

## ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СТРОЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ ОНЕЖСКОЙ СТРУКТУРЫ

Н.В. Шаров<sup>1</sup>, Э.В. Исанина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт геологии КарНЦ РАН, Петрозаводск, Россия;*

<sup>2</sup>*ФГУП "ВНИИГеофизика, Москва, Россия*

**Введение.** Онежская тектоническая структура, уникальна в геолого-тектоническом и минерагеническом отношении, отчетливо выражена в аномальных физических полях, в современных и палеосейсмических структурах. Она располагается в пределах региональной магнитной аномалии, являющейся одной из самых обширных и интенсивных аномалий в Карельской части щита [1]. Природа проводимости людиковийской области разреза связана с шунгитоносными породами, проводимость же более глубоких горизонтов еще требует своего объяснения. Гравитационное поле, как и другие геофизические поля, отражает ярко выраженную северо-западную направленность чередующихся складчатых структур. Породы, слагающие Онежскую структуру, обладают избыточной плотностью по сравнению с породами основания ( $\sigma_{изг} \approx 0,2 \text{ г/см}^3$ ). В связи с этим ядра антиклинальных структур, в которых уменьшена мощность осадочно-вулканогенных пород, выделяются отрицательными аномалиями, а синклинальные структуры – положительными. Тепловое поле Онежской структуры по экспериментальным данным ниже фонового для щита и составляет в среднем  $\sim 15 \text{ мВт/м}^2$  [1]. Это связывается с теплофизическими параметрами пород основного состава, слагающих мощные вулканогенные и интрузивные толщи геологического разреза структуры. Учитывая данные о региональных геофизических полях, основной геофизической особенностью Онежской структуры следует считать наличие комплексной геофизической аномалии, характеризующей зону древней магматической активизации. Здесь отмечается понижение мощности земной коры, теплового потока, сопротивления, повышенные значения регионального магнитного поля.

Изучение глубинного строения Онежской структуры проведено на основе обобщения данных глубинных сейсмических исследований МОВ, ОГТ, ГСЗ, МОВЗ, а также их совместной интерпретации. Обширный сейсмический материал получен в 1975-2002 гг. в основном ГП "Невскгеология", ФГУ ГНПП "Спецгеофизика", а также Западным геофизическим трестом (ЗГТ) и ЛГИ. В предлагаемой статье рассматриваются результаты сейсмических (МОВ, ОГТ, ГСЗ, МОВЗ) и других геофизических данных, что при таком комплексном подходе позволяют выявить новые детали глубинного строения земной коры региона.

**Сейсмологические исследования МОВЗ и ГСЗ.** На Онежской структуре с 1980 по 2002 гг. ГП "Невскгеология" выполнены профильные региональные работы и детальные исследования методом обменных волн от землетрясений (МОВЗ). Общая протяженность профилей более 1500 км (рис. 1, см. вкл.), часть профилей ( $\sim 900 \text{ км}$ ) переобработана по новым компьютерным технологиям. Методика исследований была стандартной для региональных исследований МОВЗ: в точке наблюдения устанавливались на жестком основании в яме глубиной 1,0-0,7 м три сейсмографа, ориентирование по странам света – NS, EW и один вертикальный. Расстояние между точками регистрацией составляли 3-5 км за исключением участков гидросети, не позволяющих такую расстановку выполнить.

Необходимо отметить, что при проведении сейсморазведочных работ МОВ-ГСЗ (1975) на профиле Ладожское озеро-Питкяранта-Сямозеро-Повенецкий залив-Белое море [2] данных о мощности земной коры не было получено, т.к. годографы были не длиннее 60 км. Сведения о глубинном строении всей земной коры Онежской структуры от 1,2 км до 50 км впервые получены по материалам МОВЗ. Особый интерес для исследователей глубинного строения данного структурного блока представляет участок земной коры между Кондопож-

ской и Лижемской зонами, где от глубин 26-27 км до глубин 43-44 км не прослежено ни одной сейсмической границы. Юго-западное ограничение этого участка характеризуется высокой обменоспособностью среды на уровне подошвы земной коры, что, возможно, связано с наличием преобразований земной коры под влиянием близко расположенного мантийного прогретого вещества.

