.

В результате была разработана обширная программа научно-исследовательских, опытно-конструкторских и опытно-методических работ (И.С. Берзон, Н.А. Караев., Н.Н. Пузырев и др., 1966) [1]. Она явилась базой для многолетних исследований по пересмотру, дальнейшему развитию и разработке физических основ и технологии методов и модификаций рудной сейсморазведки.

Роль головной организации принадлежала ВИРГУ, основные исследования которого были связаны с разработкой физических основ и технологии рудной сейсморазведки. В разные годы ВИРГом созданы и внедрены в производство: первый в СССР вибросейсмический комплекс ВСК, аппаратура аналоговой обработки сейсмоданных, специальная аппаратура для работ в рудных скважинах методами АК и ПМ ВСП, аналогово-цифровая аппаратура ультразвукового моделирования для решения теоретических и практических задач рудной сейсморазведки. Созданы цифровые комплексы обработки данных ПМ ВСП, наземных многокомпонентных наблюдений, данных сейсмотомографии. Предложен и разработан новый нетрадиционный класс сейсмических моделей гетерогенного типа, получивший широкое распространение при аппроксимации модели кристаллической коры, положенный в основу создания методов обработки и интерпретации полей рассеянных волн. Разработаны и внедрены в производство различные модификации методов наземных и скважинных наблюдений. На протяжении многих лет ВИРГ являлся куратором и экспертом Мингео СССР по всем видам работ рудной сейсморазведки, осуществляя координацию научно-исследовательских и производственных работ. Методические исследования при поисках железа, никеля, полиметаллов, меди, бокситов, алмазов, золота, апатита и др. проведены в 15 основных металлогенических провинциях России и стран СНГ: Карело-Кольский регион, Центральные районы, Беломорье, Урал, Норильск, Западная Якутия, Северо-Восток, Приморье, Кавказ, Казахстан, Узбекистан.

Многолетними исследованиями ВИРГа была доказана высокая эффективность рудной сейсморазведки при решении разнообразных геологических задач. Итоги работ по рудной сейсморазведке обобщены в крупных монографиях [3, 4, 5], последняя из которых «Рудная сейсморазведка» используется в качестве учебного пособия в некоторых ВУЗах России и зарубежья.

Рудная сейсморазведка была отнесена к числу широкодиапазонных методов, применяемых как при региональных исследованиях земной коры, так и при решении разномасштабных задач структурного контроля рудных месторождений в геологических средах, неизмеримо более сложных, чем среды, изучаемые традиционной сейсмикой при нефтепоисковых работах. Объектами изучения рудной сейсморазведки являются разнообразные геологические структуры: интрузивные образования, структурные складчатые элементы, приконтактные зоны, шарьяжно-надвиговые зоны, разрывные нарушения, кимберлитовые трубки, коры выветривания и др. Проведены исследования, связанные с локализацией в разрезе геологических неоднородностей: рудных тел, зон повышенной трещиноватости пород и пр. В составе геофизического комплекса сейсморазведка стала использоваться при поисках различных месторождений твердых полезных ископаемых: полиметаллов, меди, никеля, железа, хрома, алмазов, бокситов, золота и др.

Многообразие изучаемых геологических сред и задач, решаемых рудной сейсморазведкой при различной глубине и детальности освещения разреза, определили большой набор применяемых сейсмических методов и модификаций в широком диапазоне сейсмических частот: от единиц при региональных исследованиях до сотен герц и килогерц при детальном скважинных наблюдениях.

Многолетний опыт работ в рудных районах и полученные при этом результаты по спектру решаемых задач и глубине освещения разреза послужили основанием отнести сейсмический метод отраженных волн к числу ведущих геофизических методов при поисках рудных месторождений. Метод используется при решении разнообразных задач изучения структурно-тектонического строения рудных районов, выделения и уточнения рудоконтролирующих структур в осадочных и эффузивно-осадочных складчатых комплексах пород, обнаружения и глубинного картирования рудоконтролирующих разломов, объемного картирования интрузий и определения пространственного

положения рудоносных внутриинтрузивных зон, локализации и изучения морфологии дифференцированных интрузий и пр.

Задачи, решаемые сейсморазведкой на разных стадиях изучения рудных районов.

Региональные сейсмические исследования земной коры масштабов 1:500 000 и 1:1 000 000) в металлогенических провинциях проводятся с целью установления позиций рудных районов, поясов в геологических структурах, картирования крупных тектонических швов и выделения блоков, изучения зон метаморфизма и пр. Глубина исследований охватывает всю толщу земной коры в целом и верхние слои мантии. К числу прогрессивных преобразований в методах региональной сейсмоки, реализованных на государственной сети опорных профилей, следует отнести переход на использование «близвертикальных» отраженных (рассеянных) волн, выполняемый на новом технологическом уровне методом ОГТ, что позволило перейти к более детальным исследованиям земной коры.

Вместе с тем необходимо отметить, что традиционный подход к обработке и интерпретации сейсмических данных метода ОГТ, перенесенный из нефтепоисковой сейсмоки (при существующих противоречиях во взглядах на сейсмическую модель земной коры и верхней мантии) во многих случаях привел к многозначности интерпретации данных, как между отдельными глубинными геофизическими методами, так и между результатами в пределах одного метода. Стало очевидным, что классические модели, на базе которых строилась система обработки и интерпретации данных нефтепоисковой сейсморазведки методом ОГТ, не применимы при переходе к изучению неоднородного строения земной коры.

Многолетние теоретико-экспериментальные исследования ВИРГа, связанные с созданием нового нетрадиционного класса сейсмических моделей гетерогенного типа, легли в основу общей концепции обработки и интерпретации данных региональных сейсмических наблюдений в ближней зоне, построенной на извлечении полезной информации о неоднородном строении коры из поля рассеянных волн. Созданная система обработки данных изучения глубинного строения земной коры прошла апробацию на материалах крупных геотраверсов ОГТ: «Уралсейс», Балтийский щит (4-В, 1-ЕВ), региональное пересечение через СГ-3 (Кола-92) и региональный профиль в Западной Якутии. Получены уверенные данные о глубинном строении земной коры в масштабе 1:1 000 000, при этом наряду с выделением крупных разделов, определяющих вертикальную расслоенность земной коры и ее мозаично-блоковую структуру (крупные блоки, зоны метаморфизма и пр.), достаточно уверенно на сейсмических динамических разрезах отображаются гетерогенные сейсмические системы более высокого иерархического уровня, в том числе контрастные тектонизированные зоны. При этом показано, что изучение земной коры с позиции сейсмической гетерогенности повышает достоверность глубинных построений, а также надежность сейсмических признаков, устанавливающих связь между глубинными структурными элементами коры и верхними структурно-тектоническими комплексами.

Региональные сейсмические исследования масштаба 1:200 000. С наращиванием объемов опорных сейсмических профилей, пересекающих рудные провинции возросли требования к прогнозной составляющей этих видов исследования, с этим связана необходимость более детального изучения верхней части коры на перспективных площадях для уточнения структурно тектонического строения рудных районов, с последующим выделением рудоконтролирующих структур методами детальной сейсморазведки. Региональные сейсмические исследования масштаба 1:200 000 являются составной частью среднемасштабного геологического картирования, проводятся с целью более детального изучения основных структур верхних частей коры с освещением глубин до 15-20 км. Основной целью этих исследований, выполняемых по определенной сети профилей, является изучение рудных поясов, областей и установление связи между глубинными структурами земной коры и структурными элементами, контролирующими

рудные месторождения, в том числе, выделение и прослеживание разломных зон, оконтуривание крупных интрузивных массивов, зон метасоматоза и пр.

Поисково-съёмочные сейсморазведочные работы масштаба 1:50 000 проводились с целью уточнения структурно-тектонического строения рудных районов, выделения и прослеживания рудоконтролирующих структур.

Метод отраженных волн (МОВ) среди прочих геофизических методов занял лидирующее положение при решении задач структурного контроля полиметаллических месторождений Рудного Алтая; медно-никелевых месторождений Печенги с прослеживанием продуктивных горизонтов; а в Норильске – при изучении дифференцированных ультраосновных интрузий. В алмазоносных районах Западной Якутии и Беломорья метод используется при поисках и крупномасштабном прогнозировании алмазоносных месторождений с локализацией кимберлитовых трубок и картированием рудоконтролирующих разломов. В связи с поисками хромитовых залежей МОВ использовался при изучении морфологии ультраосновных массивов, в том числе крупнейшего Кемпирсайского массива в Казахстане. Успешное применение МОВ связано с картированием апатиторудных залежей Хибинского массива; при глубинном картировании рудоконтролирующих разломов в Золоторудной Калбе; при глубинном картировании бокситорудных залежей, связанных с древними корами выветривания. Значительные результаты получены при картировании рудосодержащих пластов железомарганцевых и свинцово-цинковых стратиформных месторождений, а также зон медного оруденения в Казахстане.

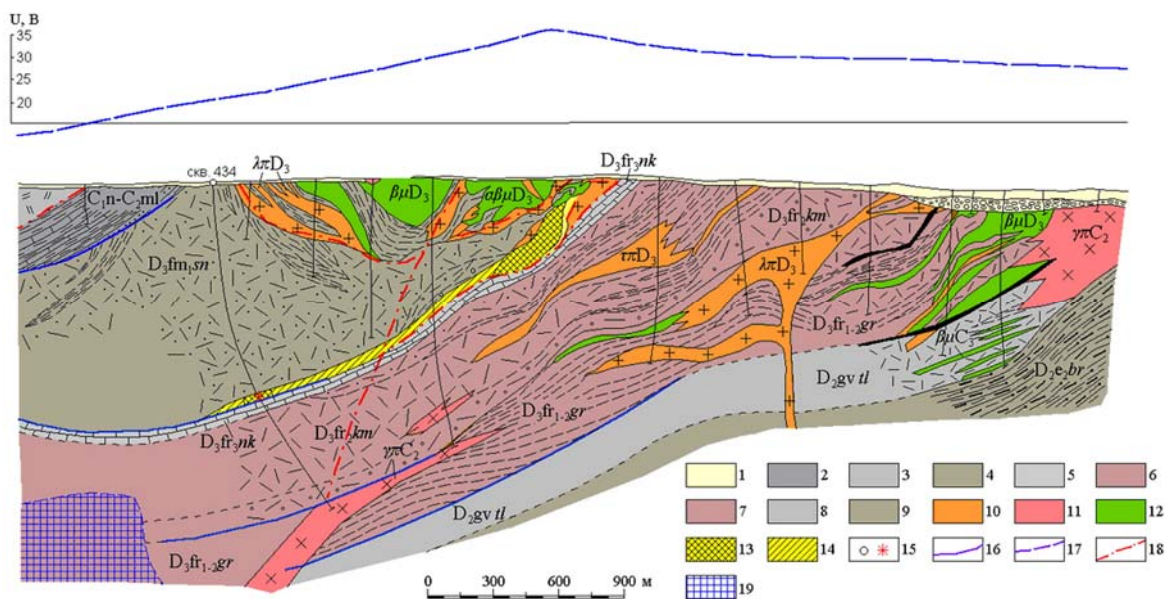


Рис 1 Пример геологического разреза, построенного по данным сейсморазведки методом отраженных волн. (Рудный Алтай. Николаевское месторождение)

Данные сейсморазведки подтверждены результатами заверочного бурения – отражающие границы совпали с николаевским горизонтом (известняки среди вулканогенных пород) и границей несогласия между нижним и средним франскими отложениями. Важным является то, что с учетом метода заряда через скважину № 434 установлено, что месторождения типа Николаевки локализуются не в антиклиналях, а в палеодепрессиях (зонах прогибания (из материалов В.Д.Борцова).

Условные обозначения:

1 – четвертичные отложения; 2 – отложения малоульбинской свиты нижнего-среднего карбона ($C_{1n}-C_2 ml$); 3 – отложения пихтовской свиты ($D_3 fm pch$); 4 – отложения снежиревской свиты ($D_3 fm_1 sn$); 5 – николаевский горизонт ($D_3 fr_1 nk$); 6 – отложения каменевской свиты ($D_3 fr_2 km$); 7 – отложения гериховской свиты ($D_3 fr_{1-2} gr$); 8 – породы таловской свиты ($D_2 gv tl$); 9 – березовская свита ($D_2 e_2 br$); 10 – липарито-дацитовые и дацитовые порфиры, трахилипаритовые порфиры ($\tau\pi D_3$); 11 – плагиогранит-порфиры, гранит-порфиры ($\gamma\pi C_2$); 12 – андезито-базальтовые порфириты ($\alpha\beta\mu D_3$,

$\beta\mu C_3$), диабазы и диабазовые порфириды ($\beta\mu D_3$); 13 – рудное тело; 14 – предполагаемое распространение оруденения; 15 – скважина и точка заряда; 16 – границы отражающих горизонтов по данным МОВ; 17 – график потенциала; 18 – разрывные нарушения; 19 – контур интрузии по данным гравиметрической съемки

Все возрастающий интерес к рудной сейсморазведке наблюдается в зарубежных странах. Только спустя три десятилетия после апробации сейсморазведки методом отраженных волн в рудных районах СССР, метод стал применяться в различных странах мира при решении прогнозно-поисковых задач на сульфидные руды, медь, золото, уран, бокситы, алмазы и пр. Работы выполнялись на высоком технологическом уровне с применением новейших технических средств получения и обработки сейсмической информации, что позволило существенно повысить эффективность применения сейсморазведки в рудных районах.

К наиболее значительным результатам могут быть отнесены сейсморазведочные работы методом отраженных волн при поисках сульфидных залежей Канадского щита. По результатам сейсморазведки в пределах крупнейшего зеленокаменного пояса изучены рудоконтролирующие структуры, а в отдельных случаях прослежены рудоносные горизонты вулканогенных комплексов; изучено строение крупнейшего ультраосновного массива Sudbury. К значительным достижениям могут быть отнесены результаты исследований, проведенных с применением высокочастотной 3D-модификации сейсмического метода при объемной локализации в пределах массива Sudbury глубокозалегающей рудной залежи плотных сульфидов. В Южной Африке с начала проведения первых работ методом отраженных волн связаны поиски глубокозалегающих месторождений золота, платины и цветных металлов. Применение МОВ при картировании структур, контролируемых рудоносными горизонтами, способствовало открытию новых золоторудных месторождений Южной Африки. В последние годы отмечается возросший интерес к методу отраженных волн после получения уникальных данных 3D-сейсморазведки при объемном изучении структурных комплексов шахтных полей крупных золоторудных месторождений. Данные МОВ, подтвержденные буровыми работами, явились основополагающими при изучении пространственной структуры и малоамплитудных нарушений золоторудных месторождений Южной Африки.

