

2ДВ 0–2110 км – уникальный объект глубинных исследований земной коры

Фельдман И.С.¹, Сальников А.С.², Кузнецов В.Л.², Чернов А.А.³.

¹ООО «ЕМГЕО»,

²ФГУП «СНИИГГ и МС», г. Новосибирск,

³ОАО «Пангея», г. Москва.

Рассмотрены геолого-геофизические модели земной коры по геотраверсу 2 ДВ на интервале 0-2110 км. На этом отрезке профиля выполнены работы ОГТ, КМПВ, ГСЗ и МТЗ.

Три независимых геофизических метода дают единую петрофизическую модель строения земной коры, где зависимости между физическими свойствами (V , ρ , σ) определяются достаточно понятными закономерностями истории их генезиса. Наиболее ярким свойством этой модели является наличие прослеживаемых на значительных расстояниях складчато-глыбовых структур, охватывающих верхнюю и среднюю часть земной коры. Горизонтальная расслоенность в этой модели характерна только для нижней части земной коры.

В результате удалось построить уникальную совокупность геофизических разрезов – сейсмические, геоэлектрические и плотностные.

Ключевые слова: геотраверс 2ДВ, петрофизические модели, комплексная интерпретация, геофизические разрезы

Введение

Работы на профиле 2ДВ являются практически первым значительным объектом исследования земной коры и верхней мантии на основе Федеральной программы МПР России. В отличие от предшествующих работ в ней был предусмотрен полный набор всех видов геофизических и геологических работ, оснащенных новой специализированной аппаратурой для глубинных исследований, прежде всего, сейсмических. Работы начались в 2001 году, а закончились в 2006 году. Первый интервал 0-730 км выполнялся с 2001 по 2003 годы и завершился отчетом в 2004 году. Результаты работ были опубликованы в 2007 году в сборнике под редакцией Сальникова А.С. «Структура и строение земной коры Магаданского сектора России по геолого-геофизическим данным». В нем опубликована также совместная статья «Комплексная сейсмогеоэлектрическая и плотностная модель земной коры по геотраверсу 2ДВ». Авторы этой статьи являются авторами моего доклада. Они заложили основу анализа и интерпретации. Совместно с исполнителями обработки сейсмических данных КМПВ и МОГТ следует добавить участие специалистов «Спецгеофизики».

Следующий этап интерпретации выполнен осенью 2006 года для интервала 0-1100 км. Коллективных действий по анализу и комплексной интерпретации всех участников не планировалось. Первичные материалы различных методов добывались с большим трудом. Последний этап работ выполнялся по договору с «Спецгеофизикой» от 2006 года и завершился в 2008 году.

Поскольку полевые работы МТЗ выполнялись ООО «Северо-Запад», то нам первичные полевые данные передавать не спешили, а результаты своей обработки и интерпретации этих же данных отправляли другим исполнителям проекта, несмотря на то, что было известно, что за эту работу отвечаем и выполняем ее мы. Поскольку операции проводились подковожно, то на свет божий вытаскивались различные отчеты, а в ряде случаев и публиковались, где уже в комплексных моделях 2ДВ присутствует вклад выше упомянутой организации. Мы их покажем на стендах, также на сопоставлении т.н. моделей с результатами обработки и интерпретации ООО «Северо-Запад» никак не вяжутся с другими геофизическими разрезами и геологией строения ВЧР. С другой стороны, мы не можем переобработать большую часть данных других организаций, что наносит огромный ущерб государству. Но мы можем передать наш опыт другим коллективам, что и попытаемся сделать, для начала, на этом показательном объекте 2ДВ. Стоит также заметить, что полное представление всех видов геофизических работ по профилю 2ДВ 2110 км никогда не публиковалось.

Сейсмические исследования

Сейсмические исследования выполнялись по комбинированной системе наблюдений **ОГТ-вибро + КМПВ-вибро** с использованием докритических и закритических отраженных, рефрагированных и головных волн. Основные параметры системы наблюдений: шаг между каналами – 50 м, взрывной интервал – 100 м для

ОГТ и 15000 м для КМПВ, максимальная длина годографов – 9 км для ОГТ и 30 км для КМПВ. Работы **ГСЗ** выполнялись по методике точечных (дифференциальных) сейсмических зондирований с использованием мощного передвижного (сборно-разборного) виброисточника ЦВП-40 и дискретно расположенных малоканалных регистрирующих станций. Частотные диапазоны зондирующих сигналов от вибратора составляли 7.031-10.547Гц; длительность сеансов составляла 40 минут. Для получения разрешенных записей и уменьшения влияния шумов на коррелограммах использовалось суммирование сеансов вибратора от 2-3 до 10-12.

