

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЗЕМНОЙ КОРЫ МЕТОДАМИ НИГ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ В КОМПЛЕКСНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ГЛУБИННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Гайдай Н.К.^{1,2}

¹ *Северо-Восточный государственный университет, Магадан*

² *Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН,
Магадан
e-mail: nataly_mag@rambler.ru*

Введение

Глубины недр недоступны прямым методам исследования, в то время как информация об их строении крайне важна для планирования поисковых работ. Об увеличении объема таких работ в последние годы вновь стали говорить достаточно много в связи с уменьшением количества россыпных месторождений и необходимостью смещения интересов в сторону поиска рудных месторождений.

На сегодняшний день наиболее достоверным источником информации о глубинном строении (за исключением результатов бурения) считаются результаты сейсмических исследований методом отраженных волн в модификации общей глубинной точки (сейсмический разрез МОВ-ОГТ, сокращенно - ОГТ) [1, 11]. Однако гетерогенная структура земной коры часто выступает осложняющим фактором при интерпретации сейсмических разрезов ОГТ. Для территории Северо-Востока России к тому же крайне недостаточно пройденных сейсмических профилей – на сегодняшний день их всего три (профиль ГСЗ Магадан – Усть-Среднекан, опорный геофизический профиль п-ов Кони – о. Врангеля и недавно пройденный опорный геолого-геофизический профиль 3-ДВ Сковородино – Томмот– Якутск – Сусуман – Мякит) [7, 10].

Условие однозначности интерпретации результатов экспериментальных наблюдений и ограниченность информации требует, таким образом, привлечения комплекса геолого-геофизических данных. В настоящей работе представлены результаты использования плотностного моделирования методами новой интерпретационной гравиметрии (НИГ) в комплексной интерпретации геофизических данных для северо-восточного участка опорного геолого-геофизического профиля 3-ДВ (2350 – 2700 км).

Методика исследования

Для построения плотностного разреза использованы НИГ, которые используют представления о преимущественно блоковой природе аномалий поля силы тяжести [2]. С использованием специальной программы, созданной в лаборатории геофизики СВКНИИ ДВО РАН [9], рассчитываются глубины квазигоризонтальных границ расслоения в земной коре и плотностные характеристики отдельных ее блоков. При этом детальность модели определяется целью проводимого исследования и точностью проведенной гравиметрической съемки. Модели глубинного строения, построенные методами НИГ, отвечают критериям Адамара [4]. Данные методы не являются в полной мере новыми. Как и другие методы, использующие гравитационные поля, они позволяют по гравитационным аномалиям оценить плотностную структуру земной коры, выделить зоны разрывных нарушений, определить мощность интрузивов и т.п. Методы НИГ относятся к блоку физико-геологических методов интерпретации аномалий поля силы тяжести [8]. Практика показывает эффективность их использования для решения региональных задач, связанных с оценкой плотностной структуры объектов Яно-Колымской складчатой системы [3, 12].

Для построения трехмерной плотностной модели земной коры методами НИГ на картах поля силы тяжести по полосам повышенных горизонтальных градиентов Δg фиксируется сеть разломов, ячейками которой выделяются проекции на поверхности плотностных неоднородностей-блоков. Источниками аномалий могут служить как структуры в общепринятом структурно-тектоническом понимании (горсты, грабены и т.д.), так и магматические, метаморфические геологические тела, тела комбинированной природы, оконтуренные в плане разрывными нарушениями [3]. Для каждого такого блока определяются глубины его нижнего и верхнего ограничений.

Полученные значения глубин нижних ограничений аномалообразующих объектов позволяют оценить рельеф плотностной границы расслоения в земной коре. В области, лежащей выше данной границы, при переходе от одного блока к другому (по латерали) возможны изменения плотности отдельных блоков. Вещество здесь находится в неоднородном состоянии (по плотностным характеристикам), и эта часть земной коры представляет собой гравитационно неоднородную среду. В области, расположенной ниже устанавливаемой моделированием плотностной границы расслоения, разница в плотности соседних блоков не устанавливается, т.е. по плотностным характеристикам вещество земной коры в данной области пространства находится в квазиоднородном состоянии.

