

УДК 550.34

СКОРОСТНЫЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ ЮГО-ВОСТОЧНОГО БЕЛОМОРЬЯ ПО ДАННЫМ МЕТОДА МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

© 2013 г. В.И. Французова, В.И. Макаров, К.Б. Данилов

Институт экологических проблем Севера УрО РАН, г. Архангельск, Россия

Описаны результаты исследования земной коры с помощью микросейсмических колебаний. Замеры производились на Онежском полуострове вдоль профиля Кянда–Ворзогоры. Обработка зарегистрированных данных выполнена по методу микросейсмического зондирования (ММЗ). Полученный геофизический разрез согласуется с результатами ранее проведенных работ и дополняет имеющуюся геофизическую информацию о структуре земной коры исследуемого участка.

Ключевые слова: микросейсмическое зондирование, земная кора, Онежский полуостров.

Введение

Одним из давних способов познания глубоких слоев Земли, недоступных прямому “прощупыванию”, является изучение их скоростных характеристик. На этом пути сделан ряд известных фундаментальных открытий, которые, однако, не являются исчерпывающими. Решение тех или иных задач порождает новые вопросы, необходимость разработки новых средств и технологий, повышения разрешающей способности и точности глубинного просвечивания. Принципиально важным при этом является обеспечение доступности новых методов и снижение стоимости их применения.

Для Севера Русской плиты, области закрытой и труднодоступной, решение названных задач особенно важно, поскольку в ее пределах геофизическими методами исследовались в основном территории, перспективные на углеводороды и алмазы, какими являются ее северная и западная части. Остальная часть территории изучена в малой степени и крайне неравномерно. Как правило, использование традиционных и довольно дорогих геофизических и, в первую очередь, сейсмических методов (например, ГСЗ) не обеспечивает получения данных о строении исследуемой среды с хорошим разрешением.

Для получения достоверных данных о структуре земной коры весьма перспективными представляются исследования методом низкочастотного сейсмического зондирования (ММЗ) [Горбатиков, 2006; Горбатиков, Степанова, Кораблев, 2008; Горбатиков, Цуканов, 2011], который позволяет получить более точную информацию о строении геологической среды. Кроме того, использование поля микросейсм, постоянно присутствующего на земной поверхности, делает названный метод малозатратным.

Основы метода микросейсмического зондирования

Метод микросейсмического зондирования основан на свойстве фундаментальной моды волн Релея менять интенсивность в пределах неоднородностей геологической среды – увеличивать в окрестности низкоскоростных неоднородностей и уменьшать в окрестности высокоскоростных [Горбатиков, Цуканов, 2011]. При этом неоднородность может находиться на некоторой глубине, а вариации микросейсм, связанные

с ней, могут быть зарегистрированы на земной поверхности. Метод реализуется при допущении, что вертикальная компонента микросейсмического поля преимущественно определяется вкладом фундаментальной моды волн Релея.

Согласно [Горбатилов, Степанова, Кораблев, 2008], технология измерений и обработки включает следующие этапы:

- последовательные замеры микросейсм одновременно передвижной и опорной станциями;
- расчет распределения интенсивности микросейсм относительно опорной станции по профилю;
- привязка полученной диаграммы к соответствующей глубине.

Для обеспечения статистической устойчивости сигнал накапливается в течение периода его стационарности, который определяется экспериментально и в нашем случае составляет 1 ч. Пересчет частот в соответствующие глубины производится по формуле $H(f) = KV_R(f)/f$, где H – глубина слоя, для которого строится изображение; V_R – фазовая скорость волны Релея; f – частота в спектре микросейсмического сигнала; K – численный коэффициент, приблизительно равный 0.4–0.5.

Результаты обработки представляются в виде геофизического разреза, отображающего распределение относительной интенсивности микросейсм вдоль профиля и по глубине. Построенный таким образом разрез демонстрирует относительное изменение скоростных свойств среды исследуемого объекта. При этом зоны с пониженной интенсивностью микросейсм соответствуют участкам повышенных скоростей, зоны с повышенной интенсивностью – участкам пониженных [Горбатилов, Цуканов, 2011].

Исследуемый объект

В статье описано использование метода микросейсмического зондирования для обнаружения нарушений в пределах Онежского грабена и Онежско-Важского выступа при наблюдениях по профилю Кянда–Ворзогоры, пересекающему Мудьюгскую ступень, Андозерский и Ворзогорский блоки (рис. 1).