Графы обработки и интерпретации сейсмических материалов **ОГТ, КМПВ и ГСЗ**, а также подробная характеристика полученных результатов приведены в статьях сборника (1). Приведем лишь основные черты сейсмических разрезов, важные для последующего сопоставления.

Сейсмическая модель по данным **ГСЗ** состоит из достаточно уверенно выделяемой границы Мохоровичича и скоростной модели земной коры, полученной по алгоритмам и программам сейсмотомографической обработки ФГУП «СНИИГГиМС». Поверхность Мохоровичича построена по данным головных и закритических отраженных волн. Средняя скорость распространения сейсмических волн до нее меняется по профилю в диапазоне 6.3 - 6.5 км/с. Граничная скорость вдоль профиля изменяется от 7.5 до 8.4 км/с. Пониженными значениями граничных скоростей продольных волн отмечаются, соответственно, участки $X = 70 - 140$ км и $X = 510 - 595$ км. Повышенными (до 8.4 км/с) значениями граничных скоростей продольных волн характеризуются центральный ($X = 160 - 310$) и конечный ($X = 500 - 600$ км) участки профиля. Мощность земной коры по профилю изменяется от 31 до 43 – 45 и более километров.

На скоростной модели ГСЗ на общем фоне возрастания скорости с глубиной в верхней и средней части земной коры достаточно выразительно выделяются горизонты с пониженной и повышенной скоростью. Граница подошвы относительно низкоскоростного слоя варьирует по профилю от первых километров до 25-30 км, формируя крупноамплитудные поднятия и впадины. В нижней части земной коры скоростная модель становится квазислоистой.

По данным **МОВ-ОГТ** в разрезе земной коры выделены: осадочный чехол, кристаллическая кора и верхняя мантия. Осадочный чехол выделяется в виде интенсивно расслоенных толщ и сравнительно однородных,

перемежающихся по профилю. На большей части профиля поверхность кристаллического фундамента выделяется достаточно надежно по переходу от сравнительно плотных сейсмических отражений нижней части чехла к акустически более прозрачной и неоднородной толще кристаллической земной коры. Верхняя часть кристаллической земной коры характеризуется гетерогенным волновым полем, протяженные пакеты высокоамплитудных отражений которого осложнены крупными акустически прозрачными областями и зонами резкого снижения уровня сейсмической записи. «Средняя кристаллическая кора», выделяющаяся в интервале глубин 20 - 33 км, характеризуется сравнительно ослабленным волновым полем, осложненным крупными областями и зонами снижения уровня сейсмической записи. Внутренняя структура блоков более плотной сейсмической записи представлена чешуйчатонадвиговой системой высокоамплитудных отражений, свидетельствующей о значительной тектонической расслоенности коры. «Нижняя кора» отличается аномально высокой плотностью сейсмической записи, в рисунке которой отчетливо видна тонкая субгоризонтальная и наклонная тектоническая расслоенность разреза.

Граница Мохоровичича на разрезе МОВ-ОГТ выражена горизонтом сильных субпараллельных рефлекторов мощностью от 1-2 до 5-7 км. В ряде районов наблюдаются локальные разрывы сплошности поверхности Мохоровичича. Разрыв поверхности Мохоровичича сопровождается субвертикальными зонами ослабления уровня сейсмической записи, прослеживающейся до приповерхностных горизонтов земной коры.

Магнитотеллурические зондирования

Магнитотеллурические зондирования выполнялись в трёх различных модификациях: глубинной (**ГМТЗ**), среднеглубинной (**МТЗ**) и малоглубинной (**Аудио-МТЗ** или **АМТЗ**). Измерения выполнялись с шагом: АМТЗ – 1 км, МТЗ – 3 км, ГМТЗ – 15 км. В течение двух суток выполнялись: одно измерение ГМТЗ+МТЗ+АМТЗ (длительность записи не менее 36 часов, диапазон частот 400–0.0001 Гц), 5 ночных измерений МТЗ+АМТЗ (длительность записи 12–14 часов, диапазон частот 400–0.0006 Гц) и 2 дневных измерения АМТЗ (длительность записи 4–6 часов, диапазон частот 400-0.001 Гц).

Интерпретация по данным МТЗ выполнялась с использованием программы MT-Driver (ООО «Центр ЭМИ»). Ее главная отличительная особенность – анализ и преобразования тензора импеданса в пространственно-частотной

области. Районирование данной области позволяет связать частотные интервалы тензора-импеданса с интервалами их пространственных спектров. Далее выполняется в определенной последовательности мультипликативное и аддитивное разложение комплексных пространственных матриц в спектральной области. При этом достигается эффективное подавление действия трехмерных неоднородностей перекрывающих целевой уровень глубинности разреза. На заключительной стадии использовались 2d инверсии Rebook 1d инверсии МЭЛ и IPI. Более подробная технология интерпретации рассмотрена в отдельной статье, посвященной электроразведочным работам МТЗ.