Детальные сейсморазведочные работы при геологическом картировании масштабов 1:25 000 и крупнее задачи, связанные с картированием поверхности палеозойского и докембрийского фундаментов, повсеместно решаются методом преломленных волн (МПВ) при частичном комплексировании с методом отраженных волн. Применение многокомпонентных и высокочастотных сейсмических наблюдений МПВ существенно повысило разрешающую способность и информативность метода при детальном изучении рельефа кристаллических пород; установлении планового положения рудоконтролирующих структур и рудовмещающих комплексов пород, в том числе при картировании выходов зон тектонических нарушений, контактов интрузивных образований и различных структурно-литологических комплексов пород (блоков); при изучении строения коры зоны выветривания коренных пород. Многоволновые наблюдения МПВ позволили перейти к прогнозированию вещественного состава пород при картировании фундамента под наносами. Успешное применение МПВ при картировании кор выветривания, с которыми связаны железные руды, залежи бокситов, урана (КМА, Урал, Кривой Рог, Казахстан). Метод успешно применялся при поисках золота в Узбекистане и на Северо-Востоке, хромитов на Урале и др.

Детальная сейсморазведка рудных месторождений. Применяется при обнаружении и уточнении формы рудных тел; при геолого-технологических исследованиях в подготовке к эксплуатации рудных месторождений; при осуществлении скважинной гидродобычи рудных полезных ископаемых. Имеются примеры положительного решения задач методами сейсмического просвечивания межскважинного и межшахтного пространств.

Несмотря на успешное применение рудной сейсморазведки в СССР, объемы этих работ в период реформ 90-х годов были существенно снижены. По существу произошел полный «обвал» метода, что пагубно сказалось на эффективности рудной геофизики при поисках рудных месторождений в России. В зарубежных странах отмечается все возрастающий интерес к рудной сейсморазведке, со значительным увеличением объемов работ методом отраженных волн при решении прогнозно-поисковых задач на разные виды рудных полезных ископаемых. Возрождение рудной сейсморазведки в России находится в прямой зависимости от уровня организации работ и обеспечения современными технологическими средствами получения и обработки сейсмической информации. Реализация сейсморазведки в рудных районах на современном уровне позволит перейти к новому этапу решения задач структурного контроля рудных месторождений с прогнозом вещественного состава горных пород и, в конечном итоге, к решению проблемы прямых поисков и диагностики рудных залежей.

Список литературы

1. Берзон И.С., Караев Н.А., Пузырев Н.В. и др. Современное состояние и пути развития рудной сейсморазведки // Вопросы разведочной геофизики. – Л.: Недра, 1966.
2. Караев Н.А. Физико-геологическое обоснование сейсмического метода отраженных волн при изучении сложнодислоцированных сред // Автореферат канд. диссертации – М: МГРИ, 1967.
3. Караев Н.А., Лукашин Ю.П., Рабинович Г.Я. и др. Сейсмический метод отраженных волн в рудных районах // Методическое руководство. – Л.: Недра, 1982 г.
4. Караев Н.А., Рабинович Г.Я. Атлас-монография сейсмических моделей и волновых полей рудных районов. – СПб.: ВИРГ-Рудгеофизика, 1995.
5. Караев Н.А., Рабинович Г.Я. Рудная сейсморазведка. – М.: Геоинформмарк, 2001.
6. Караев Н.А., Г.А. Гамбурцев и рудная сейсморазведка (от истоков до настоящего времени) // Исследования литосферы в работах петербургских геофизиков. – СПб.: ВИРГ-Рудгеофизика – ВНИИОкеангеология, 2003.
7. Караев Н.А. Принципиальные основы сейсмических исследований МОВ-ОГТ // Методическое пособие по изучению глубинного геологического строения складчатых областей для Государственной геологической карты России масштаба 1:1 000 000/ А.А. Духовский (отв. исп.) и др. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2005.
8. Караев Н.А. Становление и пути развития рудной сейсморазведки // Технологии сейсморазведки. 2007. № 4.
9. Караев Н.А. Воспоминания «рудного» сейсморазведчика // В.В.Федынский. Воспоминания, очерки, письма. – М.: ГЕРС, 2004.
10. Караев Н.А. Инна Соломоновна и рудная сейсморазведка // Дороги жизни: воспоминания об Инне Соломоновне Берзон. – М.: ИФЗ РАН, 2004.
11. Караев Н.А. Николай Никитович и рудная сейсморазведка // Н.Н. Пузырев. Он долго был с нами. – Новосибирск: РАН, 2009.

2. Сейсмическая гетерогенность сложнопостроенных сред

Развитие сейсмических методов происходило и происходит при постоянном усложнении геологических задач на различных уровнях исследования реальных сред – от сверхдетального изучения локальных сейсмических неоднородностей в высокочастотном сейсмическом диапазоне (до нескольких сотен герц) до задач регионального изучения структур земной коры. Объектами исследования становятся новые нетрадиционные для сейсморазведки сложнопостроенные геологические образования, как в пределах земной коры, так и в осадочных отложениях. Стало очевидным, что классические модели, на базе которых развивалась сейсморазведка, являются далеко идущей идеализацией реальных

геологических сред. При этом наибольшим упрощениям в них подвергнуты представления о сейсмических границах, которые в действительности далеко не всегда могут быть аппроксимированы гладкими математическими поверхностями, а чаще являются невыдержанными переходными слоями, характеризуемыми неоднородностью структуры, либо представленными в виде некоторого статистического распределения локальных неоднородностей вдоль геологических контактов. С другой стороны, в составе традиционных регулярных слоистых моделей осадочных толщ пород могут быть нерегулярные сейсмические образования (разломы, зоны выклинивания, рифтогенные структуры, кимберлитовые трубки, залежи углеводородов и пр.), которые часто являются целевыми объектами исследования. В еще большей степени отклонения от известных идеализированных классических регулярных моделей реальных сред относятся к сложнодислоцированным толщам метаморфических и магматических пород, как при исследованиях глубинного строения земной коры, так и при решении прогнозных рудно-поисковых задач.

Решение новых задач сейсморазведки сопровождалось усовершенствованием представлений о сейсмических моделях реальных сред. По мере накопления сведений о пространственном распределении упругих параметров горных пород и волновых полей, наблюдаемых в сложнеоднородных метаморфических и изверженных толщах пород, еще в семидесятые годы произошли коренные изменения в представлениях о сейсмических моделях верхних и глубоких частей земной коры. При этом основой в развитии нетрадиционных представлений о моделях подобных сред явился созданный принципиально новый наиболее общий класс сейсмических моделей гетерогенного типа [7,9].

В основе типизации сейсмических моделей земной коры положено фундаментальное свойство геологической среды – г е т е р о г е н н о с т ь . Земля повсеместно неоднородна от коры, мантии и до ядра при размере неоднородностей от зерна до глобальной сферической расслоенности. Неоднородности Земли, имеющие разнообразную геологическую природу и характеризующиеся широким диапазоном изменения размеров, собраны в определенные композиции. При этом по абсолютным размерам неоднородности геологической среды делятся на несколько иерархических уровней [М.В.Рац,1968]. К макронеоднородностям первого порядка отнесены крупные региональные объекты, определяющие расслоенность и блоковую структуру земной коры, а также региональные структурные элементы в земной коре, различаемые внутренним строением и состоянием пород. К неоднородностям второго порядка причислены зоны разломов, системы трещин, интрузивные образования, контактовые ореолы, системы складок и пр. Неоднородности третьего и четвертого порядков отнесены к категории микронеоднородностей, связанных со структурой минералов, а также микротрещиноватостью пород. В самых верхних частях земной коры, доступных современному бурению, геологические неоднородности наиболее наглядно проявляются в изменениях упругих параметров горных пород. Флуктуации скорости могут быть значительными, и это связано с чрезвычайно пестрым составом пород, последующим их изменением, неравномерностью концентрации зон напряженного состояния пород и пр.

Структура сложнопостроенных толщ пород определена композицией гетерогенных систем различных порядков. Например, под структурой складчатой области можно понимать наложение гетерогенных систем, которые образованы складками различных генераций, зонами деструктивных деформаций кливажа и т.п. В качестве составных компонентов этой композиции в ограниченном количестве могут присутствовать и регулярные системы в виде квазиоднородных пластов, границ, блоков и пр. Наряду со случайным распределением в разрезе неоднородности могут характеризоваться упорядоченной структурой, сопровождаемой направленным изменением физических характеристик, обуславливающих анизотропию горных пород, как например, в случае трещиноватости горных пород.

Переход к построению наиболее реалистичных и конструктивных сейсмических моделей гетерогенного типа и их систематизация по сейсмическим иерархическим уровням проведены на основе сейсмического масштабирования неоднородностей среды [6,8]. При этом под *сейсмическим масштабом* подразумеваются относительные значения размеров неоднородностей по отношению к важнейшему волновому параметру – сечению первой зоны Френеля ($D_{фр}$), определяемого длиной волны и положением неоднородности в пространстве относительно системы излучение-прием. По отношению площади неоднородности к сечению зоны Френеля ($D_{фр}$) все многообразие неоднородностей систематизированы в три группы, различаемые масштабом.

В случае крупномасштабных неоднородностей ($2d \gg D_{фр}$) – это область лучевого приближения, положенная в основу описания традиционных моделей регулярных сейсмических границ. Центральное место в сейсмических моделях земной коры отведено средним ($0,3 D_{фр} < 2d < 1,5 D_{фр}$) и мелкомасштабным ($2d \ll D_{фр}$) неоднородностям, из композиции которых формируются различные системы, названные нами *сейсмическими гетерогенными системами*. В первом случае – это область френелевской дифракции, при этом эффективные сейсмические модели (ЭСМ) среднемасштабных неоднородностей условно подразделены на двумерные и трехмерные. В другом случае – фраунгоферовой дифракции, волновое поле описывается статистически.

Эффективные сейсмические модели гетерогенных систем характеризуются размерностью системы, определяемой соотношением между характерными размерами контуров систем (трубчатые, зоны, блоки) и внутренней структурой гетерогенной системы. В этом случае эффективные параметры систем при отражении и прохождении волнового поля определяются ЭСМ локальных неоднородностей, плотностью их распределения и структурой организации в пределах систем.

По типу распределения локальных неоднородностей в пространстве гетерогенные системы условно могут быть подразделены на *квазиупорядоченные и диффузные*. *Квазиупорядоченные* системы характеризуются закономерным распределением неоднородностей в пространстве: по их ориентировке, степени периодичности, изменению эффективных значений коэффициента отражения и т.п. *Диффузные* гетерогенные системы в целом характеризуются случайным распределением параметров локальных элементов. В этом случае можно говорить о плотности распределения в пространстве центров тяжести элементов, об их ориентировке и контрастности сейсмических характеристик. Таким образом, в общем виде сейсмическую модель сложнодислоцированных толщ следует рассматривать как суперпозицию гетерогенных систем различной внутренней структуры и масштаба. В состав этой композиции могут входить и регулярные системы.

Гетерогенные сейсмические модели наиболее реалистично отображают особенности геологических структурных элементов в сложнодислоцированных средах. В них заложены новые информативные характеристики об этих средах, необычные с позиции традиционных регулярных сейсмических моделей. Например, в отличие от традиционно рассматриваемых в сейсморазведке гомогенных пластов, тонкослоистых пачек пород и зеркальных сейсмических границ основная особенность гетерогенных зон определяется их высокой внутренней неоднородностью, определяемой параметрами и характером распределения неоднородных включений. Сюда, прежде всего, могут быть отнесены зоны разломов, приконтактные зоны, системы складок, зоны несогласия, системы трещин и пр. То же самое относится и к традиционному понятию в сейсморазведке – *скоростной блок*, которому противопоставляется гетерогенная система, различаемая параметрами и плотностью, а также характером распределения разномасштабных неоднородностей. Модели гетерогенных блоков значительно лучше отображают распределение в пространстве различных геологических образований (интрузии, складчатые зоны, кимберлитовые трубки и пр.), чем модели, различаемые усредненными скоростными параметрами.

К предложенной необычной конструкции сейсмических моделей, основная информация о которых связывалась с полем рассеянных волн, многие относились скептически, воспринимая предлагаемые модели, как сейсмическую «экзотику», не адекватную строению реальных сред. Важно отметить, что введение в сейсморазведку нового нетрадиционного класса моделей было поддержано Ю.В.Ризниченко, который еще в начале 70-х годов предложил назвать их *макрогетерогенными*. Гетерогенные модели получили широкую поддержку в среде «региональных» сейсморазведчиков (И.П. Косминская, Н.И. Павленкова и др.). Знаменательным является положительное восприятие идеи аппроксимации неоднородного строения земной коры гетерогенными сейсмическими моделями на крупном международном форуме (Ялта, 1977). Важно отметить, что данные по гетерогенным сейсмическим моделям и роли рассеянной компоненты волнового поля в их изучении, были изложены на форуме значительно раньше – до постановки крупных проектов региональных пересечений СДР. По рекомендации форума первые результаты исследований рассеянных волн в изучении гетерогенных сейсмических систем со среднемасштабными включениями были опубликованы за рубежом [10,11].

Только через много лет, с постановкой в широких масштабах региональных сейсмических наблюдений на крупных геотраверсах методом отраженных волн в модификации МОГТ, предложенный и развиваемый в рудной сейсморазведке класс гетерогенных моделей получил широкое признание при аппроксимации неоднородной структуры земной коры. При этом экспериментальными полевыми наблюдениями в сопоставлении с накопленными данными физического моделирования было установлено, что практически повсеместно основная информация о сейсмической гетерогенности земной коры по наблюдениям в ближней зоне связана с полем рассеянных волн. В последующем, это было положено в основу построения общей концепции обработки и интерпретации поля рассеянных волн с выделением разноранговых структурных элементов земной коры. Аппроксимация земной коры гетерогенными сейсмическими системами позволила разрешить некоторые противоречия в существующей многозначной интерпретации данных глубинных сейсмических построений, обосновании природы наблюдаемого волнового поля и, соответственно, геологической природы сейсмических объектов различных иерархических уровней.