Рис. 1. Район исследований с указанием местоположения профиля Кянда–Ворзогоры, вдоль которого проводились замеры микросейсм

1 – линия профиля; 2 – граница Архангельской области; 3 – дороги



Схема структур фундамента юго-восточного Беломорья по [Станковский и др., 1973], приводимая с некоторыми упрощениями на рис. 2, а, и тектоническая схема рассматриваемого участка из [Отчет..., 2009] (рис. 2, б) дают обобщенные представления о структуре фундамента в районе исследований.

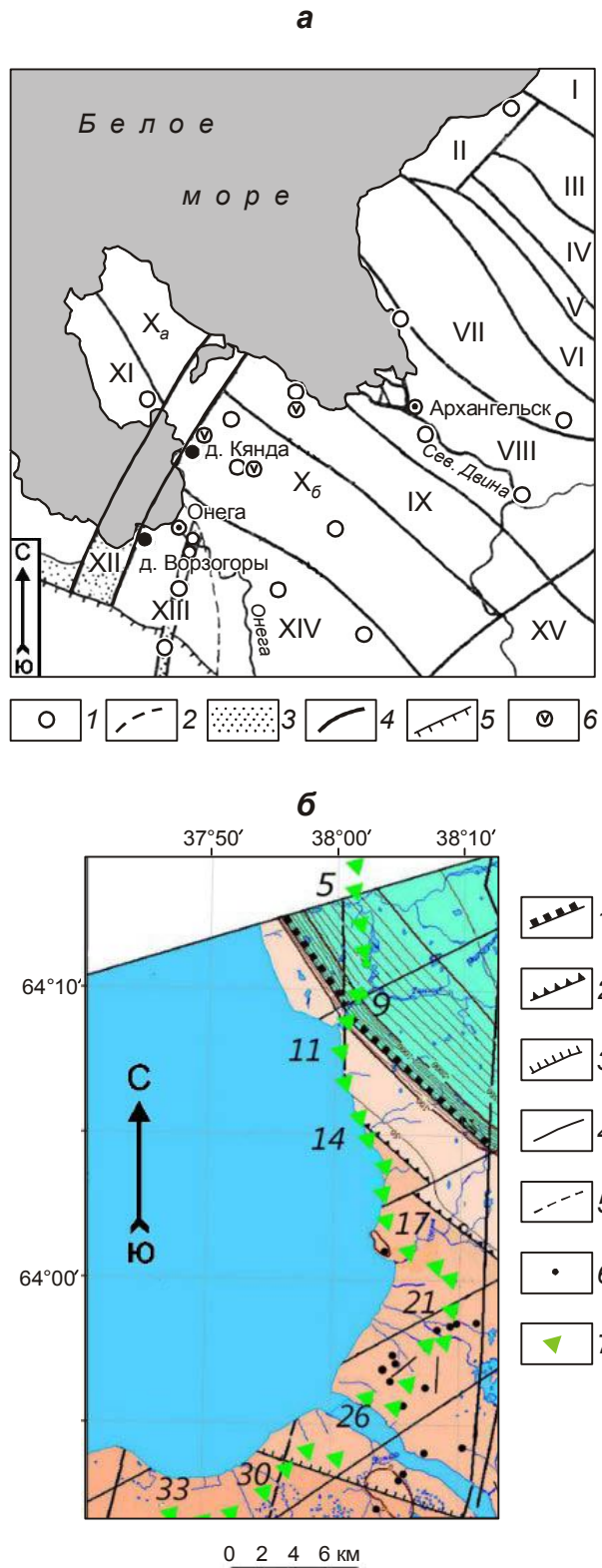


Рис. 2. Схема структур фундамента юго-восточного Беломорья (а) и тектоническая схема исследуемого участка (б)

а: 1 – скважины; 2 – граница осадочного чехла Русской плиты; 3 – вендские отложения Малошуйско-Унского и Игишского грабенов в пределах щита; 4 – основные разломы фундамента; 5 – граница Ветреного пояса; 6 – проявления платформенного магматизма; I – XV – основные структуры фундамента: Кулойский выступ (I); Ручьевский выступ (II); Лешуконский грабен (III); Мегра-Лакский горст (IV); Кепинский грабен (V); Падун-Соткинский горст (VI); Керецкий грабен (VII); Архангельский горст (VIII); Солзенская ступень (IX); Онежский грабен (X, а – Лопшеньгский блок, б – Солозерский блок); Мяндозерская ступень (XI); Малошуйско-Унский грабен (XII); Игишский грабен (XIII); Онеговажский выступ (XIV); Емецкая седловина (XV)