Так как обменные волны от землетрясений проходят снизу вверх, на поверхность волновода, который предполагается под Онежской мульдой, ввиду малой мощности этого слоя (300-500 м) обменные волны от поверхности с  $H = 2,2-3,0$  км появляются спародически. Первая устойчивая сейсмическая граница построена на глубинах 5-8 км, число слоев в разрезе изменяется от 2 до 7.

ФГУ "НПЦ Недр" в 2007-2009 годах провело бурение на окраине деревни Улитина Новинка Кондопожского района Республики Карелия Онежской параметрической скважины (ОПС) до глубины 3500 м. В процессе бурения изучался керн, а также выполнена комплексная интерпретация материалов ГИС и ВСП [3]. В интервале 2751-2944 м была вскрыта толща каменной соли. Обнаружение солей оказалось неожиданным, т.к. находятся они в основании нижнепротерозойской Онежской структуры и перекрывают мигматизированные гранито-гнейсы архейского фундамента. Сейсмический профиль МОВ-ГСЗ Сямозеро-Повенецкий залив (рис. 1, см. вкл.) расположен в 17 км к северу от участка бурения скважины. Результаты бурения в основном подтвердили прогнозную геолого-геофизическую модель строения региона [2].

На участке профиля Сямозеро-Повенецкий залив была предпринята попытка сейсмотомографической обработки годографов 1975 г. Ввиду малой длины годографов и слабого проникания лучей, разрез представляет собой ячеистую структуру с редкими лучевыми трубками. Западная часть сейсмотомографического разреза близка к скоростной модели, полученной по наблюдаемым годографам. Восточная (собственно Онежская структура) от ПВ9 и до ПВ12 не отражает мнение авторов отчета [4] о наличии высокоскоростного горизонта (и даже двух) в верхней части разреза (от 0,6 м до 2,5 км), т.к. в первых вступлениях не обнаружено волн со скоростями более 5,6-5,7 км/с. Возможно, высокоскоростные волны близко расположены к волнам с этими скоростями, а сам слой маломощный, длина годографа мала. Но это предположения, заставляющие пересмотреть первичный материал МОВ, ГСЗ и вновь вернуться к современной обработке сейсмоматериала. Планируется выполнить площадные сейсмические исследования в районе Онежской параметрической скважины.

**Сейсмические исследования ОГТ и ГСЗ.** Северный участок геотраверса 1-ЕВ, отработанный УГПП "Спецгеофизикой", пересекает несколько крупных тектонических структур Фенноскандинавского щита и зона его сочленения с Русской плитой (рис. 1, (см. вкл.)). На участке протяженностью 1000 км этого геотраверса между Петрозаводском и Москвой проведены комбинированные исследования методами общей глубинной точки (ОГТ), основанном на регистрации близвертикальных отражений и глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ), регистрирующего преломленные и закритические отраженные волны. При этом использовалась одна и та же регистрирующая аппаратура, что позволило объективно, сравнить особенности полей разных типов волн [1].

Система наблюдений ГСЗ состояла из 8 пунктов взрыва, расположенных на расстоянии 80-120 км друг от друга. Взрывы производились в скважинах. В результате получены записи до расстояний от источника в 250-300 км, что позволило зарегистрировать волны от подошвы земной коры и верхов мантии до глубины 70 км. Среди зарегистрированных волн на удалениях от источника 0-200 км четко выделяются первые вступления (волна  $P_g$ ) с увеличивающейся с расстоянием кажущейся скоростью от 5,8-6,0 до 6,8-7,2 км/с. На больших удалениях с резким изломом в первые вступления выходят преломленные волны от границы М (волны  $P_n$ ) со скоростью 8,0-8,4 км/с. По доминирующим скоростям волна  $P_g$  делятся на три основные ветви. На расстоянии от источника 0-100 км кажущиеся скорости изменяются от 5,8 до 6,3 км/с, затем в первые вступления выходит волна  $K_1$  со скоростью 6,4-6,7 км/с, а на удалениях 150-200 км волна  $K_2$  с кажущейся скоростью 6,5-6,8 км/с. Смена волн происхо-