Сейчас, когда речь идет о модели земной коры по наблюдениям в «ближней» зоне термин *сейсмическая гетерогенность* употребляется повсеместно. Учитывая принципиальную важность проблемы введения нового класса моделей в сейсморазведку приведем фрагменты из отзывов, полученных в разные годы:

«..Выявленная принципиальная невозможность описания кинематики и динамики ряда локальных и интерференционных волнообразований в гетерогенных системах с позиции регулярных моделей имеет, на наш взгляд, фундаментальное значение для дальнейшего развития теории распространения волн в сложных средах».. «Получены новые геофизические результаты и развиты подходы к интерпретации «отраженно-рассеянных» и « рефрагированно - рассеянных» волн при изучении погребенных интрузивных массивов, приконтактных зон гетерогенных блоков, разломов и кимберлитовых трубок. В совокупности все перечисленные теоретические и методические результаты Н.А. Караева можно расценивать, как крупный прорыв в области рудной сейсморазведки...» (академик А.С. Алексеев, 1978).

«...Ученые ВИРГа были в числе немногих пионеров этого направления, их вклад в развитии сейсмики гетерогенных сред значителен, хорошо известен и теперь общепризнан. В развитии метода на протяжении всех 30 лет исключительная роль принадлежит руководителю исследований Н.А. Караеву. Развитие концепции сейсмической гетерогенности было продиктовано в первую очередь требованиями рудной сейсморазведки, где проблема стоит особенно остро – весьма неоднородная среда, сложная форма рудных тел. Вместе с тем модель и методы исследования должны найти

самое широкое применение в решении задач структурной сейсмологии, поскольку гетерогенность - фундаментальное свойство геологической среды, дающее новую информацию не только о ее структуре, но и составе...» (чл.кор. А.В. Николаев, 1996.).

«...Важным достижением следует считать введение гетерогенных моделей, состоящих из упорядоченных и неупорядоченных множеств дискретных элементов, представляющих собой локальные неоднородности. Это нововведение в теорию и практику метода отраженных волн следует считать принципиально новым подходом при расшифровке природы волн в сложных ситуациях, которая расширяет понимание термина «граница раздела». (академик Н.Н.Пузырев, 2000).

2.1. Теоретико-модельные исследования

Введение класса гетерогенных сейсмических моделей со среднемасштабными неоднородностями естественно привело к необходимости постановки исследований по распространению волн в этих чрезвычайно сложных по конструкции, необычных для сейморазведки системах. Действительно, если подобные модели более адекватно приближены к реальным сложнорасположенным средам, то, очевидно, исходя из особенности строения этих моделей, информация об этих средах будет связана с рассеянными волнами, которые традиционно в сейморазведке относились к классу нерегулярных помех. Поэтому при постановке исследований в этом классе моделей была поставлена первоочередная задача, связанная с изучением закономерности распространения волнового поля в этих моделях и, как следствие, поиск «сигнальных» компонент, по которым искомые гетерогенные системы могли быть опознаны, как на исходных сейсмограммах, так и после их преобразования в глубинный разрез. Существенным при этом является оценка применимости современных комплексов обработки сейсмической информации к подобным средам. По существу поставлена проблема создания общей концепции обработки и интерпретации полей рассеянных волн при построении гетерогенных систем сложнорасположенных сред.

В период постановки этой задачи математическое описание полей рассеяния, возникающих в сложнопостроенных гетерогенных системах, представляло трудно разрешимую проблему. Теоретическое рассмотрение было ограничено получением лишь асимптотических формул и исследованием полного поля рассеяния на локальном элементе произвольной формы. Учитывая это обстоятельство, к разрешению этой проблемы были привлечены методы физического моделирования в ультразвуковом диапазоне частот, впервые были предложены и развиты в работах ИФЗ АН СССР (Ю.В.Ризниченко, Б.Н.Ивакин, В.Р.Бугров).

Данные физического моделирования сопоставлялись с теоретическими расчетами по асимптотическим формулам, полученными в приближении Кирхгофа для поля волны, рассеянной на локальном элементе произвольной формы [6]. Была достигнута удовлетворительная сходимость расчетных данных и физического моделирования при исследовании волнового поля, рассеянного на среднемасштабном элементе. При этом, с одной стороны, было показано, что приближение Кирхгофа для поля рассеянных волн с достаточной для практики точностью применимо вплоть до глубокой полутени даже для сильно искривленных элементов, когда радиус кривизны оказывается порядка длины волны сейсмических колебаний. С другой стороны, совпадение расчетных данных с экспериментом явилось основанием для проведения дальнейших исследований методом ультразвукового моделирования на моделях, композиционно составленных из системы среднемасштабных элементов.

Рассмотрены особенности волнового поля, рассеянного как на среднемасштабном элементе, так и на разнообразных гетерогенных системах со среднемасштабными включениями. Приведем некоторые выводы по ряду существенных особенностей рассеянной волны, формируемой на элементе.

Среднемасштабные элементы занимают промежуточное положение между регулярными границами и точками (ребрами) дифракции. Так же, как и в случае протяженной границы к волновому полю отраженных и проходящих рассеянных волн на среднемасштабном элементе, полностью применим закон Снелиуса. При этом эффективные коэффициенты отражения зависят от размеров элемента, а диаграмма направленности излучения – от его формы и положения относительно источника возбуждения. Но с другой стороны показано, что среднемасштабному элементу на сейсмограммах отвечает протяженная синфазность, соответствующая годографу дифрагированной волны с минимумом над неоднородностью. Существенным является образование на среднемасштабных элементах обменных отраженных и проходящих волн. В соответствие с законом Снелиуса обменные отраженные, а также проходящие волны от элемента наблюдаются в том секторе углов, что и от протяженной границы с теми же упругими параметрами, как у элемента.

Исследования свойств рассеянных волн на локальных элементах явились основой для изучения механизма образования и особенности распространения волновых полей, формируемых на гетерогенных системах.

Проведенные исследования позволили выявить следующие основные особенности поля среднемасштабного рассеяния, формируемого *гетерогенными зонами и блоками*.

Гетерогенные зоны. Эффективные сейсмические модели гетерогенных зон относятся к категории двумерных моделей, геометрия которых (форма, углы наклона), а также размеры (мощность, протяженность) могут быть тождественны сейсмическому слою, либо пачке тонких слоев. Однако внутренняя структура зоны определяет ее существенные отличия от традиционной тонкослойной модели и эти различия заключаются в том, что эффективные характеристики зоны, составленной из набора преимущественно среднемасштабных рассеивателей, определяются их упругими и геометрическими (форма, размеры по отношению к $D_{фр}$) параметрами.

По характеру композиции среднемасштабных включений гетерогенные зоны подразделяются на два вида – зоны с упорядоченной и случайно-неоднородной (диффузной) структурой распределения неоднородностей. По скоростным интегральным характеристикам гетерогенные зоны могут быть отнесены к квазиоднородным, либо латерально-неоднородным скоростным моделям с наличием (либо отсутствием) вертикального градиента скорости. На контакте с вмещающей средой скорости могут изменяться как скачкообразно, так и плавно. Существенным является и то, что по интегральным скоростным характеристикам контрастность зон по отношению к вмещающей среде может быть и очень незначительной.

Полное волновое поле, отвечающее гетерогенным зонам со среднемасштабными включениями, характеризуется интегральными и локальными свойствами. По результатам физического моделирования установлена важная особенность волнового поля, сформированного на гетерогенной зоне, которая заключается в том, что основная часть суммарного поля, соответствующего гетерогенной системе, образуется в результате *суперпозиции* однократных полей, рассеявшихся на каждом элементе в отдельности. Отсюда следует важный вывод – пренебрежимо малая роль эффектов вторичного рассеяния поля даже при расстоянии между элементами много меньше длины волны и высокой скоростной контрастности неоднородностей.

Структура и параметры волнового поля, формируемого на сейсмических моделях гетерогенных зон, зависят от локальных характеристик рассеяния, определяемых их диаграммой направленности и композицией неоднородностей. Волновое поле, соответствующее гетерогенным зонам, независимо от геометрии зоны и характера организации элементов в зоне, характеризуясь достаточно компактной структурой поля рассеянных волн, приобретает свойства волнового пакета, фазовые и групповые характеристики которого определяются диаграммой направленности, геометрией и распределением неоднородностей в зоне. Для волнового пакета справедлив принцип

локальности, при этом максимум энергии волнового пакета определяет положение в пространстве группового годографа.

Для субвертикальных гетерогенных зон с упорядоченным распределением локальных элементов групповая кажущаяся скорость волнового пакета всегда будет меньше скорости в среде и эти различия возрастают с уменьшением угла наклона элементов. При этом общий вид наблюдаемого на записи многофазного волнового пакета по ряду признаков очень похож на поле отраженной волны от наклонного гомогенного слоя [13,20].

Важная особенность рассеянных волн, соответствующих зонам по данным моделирования, заключается в том, что характер «освещения» зон находится в зависимости от их протяженности и удаления относительно источника возбуждения.

В случае вертикальных и крутонаклонных зон «глубина» освещения зон находится в прямой зависимости от соотношения $D_{фр}$ и размеров элементов. Так, если зона составлена из элементов одинакового размера, то за счет возрастания $D_{фр}$ с глубиной среднемасштабные элементы постепенно будут переходить в разряд мелкомасштабных, при этом интенсивность отраженно-рассеянного поля с увеличением времени будет убывать [20]. При этом следует иметь в виду, что существует оптимальный диапазон частот выделения на записи рассеянных волн, при котором глубина освещаемой части зоны будет предельной. Со смещением в область низких частот волновой пакет ослабевает и может исчезнуть, а на высоких частотах из-за поглощения в среде он также может быть не обнаружен. Эта особенность поля рассеянных волн имеет важное значение в истолковании сейсмических построений с изображением вертикальных зон в реальных средах, когда максимальная глубина их прослеживания, например, разрывных нарушений, часто трактовалась геологическими факторами.

Зависимость структуры поля рассеянных волн от расстояния четко проявилась и при рассмотрении горизонтальных зон. В этом случае особенность поля рассеянных волн от горизонтальной зоны заключается в том, что с удалением наблюдений от источника возбуждения волновое поле постепенно становится регулярным. Это связано с тем, что в «дальней» зоне на большом расстоянии от источника возбуждения за счет возрастания $D_{фр}$ среднемасштабные неоднородности постепенно переходят в разряд мелкомасштабных, при этом зона проявляется как вполне регулярная граница.

В традиционных представлениях под понятием *сейсмическая граница* имеется ввиду поверхность контакта между слоями пород, либо тонкослоистыми пачками, различаемыми упругими характеристиками. Параметры сейсмических границ определяются контрастностью упругих характеристик пород по обе стороны от контакта, их гладкостью, устойчивостью и неоднородностью, относимых непосредственно к поверхности контакта, как например шероховатые, прерывистые и другие границы. Эти свойства границ лежат в основе определения их эффективных отражающих характеристик, в том числе и в истолковании параметров наблюдаемого волнового поля. Очевидно, что подобная трактовка понятия *сейсмическая граница* не может быть отнесена к гетерогенным зонам, составленным из среднемасштабных неоднородностей.

Композиционное распределение неоднородностей в пределах гетерогенных зон определяет компактность структуры наблюдаемого волнового поля, создает видимый эффект единой отражающей границы, характеризуемой эффективными значениями коэффициентов отражения. Энергетические характеристики волновых пакетов, их спектральные характеристики определяются усредненными значениями эффективных коэффициентов отражения зон, зависящих от целой совокупности параметров: упругой контрастности и формы преобладающих локальных неоднородностей; отношения размеров неоднородностей к сечению первой зоны Френеля; глубины залегания и геометрии зоны; композиции неоднородностей в зоне (случайная, упорядоченная) и пр. Существенным является и то, что зоны по значению скорости в среднем могут слабо отличаться от вмещающей среды. Однако при этом за счет локальной контрастности

неоднородностей внутри зоны значения эффективных коэффициентов отражения ($K_{эф}$) от зон могут быть достаточно высокими.

Эффективные значения коэффициентов отражения от гетерогенных зон, определяемые внутренней структурой зон, зависят от степени неоднородности покрывающей среды. Так, при расположении гетерогенных зон в случайно-неоднородной среде эффективные значения коэффициентов отражения зон будут зависеть не только от контрастности локальных неоднородностей, но также и от различия в композициях распределения неоднородностей в зоне и вмещающей среде.

Гетерогенные зоны не могут быть отождествлены и с традиционными моделями сейсмического слоя либо пачками тонких слоев. Несмотря на качественную схожесть в интерференционной картине наблюдаемого волнового поля принципиальные основные отличия между слоем и зоной, прежде всего, заключены в том, что структура сейсмических моделей, а следовательно и формируемые волновые поля, существенно различаются свойствами, иной амплитудно-частотной зависимостью от значений коэффициента $K_{эф}$. К числу отличительных признаков волнового поля могут быть отнесены и условия образования обменных рассеянных волн на зонах, характеризующихся широким спектром углов наклона неоднородностей в составе зон. Эффективные коэффициенты обмена определяются внутренней структурой зон, при этом показаны возможность и условия образования как продольных, так обменных отраженно-рассеянных волн от гетерогенных зон, в том числе и субвертикальных.

Сейсмические гетерогенные блоки. В традиционных представлениях модель сейсмического блока, отождествляемого с разнообразными геологическими структурами, может быть отнесена к крупномасштабным гетерогенным системам, основная информация о которых связана с усредненными упругими интегральными характеристиками. Этот признак в методе глубинных сейсмических зондирований (ГСЗ) является основным, на котором построена идея аппроксимации земной коры мозаично-блоковой моделью. К числу других признаков, используемых при блоковой дифференциации земной коры, как было отмечено выше, относятся интегральные волновые (амплитудные) характеристики сейсмического рассеяния, как при просвечивании, так и при отражении от блоков. При этом по степени сейсмического рассеяния поля блоки разделяются на «прозрачные» и «мутные».

При переходе к рассмотрению сейсмических моделей гетерогенных блоков, составленных из композиций среднемасштабных неоднородностей, количество признаков локализации блоков возрастает. Важно отметить, что модели подобных блоков более адекватны их неоднородному строению. Поэтому принятие этих моделей в основу интерпретации сейсмических данных позволит повысить информативность и надежность сейсмогеологических построений при наблюдениях в ближней зоне. В работах [9,14,20] рассматриваются модели и результаты физического моделирования особенностей волнового поля, формируемого в гетерогенных блоках, как при прохождении, так и при отражении сейсмических волн.