б: 1–3 – разломы, разделяющие структуры I, II, III порядка; 4 – разломы сбросо-сдвигового характера; 5 – предполагаемые долгоживущие рудоконтролирующие разломы; 6 – пункты регистрации микросейсм. На схему вынесены номера пунктов замера микросейсм на профиле Кянда-Ворзогоры

Онежский полуостров находится на северо-западе Русской платформы, где отмечается очень пологое погружение кристаллического фундамента под трансгрессивно залегающие и практически недеформированные слои древнейшего на платформе осадочного чехла. Кристаллический фундамент полуострова сложен глубокометаморфизованными гнейсами и амфиболитами беломорской серии архейского возраста, коренные выходы которых известны в районе г. Онега, с. Покровское и островов архипелага Кий [Станковский и др., 1973].

Большая часть профиля проходит по имеющему северо-западное простирание Онежско-Важскому поднятию, ограниченному с юго-запада Ветренным Поясом Карельского геоблока (располагается за пределами полосы зондирования), а с северо-востока – рифейским Онежским грабеном [Станковский и др., 1973, 1981; Отчет ..., 2009].

Поверхность кристаллического фундамента полого наклонена в северо-восточном направлении; глубина ее залегания меняется от нескольких метров на юго-западе, где фундамент фрагментарно перекрыт толщей верхнепротерозойских (вендских) отложений, до 400–500 м на северо-востоке, где перекрывающая толща наращивается палеозойскими отложениями. Онежско-Важское поднятие разбито системой разломов северо-западного простирания на Ворзогорский блок, Андозерский блок и Мудьюгскую ступень (см. рис. 2). Мудьюгская ступень является переходной к Онежскому грабену и относится авторами к структурам II порядка, а названные блоки – к структурам III порядка. Выделяемые структуры имеют северо-западное простирание, что соответствует генеральному простиранию Онежско-Важского поднятия в целом.

Онежский грабен – доплатформенная структура, заложившаяся и развившаяся в позднем протерозое (рифее). Грабен протягивается более чем на 200 км с северо-запада на юго-восток через весь Онежский полуостров – от Белого моря до станции Обозерская. Ширина грабена с учетом северо-восточного ступенчатого крыла, являющегося одновременно и юго-западным склоном Архангельского горста (мегавала), может быть оценена в 80–100 км. По геофизическим данным, поверхность кристаллического фундамента залегает на глубинах 2500–5000 м. В поперечном сечении грабен асимметричен – его юго-западный борт значительно круче северо-восточного [Станковский и др., 1973; Отчет ..., 2009]. С обеих сторон он ограничен разломами северо-западного простирания и через переходные ступени сопряжен со смежными поднятиями [Отчет ..., 2009; Константиновский, 1977].

Представленное на рис. 2 свидетельствует о том, что в пределах изучаемого участка имеется нескольких узлов пересечения разломов, ориентированных в северо-западном, северо-восточном и субмеридиональном направлениях (редко); субмеридиональные разломы классифицируются как рудоконтролирующие [Константиновский, 1977]. Кроме того, отмечено, что секущие разломы северо-восточного простирания являются более молодыми и относятся к категории сбросо-сдвиговых; по ним часто происходит смещение более ранних структур северо-западного простирания.

Используемая аппаратура

На профиле Кянда–Ворзогоры длиной более 60 км с шагом 1.5–2 км было размещено 33 пункта измерений, в каждом из которых микросейсмы регистрировались в течение 1 ч. В качестве передвижной использовалась сейсмическая станция УГРА (16-разрядный АЦП) с широкополосным датчиком CM3-OC (частотный диапазон – 0.03–10 Гц, чувствительность – 3908 В·с/м); в качестве опорной – регистратор GSR-24 (24-разрядный АЦП) с широкополосным датчиком CMG-3ESP (частотный диапазон – 0.03–30 Гц, чувствительность – 19848 В·с/м). Опорной была станция, размещенная вблизи пункта 9 (см. рис. 2, б), установленная на постаменте стационарной станции ТМС (Тамица). Регистрация микросейсм выполнялась одновременно передвижной и опорной станциями.