дит достаточно плавно [5]. В последующей части записи наиболее яркими являются отраженные волны от границы М (волны PmP). Кроме них прослеживаются и достаточно интенсивные отраженные волны от границ внутри коры (волны  $K_1$ ,  $K_2$ ) и внутри верхней мантии ( $M_1$ ). Наблюдается также множество коротких осей синфазности с кажущимися скоростями, типичными для коры от 6,0 до 6,7 км/с, а также с аномально высокими скоростями (до 8-9 км/с). Последние являются, очевидно, отражениями от крутонаклонных отражающих границ [5]. Построение скоростного разреза по материалам ГСЗ осуществлялось Н.И. Павленковой методом лучевого моделирования: для некоторой стартовой модели рассчитывались лучи и годографы отраженных и преломленных волн, которые сравнивались с наблюдаемыми годографами. В случае их расхождения в модель вносились поправки, и снова решалась прямая задача. Для окончательной модели расхождения между наблюдаемыми и расчетными годографами не превышают 0,1 с [5].

Сейсмотомографическая модель 2D по северному участку геотраверса 1-ЕВ Кемь-Тихвин выполнена в системе Firstomo. Скоростная модель построена как результат кинематической интерпретации времен первых вступлений сейсмических волн ГСЗ. В обработке участвовало 700 пар "источник-приемник" с максимальным удалением 260 км. При этом для ПВ 10-10А, 7, 6 наблюдения имелись начиная с малых удалений, для ПВ 8-8А – наблюдения только с больших удалений. Для построения двумерной модели была выбрана линия продольного профиля. Переход от 3D (прямоугольных) координат источников и приемников в двумерные профильные координаты осуществлялся следующим образом: положение источников – спроецировано на линию спрямления профиля ГСЗ; все расстояния "источник-приемник" сохранялись. За нулевую координату профильной системы координат принято положение ПВ 10.

**Сопоставление разрезов ОГТ, ГСЗ, МОВЗ и томографии.** В последние годы в связи с возрастающим объемом глубинных исследований комплексом методов ОГТ, ГСЗ, МОВЗ, сейсмотомография активно обсуждается одна из актуальных проблем региональной геофизики – сопоставимость и достоверность получаемых данных о глубинном строении земной коры и верхней мантии. Обработка осуществляется с использованием P-S- и PS-волн широкого класса событий: далеких и близких землетрясений, а также промышленных и специальных взрывов, что позволяет изучить до глубины 100 и более км в едином ключе строения консолидированной коры и верхней мантии. Интерпретация каждого вида данных многоволновой сейсмоки имеет свои методические особенности и дает представление о различных физических параметрах изучаемой среды.

Сопоставление разрезов ОГТ и ГСЗ показывает, что тонкослоистая структура нижней коры видна на разрезах ОГТ, а при ГСЗ она может быть за пределами разрешенности метода. Поверхность М в ОГТ характеризуется сменой гетерогенного поля волн на область рассеянных площадок. Природа неоднородности в мантии может быть иной, чем в земной коре. Возможно, верхняя мантия анизотропна под границей М и там присутствуют зоны повышенной и пониженной скорости. Видимые отсутствия внутрикоровых границ, также как и их размытость по данным ОГТ в большей мере может быть связана со сложным рельефом границ (наклоном границ, изменением отражающих свойств, поглощения и др.), а также значительным ослаблением уровня сигнала с больших глубин. Малые базы суммирования по ОГТ не позволяют уверенно выделять глубинные границы в таких сложных геологических зонах, а зоны с большими углами наклона не могут быть выделены уже методически. Данные ГСЗ на близкритических и закритических отражениях (а также с учетом низких частот) по отношению к данным ОГТ на докритических отражениях являются более интегральными (осредняющими), но в то же время более достоверными, как при определении структуры границ М, так и средней скорости в земной коре и граничной скорости по поверхности М. Сочетание методов ОГТ и ГСЗ очень важно для понимания строения земной коры и верхней мантии региона. Их не надо противопоставлять, они дополняют друг друга.