Эффективные сейсмические модели гетерогенных блоков, составленные из композиции среднемасштабных неоднородностей, относятся к трехмерным гетерогенным системам в составе случайно-неоднородных либо регулярно-слоистых моделей. По отношению к вмещающей среде контрастность блоков определяется различиями в упругих интегральных характеристиках и параметрах неоднородностей в составе блоков.

В зависимости от композиции среднемасштабных неоднородностей блоки по аналогии с гетерогенными зонами могут быть отнесены к квазиупорядоченным либо диффузным гетерогенным системам.

Волновое поле. Локальные характеристики рассеяния существенным образом влияют на формирование общей структуры и на параметры волнового поля, соответствующего гетерогенным блокам со среднемасштабными неоднородностями. С этим связаны различия в пространственно-временных и спектрально-поляризационных характеристиках

отраженно-рассеянных и проходящих монотипных волн в зависимости от композиционного распределения среднemasштабных неоднородностей в пределах блоков. По отношению к вмещающей среде контрастность блоков определяется размерами и плотностью распределения рассеивающих неоднородностей. В тех случаях, когда в составе блоков преобладают среднemasштабные неоднородности, структура волнового поля будет зависеть от характера ориентации неоднородностей в блоках (блоки с квазиупорядоченной и диффузной структурой).

Методами физического моделирования исследованы волновые эффекты, формируемые при прохождении и отражении от гетерогенных блоков с квазиупорядоченной и диффузной структурой распределения среднemasштабных элементов. Результатами этих исследований выявлены некоторые особенности модельного волнового поля, которые на наш взгляд могут представить определенный интерес при анализе и интерпретации реальных данных.

При распространении Р-волны через гетерогенный блок по мере увеличения области облучения неоднородностей за счет эффекта рассеяния возрастает длительность сигнала с образованием в последующей части записи цуга колебаний, относимого к кода- волне. Условия образования кода-волн зависят от характера ориентации среднemasштабных элементов в блоках. Для блоков с упорядоченным распределением элементов кода-волны формируются в результате наложения кратных рассеянных волн, а при облучении блоков с диффузной структурой кода-волны являются следствием прямого рассеяния Р-волны на случайно ориентированных элементах блока. С другой стороны, в результате рассеяния волнового поля наблюдается постепенное «вырождение» вступления Р-волны со смещением максимальных амплитуд записи на последующие фазы колебаний. В этом случае, на записях физического моделирования наблюдается «кинематический» эффект, связанный с увеличением времени регистрации волны при распространении через гетерогенный блок, даже в том случае, если он составлен из высокоскоростных элементов. В зависимости от упорядоченности распределения среднemasштабных элементов изменяется поляризация Р-волны. В работе [20] показано, что в случае диффузных блоков Р-волна при распространении в блоке становится сложно поляризованной, при этом коэффициент линейности снижается до значений $K=0,15$.

Важной особенностью волнового поля является формирование в определенном диапазоне углов наклона среднemasштабных элементов проходящих и отраженных обменных рассеянных волн. За счет переизлучения Р-волны на локальных элементах блоков со случайным распределением углов наклона рассеивателей формируются обменные проходящие PS-волны. При распространении Р-волны, за счет облучения все большего объема рассеивающих включений в блоке, интервал прослеживания PS-волн на записи постепенно нарастает, при этом волновое поле характеризуется симметричной двухлепестковой диаграммой направленности со слабовыраженным максимумом в направлении глубокой тени. При упорядоченном распределении локальных элементов, в соответствии с их диаграммой направленности, максимальное излучение PS-волн асимметрично относительно блока и возрастает с увеличением углов наклона неоднородностей, а при нормальном падении Р-волны интенсивность обменных волн приближается к нулю.

Таким образом, гетерогенные блоки, составленные из композиции среднemasштабных неоднородностей, при падении Р-волны становятся «источником» образования поперечных волн, структура и параметры которых зависят от размера, формы и углов наклона неоднородностей. Результаты модельных исследований в определенной степени подтверждаются реальными данными и, в первую очередь, многокомпонентными сейсмическими наблюдениями в глубоких скважинах кристаллических пород. Очевидно, что в случае реверсивного просвечивания коры важным признаком при интерпретации данных МОВЗ о положении в пространстве и, возможно, о внутренней структуре объектов просвечивания (гетерогенные блоки), является появление на записи обменных рассеянных

волн. При этом информативные характеристики обменных волн в большей степени могут зависеть не от скоростной контрастности блоков, а от внутренней их неоднородной структуры, а также положения источников возбуждения и приема сейсмических колебаний по отношению к облучаемому объекту.

По данным физического моделирования при наблюдениях над блоками, с учетом диаграммы рассеяния среднемасштабных элементов, а также системы излучение-прием, отраженное рассеянное поле воспринимается избирательно. Так, над диффузным блоком, несмотря на широкий спектр углов наклона локальных элементов, волновое поле рассеяния становится интенсивным (наблюдаемым) для элементов, расположенных в полосе пропускания системы излучение-прием. Не исключено, что именно поэтому, вследствие избирательного освещения среднемасштабных неоднородностей на сейсмических разрезах, часто можно наблюдать сформированную горизонтальную квазислоистость, как в масштабе регионального изучения земной коры, так и при детальном исследовании ее верхней части. Следует отметить, что с увеличением глубины залегания диффузного блока, эффект регуляризации волнового поля усиливается.

Между наблюдаемым рассеянным волновым полем и внутренней структурой блоков существует определенная частотная зависимость. Так, один и тот же блок может представлять собой наложение неоднородностей неодинаковой геологической природы (состав, трещиноватости и пр.). Неоднородности при этом могут иметь как различную ориентацию в пространстве, так и отличаться средним размером. В соответствии с этим изменяется изображение блока на динамических сейсмических разрезах, полученных в широком диапазоне частот, отображая при этом различные особенности его внутреннего строения.

Таким образом, наряду с традиционным понятием сейсмический блок, определяемым усредненными значениями упругих параметров, важнейшим признаком выделения гетерогенных блоков в земной коре являются контрастность и структура образующих их неоднородностей. Наблюдаемые волновые эффекты, создаваемые локальными неоднородностями гетерогенных блоков, во многих случаях могут быть более информативными признаками при локализации блоков в земной коре, чем их усредненные скоростные характеристики. Поэтому, при определении понятия сейсмический блок наряду со скоростными параметрами следует иметь в виду и сейсмическую гетерогенность, определяемую структурой и параметрами образующих их неоднородностей.

2.2. Гетерогенные сейсмические системы земной коры и их отображение в поле рассеянных волн

В начале 90-х годов ВИРГ полностью переключился на решение некоторых проблем региональной сейсмологии, и этому способствовала И.П. Косминская, которая предложила использовать класс гетерогенных моделей для разрешения назревших противоречий в существующей многозначной интерпретации данных глубинных сейсмических построений, обосновании природы наблюдаемого волнового поля и соответственно геологической природы сейсмических объектов различных иерархий.

Консолидированная кора и верхняя мантия являются наиболее сложной гетерогенной средой, характеризующейся слоисто-неоднородным строением. Сферически расслоенная скоростная модель коры с плавными и скачкообразными изменениями скорости на контакте слоев осложнена наложением латеральных неоднородностей, имеющих сложную иерархию масштабов. Изучение гетерогенности земной коры и верхней мантии, в отличие от сейсмологических методов, проводится широким набором сейсмических методов в диапазоне частот от единиц до сотен герц и, соответственно, при дистанциях наблюдений от многих сотен километров до первых километров. Это позволяет изучать гетерогенность земной коры от уровня мегагетерогенных систем

(например, расслоенность и блоковую структуру коры) до микроуровня, относимого к отдельным геологическим телам и структурам верхней коры.

Модель волнового поля, наблюдаемая различными методами, находится в зависимости от геологической модели облучаемой среды, упругих и геометрических параметров локальных скоростных неоднородностей, их контрастности и композиционного распределения в пространстве. С другой стороны, модель волнового поля, а следовательно, и сейсмическая модель среды оцениваются по отношению к трем характерным параметрам: λ – параметр, определяемый полем волны; $D_{фр}$ – структурный параметр, который зависит от геометрических размеров гетерогенных систем, их положения в разрезе; M – условный обобщенный параметр, отображающий область воздействия волнового поля на среду, размеры применяемых измерительных систем, в том числе и систем наблюдений. Очевидно, по этим признакам применяемые глубинные сейсмические методы по-разному будут аппроксимировать неоднородности среды разных иерархических уровней. При этом следует отметить, что образы сейсмических моделей разномасштабной гетерогенности Земли, отображаемые различными методами (при условии достаточной их технологической обеспеченности) не противоречат, а дополняют друг друга.

Глубинные сейсмические исследования выполняются различными методами и их модификациями, которые в зависимости от уровня отображения сейсмической гетерогенности земной коры и верхней мантии могут быть подразделены на *две основные группы*.

Первая группа методов основана на сверхдальнем приеме сейсмических колебаний, основным из которых является метод ГСЗ, созданный Г.А. Гамбургцевым. По существу все методические позиции, заложенные в разведочном варианте КМПВ, были сохранены при создании метода ГСЗ.

В целом считается общепризнанным, что типовая модель косолидированной земной коры, представляет собой градиентную мозаично-блоковую среду, характеризующуюся плавным увеличением скорости от 6.0 до 8.0 км/с. На фоне общего возрастания скорости с глубиной отмечается инверсия скорости в зонах, соответствующих изменению физического состояния и возможного флюидонасыщения горных пород, что позволяет предположить наличие в земной коре волноводных слоев. Рассматривая в целом данные ГСЗ с позиции регулярных сейсмических моделей в рамках лучевой сейсмологии к макронеоднородностям, определяющих гетерогенность земной коры, могут быть отнесены сейсмические границы и скоростные блоки. Эти данные определяют фактологическую основу построения каркаса слоисто-блоковой сейсмической модели, положенной в основу аппроксимации геологической неоднородности земной коры первого уровня. При этом, практически повсеместно, независимо от применяемых технологий, с земной корой и верхней мантией отмечено прослеживание только двух региональных сейсмических границ, которые могут быть отнесены к категории опорных: поверхность фундамента и Мохо.

Наиболее противоречивыми результатами ГСЗ являются сведения о сейсмической модели средней и нижней коры. Имеются многочисленные построения, когда по наблюдениям в "дальней" зоне средняя и нижняя кора представляется в виде слоисто-блоковой модели [2,23,25 и др], тогда как в других работах существование субгоризонтальных внутрикоровых сейсмических границ полностью отрицается [18]. Неоднозначно трактуется и модель Мохо. По одним данным граница M отождествляется с границей первого рода, с которой связано образование отраженных и квазиголовных волн. По другим – Мохо аппроксимируется моделью переходного градиентного слоя, с которым связано образование рефрагированных волн. Более детальные данные о внутренней структуре модели переходного слоя, очевидно, содержатся в волновом поле, наблюдаемом в «ближней» зоне.

Неоднородная структура волнового поля, соответствующего границе М и внутрикоровым границам, позволяют утверждать о высокой латеральной неоднородности объектов изучения. В целом, наблюдаемые отраженные $(P_{MP}, S_{MS})_{отр.}$ и преломленные $P_{пр.}$ волны от границы М характеризуются многофазной интерференционной записью, что позволяет предположить о сложном строении границы М. Другая особенность записей отражений от Мохо заключается в том, что волновое поле сложно поляризовано. Поэтому многофазная структура отражений может быть связана не только со сложностью предполагаемого сейсмического репера М, но и, возможно, с усложнением состава волнового поля.

Проводимое «искусственное» сглаживание волнового поля, путем процедуры групповой корреляции приводит к значительной идеализации модели реальной среды, при этом наибольшим упрощением в них подвергнуто представление о сейсмических границах, которые, вряд ли могут быть отнесены к категории «гладких» математических поверхностей. С этим, очевидно, связаны наблюдаемые расхождения между динамическими характеристиками реального волнового поля и расчетными данными, а также неоднозначная трактовка модели Мохо. По существу, наблюдаемые волновые поля, о чем будет сказано ниже, соответствуют достаточно сложным гетерогенным системам. Отнесение волнового поля к классическим сейсмическим границам слоистых моделей осадочных толщ является весьма условным и требует дальнейшего уточнения.

В еще большей степени идеализированы выделяемые на разрезах внутрикоровые границы и скоростные блоки, особенно в средней части коры. Из-за сложной структуры наблюдаемого волнового поля, не адекватной применяемой технологии получения и обработки данных, нельзя рассчитывать на приводимую точность определения скоростных параметров блоков, а также на достоверность изображения их объемной структуры. Что касается волнового поля, связанного с внутрикоровыми неоднородностями, то оно характеризуется слабо разрешенной записью. Выделяются, как правило, непротяженные оси синфазности, а сама корреляция отдельных волн, так же, как и трактовка их природы, малонадежны. Лишь иногда относительно уверенно прослеживаются непротяженные оси синфазности отраженных и преломленных волн, в виде слабо разрешенных волновых пакетов отождествляемых с поверхностью нижней коры ($V_p = 6.8-7.2$ км/с) - граница K_2 . Физическая природа границы K_2 до сих пор остается неясной, а ее отнесение к якобы существующей в нижней коре опорной региональной границе Конрада является малообоснованным [25].

Сейсмотомография. По наблюдениям в «дальней» зоне отход от аппроксимации земной коры традиционными регулярными сейсмическими моделями был сделан А.В. Николаевым (1972). При этом автор исходит из рассмотрения двух моделей.

Первая модель предполагает, что наблюдаемые первые волны относятся к регулярной детерминированной компоненте рефрагированных волн, которые распространяются в градиентной среде с контрастными крупномасштабными скоростными неоднородностями (скоростные блоки, границы, зоны и пр.). В основу интерпретации данных положены способы лучевой сейсмотомографии, с помощью которой путем трассирования лучей восходящих волн восстанавливается положение неоднородных объектов первого иерархического уровня. Практически, сейсмотомографическая обработка первых волн основана на переобработке данных ГСЗ, характеризующихся, как правило, разной дискретностью и плотностью применяемых систем наблюдений. Поэтому данные лучевой сейсмотомографии следует рассматривать в качестве одного из приближений в изображении сейсмической неоднородности коры, относимого к первому иерархическому уровню.