Полученные результаты и обсуждение

Примеры спектров десятиминутных записей вертикальных каналов опорной и передвижной станций в трех разных точках профиля приведены на рис. 3. Можно видеть, что наибольшие изменения в спектре наблюдаются на записях передвижной станции (рис. 3, а). Временные вариации спектров на опорной станции (рис. 3, б) прослеживаются преимущественно на нижних частотах, а в диапазоне 0.3 Гц–20 Гц они незначительны.

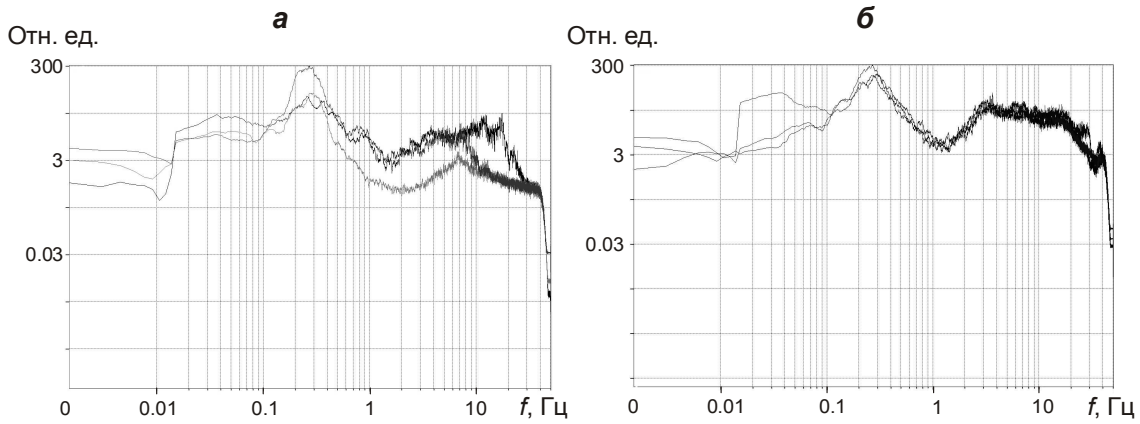


Рис. 3. Графики спектров микросейсм, соответствующие разным пунктам профиля Кянда–Ворзогоры, зарегистрированные передвижной (а) и опорной (б) станциями

Это может считаться экспериментальным подтверждением гипотезы о возможности выявления неоднородностей земной коры по данным измерений фоновых микросейсм.

Результаты обработки записей микросейсм, полученных методом микросейсмического зондирования [Горбатиков, 2006], в виде диаграммы распределения относительной интенсивности вдоль профиля и по глубине показаны на рис. 4. Анализ диаграмм позволяет выделить в разрезе земной коры до глубины 30 км несколько блоков [Французова и др., 2011], которые в определенной мере согласуются с приведенными выше данными о строении среды вдоль профиля. Участок, характеризующийся положительными значениями интенсивности в верхней части разреза (интервал профиля от 0 км до 16 км), соответствует Онежскому грабену. Участок профиля от 18 км до 25 км, в краевых частях которого прослеживаются положительные значения интенсивности микросейсм, соответствует Мудьюгской ступени. На участке от 25 км до 41 км, соответствующем северной части Андозерского блока, ниже 5 км преобладают положительные значения интенсивности. Для южной части Андозерского блока (интервал профиля 41–51 км) характерно преобладание отрицательных значений интенсивности