Учитывая трехкомпонентную современную цифровую регистрацию сейсмических сигналов в широком динамическом диапазоне (130 дБ) и возможность расстановки станций с

помощью спутниковой навигации, исследования МОВЗ-МРС (метод разведочной сейсмологии) приобрели весьма универсальную сейсмическую направленность. Появилась реальная возможность одновременного изучения строения земной коры от 0,4-0,5 км до верхов мантии (100 и более км) с помощью широкого спектра сейсмических источников (специальные взрывы, карьерные и шахтные взрывы, пневмоизлучатели в акватории, близкие и далекие землетрясения, фоновые микросейсмические помехи). К сожалению, часто сравниваются просто глубинные разрезы, отражающие статическую картину. Это происходит по причине отсутствия каких-либо динамических или анизотропных характеристик среды на разрезах ОГТ, в то время как разрезы МОВЗ-МРС характеризуют геопространство как статически (положение и количество границ, блоковость, положение зон разломов практически любых углов наклонов, их трассировка на глубину и определение современной сейсмической активности), так и динамически – состояние напряженности, жесткость контактов, анизотропные свойства массивов, трещиноватость и т.д. Безусловно различная природа отраженной продольной (ОГТ) и проходящей обменной (МОВЗ) волн создают довольно часто (особенно в сложнопостроенном геологическом пространстве) рисунок "случайных" несовпадений. На деле оказывается, что значительный интерес представляет как совпадение границ, так и их расхождение, а совместный анализ результатов этих методов позволяет значительно приблизиться к строению и истории развития изучаемого геопространства.

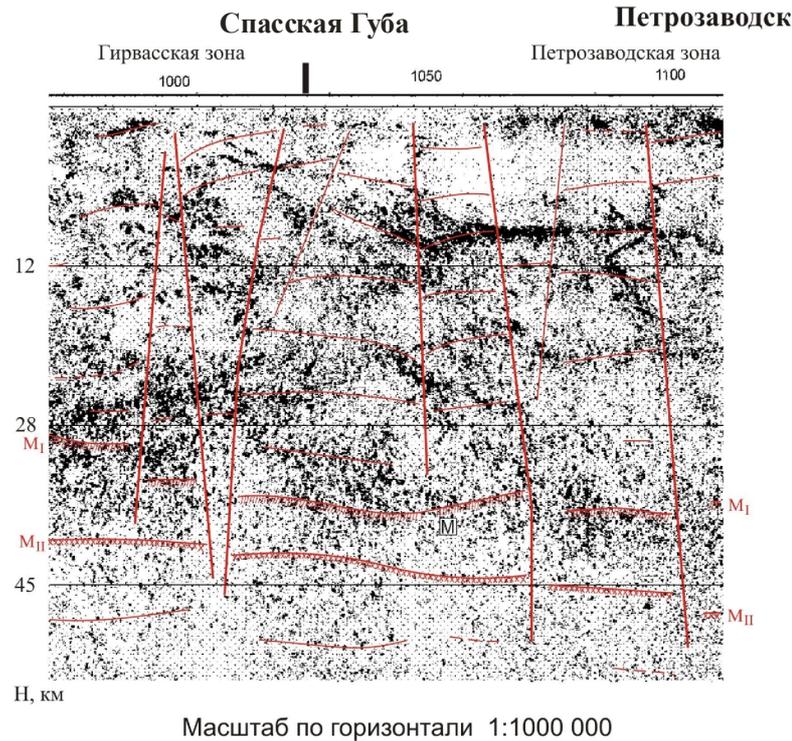
Приведенные на рис. 2 (см. вкл.) сейсмические разрезы дают разные изображения земной коры. Разрез ОГТ (рис. 2а, см. вкл.) описывает среду не по сейсмическим скоростям, а по числу и свойству отдельных отражающих элементов, по характеру их распределения в пространстве, по тонкой горизонтальной и вертикальной неоднородности среды. На разрезах ОГТ отмечаются "мутные" и "прозрачные" участки. По смене гетерогенности выделяются основные сейсмические границы, они чаще всего крутонаклонные, но имеются и субгоризонтальные границы. Среди последних наиболее протяженные границы прослеживаются в нижней коре на глубине 30 км. Граница М редко представлена четкими отражениями, обычно это граница между гетерогенной нижней корой и практически прозрачной верхней мантией. На отдельных участках профиля вообще невозможно выделить эту границу [5].