Вещество недр подвергается глубоким метаморфическим преобразованиям различной интенсивности и природы, и данная граница, вероятно, представляет собой фронт метаморфизации вещества земной коры. Наиболее вероятной причиной образования плотностной границы расслоения в земной коре вероятно следует считать воздействие на вещество недр теплового потока различной интенсивности, который собственно и привел к преобразованию вещества. Кроме этого, вероятной причиной формирования плотностной границы расслоения в земной коре одновременно могут выступать и другие физико-химические процессы, в том числе тектонические.

Полученные мощности аномалообразующих блоков используются далее собственно для построения трехмерной плотностной модели земной коры. Земная кора представляется в виде системы пятигранных многослойных треугольных призм. Каждая призма характеризуется набором параметров – пространственными координатами ее узлов, мощностью отдельных ее слоев (интерпретирующих геофизические слои земной коры), а также аномальным значением плотности (скачком плотности) $\Delta\sigma$. С помощью программы, разработанной в лаборатории региональной геофизики СВКНИИ ДВО РАН (авторы – О. Сахно и Ю. Забываев) подбираются указанные выше параметры элементарных ячеек. Контролем удовлетворительности подобранных параметров является совпадение теоретического гравитационного поля (рассчитанного по модельным параметрам элементарных ячеек) с наблюдаемым.

Определение абсолютных значений плотности пород основывается непосредственно на информации о плотности горных пород на поверхности. Плотность пород на глубине оценивается с учетом среднего градиента плотности, который для континентальных районов Магаданской области

составляет $13.8 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3 \cdot \text{км}}$ [3]. Под воздействием повышенных температуры и давления вещество

земной коры преобразуется в новые, не свойственные поверхностным образованиям модификации. Поэтому петроплотностной интерпретационной задачей в этом случае является лишь самое грубое определение абсолютных значений плотности на глубине с целью последующего разделения объектов магматической и метаморфической природы на образование ультраосновного, основного и среднего составов. Именно такой принцип используется нами для «вещественного» истолкования петроплотностных срезов и разрезов.

Обсуждение результатов

Параметры элементарных ячеек, моделирующих земную кору, позволили построить разрез земной коры вдоль опорного профиля 3-ДВ [5].

Вначале опорный профиль идет практически вдоль одной изолинии поля силы тяжести, что фактически означает его положение на границе отдельных блоков земной коры, находящейся в непосредственной близости от Берелехского разлома (участок 2335-2370 км), а далее профиль следует вдоль Дебинского разлома (2370-2390 км). Характер гравитационного поля на данном участке также указывает на наличие здесь разлома (сеть разломов на гравитационных картах отображается полосами повышенных горизонтальных градиентов [3]).

Результаты интерпретации аномалий поля силы тяжести показывают резкое погружение плотностной границы раздела в районе Берелеха (до глубины 50 км на 2335 км профиля, до глубины 80 км – к северу от профиля, в центре погруженного блока). Максимальное погружение плотностной границы расслоения устанавливается северо-западнее от зоны пересечения Берелехского и Чай-Юринского разломов. Именно здесь профиль проходит вдоль Чай-Юринского разлома, разделяющего две тектонические структуры: Аян-Юряхский антиклинорий и Иньяли-Дебинский синклинорий. Вероятно, плотностная граница отражает глубину зоны влияния данного разлома.

На участке 2375-2425 км наблюдается максимальный подъем плотностной границы вдоль рассматриваемого участка профиля 3-ДВ (до 11-13 км). Здесь профиль идет вдоль Дебинского разлома, в этой области на поверхности картируются юрские отложения. Далее профиль входит в

зону батолитового пояса и на протяжении от 2425 до 2525 км профиля наблюдается погружение плотностной границы до глубин 20-40 км. При этом, как и ранее, наибольшее погружение устанавливается в зоне пересечения разломов различной направленности: Дебинского северо-западного простирания и Хейджано-Мылтинского юго-восточного простирания (на 2450 км), а также Дебинского, Умарского (северо-западного простирания) и Правоорутуканского широтного направления (на 2500-2514 км).

Относительно резкое погружение плотностной границы устанавливается и в области 2600-2615 км профиля. С нашей точки зрения, именно данная область представляет собой восточную границу Паутовского поднятия.