В отличие от классических представлений второй моделью земная кора аппроксимирована случайно-неоднородной сейсмической средой. При этом предполагается, что различия в статистических характеристиках неоднородностей разнообразных иерархических уровней отображаются в размерах средних значений

флуктуаций параметров волн просвечивания. В основу положен тот факт, что в результате взаимодействия между первичными волнами и неоднородностями среды образуются рассеянные вперед волны, которые продолжают распространяться вместе с первичной волной и проявляются в виде пространственной флуктуации ее амплитуд и фаз.

По реакции динамических и кинематических характеристик первых волн на неоднородности коры им впервые было введено понятие «мутность» среды, характеризующее рассеивающее действие статистических неоднородностей на изменения тонкой структуры волнового поля. При этом по введенному параметру (коэффициент мутности) была исследована вертикальная расслоенность и блоковая структура коры. Таким образом, А.В. Николаевым был сделан первый шаг на пути изучения сейсмической гетерогенности земной коры. Однако наблюдения в дальней зоне позволили осветить лишь в самом общем виде интегральные характеристики мегагетерогенных структур коры: ее расслоенность и блоковую структуру.

Ко второй группе методов, основанной на регистрации «близвертикальных» отражений в ближней зоне, относится метод отраженных волн в модификации МОГТ; основы этого метода были заложены в поисковой сейсмике, при этом главные методические позиции были сохранены при решении региональных задач.

Между группами методов существуют принципиальные отличия, определяемые разной степенью детальности освещения строения среды. Если с методами ГСЗ связано построение обобщенного каркаса скоростной модели земной коры с выделением опорных региональных сейсмических границ, крупных блоков, то второй группой методов решаются более тонкие задачи, связанные с изучением структурных особенностей коры, установления связи между глубинными структурами и верхними структурно-тектоническими комплексами коры. В этой связи сейсмические модели, на которых базируются физические основы методов первой и второй групп, в том числе и основы геологической интерпретации данных, различны.

В начале 90-х годов метод отраженных волн начал применяться при региональных исследованиях на крупных геотраверсах, в том числе пересекших рудные районы. В отличие от реверсивного просвечивания земной коры ее неоднородности наблюдениями в «ближней» зоне освещаются относительно узким «пучком» волнового поля. В общем виде сейсмическую гетерогенность земной коры следует рассматривать как сочетание локальных мелко- и среднемасштабных неоднородностей, собранных в определенные композиции, образующие в пространстве гетерогенные системы. Последние различаются масштабом неоднородностей, их контрастностью, структурой организации и плотностью распределения. В составе этой композиции могут быть и регулярные крупномасштабные сейсмические объекты – границы, блоки.

Проявление в волновом поле сейсмических неоднородностей различных масштабов зависит от размеров области наблюдения, а также распределения неоднородностей по глубине.

С увеличением глубины в соответствии с увеличением сечения первой зоны Френеля изменяется масштаб сейсмической неоднородности (рис2). За счет масштабного сейсмического параметра с увеличением глубины в соответствии с изменением масштаба неоднородностей постепенно возрастает «прозрачность» земной коры, наблюдаемая в ближней зоне. Поэтому по мере распространения волнового поля информация о рассеивающей среде будет убывать за счет снижения энергетических характеристик рассеяния по отношению к уровню случайных помех. На фоне общего спада разрешающей способности сейсмике с глубиной снижается иерархический уровень неоднородностей, отображаемых различными сейсмическими методами. Так, например, крупномасштабные сейсмические блоки в верхних частях разреза при сохранении их абсолютных размеров на больших глубинах в пределах освещаемого объема усреднения рассматриваются в качестве случайной мелкомасштабной компоненты. Следует отметить, что на больших глубинах абсолютные размеры мелкомасштабных неоднородностей, из

которых формируется статистический «фон» сейсмической гетерогенности коры, достигает одного и более километра. Можно предположить, что с ростом глубины за счет геодинамических и геохимических условий скоростная дифференциация среды будет уменьшаться, а скоростные аномалии будут гораздо меньше средних значений скорости. Очевидно, что контрастность наблюдаемых волновых эффектов в поле рассеянных волн будет возрастать в основном за счет увеличения абсолютных размеров неоднородностей в контактирующих гетерогенных системах.

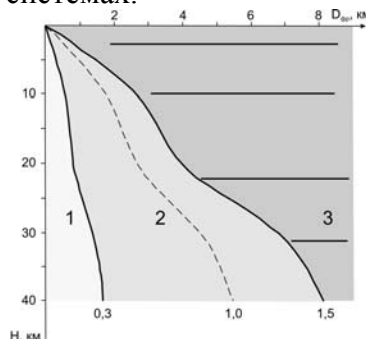


Рис 2. Графики изменения с глубиной значений $2d / D_{Фр}$, ограничивающие области разномасштабного рассеяния в зависимости от размера сечения первой зоны Френеля ($D_{Фр}$).

С увеличением глубины в соответствие с размером $D_{Фр}$ изменяется масштаб сейсмической неоднородности, при этом возрастает «видимая» прозрачность земной коры, наблюдаемая в поле рассеянных волн. На больших глубинах абсолютные размеры мелкомасштабных неоднородностей, из которых формируется статистический «фон» сейсмической гетерогенности коры, достигает одного и более километра.

1 – область мелкомасштабного рассеяния ($2d < 0,3D_{Фр}$); 2 – область среднемасштабного рассеяния ($0,3 < 2d < 1,5D_{Фр}$); 3 – область крупномасштабного рассеяния ($2d > 1,5D_{Фр}$)

Полное волновое поле рассеянных волн, несущее информацию о неоднородностях коры, представляется в виде наложения *двух компонент*.

Первая компонента, условно названная волновым фоном, образована в результате рассеяния сейсмических волн на мелкомасштабных неоднородностях. Геологической информацией об усредненных характеристиках коры обладают интегральные характеристики волнового фона, в котором проявляется как вертикальная расслоенность коры, определяемая составом, фазовыми изменениями вещества под воздействием температур и давлений, так и блоковая структура коры. Расслоение коры по параметру «мутности», установленное наблюдениями в «дальней» зоне, позволяет предположить, что в формировании слоистости существенное значение имеют мелкомасштабные неоднородности, образующие статистический фон сейсмической гетерогенности коры. При этом предполагается, что слоистость земной коры определяется средним размером неоднородностей, их сейсмической контрастностью (по параметрам $V_{P,S}$ и $\alpha_{P,S}$), а также различиями в степени их насыщения в каждом слое. Подобное распределение неоднородностей в среде нашло отражение в изменениях интегральных амплитудных и спектральных характеристик записи межволнового фона, создаваемого мелкомасштабным рассеянием и наблюдаемого в ближней зоне.

По изменению энергетических характеристик статистического поля отраженных рассеянных волн возможны качественные оценки распределения по глубине поглощающих и рассеивающих характеристик среды на основе определения эффективного суммарного декремента поглощения, связанного с «мутностью» среды. Наблюдаемые высокие энергетические характеристики поля рассеянных волн верхней части коры отмечаются повсеместно и, очевидно, это обусловлено преобладающим влиянием на формирование волнового поля как крупномасштабных, так и среднемасштабных неоднородностей.

По наблюдениям в «ближней» зоне установлено соответствие наблюдаемых интегральных амплитудных эффектов рассеянных волн распределению сейсмических неоднородностей в земной коре. В относительных изменениях интенсивности поля рассеяния на мигрированных разрезах, полученных в истинных амплитудах, отображены гетерогенные системы различных иерархических уровней. Так, на одном из крупных региональных пересечений по широтному профилю через Южный Урал – в поле интенсивности рассеянных волн четко проявились крупные макрогетерогенные разделы земной коры, в том числе отображено положение шести известных мегазон Южного Урала [26,30,31] (рис 3).

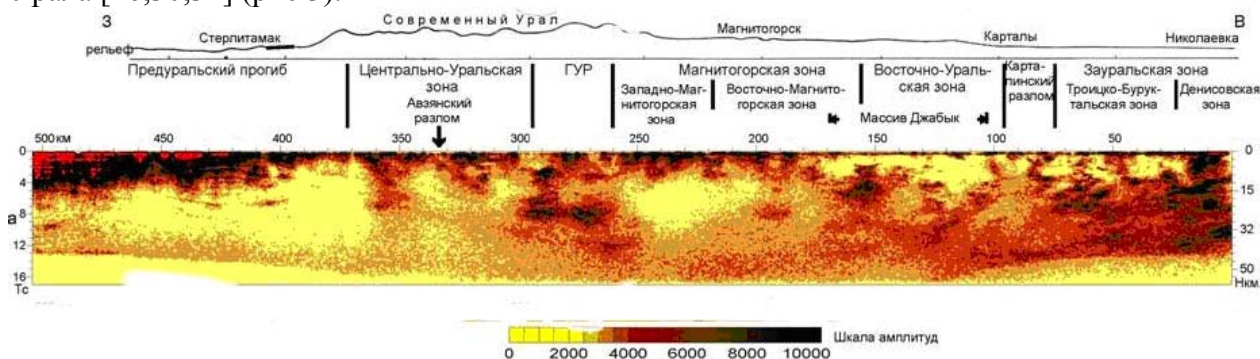


Рис. 3. Мигрированный динамический разрез ОГТ по региональному широтному профилю «Urseis», полученный после матричного усреднения поля амплитуд рассеянных волн.

В относительных изменениях интенсивности поля рассеяния на мигрированном разрезе отображены гетерогенные системы различных иерархических уровней, как крупные макрогетерогенные разделы земной коры, отождествляемые с положением шести известных мегазон Южного Урала, так и гетерогенные системы более высокого уровня, соответствующие крупным внутрикоровым структурам, в том числе крупнейшего Джабыкского плутона; Карталинской зоне разлома. Положению Главного Уральского разлома (ГУР) соответствует обширная зона высоких значений амплитуды записи рассеянных волн. В аномалиях амплитуд поля разномасштабного рассеяния четко отображено положение нижнекорового слоя

Сопоставление результатов наблюдений в «ближней» и «дальней» зонах на участке регионального профиля Urseis в сопоставлении с прогнозным сейсмическим разрезом земной коры по данным ГСЗ (рис 3) позволили сделать ряд принципиальных выводов. Прежде всего, в поле изоамплитуд рассеянных волн проявилась, как расслоенность, так и мозаично-блоковая структура коры. По относительному изменению интенсивности мелкомасштабного рассеяния в рассматриваемом случае земная кора дифференцируется на три слоя, положение которых совпадает с сейсмоструктурными этажами (ССЭ), выделяемыми по данным ГСЗ. Высокие энергетические характеристики поля рассеянных волн в верхней части коры отмечаются повсеместно и, очевидно, это обусловлено преобладающим влиянием на формирование волнового поля как крупно, так и среднемасштабных неоднородностей. Качественное совпадение вертикальной сейсмической гетерогенности земной коры с положением сейсмоструктурных этажей по данным ГСЗ не случайно. Оба подхода, по существу дополняя друг друга, с разных позиций освещают расслоенность земной коры. Данные ГСЗ характеризуют положение и скорости преломляющих границ на контактах ССЭ, а в наблюдаемом фоновом поле отображена внутренняя сейсмическая неоднородность выделяемых этажей. Проявление наблюдаемой сейсмической расслоенности земной коры, возможно, связано не только с изменениями состава пород, но и с влиянием на гетерогенность коры пластических деформаций и латеральных тектонических течений горных пород. Существенным в приведенном рассмотрении является то, что с контактами послойной смены интегральных амплитудных характеристик рассеяния не связано образование регулярных отраженных волн.

Подобное проявление контактов между ССЭ в сейсмическом волновом поле при наблюдениях на различных удалениях от источника возбуждения может быть

обусловлено рядом особенностей строения области перехода. Контакт между структурными этажами, как правило, нерезкий, ввиду плавности изменения скорости между породами, различаемыми составом, а также их состоянием под воздействием температур и давлений. Примером являются данные метода АК Кольской СГ-3, где зона перехода на глубине 10 км, представленная интенсивно разуплотненными породами подошвы верхней части коры, по существу, не сказалась на резких изменениях скорости при контакте [24,28]. В то же время контакт между двумя существенно различными сейсмогеологическими моделями четко проявился по изменению энергетических характеристик волнового фона, отображающего сейсмическую гетерогенность контактирующих сред. Следует отметить, что в районе СГ-3 регулярные отраженные волны, связанные с подошвой верхней коры, в «ближней» зоне не были прослежены.

В изменениях амплитудных аномалий волнового фона на региональном пересечении «Уралсейс» отображается латеральная неоднородность коры более высокого иерархического уровня. На динамических разрезах выделяются, как крупные, так и более мелкие амплитудные аномалии фонового поля, отождествляемые в разрезе с различными гетерогенными сейсмическими системами. По резкому уменьшению энергетических характеристик рассеяния на разрезах отображено положение гранитоидных массивов, в том числе крупнейшего Джабыкского плутона, прослежены на глубину зоны разломов и, в том числе крупная Карталинская зона. Положению Главного Уральского разлома соответствует обширная зона больших значений амплитуды рассеянных волн, характеризующаяся высокой внутренней неоднородностью.

Ко второй компоненте волнового поля отнесены рассеянные волны, сформированные на гетерогенных системах, составленных из среднемасштабных неоднородностей. Эти системы наиболее реалистично отображают главные структурные особенности разнообразных геологических объектов, как, например, зон разломов, приконтактовых зон, интрузивных образований и пр.

Сам факт регистрации рассеянных волн, связанных со среднемасштабными неоднородностями, установлен практически повсеместно. В самых разнообразных условиях на временных разрезах региональных профилей ОГТ наблюдаются достаточно протяженные интенсивные регулярные синфазности, которые по кинематическим характеристикам соответствуют годографам рассеянных волн, отраженных от среднемасштабных рассеивателей и их композиций. Наибольшая плотность наблюдаемого среднемасштабного рассеяния относится к верхней части коры, а также часто связана с коромантийным слоем. Высокие энергетические характеристики наблюдаемых волн, рассеянных на неоднородностях коры, связаны с высокой контрастностью локальных среднемасштабных неоднородностей. При этом сами неоднородности геометрически могут представлять собой не обязательно традиционные отражающие «площадки», а могут иметь линзовидную и даже изометрическую форму. В этом случае энергетические характеристики рассеяния будут определяться всем конечным объемом локальной неоднородности. Относительно традиционных слоистых моделей, наблюдаемые высокие амплитуды записи рассеяния, очевидно, связаны и с более низкими поглощающими характеристиками кристаллической коры при более высоком уровне соотношения сигнал/помеха.