Основная особенность геоэлектрического разреза – наличие практически по всему профилю проводящих горизонтов на глубинах от нескольких км до 30 км. Хотя сопротивление горизонтов существенно изменяется вдоль профиля, оно остается достаточно низким по отношению к вмещающим значительно более высокоомным образованиям. В конфигурации проводящих горизонтов достаточно ярко вырисовываются крупноамплитудные складки поперечником в десятки км, которые удается проследить по всему профилю. На отдельных участках проводящие горизонты достаточно близко подходят к поверхности.

Проводящие горизонты были прокоррелированы по профилю. Полученные геоэлектрические границы были вынесены на сейсмические разрезы по данным МОВ-ОГТ и ГСЗ. Прежде всего, обращает на себя внимание близкая корреляция между конфигурацией скоростной модели и геоэлектрической.

Интерпретация гравимагнитных данных

Конфигурация сейсмогеоэлектрических горизонтов находится в близкой положительной корреляционной связи с гравитационным полем. На значительных интервалах профилей коэффициенты корреляции превышают 0.9, что свидетельствует о значительной положительной избыточной плотности ($\Delta\sigma$) на границах, соответствующей кровле выделенных основных сейсмогеоэлектрических горизонтов.

По результатам математического моделирования гравимагнитных данных рассчитаны плотностные характеристики и построены геоплотностные разрезы до глубины более 50 км. Плотностные характеристики гранулитобазитового слоя определяют его блоковое строение. Плотность блоков меняется в достаточно широких пределах: от 2,75–2,8 г/см³ до 3,2–3,25 г/см³. Поверхность гранулитобазитового слоя неровная, бугристая, с колебаниями амплитуд абсолютных отметок от

–10 км в океане до –26 км в средней части фрагмента профиля и его окончании. По своим плотностным характеристикам слой Мохоровичича имеет также блоковое строение. Общий фон плотности заметно повышен. Однако, в отличие от гранулитобазитового слоя наблюдается уменьшение расчетной плотности от периферии к центру, от 3,40–3,45 г/см³ до 3,00–3,05 г/см³. Поверхность Мохоровичича, как и гранулитобазитового слоя имеет также бугристый характер с колебаниями амплитуд абсолютных отметок от –20 км в океане до –50 км на континенте.

Отмеченные выше закономерности были использованы для совместного анализа сейсмических и геоэлектрических разрезов с целью построения согласованных петрофизических моделей земной коры. При расчетах плотностной модели использовались обобщенные статистические зависимости между параметрами скорость (V_p), сопротивление (ρ) и плотности (σ) различных метаморфических и магматических образований (Канамори-Музутани, Пузырева, Шрайбмана, Воларовича, Пахроменко и др). Обратная задача для поля Δg решалась методом подбора при закреплении границ геоэлектрической модели и ее значениям плотности, рассчитанными по скоростной модели с использованием статистических связей между V_p и σ .

Построение геофизических разрезов и комплексная геологическая и геотектоническая интерпретация

Как сейсмические, так и электроразведочные методы зондирования позволяют получать некоторые упрощенные отражения реальных заведомо более сложнопостроенных сейсмических и геоэлектрических моделей. Эти отражения (разрезы) зависят не только от свойств реальных объектов, но и от тех или других характеристик измерительных систем и программ обработки. Связь между сейсмическими разрезами и реальными моделями определяется двумя главными характеристиками (свойствами) последних: распределением скоростей (V), т.е. интегральными (объемными) характеристиками, и динамическими особенностями, зависящими от дифференциальных свойств локальных объектов среды. Чем сложнее строение среды (выше степень ее неоднородности), тем менее выразительна картина суммарных откликов на динамическом разрезе. Скоростные модели в значительно меньшей степени зависят от дифференциальных особенностей среды. В геоэлектрическом разрезе отражаются интегральные характеристики реальной среды, т.е. распределение объемных проводимостей

всей толщи. Геоэлектрический отклик от проводящих объектов в глубоких горизонтах осадочного чехла и фундамента практически не зависит от сложности строения этих объектов. Таким образом, при изучении строения глубоких горизонтов неоднородного по строению фундамента и земной коры способности электроразведки, связанные с определением интегральных характеристик среды, оборачивается существенным преимуществом по сравнению с сейсморазведкой. Оно выражается в способности электроразведки непрерывно проследить в разрезе относительно проводящие горизонты при практической независимости от сложности их внутреннего строения. Т.о., при комплексировании мы должны сопоставить интегральные характеристики двух методов, т.е. скоростные и геоэлектрические разрезы.