Сопоставление энергетического и плотностного разрезов для участка профиля от 2350 км до 2700 км показывает, что верхний наиболее энергетически насыщенный слой земной коры располагается в структурной модели от дневной поверхности до глубины порядка 15 км в земной коре [6]. Подошва этого слоя прослежена по энергетически сильному отражающему горизонту, ниже которого вдоль всего разреза наблюдается однородный, энергетически прозрачный слой мощностью в среднем около 10 км. Данный слой прозрачности отвечает волноводу Конрада. Верхний слой земной коры наиболее тектонизирован, о чем говорит многочисленное количество отражающих площадок, наблюдаемых в данной области пространства. Слой включает в себя многочисленные надвиги, взбросы мезозойско-кайнозойского возраста. Как показывает анализ положения гипоцентров землетрясений, именно в этом слое содержится наибольшее число гипоцентров близповерхностных землетрясений. Сравнение энергетического и плотностного разреза показало, что подошва верхнего слоя коры, намеченная по энергетическому разрезу, практически совпадает с плотностной границей расслоения в земной коре, установленной плотностным моделированием (за исключением зон тектоно-магматической активизации, где плотностная граница расслоения опускается значительно ниже) [5].

Результаты комплексной интерпретации рассматриваемого участка профиля позволяют предположить, что территория, по которой проходит северо-восточный участок профиля 3-ДВ, может быть разбита на три принципиально отличающиеся по характеру глубинного строения и поведению отражающих площадок, области.

В *первой* области в районе г. Сусуман плотностным моделированием устанавливается зона разуплотнения земной коры (средняя плотность 2.58-2.66 г/см³). Четко выделяются границы гранитоидных массивов (Чьорго, Негояхский, Маяк, Трубный, Б.Пороги, Хапчагай, Уаза-Ина, Б.Анначаг). В целом, в данной области земная кора сильно гранитизирована. Можно предположить, что уже на глубине 2 км область пространства, расположенная левее Дебинского разлома, а также в северной части правее Дебинского разлома представляет собой единый магматический очаг, выступавший в свое время резервуаром для объема магмы, внедрившейся в верхнюю часть земной коры. Данный резервуар и являлся источником вещества для образовавшихся батолитов. Область отличается повышенным количеством слоев отражающих площадок и практически горизонтальным характером их расположения.

Вторая область выделяется севернее Паутовского разлома (Среднеканская ветвь Иньяли-Дебинского синклиория), и устанавливается как область уплотнения земной коры (средняя модельная плотность пород 2.72-2.74 г/см³) с точечным внедрением небольших по площади и мощности интрузивов. На южном контакте гранитоидного интрузива Маяк устанавливается аномальная зона уплотнения 2.72-2.80 г/см³, причиной которой являются тела коллизионных габброидов.

Третья область – собственно Паутовский горст (Оротуканское поднятие). Определяется как область разуплотнения. Четко выделяются границы нескрытых на поверхности Приискательского и Паутовского гранитоидных массивов (средняя модельная плотность (2.61-2.67 г/см³), разделенных областью триасово-юрских отложений сравнительно небольшой мощности (7-8 км) со средней модельной плотностью пород 2.70-2.72 г/см³. Западная граница области оконтуривается Умарским, Паутовским и Долинным разломами.

Однако, результаты комплексной интерпретации ставят вопрос о смещении данной границы левее относительно Умарского разлома, либо здесь уместнее вести речь не о разломе, как о линии на карте, а о зоне разрывных нарушений шириной порядка 7-16 км. В третьей области наблюдается увеличение хаотичности в расположении отражающих площадок.

Замечено, что все зоны разуплотнения, установленные плотностным моделированием и прослеживающиеся на глубину (в районах 2350, 2440 и 2615 км профиля), на энергетических разрезах отражаются провалом (опусканием) ступеней отражающих площадок в верхней части

земной коры (до 20 км), а в ряде случаев – их разрывом (на глубине 40 км на 2350-м км, на глубине 28-30 км на 2440 км, на глубине 15 км на 2615 км) – областями прозрачности. Данные зоны можно интерпретировать как участки земной коры, подвергшиеся длительному и, вероятно, неоднократному воздействию повышенного теплового потока, вызвавшего метаморфизацию глубинного вещества и перевод его в квазигомогенное состояние. Эти же зоны прослеживаются и на плотностном, и на геоэлектрическом разрезах.

Анализ положения гипоцентров землетрясений в земной коре показывает, что гипоцентры, расположенные в интервале глубин от 20 до 35 км, приурочены к системам долгоживущих сквозькоровых региональных разломов: Хейджано-Мылтинской зоне и пересечению Умаро-Дебинской (северо-западного простирания) с Правооротуканской (северо-восточного простирания). Протяжённость этих зон разломов имеет порядок сотен километров, глубина заложения – не менее 40 километров [5].