Разрез ГСЗ (рис. 2б, см. вкл.) представляет кору в виде скоростного разреза и нескольких субгоризонтальных границ [5], из которых подошва коры, граница М, является наиболее стабильной. Скоростной разрез в верхней коре спокойный, но существенно неоднородный в ее низах: мощность слоя со скоростями более 7,4 км/с меняется вдоль профиля от 0 до 20 км. Скорость вдоль границы М меняется от нормальной 8,0-8,1 км/с в центральной части профиля (Русская плита) до аномально высокой в северо-западной его части (Фенноскандинавский щит).

Сейсмотомографический разрез (рис. 2в, см. вкл.) более дифференцированно характеризует верхнюю часть коры. На разных участках профиля скорость продольных волн изменяется от 5,1 до 6,3 км/с до глубины 10 км. Средняя и нижняя части земной коры освещены сейсмическими лучами менее надежно по сравнению с разрезом ГСЗ (рис. 2б, см. вкл.).

В 1985 году ГП "Невскгеология", выполнила работы МОВЗ на профиле Мяндусельга-Вознесенье. Фрагмент этого профиля (Медвежьегорск-Петрозаводск) представлен на сводном разрезе только в статическом варианте (ввиду отсутствия динамических характеристик в материалах ОГТ). В 2001 году по этому же участку пройден геотраверс ОГТ 1-ЕВ ФГУ УГПП "Спецгеофизика". Сопоставление построенных разрезов представлено на рис. 3. На сводном разрезе по МОВЗ видна зона перехода кора-мантия, ограниченная поверхностями  $M_I$  (30-38 км) – кровля зоны перехода и  $M_{II}$  (40-46 км) – подошва зоны перехода, в то время как на разрезе ОГТ индексом М обозначена область, не имеющая параметрических данных и совпадающая то с границей  $M_{II}$  (север), то с  $M_I$  (юг). В земной коре прослежены различные варианты как совпадений, так и различий положения границ. По мнению авторов, совпадающие границы – это границы со значительными перепадами скорости, так называемые "жесткие" границы. Блоки и зоны, выделяемые по комплексу волновых признаков в МОВЗ в материалах ОГТ либо весьма размыты, либо не обозначаются вовсе, что связано с невозмож-

ностью в ОГТ выделения границ и зон с углами наклона более  $45^\circ$ ; в то время как в МОВЗ такие границы и зоны выделяются по целому комплексу признаков: топография границ, дифференцированная расслоенность, частотные и амплитудные спектры волн, обменоспособность среды и поляризационные свойства волновых полей.



**Рис. 3.** Совмещенный глубинный разрез ОГТ (ФГУ УГПИ "Спецгеофизика") и МОВЗ (ГП "Невскгеология") по участку геотраверса 1-ЕВ