Сейсмическая контрастность подобных систем определяется параметрами среднемасштабных элементов, плотностью и степенью упорядоченности их распределения в пределах гетерогенных систем. Композиционное распределение локальных элементов в гетерогенных моделях определяет и достаточно компактную структуру поля рассеянных волн. На мигрированных разрезах в поле изоамплитуд часто наблюдаются четкие волновые пакеты рассеянных волн, соответствующие, например, наклонным гетерогенным зонам, отождествляемыми с надвигами, разломами, приконтактовыми зонами интрузий и пр. . В этом отношении представляют интерес пример отображения в поле рассеянных волн надвигов докембрийских структур

восточной части Феноскандинавского щита на региональном профиле 4-ЕВ. В амплитудных аномалиях поля среднемасштабного рассеяния наиболее ярко проявилась чешуйчато-надиговая структура зоны сочленения Карельского и Беломорского блоков. Волновое поле по интенсивности в 2.0-2.5 раза превосходит фон, что дает основание по аналогии отождествить эту зону с высококонтрастной макрогетерогенной зоной. При более детальном рассмотрении линейно-вытянутой амплитудной аномалии можно видеть, что она сформирована из наложения нескольких волновых пакетов, в целом образующих характерный рисунок чешуеобразной системы надвигов. Важно отметить, что высокая сейсмическая прозрачность верхней части разреза соответствует широкому распространению в пределах комплекса гранитоидных интрузивных образований.

Уникальные данные о вертикальных сейсмических гетерогенных системах земной коры получены на региональных профилях ОГТ через известные кимберлитовые поля (Мирнинское и Накынское) в алмазоносных районах Западной Якутии [29, 31,32.]. В областях, непосредственно примыкающих к кимберлитовым полям, наблюдаются контрастные транскоровые амплитудные аномалии поля рассеянных волн, отождествляемые с моделью кимберлитоконтролирующих систем, включающих мантийнокоровый диапир. Впервые выявленные сейсморазведкой ОГТ зоны динамического развития земной коры в области развития кимберлитовых полей отнесены к важнейшим прогнозно-поисковым признакам обнаружения проявлений кимберлитового магматизма в алмазоносных районах. Наблюдаемая на динамических разрезах «грибообразная» форма изображения транскоровой структуры, очевидно, связана с изменением глубины волнового параметра.

Наряду с субвертикальными зонами на временных разрезах прослежены волновые пакеты рассеянных волн, соответствующие внутрикоровым горизонтальным зонам. Волновые пакеты характеризуются достаточно компактной структурой, наблюдаемой в относительно узком временном диапазоне, и отличаются повышенной интенсивностью записи. Компактность структуры волнового поля сохраняется и в том случае, когда горизонтальная зона составлена из набора среднемасштабных элементов, характеризующихся широким спектром углов наклона.

К числу контрастных горизонтальных гетерогенных зон может быть отнесен нижнекоровый слой, контролирующий положение границы М. По наблюдениям в «ближней» зоне ему соответствуют иногда достаточно четкие, протяженные синфазности рассеянных волн, собранные в виде волновых пакетов. Анализ структуры волновых пакетов позволил установить, что они сформированы на сложнонеоднородной высококонтрастной гетерогенной зоне из композиции разномасштабных рассеивающих неоднородностей. Размеры среднемасштабных неоднородностей в пределах коромантийного слоя достигают 8 и более км. В известной работе Г.А. Гамбурцева (в соавторстве с Л.С. Вейцман) при изучении границы Мохо впервые была реализована процедура «групповой» корреляции сейсмических волн, под которой авторы, по всей видимости, подразумевали усреднение рассеянных волн с прослеживанием групповых характеристик наблюдаемых пакетов. В последующем при выделении гетерогенных зон групповая корреляция была использована нами путем реализации преобразования Гильберта [4].

В целом результаты модельных исследований, связанных с изучением особенности сейсмического рассеяния, формируемого неоднородностями нижней коры в сопоставлении с реальными экспериментальными данными, можно заключить, что рассеянные волны, наблюдаемые в ближней зоне в виде «штрихового» поля синфазностей, являются результатом сложной пространственной интерференции разномасштабного рассеяния, к которым не применим принцип локальности. Рассматриваются различные модели аппроксимирующие неоднородную структуру нижнекорового слоя. По результатам численного моделирования в качестве модели предложена система ориентированных линзовидных неоднородностей, при этом

наблюдаемые на записи «штрихового» поля «вспышки» амплитуд рассеяния автором связывались с высокой плотностью упаковки рассеивателей, а наблюдаемые короткие синфазности с пространственной интерференцией волнового поля. Аналогичный результат получен методом физического моделирования горизонтальной гетерогенной зоны с диффузной структурой распределения среднemasштабных плоских элементов. Прежде всего, несмотря на широкий спектр углов наклона локальных неоднородностей, образ нижнекорового слоя, с учетом диаграммы направленности системы излучение-прием, изображен в виде сформированной горизонтальной упорядоченной структуры «штрихового» поля рассеянных волн.

Существенное отличие поля рассеянных волн от горизонтальной гетерогенной зоны, отождествляемой с нижней корой, заключается в том, что с удалением от источника возбуждения наблюдаемое волновое поле постепенно становится регулярным. Это связано с тем, что на больших удалениях от источника возбуждения в «дальней» зоне за счет возрастания $D_{\text{фр}}$ среднemasштабные неоднородности постепенно переходят в разряд мелкомасштабных и зона проявляется как вполне регулярная граница. Так, наблюдаемая в «ближней» зоне сложная структура волнового поля, соответствующая, например коромантийному слою, при удалении от источника возбуждения переходит в разряд регулярных отраженных волн. С этим очевидно связано то, что достаточно интенсивные регулярные отраженные волны начинают появляться на расстояниях существенно ближе «докритической» области при существенно малых расстояниях от источника возбуждения (50-70км). Примером являются многокомпонентные записи волновых пакетов продольной (РmP) и поперечной (SmS) отраженно-рассеянных волн по наблюдениям в ближней и дальней зонах, полученные вдоль геотраверса в Баренцевом море в системе обращенного годографа. В этом отношении интересны результаты математического моделирования (Levander A. et. al.1994), связанные с изучением сейсмического рассеяния от случайно-неоднородной зоны, отождествляемой с коромантийным слоем. В работе анализируются особенности изменения записи рассеянных волн на различном удалении от источника возбуждения. В случае равномерного распределения случайных неоднородностей в пределах слоя за счет действия глубинного геометрического «фильтра», определяемого положением источник – зона – регистрация, с удалением от источника возрастают энергетические характеристики и регуляризация наблюдаемого поля рассеяния. Аналогичные результаты получены путем физического моделирования диффузной гетерогенной зоны.

Аппроксимация земной коры моделями гетерогенного типа позволяет по-новому трактовать традиционное понятие о сейсмических границах в земной коре, которое далеко не всегда может быть отождествлено с гладкой математической поверхностью. Чаще – это невыдержанные переходные зоны, характеризующиеся высокими неоднородными упругими свойствами, либо представленные в виде некоторого статистического распределения локальных неоднородностей вдоль геологических контактов, характеризующихся сменой сейсмической гетерогенности.

Рассеянные волны, несут важную информацию о мозаично блоковой структуре коры. В традиционных представлениях модель *сейсмического блока*, отождествляемого с разнообразными геологическими структурами, может быть отнесена к крупномасштабным системам, основные признаки которых определены усредненными скоростными характеристиками (V_p , V_s , γ). Эти признаки в ГСЗ являются основными, на них построена аппроксимация земной коры мозаично-блоковой скоростной моделью. К числу других признаков, используемых при блоковой дифференциации земной коры, относятся динамические характеристики сейсмического рассеяния, как при просвечивании, так и отражении от блоков.

В самом общем случае сейсмическая модель гетерогенных блоков составлена из композиций разномасштабных неоднородностей, при этом соотношения эффективных масштабов неоднородностей изменяются в широких пределах в зависимости от

геологической модели блока, а также его положения в разрезе. С возрастанием глубины, за счет «масштабного эффекта» все большее значение в составе блоков приобретают мелкомасштабные неоднородности. С изменением преобладающего масштаба неоднородностей изменяются различия в структуре и в эффективных параметрах поля рассеянных волн, а вместе с этим и волновые признаки диагностики гетерогенных блоков. Формируемые в гетерогенных блоках со среднемасштабными включениями рассеянные волны находятся в сложных пространственно-временных соотношениях, определяемых плотностью распределения, размером, контрастностью и характером ориентации элементов в пределах блоков. В случае преобладания мелкомасштабных неоднородностей блоковая дифференциация коры, как было отмечено выше, построена на различиях в наблюдаемых на динамических разрезах амплитудных аномалиях волнового поля, обусловленных разной плотностью распределения неоднородностей. При переходе к рассмотрению сейсмических моделей гетерогенных блоков, составленных из композиций среднемасштабных неоднородностей, количество волновых признаков локализации блоков возрастает. Важно отметить, что модели подобных блоков более адекватны их неоднородному строению.

Изучая сейсмическую гетерогенность земной коры, мы получаем новую информацию о ее строении. В то же время достоверность сейсмических построений, геологическая интерпретация данных находятся в прямой зависимости от надежности выделения и преобразования рассеянных волн в глубинный разрез. При получении огромного массива данных и их поточной обработки, когда утрачивается контроль над качеством исходной информации, а обработка строится с позиции регулярных моделей, часто происходит разрушение и искажение результатов. Стремление повысить информативность извлекаемой информации за счет кратности накопления данных в случае сейсмического рассеяния не всегда является адекватным.

Средства физического моделирования позволили сформировать тестовые материалы, синтезирующие современные технологии работ. Это дало возможность проанализировать особенности преобразования полей рассеянных волн в форму временных и мигрированных разрезов, а также оценить искажения, вносимые в волновые поля при наложении разнообразных помех. Накопленные данные дают веские основания для определенных заключений, касающихся общих оценок сейсморазведки МОГТ при изучении гетерогенных сред, и, с другой стороны, формирования конкретных направлений по анализу, обработке и интерпретации волновых полей, формируемых разнообразными гетерогенными системами.

Список литературы

1. Гельчинский Б.Я., Караев Н.А., Коган Л.Д. Теоретико-модельные исследования полей волн, отраженных от гофрированных границ. // Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. – Л.: Наука. 1968. Вып. XIХ.
2. Косминская И.П. Метод глубинного сейсмического зондирования земной коры и верхов мантии. // М.: Наука, 1968. - 226 с.
3. Рац М.В. Неоднородность горных пород и их физические свойства. – М.: Наука, 1968.
4. Гельчинский Б.Я., Караев Н.А., Коган Л.Д. О применении преобразования Гильберта для групповой корреляции сейсмических волн // Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. – Л.: Наука. 1970. Вып. X.
5. Николаев А.В. Сейсмика неоднородных и мутных сред. – М.: Наука, 1972.- 174с.
6. Гельчинский Б.Я. Цепелев Н.В. рассеяние на криволинейной площадке волны с фронтом произвольной формы // Вопросы динамической природы распространения сейсмических волн. – Л.: Наука. 1976 вып. X.

7. Гельчинский Б.Я., Караев Н.А., Коган Л.Д. Теоретико-модельные исследования волновых полей, образующихся в гетерогенных системах // Региональная, разведочная и промысловая геофизика. 1977. № 11. ВИЭМС.
8. Гельчинский Б.Я., Караев Н.А., Рудаков А.Н. Метод рассеивающего элемента // Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. – Л.: Наука. 1977. вып. XX11.
9. Караев Н.А. Исследование сейсмических моделей и волновых полей в сложнодислоцированных средах // Автореферат диссертации на соискание ученой степени д.ф.-м.н. – М., ИФЗ АН СССР, 1978.
10. Gelnisri.B, Karaev N. Theoretical and model investigation waves scattered by guasithien bodies of arbitrary shape. // AnnmGeophys, 1980, t. 36, fasc 4.
11. Gelnisri.B, Karaev N., Heterodeneons seismic models formed by inclesions of wave fields in them. // AnnmGeophys, 1980 t. 36, fasc 4.
12. Караев Н.А. Развитие представлений на сейсмические модели и волновые поля сложнодислоцированных сред // Развитие идей академика Г.А. Гамбурцева. – М.: Наука, 1982.
13. Караев Н.А. Сейсмические модели гетерогенных зон и формируемые ими волновые поля // Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. – Л.: Наука. 1982. Вып. XX11.
14. Караев Н.А., Скрипова В.Ф., Суматохина И.Н. Модели гетерогенных блоков и формируемые ими волновые поля // Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. – Л.: Наука. 1982. Вып. X1X.
15. Reston N.S. Spatial interference reflection character and the structure of the lower crust under extension. Results from 2-D seismic modeling. Annales Geophysical, 1987, vol.5, № 4.
16. Караев Н.А. Физическое моделирование в задачах сейсмологии гетерогенных сред // Физика Земли. 1991, № 9.
17. Петрашень Г.И., Караев Н.А. Сложнодислоцированные среды и проблемы сейсморазведки // Физические основы сейсмического метода. Нетрадиционная геофизика. – М.: Наука, 1991.
18. Кунин Н.Я., Шейх-Заде Э.Р. Исследование литосферы докритическими отраженными волнами // М.: Наука, 1993
19. Levander A. et. al. The crust as a heterogeneous optical medium, or crocodiles in the mist. Tectonophysics, 1994, 232.
20. Караев Н.А., Рабинович Г.Я. Атлас-монография сейсмических моделей и волновых полей рудных районов. – СПб.: ВИРГ-Рудгеофизика, 1995.
21. Караев Н.А. Смитсон С. Многокомпонентные сейсмические исследования в районе Кольской сверхглубокой скважины (результаты и перспективы). – М.: Геофизика, 1995.
22. Караев Н.А. Классификация сейсмических моделей слоистых и гетерогенных сред рудных районов. // Геофизика 1995 №2, с.19-28.
23. Краснопевцева Г.В. Современные представления о сейсмической модели земной коры континентов // Разведочная геофизика: обзор ВИЭМС. – М., 1985.
24. Караев Н.А. Структура и природа «близвертикальных» отражений земной коры в районе Кольской сверхглубокой скважины // Сейсмогеологическая модель литосферы Северной Европы. – Апатиты: КНЦ РАН, 1997.
25. Павленкова Н И Метод глубинных сейсмических зондирований, основные этапы развития и проблемы Физика Земли 1999.М 7-8
26. Караев Н.А. Сейсмическая гетерогенность земной коры и ее отображение в поле рассеянных волн // Глубинное строение и геодинамика Южного Урала. – М.: ГЕРС. 2001.
27. Караев Н.А., Рабинович Г.Я. Рудная сейсморазведка. – М.: Геоинформмарк, 2001
28. Ganchin J., Smitson C., Karaev B. and oth. Seismic studies around the Kola Superdeep Borehole. – Russia :1998, Tectonophysics, 288

29. Караев Н.А., Биезайс Я.Я., Лебедин П.А., Ларионова С.А. Сейсмическая гетерогенность земной коры Накынского кимберлитового поля Западной Якутии // Геофизика.2002. № 6.
30. Караев Н.А., Лебедин П.А. Сейсмическая гетерогенность земной коры и модель волнового поля. // Исследования литосферы в работах петербургских геофизиков. – СПб.: ВИРГ Рудгеофизика– ВНИИОкеангеология,2003.
31. Караев Н.А., Лебедин П.А., Кошелева Т.Д. Изучение сейсмической гетерогенности земной коры на примере региональных наблюдений в ближней зоне. – СПб.: ВИРГ Рудгеофизика– ВНИИОкеангеология,2003.
32. Караев Н.А., Биезайс Я.Я., Лебедин П.А. Связь кимберлитовых полей с трансформными и коромантийными структурами, отображаемыми в сейсмических аномалиях гетерогенных систем //Российский геофизический журнал. 2005. № 4.