Рассмотрим теперь возможные связи между реальными физическими свойствами горных пород и их петрографическим составом. Для осадочных пород скорости сейсмических волн зависят от фацеального состава, стадии катагенеза и степени уплотнения. В пределах складчатого фундамента и в более глубоких горизонтах земной коры в процессе метаморфизма и складчатости происходит увеличение скорости и плотности пород, тем больше, чем выше стадия прогрессивного метаморфизма. Регрессивный метаморфизм разрыхляет структуру и уменьшает скорости.

Геоэлектрические параметры (удельное электрическое сопротивление (ρ) или суммарная продольная проводимость(S)) отражают объемное содержание свободных электрических зарядов в горных породах и, поэтому, являются прямым индикатором их петрографического состава, текстуры и термодинамического состояния. Для осадочных образований основным фактором является фацеальный состав пород: глинистые фации и породы с высокой пористостью имеют низкие сопротивления (первые Ом·м), карбонатные и эффузивные—высокие (сотни Ом·м). На больших глубинах за счет литогенеза осадков и изменения термодинамических условий, с одной стороны, происходит значительное уменьшение пористости и вытеснение к поверхности свободной воды. Сопротивление пород возрастает на несколько порядков. С другой стороны, за счет катагенеза органогенных образований, появляется электронная проводимость, что приводит к значительному уменьшению сопротивлений терригенных разностей (черносланцевые породы).

В глубоких эрозионных срезках на щитах породы, слагающие земную кору, хорошо изучены как в естественном залегании малоглубинной электроразведкой, так и в лабораторных

условиях при больших температурах и давлениях. Хорошо проводящие породы из этой серии относятся к "черным сланцам", обогащенным углеродом. Их сопротивление в массиве может опускаться до долей Омм. Все остальные образования высокоомны ($\rho > 1000$ Омм). Насыщение последних рассолами при соответствующих РТ-условиях в земной коре приводит к снижению сопротивлений на один-два порядка, но оно не может быть меньше сотен Омм. Необходимо также учесть, что в тектонически-стабильных регионах вода в земной коре находится не в свободном, а в кристаллизационно-связном состоянии.

Перекристаллизация пород при возрастании стадии метаморфизма приводит к увеличению сопротивлений. При этом графит остается устойчивым в термодинамических условиях земной коры и верхов мантии. Он может быть только растворен при процессах мигматизации (образование гранитов). Нужно добавить к этому замечательную способность углеродистых образований создавать пленочные структуры, как на микро, так и на макроуровнях. Это обеспечивает объемную связность проводников при их незначительной доле в общем объеме. Сопротивление существенно реагирует на характер и степень вторичных изменений с участием флюидно-газовых эманаций. В восстановительной среде происходит интенсивное восстановление углерода (до графита). Здесь должны наблюдаться чрезвычайно контрастные аномалии проводимости.

Из общего объема органогенных образований Земли, содержащих углерод, 95 % было накоплено в докембрии. Максимум приходится на средний-верхний протерозой. Оставшиеся 5 % приходятся на палеозой и более молодые образования. Поскольку основной объем земной коры сложен докембрийскими образованиями, углеродистые образования должны играть главенствующую роль в формировании ее геоэлектрического облика.

Таким образом, три независимых геофизических метода дают единую петрофизическую модель строения земной коры, где зависимости между физическими свойствами (V, ρ, σ) определяются достаточно понятными закономерностями истории их генезиса. Наиболее ярким свойством этой модели является наличие прослеживаемых на значительных расстояниях складчато-глыбовых структур, охватывающих верхнюю и среднюю часть земной коры. Горизонтальная расслоенность в этой модели характерна только для нижней части земной коры.

Выводы

По результатам обработки и интерпретации перечисленных выше полевых геофизических

работ построены следующие разрезы земной коры и верхней мантии:

сейсמודинамические разрезы волновых полей МОВ-ОГТ и ГСЗ, скоростная модель на основе сейсмотомографической обработки данных ГСВ, скоростная модель верхней части разреза (3–5 км) по сейсмотомографической обработке данных КМПВ, геологические разрезы по данным МТЗ, ГМТЗ и НМТЗ по параметру ρ Ом м по верхней части разреза (0–5 км) и глубинной части до глубины 50 км.

На основе обработки и математического моделирования гравимагнитных данных построены геоплотностные разрезы земной коры до глубины более 50 км.

Рассмотрена проблема их геотектонического толкования. Выявлены следующие общие для всех профилей закономерности:

- геоэлектрические границы достаточно контрастно отражают складчатые структуры древнего основания и прослеживаются на протяженных (сотни км) участках профилей;
- геоэлектрические границы совпадают с томографическими разрезами скоростей сейсмических волн ГСЗ и МОГТ и с рядом элементов сейсмических волновых разрезов и находят прямое и, практически, однозначное соответствие с гравитационным полем;
- Основным элементом геологического строения земной коры, по крайней мере, ее большей верхней части, являются запечатленные в ней складчатые структуры поперечником от 40 до 80 км и амплитудой до 20 км.