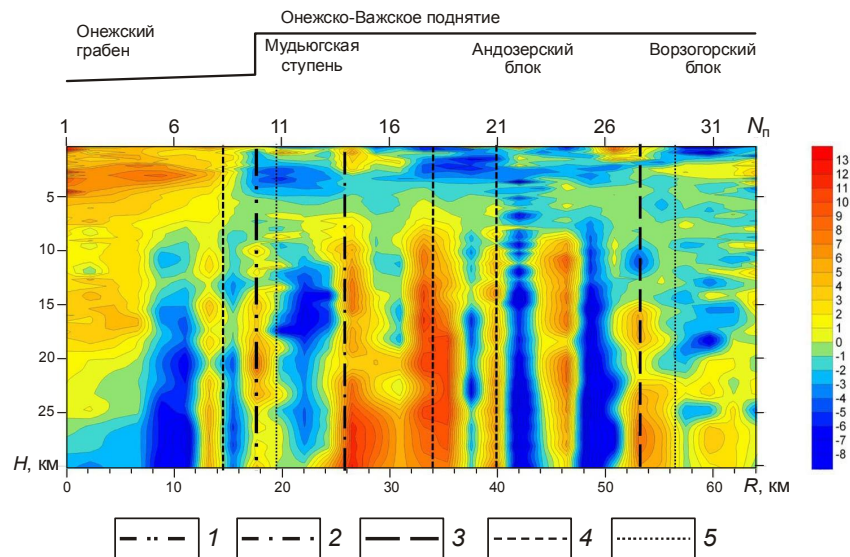


Рис. 4. Диаграмма распределения относительной интенсивности микросейсм вдоль профиля Кянда–Ворзогоры

1–3 – разломы, разделяющие соответственно структуры I, II, III порядка; 4 – разломы сбросо-сдвигового характера; 5 – предполагаемые долгоживущие рудоконтролирующие разломы. Справа от диаграммы шкала относительной интенсивности микросейсм

с положительной срединной “вставкой”; по своему рисунку эта часть блока в целом антиподальна северной части. Ворзгорский блок характеризуется совсем иным распределением и контрастностью интенсивности.

В описанной картине распределения относительной интенсивности микросейсм следует отметить [Французова и др., 2011] чередование довольно узких вертикальных полос–блоков с положительными и отрицательными значениями интенсивности (см. рис. 4). Обращает на себя внимание довольно высокий контраст между этими блоками. Такая картина присуща Мудьюгскому и Андозерскому блокам Онежско-Важского поднятия, при этом только для глубин, превышающих 3–5 км. В верхней части разреза контрастные блоки ограничены полосой отрицательных значений относительной интенсивности микросейсм, которая очень полого погружается в северном направлении, увеличиваясь по мощности до ~2–3 км. Можно предположить, что эта полого наклоненная полоса – либо зона древнего тектонического срыва, либо граница крупного несогласия между древними же структурно-вещественными комплексами фундамента. Ответ можно найти в пределах Ворзгорского блока, где рассматриваемая полоса выходит на поверхность. Изменчивость интенсивности микросейсм в приповерхностном слое не обнаруживает достаточно определенного соответствия глубинным блокам.

В связи с изложенным возникает вопрос о глубинах прослеживания блоков и ступеней Онежско-Важского поднятия, которые могут быть исключительно приповерхностными и не иметь глубинных корней. Более определенной является граница между Онежско-Важским поднятием и Онежским грабеном. Разрез позволяет считать, что южная граница Онежского грабена, имеющая сбросовый характер, достаточно полого наклонена в сторону грабена и может быть прослежена до 7–8 км. На этой глубине рассматриваемая граница срезает две вертикальные “колонны” положительных и отрицательных значений относительной интенсивности микросейсм, которые по своему виду явно относятся к Онежско-Важскому поднятию. Можно предположить, что севернее исследуемого профиля сброс выполаживается до 8.5 км [Константиновский, 1977].

Вертикальное положение многих выделенных зон не означает строгую вертикальность самих объектов, а может быть объяснено разрешающей способностью метода, обусловленной особенностями проявления скоростных неоднородностей в амплитудно-частотных характеристиках поля волн Релея. Так, используемый в данной работе метод более точно определяет верхнюю часть скоростных неоднородностей. При определении нижней границы разрешающая способность падает, возможно, из-за большей эффективной длины волны [Горбатилов, Цуканов, 2011].

По результатам математического моделирования [Горбатилов, Цуканов, 2011] известно, что два объекта по горизонтали могут быть представлены раздельно, если расстояние между ними составляет более четверти длины волны. Это расстояние с глубиной увеличивается от 0 м на поверхности до 10 км на глубине 20 км (см. рис. 4).

Наблюдаемое в нашем случае слияние отдельных зон на глубине, скорее всего, связано с разрешающей способностью метода по горизонтали. При этом точность определения вертикальных границ отдельного объекта близка к 4% от эффективной длины волны. На глубине 20 км точность определения границ по горизонтали составляет 1.6 км. Таким образом, можно утверждать, что в нашем случае по всей глубине разреза точность определения границ скоростных неоднородностей по горизонтали ограничена шагом между пунктами измерений, составляющим 1.5–2 км. Исключения составляют неоднородности, размеры которых меньше четверти эффективной длины волны.