В результате анализа совместных материалов МОВЗ, ОГТ, ГСЗ и томографии можно утверждать, что только комплексный подход к построению глубинных сейсмогеологических разрезов позволит приблизиться к пониманию тектонических процессов, как в современной земной коре, так и в протокоре. Взаимно выигрышная комбинация совместного использования Р-, S-, PS-волн. Компоненты поперечной и обменной волн позволяют определить иные свойства земной коры, чем волны сжатия-растяжения. Но, ни один из этих компонентов в отдельности не позволяет дать объективную картину глубинного строения литосферы. Однако сочетание этих компонентов позволяет извлечь ту комплексную, более достоверную информацию, которая не доступна каждому из них по отдельности. Следовательно, данные различных сейсмических методов должны использоваться в комплексе для взаимного дополнения, информации о геологическом строении среды.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Глубинное строение и сейсмичность Карельского региона и его обрамления / Под ред. Н.В. Шарова. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. – 353 с.
2. Шаров Н.В., Клабуков Б.Н., Рычанчик Д.В. Геолого-геофизическая модель строения земной коры Онежской структуры // Геофиз. жур. – № 3. – 2008. – С. 132-139.
3. Горбачев В.И., Есипко О.А., Неронова И.В., Шахрай А.В. Результаты геофизических исследований в Онежской параметрической скважине // Связь поверхностных структур с глубинными. – Ч. I. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. – С. 142-144.
4. Кокорина Л.К., Мурова Э.В., Дворецкая Л.М. Отчет о региональных сейсморазведочных работ в Пряжинском, Кондопожском и Медвежьегорском районах Карельской АССР в 1975 г. – Л.: Фонды Карлгеолком, 1976. – 150 с.

5. Сулейманов А.К., Заможняя Н.Г., Павленкова Н.И., Комбинированные сейсмические исследования методами ОГТ и ГСЗ Восточно-Европейского кратона (профиль 1-ЕВ) // Модели земной коры и верхней мантии по результатам глубинного сейсмопрофилирования. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2007. – С. 229-232.

УДК 552.14.001 (470.32)

## МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАНТАНОИДОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ОСАДОЧНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

В.А. Шатров, Г.В. Войцеховский

*Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия*

Лантаноиды широко применяются для решения ряда принципиальных вопросов геологии, в то же время, до настоящего времени отсутствует единый методологический подход их применения для изучения осадочных и метаосадочных образований.

Распределение лантаноидов изучаются с помощью спектров, нормированных к выбранному стандарту, парных отношений и групп редких элементов. Для осадочных пород широко применяется в качестве стандарта среднее содержание лантаноидов в глинах платформ или сланцах (NACC, PAAS, ESC, RPSC), реже – в хондрите. И хотя принципиальные различия в распределении лантаноидов во всех предложенных стандартах отсутствуют, предлагается нормировать к более представительной пробе – генеральной пробе глин и глинистых сланцев Русской платформы (RPSC) [1, 2]. Применение в качестве стандарта хондрита мало информативно, при этом отсутствует единый стандарт хондрита, используются сводки разных лет и авторов. Для успешного решения геологических задач предпочтительнее применение всего состава лантаноидов, то есть приоритет группировок редких земель по отношению к парным отношениям. На практике это реализуется построением бинарных и треугольных диаграмм, позволяющих учитывать особенности полного спектра лантаноидов, быть предельно краткой его характеристикой, одновременно сравнивать между собой большое количество результатов [3].

В геохимической литературе лантаноиды подразделяются на группы: 1) **цериевые и иттриевые**, состав групп определяется произвольно и по-разному: граница проводится после Sm, Gd, Tb; ряд авторов включают в состав иттриевой группы иттрий; 2) **легкие и тяжелые**, группировка не имеет однозначного определения, часто выделяется промежуточная группа **средних**. Трудность группировок обусловлена отсутствием однозначной химической и кристаллохимической границы между цериевыми и иттриевыми землями, которая сдвигается в различных геохимических процессах, абсолютное положение границы зависит от вида соединения и температуры кристаллизации. Отсутствие единого методологического подхода приводит к несопоставимости опубликованных цифровых значений большинства коэффициентов между собой.

Важным вопросом является соотношение дифференциации и гомогенизации составов редких земель при накоплении осадочных образований, механизм фракционирования лантаноидов в зоне гипергенеза. С.Р. Тейлор, С.М. Мак-Леннан [4] предполагают поступление лантаноидов в осадки практически в тех же концентрациях, в которых они были в выветриваемых породах суши. Различия в распределении редких земель обусловлены процессами эффективного перемешивания и усреднения составов магматических и метаморфических пород, обнажающихся на поверхности континентов в процессе их разрушения. В то же время, авторы особо отмечают наличие дифференцированных осадков, отличающихся характером распределения лантаноидов, не исключают возможность слабого фракционирования