Выводы

Анализ плотностной модели земной коры, построенной для северо-восточного участка опорного геолого-геофизического профиля 3-ДВ (2350 – 2650 км), в совокупности с результатами интерпретации сейсмических разрезов ОГТ (частотно-энергетических атрибутов сейсмического разреза), а также геоэлектрической моделью земной коры позволил сделать вывод о неоднородном строении верхней части земной коры северо-восточных (Среднеканская ветвь Иньяли-Дебинского синклиория (ИДС)) и юго-западных, южных (осевая часть ИДС, Балыгычанское поднятие (БП)) структур территории. Сочленение этих структур совпадает с гравитационным градиентом северо-западного простирания мощностью 15-20 км. На основании представленных материалов границу между ИДС и БП, проходящую по действующей сегодня тектонической схеме региона Кузнецова В.М. по Право-Оротуканскому разлому, разделяющему юрские (ИДС) и триасовые (БП) осадочные образования, следует провести по Паутовскому разлому, который фактически является блокоразграничивающим (ПК 2600).

Список литературы:

1. Боганик Г.Н., Гурвич И.И. Сейсморазведка. Тверь: АИС, 2006. 744 с.
2. Ващилов Ю.Я. Новая интерпретационная гравиметрия – вместо и вместе с глубинными сейсмическими исследованиями. Статья 1. Методические основы новой интерпретационной гравиметрии // Вестник СВНЦ ДВО РАН. - 2005. - №3. - С. 2-16.
3. Ващилов Ю.Я., Гайдай Н.К., Сахно О.В. Трёхмерная глубинная плотностная модель Паутовского горста и ее геологическая интерпретация// Тихоокеанская Геология, том 27, №4, 2008. – С.22 – 38.
4. Гайдай Н.К. Новая интерпретационная гравиметрия. Понятия. Возможности. Перспективы использования// Вестник Северо-Восточного государственного университета. Спецвыпуск. - Магадан: изд-во СВГУ, 2010. - №13. - С. 10-14.
5. Гошко Е.Ю., Гайдай Н.К. Связь гипоцентров глубоких землетрясений и долгоживущих сквозькоровых разломов Иньяли-Дебинского синклиория вдоль опорного геофизического профиля 3-ДВ Материалы XI Международной сейсмологической школы. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2016. С. 114-116.
6. Гошко Е. Ю., Ефимов А. С., Сальников А. С. Современная структура и предполагаемая история формирования земной коры юго-востока Северо-Азиатского кратона вдоль опорного профиля 3-ДВ / Геодинамика и тектонофизика, 2014 г. № 5 (3), с. 785–798.
7. Кузнецов В.Л., Сальников А.С. Старосельцев В.С., Сурков В.С., Липилин А.В., Еманов А.Ф., Соловьев В.М. Строение земной коры в сечении опорного профиля 2-ДВ по данным ГСЗ // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. №2, СНИИГГиМС, Новосибирск, 2010. С. 21–30.
8. Петрищевский А.М. Три образа мышления и три подхода к интерпретации гравитационных аномалий // Региональные проблемы. 2014. Том 17, №2. С.5-17.
9. Сахно О.В. Вычисление гравитационного эффекта Δg от конечного числа треугольных призм // Геофизические исследования блоково-слоистой структуры литосферы. Магадан, 1983. С. 110-117.
10. Суворов В.Д., Мельник Е.А., Сальников А.С. Строение верхней части земной коры по данным КМПВ вдоль профиля 3-ДВ (Сковородино-Томмот-Якутск-Сусуман-Мякит) // Геофизические методы исследования земной коры: Материалы Всероссийской конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Пузырева (Новосибирск, 8–13 декабря 2014 г.). С. 264-268.
11. Турчков А.М. Метод отраженных волн в модификации общей глубинной точки в инженерной сейсморазведке // Технологии сейсморазведки. – №2. 2013. С. 98-111.
12. Хасанов И.М., Гайдай Н.К., Ганов А.П., Ткачев А.В. Особенности глубинного строения Аган-Утеснинского рудного узла по геофизическим данным // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН, 2017, №1, с.32-43.