3. Скважинная сейсмоакустика в кристаллических породах

Фундаментальное значение в развитии физических основ и решении прикладных задач сейсмометрии, связанных с изучением кристаллических толщ пород, имеют результаты сейсмоакустических исследований в скважинах, которые внесли принципиальные коррективы в представления о сейсмических моделях геологических сред в рудных районах, в определенной степени рассеяв при этом пессимизм в оценке возможности использования сейсморазведки МОВ при поисках глубокозалегающих рудных месторождений.

Метод акустического каротажа (АК). Придавая огромное значение акустическим исследованиям горных пород в скважинах как одному из важнейших направлений в развитии физических основ рудной сейсморазведки, коллектив ВИРГа под руководством А.Л. Перельмана разработал специальную аппаратуру АК малого диаметра для наблюдений в рудных скважинах. Это явилось основой для постановки широкомасштабных исследований скоростных характеристик горных пород во многих скважинах (свыше 300) и в самых разнообразных рудных провинциях. В течение многих лет накоплены уникальные данные, не имеющие аналогов по многообразию скоростных характеристик (V_p , V_s) кристаллических и вулканогенно-осадочных метаморфических пород и рудных залежей, как в рудных, так и в глубоких (до 3 км) и сверхглубоких скважинах. Установлен широкий диапазон изменения скорости (V_p , V_s) и отношения скоростей (γ) разнообразных горных пород в зависимости от минералогического состава, структурно-текстурных особенностей среды, различной степени метаморфизации пород, возраста, глубины залегания, температур и пр. Данные метода АК позволили оценить степень упругой неоднородности горных пород в исследуемом разрезе. При этом было показано, что наряду со средами, характеризующимися высокой степенью дифференциации по скоростным параметрам, могут иметь место геологические образования, как, например, гранитоидные массивы, которые могут быть отнесены к категории квазиоднородных моделей ($\Delta V_{p,s} < 5\%$). Данные метода АК использовались при прогнозе волновых полей на основе построения синтетических сейсмограмм; при изучении физико-механических свойств горных пород для решения шахтно-рудничных задач и пр. Систематизация результатов наблюдений АК при изучении кристаллических пород в рудных, глубоких и сверхглубоких скважинах приведены в монографиях ВИРГа.

Поляризационный метод вертикального сейсмического профилирования. Широкий охват разнообразных проблем, связанных с изучением сути сейсмического процесса, влиянием среды на природу наблюдаемых волновых явлений, относится к одной из главных парадигм Г.А. Гамбурцева. Развитие предложенного им азимутального метода сейсмических исследований имело фундаментальное значение в создании поляризационного метода вертикального сейсмического профилирования (ПМ ВСП) учеником Г.А. Гамбурцева Е.И. Гальпериним.

Впервые апробация ПМ ВСП была проведена Е.И. Гальперином на рудных объектах Казахстана. В ВИРГе создается аппаратура для азимутальных наблюдений в скважинах, а также системы обработки данных ПМ ВСП «Азимут» (ВИРГ, И.А. Быков) и «Поляр» (ИФЗ АН СССР, С.И. Александров).

Векторная модификация ВСП в рудных районах сформировалась как самостоятельное и единственное направление скважинной структурной геофизики, при этом его роль в рудной сейсморазведке оказалась значительно шире, чем в нефтяной. Существенной отличительной особенностью ПМ ВСП, определяющей его универсальность, является высокая избирательность метода по направлению распространения сейсмических волн; селективностью при разделении сложных волновых полей по признаку поляризации. По отношению к наземной сейсморазведке ПМ ВСП обладает бесспорным преимуществом при реализации различных модификаций многоволновой и высокоразрешающей сейсморазведки и объемного изучения околоскважинного пространства. Успешное применение азимутальной системы приема при наблюдениях в скважинах отмечено положительными результатами при объемном картировании в околоскважинном пространстве апатиторудных интрузий Хибинского массива (А.Л. Ронин), при поисках никеленосных интрузий Норильского типа, локализации хромитовых залежей в Казахстане и др.

Использование ПМ ВСП в рудных районах имело решающее значение в пересмотре и дальнейшем развитии физических основ рудной сейсморазведки при изучении сложнопостроенных метаморфических и изверженных комплексов пород.

Исключительное значение имеют результаты изучения природы волновых полей, формируемых в земной коре по наблюдениям ПМ ВСП в глубоких и сверхглубоких скважинах (Кольской СГ-3, Уральской СГ-4) (рис 4). Получен уникальный материал об особенностях распространения сейсмических волн в кристаллических породах и о природе сейсмических границ. Важно отметить, что практически повсеместно, независимо от типа применяемого источника возбуждения упругих колебаний, поле прямой волны по наблюдениям в скважинах представлено поперечными и обменными волнами, которые являются определяющими в формировании структуры сложнополяризованного поля восходящих волн. Сопоставление волновых полей, наблюдаемых в скважинах, с данными наземных наблюдений МОГТ явились иллюстрацией значительных потерь полезной информации о строении среды при переходе к наземным наблюдениям. Стало очевидным, что существенные потери информации связаны с несовершенством применяемых технологий наблюдений МОВ. Вопрос об использовании обменных и поперечных отраженных волн при региональных исследованиях в ближней зоне неоднократно обсуждался с Н.Н. Пузыревым в двух аспектах. С одной стороны, возможно ли в условиях современного развития «технологичной» сейсморазведки обеспечить выполнение многоволнового сейсмического эксперимента, гарантирующего стабильность и оптимальность возбуждения и приема поперечных волн. В подобной ситуации при отсутствии «чистоты» в проведении эксперимента, как отмечал Н.Н., вряд ли можно ожидать положительного эффекта от применения многоволновой сейсмики в «ближней» зоне. С другой стороны, ограничения в реализации многоволновой сейсмики в «открытых» районах могут быть связаны с сильными искажениями, вносимыми в поляризацию волнового поля высокой сейсмической неоднородностью верхней части фундамента при возбуждении и приеме упругих колебаний.

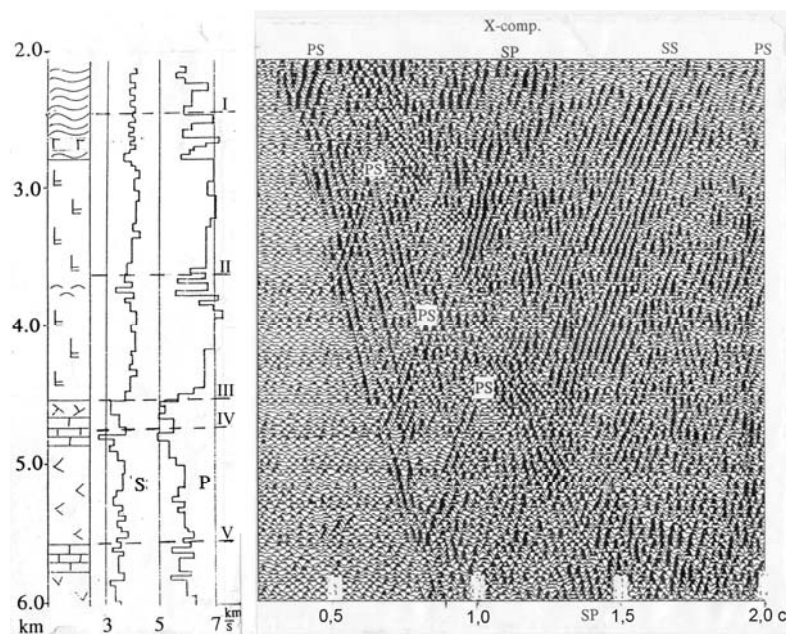


Рис.4. Данные метода АК и ПМ ВСП по наблюдениям в Кольской СГ-3. Волновое поле широко представлено обменными и поперечными волнами, соответствующими контактам свит пород печенгской серии.

Уникальные данные о многоволновой структуре волнового поля, наблюдаемого в СГ-3, являются иллюстрацией значительных потерь полезной информации о строении кристаллической коры при традиционных наземных наблюдениях в ближней зоне, связанных с несовершенством применяемой моноволновой технологии наблюдений МОВ

К наиболее значительным результатам ПМ ВСП в глубоких скважинах могут быть отнесены следующие.

Установлено, что с разнообразными геологическими контактами непосредственно связано образование как регулярных монотипных и обменных отраженных волн, так и рассеянных отраженных волн, наблюдаемых в виде компактных волновых пакетов. Сюда отнесены геологические контакты рудовмещающих комплексов в сложнопостроенных эффузивно-осадочных толщах, в том числе и продуктивные горизонты: разломы и надвиги, зоны трещиноватости пород, приконтактные и внутриинтрузивные зоны, зоны несогласий, рудные залежи, кимберлитовые трубки и пр. Все это явилось обоснованием для постановки МОВ в рудных районах. Показано, что некоторые геологические объекты, как, например, интрузивные массивы гранитоидного и щелочного состава характеризуются слабым поглощением и могут быть отнесены к категории прозрачных и полупрозрачных моделей. Так, по наблюдениям в скважинах на больших дистанциях (до 1.0-1.5 км) при возбуждении искровым источником в кристаллических породах спектр наблюдаемых *P*-волн смещен в диапазон до 400-600 Гц, что может служить основанием в решении принципиальных вопросов технологии ВЧС, в том числе сейсмотомографии. Установлено, что ряд геологических объектов, как, например, рудные залежи, разрывные нарушения, характеризуемые существенно пониженными значениями скорости по отношению к вмещающей среде, являются сейсмическими волноводами. Впервые при возбуждении упругих колебаний непосредственно в рудных залежах, пересекаемых скважиной, были зарегистрированы пакеты интерференционных каналов волн типа *SV* и соответствующие им дифрагированные волны, образованные в области «срыва» рудных залежей (А.Л. Ронин). Этот эффект, зафиксированный по наблюдениям ПМ ВСП на Хибиных, может иметь самостоятельное значение в решении разведочных задач.

По данным наблюдений первых волн, а также данных АК в глубоких и сверхглубоких скважинах показано, что кристаллические породы в среднем аппроксимируются изотропно-неоднородной моделью. Наблюдаемая в основном по

лабораторным измерениям скорости на образцах пород сверхглубоких скважин значительная скоростная анизотропия горных пород носит локальный характер и, возможно, связана с тектонизированными зонами высоких напряжений. Во многих случаях отмечается удовлетворительное совпадение данных АК и ПМ ВСП как на уровне приведенных вертикальных годографов $t(H)$, так и при сопоставлении данных АК с разрезами «истинных» скоростей по результатам поляризационной обработки P -волн. Практически повсеместно, за небольшим исключением, по результатам АК и ПМ ВСП установлено, что зона высокого вертикального градиента скорости кристаллических пород соответствует самым верхним частям разреза в диапазоне глубин до 100-200 м. Ниже этой зоны кристаллические породы характеризуются чрезвычайно слабым градиентом скорости ($\beta < 0.01$ 1/с). Между тем, следует отметить, что имеют место принципиальные расхождения в значениях вертикального градиента скорости по данным скважинных наблюдений и по результатам обработки годографов рефрагированных волн. В последнем случае область высоких градиентов скорости охватывает значительно большие глубины, чем по данным скважинных наблюдений. Расхождения между данными АК и наземными наблюдениями в работе А.М. Епинатьевой были отнесены за счет сложной геометрии лучей рефрагированных волн, обусловленных скоростной неоднородностью ВЧР. На самом деле, при сопоставлении данных АК с полем лучей первых волн, восстановленных по наблюдениям ПМ ВСП, в обоих случаях отмечается совпадение положения верхней высокоградиентной части разреза. Причина расхождения между данными обработки рефрагированных волн и скважинными наблюдениями, очевидно, связана с неадекватностью обработки данных МРВ.

Параметры поляризации весьма чувствительны к неоднородностям среды. Так, по наблюдениям ПМ ВСП показано, что при распространении через неоднородные зоны (рудные залежи, продуктивные горизонты, зоны нарушений и пр.) наблюдаются значительные изменения поляризации P -волны, а при выходе из зон линейность поляризации восстанавливается. Этот признак используется при «диагностике» пород, пересекаемых скважиной. По результатам внедрения ПМ ВСП ИФЗ АН СССР совместно с ВИРГом были созданы «Методические рекомендации по применению поляризационного метода в рудных районах» (Е.И. Гальперин, Л.А. Певзнер, Н.А. Караев, А.Л. Ронин и др., 1984).