Наиболее яркий пример слияния низкоскоростных зон наблюдается на участке профиля 25–36 км. Две раздельно прослеживаемые от глубины 7 км зоны положительных значений интенсивности микросейсм сливаются в одну на глубине около 20 км. Аналогичная, но не столь выразительная картина наблюдается на участке профиля 54–62 км, где две низкоскоростные зоны сливаются в одну на глубине более 23 км.

Следует отметить и тот факт, что не все близко расположенные зоны сливаются. Например, низкоскоростная зона на отметке 46 км прослеживается обособленно до глубины 30 км. Данный пример может быть объяснен возможным размывом нижней границы скоростной неоднородности. Нестрогое соответствие результатов обработки экспериментальных данных результатам математического эксперимента может объясняться и сложностью выбора нулевого уровня в процессе обработки.

Таким образом, полученное распределение интенсивности микросейсмических колебаний не противоречит оценкам разрешающей способности метода микросейсмического зондирования, полученным при математическом моделировании [Горбатилов, Цуканов, 2011], что подтверждает корректность результатов обработки.

В результате ранее проведенных геофизических работ [Отчет..., 2009] для части исследуемого района была построена карта аномального магнитного поля (рис. 5). При ее сопоставлении с диаграммами распределения относительной интенсивности микросейсм (см. рис. 4) отмечается хорошая корреляция выделяемых зон. Так, вблизи контакта грабена и поднятия зона пониженных значений магнитного поля демонстрирует приемлемую сходимость с низкоскоростным участком, выделенным по данным метода микросейсмического зондирования на глубине до 5 км.

В пределах Онежско-Важского поднятия низкоскоростные зоны у поверхности (до 1 км) соответствуют зонам высоких значений аномального магнитного поля.

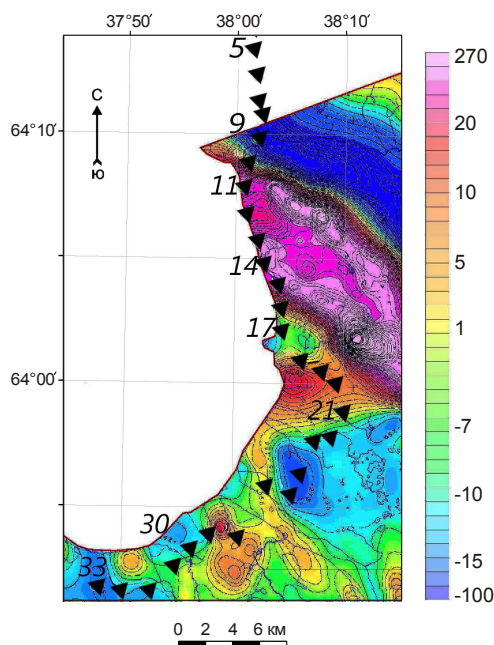


Рис. 5. Карта аномального магнитного поля исследуемого участка с пунктами замеров микросейсм [Отчет..., 2009]. Треугольники – пункты регистрации микросейсм; цифры возле них – номера пунктов, упоминаемые в тексте. Пункты 1–8 находятся за пределами участка, для которого построена карта

Установленное согласие между магнитометрическими данными [Отчет..., 2009] и результатами исследований методом микросейсмического зондирования не противоречит заключению авторов работы [Кутинов, Чистова, 2004] о том, что в пределах грабенов юго-восточного Беломорья возможно присутствие магнитоактивных границ, связанных с кровлей отложений солозерской свиты.

Выводы

Методом микросейсмического зондирования охарактеризовано распределение скоростных неоднородностей в верхней части земной коры юго-восточного Беломорья (до фундамента). Показано соответствие выявленных аномалий основным региональным структурам, известным по другим геофизическим данным.

Результаты зондирования свидетельствуют о приемлемой сходимости полученного распределения относительной интенсивности микросейсм с имеющимися геолого-геофизическими данными о разломах I–II порядков (юго-западный борт Онежского грабена, пересечение Малошуйско-Унского и Игишского грабенов), неоднородностях III порядка (участок пересечения погребенной палеодолины р. Онеги с Игишским грабеном, сочленение Мудьюгской ступени с Андозерским блоком) и ряде сбросо-сдвиговых и рудоконтролирующих структур.