Список литературы

1. Гальперин Е.И., Караев Н.А., Певзнер Л.А., Ронин А.Л. и др. Методические рекомендации по применению поляризационного метода сейсмической разведки. – Алма-Ата: Мингео СССР, 1984.
2. Караев Н.А., Голубев А.А., Рабинович Г.Я., Ронин А.Л. Сейсмические модели массивов кристаллических пород по материалам скважинных сейсмоакустических наблюдений. // Глубинные сейсмические исследования в восточной части Балтийского щита. – Апатиты: КНЦ АН СССР, 1985.
3. Караев Н.А., Ронин А.Л., Прокатор О.М. Использование волн различной поляризации при изучении структуры толщ изверженных пород в околоскважинном пространстве // Многоволновые сейсмические исследования. – Л.: Наука, 1987.
4. Караев Н.А., Константинов В.В., Корнеев В.А. Сейсмическое просвечивание локальных неоднородностей // Разведочная геофизика. Обзор ВИЭМС. 1987.
5. Караев Н.А., Ронин А.Л. Опыт применения ПМ ВСП в рудной геологии // Гальперин Е.И. Вертикальное сейсмическое профилирование. – М.: Наука, 1994.
6. Караев Н.А., Смитсон С. Многокомпонентные сейсмические исследования в районе Кольской сверхглубокой скважины (результаты и перспективы). – М.: Геофизика, 1995.

7. Karaev N.A., Ronin A.L. Seismic investigations by PM VSP in Kola superdeep borehole. CCSS work Shop presidens Minolep. –California, 1995.
8. DerDigranes, Yngve Kristoffersen, Karaev N.A., Analysis of Shear waves observed in VSP data from the superdeep well at Kola // Geophys.J.Ynt (1996)126.
9. Carz B.J., Smitson S.B., Karaev N.A., and oth., Vertical seismic profile results from the Kola Superdeep Borehole. – Russia: Tectonophysics, 1996,264,
10. Караев Н.А., Ронин А.Л. Поляризационный метод вертикального сейсмического профилирования в кристаллических породах разведочных и сверхглубоких скважин // Исследования литосферы в работах петербургских геофизиков. – СПб.: ВИРГ Рудгеофизика–ВНИИОкеангеология, 2003.
11. Караев Н.А. Совсем немного о Е.И. Гальперине // Е.И. Гальперин. Воспоминания близких друзей, коллег, учеников. – М.:ЕАГО, 2005.

4. Физическое моделирование при решении проблем сейсморазведки поисков и диагностики коллекторов углеводородов

Проблема поисков трещинных и порово-трещинных коллекторов углеводородов отнесена к числу первостепенных задач геофизики, к разрешению которой привлекается сейсморазведка. Повсеместное использование традиционных сейсмических технологий без достаточного обоснования их применения к нетрадиционным сейсмическим объектам во многих случаях приводит к многозначной геологической интерпретации сейсмических данных, ложным представлениям о геологическом строении целевого объекта. Существующая многозначность интерпретации сейсмических данных и при этом возникшие противоречия в оценке разведочных возможностей различных направлений поисков и диагностики коллекторов при ограниченных возможностях численных методов моделирования во многих странах мира стимулировали проведение исследований методами физического моделирования.

С развитием известных способов физического моделирования ВИРГом (ФГУНПП «Геологоразведка»), проводившихся по договорам с МПР РФ и Роснедра при поддержке грантов РФФИ создана уникальная система ультразвукового физического моделирования для тестирования и оптимизации современных сейсмических технологий поисков и диагностики коллекторов углеводородов. Новизна созданных способов и методов исследований подтверждены патентами РФ. Функциональные возможности физического моделирования представлены следующими положениями:

1. *Физическое моделирование* – средство исследования признаков диагностики коллекторов и составления банка данных тестовых волновых полей трещинных и порово-трещинных моделей для сопровождения обработки и интерпретации данных сейсморазведки на различных стадиях поисковых ГРП.

Разработаны и апробированы новые оригинальные конструкции объемных фрагментарных физических моделей трещиноватых и порово-трещиноватых систем, наиболее приближенные к реальным типовым объектам залежи. В отличие от известных аналогов физических моделей оригинальность предложенных конструкций обеспечивает возможность имитации гидравлической связи вертикальной трещиноватости с матричной пористостью с широкой вариацией параметров плоских трещин и системы трещин, характеризуемых «шероховатыми» стенками, при различных режимах газо- и флюидонасыщения пустотного пространства.

При сохранении подобия размера изометричных пор реальным объектам физические модели отличаются возможностью изменения параметров трещин (размер, форма, раскрытость) и порового пустотного пространства с произвольно меняемым типом насыщения. Параметры трещинных и порово-трещинных моделей приведены в таблице.

Модель	Наименование параметра модели	мин	макс
Трещинные (плоские трещины)	Плотность трещин (плоские)	0,01	0,1
	Раскрытие, мм	0,01	0,05
Трещинные (шероховатые трещины)	Шероховатость, см	0,5	3
	Раскрытие, мм	0,02	0,05
Пористые	Пористость матрицы	0,01	0,15
	Размеры пор, мм	0,02	0,15
Трещинные	Степень гидравлической связи между трещинами, %	0	30
Порово-трещинные	Степень гидравлической связи между трещинами и порами, %	30	100
	Тип порозаполнителя	Газ, флюид	

Разработанный ассортимент физических моделей при широкой вариации параметров наиболее приближен к эффективным сейсмическим моделям реальных порово-трещинных объектов. Это явилось основанием для реализации фрагментарных моделей, как на этапе изучения волновых признаков диагностики коллекторов, так и при включения их в виде модулей в составную базовую модель для тестирования сейсмических технологий.

2. *Физическое моделирование – лабораторный «полигон»* для тестирования применяемых и вновь создаваемых современных сейсмических технологий при сопровождении поисковых работ как на этапе проектирования ГРП, так и в процессе оптимизации методики наблюдений при поисках коллекторов.

Для тестирования сейсмических технологий создана «большая» составная базовая модель. Ключевой особенностью созданной системы физического моделирования является возможность включения и замены блоков фрагментарных моделей трещинных и порово-трещинных объектов (12.5×12.5×6.0 см) с заданными параметрами трещин и пор при различных режимах сжатия и флюидонасыщения.

С учетом коэффициента подобия (1:4000) площадь составной модели эквивалентна площади реальных наблюдений (4.5×4.5 кв.км). Размеры составной модели обеспечивают возможность тестирования любых 2D и 3D современных технологий моно и многоволновой сейсморазведки, в том числе, возможность имитации полноценных 3D-наблюдений с целью обоснования и оптимизации параметров методики обнаружения и диагностики порово-трещинных и трещинных моделей, имитирующих реальные целевые объекты поисков.

3. *Ультразвуковое физическое моделирование* проводится с помощью полностью компьютеризированной установки, функциональные возможности которой расширены за счет введения канала возбуждения высокочастотных вибрационных сигналов с преобразованием виброграмм в импульсную форму. Установка обеспечивает возможность реализации многоканальных и многоволновых сейсмических наблюдений при любых сочетаниях диаграммы направленности приемно-излучающей системы. Результаты наблюдений представляются в формате SGY.

4. *Наблюдения на фрагментарных порово-трещинных физических моделях* позволили исследовать влияние на характеристики волнового поля геометрических параметров плоских микротрещин, «раскрытость» которых измеряется первыми микронами, и, с другой стороны, влияние на волновое поле параметров «шероховатости», при вариации «раскрытости» трещин (0,01; 0,04; 0,07; 0,1мм.). Для всех исследуемых фрагментарных трещинных и порово-трещинных моделей независимо от параметров трещин и структуры трещиноватости наблюдаемые характеристики волнового поля адекватны условиям трансверсально-изотропной среды.

Исследованиями, проведенными на фрагментарных моделях с монетообразными трещинами, размеры которых существенно меньше сечения первой зоны Френеля, установлено существенное влияние удельной поверхности трещин на поле рассеянных волн, формируемых трещиноватой системой. При этом основным фактором, влияющим на формирование поля рассеянных волн, как при прохождении, так и отражении непосредственно от поверхности трещиноватых систем, являются геометрические размеры и форма микротрещин. Наблюдаемые особенности волнового поля следует учитывать при идентификации микроструктуры трещиноватости.

При фиксированных значениях раскрытия «шероховатых трещин» исследованы угловые изменения декремента поглощения продольной волны, отображающие степень различия трещинной и матричной пористости. С улучшением емкостных и фильтрационных характеристик трещин с шероховатыми стенками, определяемых раскрытостью таких трещин, возрастают различия в значениях скорости и поглощения между «быстрой» SH- и «медленной» SV-волнами, что подтверждает высокий разведочный потенциал многоволновой сейсморазведки.

Экспериментальные данные, полученные при просвечивании порово-трещинных моделей с возможностью управления эффектом перетекания флюида во времени, можно рассматривать в перспективе при проведении физического моделирования порово-трещиноватых сред в режиме мониторинговых наблюдений.

5. Система ультразвукового моделирования опробована при тестировании многоволновых сейсмических наблюдений на примере изучения слабоконтрастных фрагментарных порово-трещинных объектов с параметрами, адекватными сейсмическим моделям ЮТЗ Восточной Сибири. Задача эксперимента – оценить, насколько существенны наблюдаемые над фрагментарными моделями волновые аномалии при локализации и диагностике трещиноватости слабоконтрастных порово-трещинных блоков. Для решения этой задачи проведены многоволновые 2D и частично 3D наблюдения при различных сочетаниях пар источник-приемник: Fz–Uz , Fz–Ux , Fx–Uz, Fx–Ux , Fy –Uy.

В полном соответствии с реальными данными поляризационных наблюдений в скважинах проведенное тестирование сейсмических технологий иллюстрирует высокую информативность метода многоволновой сеймики при диагностике слабоконтрастных порово-трещинных объектов. Трещиноватость объектов достаточно надежно проявилась в поле обменных и поперечных волн, как непосредственно отраженных от шероховатой поверхности трещинных блоков, так и в наблюдаемом эффекте расщепления отраженной волны от нижерасположенной границы при распространении через блоки (рис. 5). Для разрешения существующих противоречий по вопросу разведочных возможностей рассеянных волн (F-технология) и способа СЛБО в Восточной Сибири целесообразно провести тестирование этих технологий на составной модели с возможностью в случае необходимости корректировки параметров исследуемых фрагментарных моделей.

Разработанные принципиально новые конструкции фрагментарных трещинных и порово-трещинных моделей с произвольно варьируемыми параметрами трещиноватости и пористости при различном флюидонасыщении пустотного пространства раскрывают новые возможности физического моделирования полей P- и S-волн в разработке волновых признаков диагностики пористых, трещинных и порово-трещинных сред с параметрами, произвольно варьируемыми в заданных пределах.

Созданная и реализованная при выполнении исследований оригинальная технология объемного физического моделирования может быть рекомендована как на этапе тестирования применяемых сейсмических технологий получения и обработки сейсмической информации (в том числе многоволновых наземно-скважинных 3D-наблюдений), так и при решении научно-исследовательских задач, связанных с дальнейшей оптимизацией сейсмических методов при поисках и изучении коллекторов

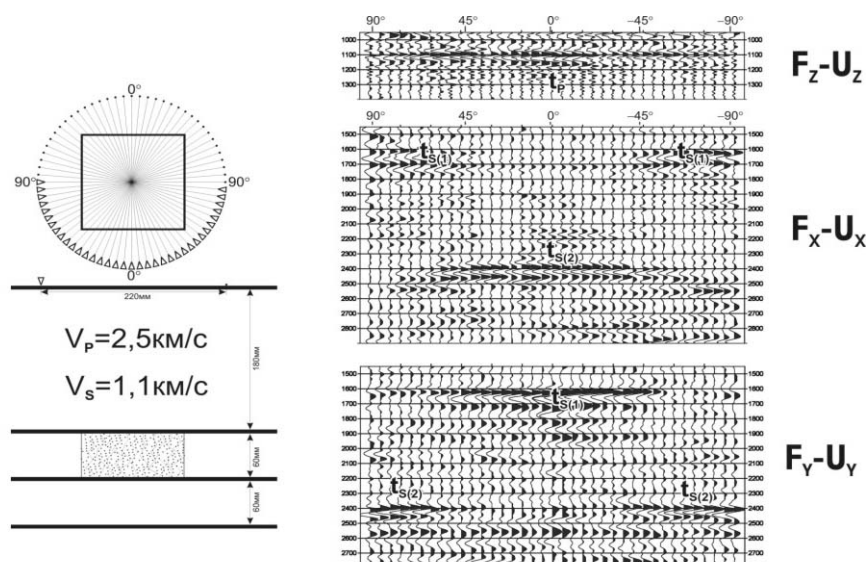


Рис. 5. Фрагмент азимутальных наблюдений методикой общей средней точки на поверхности составной модели над фрагментарной моделью слабоконтрастного ($\Delta V_p=3\%$) порово-трещинного флюидонасыщенного блока с вертикальной шероховатой трещиноватостью ($K_{тп} -4.3\%$, $K_{мп}-2\%$, $\Delta t_p - 0.03\text{мм}$).

Сейсмическая анизотропия блока практически не проявилась в поле (система F_z-U_z) продольной отраженной волны. В тоже время на фрагментах записи в системах F_x-U_x , F_y-U_y трещиноватость исследуемого объекта надежно проявилась в азимутальных изменениях как в поле поперечной волны (t_1), непосредственно отраженной от шероховатой поверхности трещинного блока, так и в наблюдаемом эффекте расщепления поперечных SH и SV (t_1 , t_2) отраженных волн от нижерасположенной границы при распространении через блок

Список литературы

1. Караев Н.А., Козлов Е.А. Объемные пластинчатые модели систем микровключений для ультразвукового моделирования, комбинированная модель для ультразвукового моделирования и способы изготовления моделей //Патент РФ на изобретение от 20.12.10. № 2407042.
2. Караев Н.А. Объемная пластинчатая модель систем микровключений для ультразвукового моделирования и способ ее изготовления //Патент РФ на изобретение от 10.02.11 № 24115454.
3. Караев Н.А., Лукашин Ю.П., Прокатор О.М., Семенов В.П. Физическое моделирование трещиноватых сред // Технологии сейсморазведки. 2008. № 2.
4. Караев Н.А., Козлов Е.А., Караев Г.Н. и др. Физическое моделирование порово-трещинных объектов.// Технологии сейсморазведки, 2008. № 3.
5. Караев Н.А., Караев Г.Н., Лукашин Ю.П., Прокатор О.М. Физическое моделирование порово-трещинных объектов с возможностью тестирования сейсмических технологий //Технологии сейсморазведки. 2010. №3.
6. Bakulin A., Grechka V., Karaev N, Anisimov A., Kozlov E. Physical Modeling and theoretical studies of seismic reflections from a fault zone //11 the International Workshop Seismic Anisotropy. – Canada: Newfoundland, 2004.