Выявленные закономерности распределения микросейсмических колебаний в целом не противоречат оценкам разрешающей способности метода ММЗ [Горбатилов, Цуканов, 2011].

Дополнительно получена информация о расположении границ в нижних слоях земной коры, которые к настоящему времени изучены недостаточно.

Полученные результаты подтверждают корректность применения рассмотренного метода для выявления вещественно-структурных неоднородностей геологической среды как в комплексе с другими геофизическими методами, так и самостоятельно.

Литература

- Горбатилов А.В. Патент РФ № 2271554 // Бюл. изобр. 2006. № 7.
- Горбатилов А.В., Степанова М.Ю., Кораблев Г.Е. Закономерности формирования микросейсмического поля под влиянием локальных геологических неоднородностей и зондирование микросейсм с помощью микросейсм // Физика Земли. 2008. № 7. С.66–84.
- Горбатилов А.В., Цуканов А.А. Моделирование волн Рэлея вблизи рассеивающих скоростных неоднородностей. Исследование возможностей метода микросейсмического зондирования // Физика Земли. 2011. № 4. С.96–112.
- Константиновский А.А. Онежско-Кандалакшский рифейский грабен Восточно-Европейской платформы // Геотектоника. 1977. № 3. С.38–45.
- Кутинов Ю. Г., Чистова З. Б. Иерархический ряд проявлений щелочно-ультраосновного магматизма Архангельской алмазоносной провинции. Их отражение в геолого-физических материалах. Архангельск: ИЭПС УрО РАН, ОАО “ИПП Правда Севера”, 2004. 268 с.
- Отчет по региональному изучению Нижнеонежской и Лайской площадей с целью оценки перспектив алмазоносности нижнего течения реки Онега в 2004–2008 годах. (Объект региональный). Архангельск, 2009. 583 с.
- Станковский А.Ф., Данилов М.А., Гриб В.П., Синицин А.В. Трубки взрыва Онежского полуострова // Сов. геология. 1973. № 8. С.69–79.
- Станковский А.Ф., Веричев Е.М., Гриб В.П., Добейко И.П. Венд юго-восточного Беломорья // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1981. № 2. С.78–87.
- Французова В.И., Горбатилов А.В., Данилов К.Б. Структура верхней части осадочного чехла на профиле г. Архангельска // Геодинамика. Глубинное строение. Тепловое поле Земли. Интерпретация геофизических полей: Материалы Пятых научных чтений памяти Ю.П. Булашевича. Екатеринбург: ИГф УрО РАН, 2009. С.502–506.
- Французова В.И., Макаров В.Н., Данилов К.Б., Горбатилов А.В. Низкочастотное просвечивание земной коры Севера Русской плиты с использованием фоновых микросейсм // Проблемы сейсмогеотектоники: Материалы Всероссийской конф. с межд. участием. М.: ИФЗ РАН, 2011. С.511–515.

Сведения об авторах

ФРАНЦУЗОВА Валентина Ивановна – кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт экологических проблем Севера УрО РАН, заведующая сектором сейсмического мониторинга Геофизической службы РАН. 163000, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 23. Тел./факс: (8182) 21-55-68. E-mail: FrancuzovaVI@yandex.ru

МАКАРОВ Владимир Иванович (28.12.1937–12.08.2011) – доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией эндогенной геодинамики и новейшей тектоники, Институт экологических проблем Севера УрО РАН. г. Архангельск.

ДАНИЛОВ Константин Борисович – младший научный сотрудник, Институт экологических проблем Севера УрО РАН. 163000, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 23. Тел./факс: (8182) 21-56-87. E-mail: danilov_kostea@mail.ru

VELOCITY HETEROGENEITIES OF THE CRUST OF THE SOUTH-EASTERN COAST OF THE WHITE SEA BASED ON MICROSEISMIC SOUNDINGS METHOD

V.I. Frantsuzova, V.I. Makarov, K.B. Danilov

Institute of Ecological Problems of the North, Ural Branch of RAS, Arkhangelsk, Russia

Abstract. The article describes the results of studies of the earth's crust using microseismic oscillations. The measurements were performed along the Kiand–Vorzogory profile (Onega Peninsula). Processing of recorded data was performed by the method of microseismic sounding (MSM). The resulting geophysical section is consistent with previous work and adds to the existing geophysical information about the structure of the crust in the studied site.

Keywords: microseismic sounding, earth's crust, Onega Peninsula.