

**СТРОЕНИЕ ЛИТОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ ОБМЕННЫХ ВОЛН
ПОД СЕЙСМОСТАНЦИЕЙ «КЛИМОВСКАЯ»****В. И. Французова^{1,2}, Н. В. Ваганова¹, Ф. Н. Юдахин¹, Л. П. Винник³, Г. Л. Косарев³,
С. И. Орешин³**¹*Институт экологических проблем Севера УрО РАН, г. Архангельск*²*Сектор сейсмического мониторинга Севера Русской плиты ГС РАН, г. Архангельск*³*Объединенный институт физики Земли РАН им. О. Ю. Шмидта, г. Москва**Поступила в редакцию 1 октября 2010 г.*

Аннотация. В данной работе приводятся результаты исследования строения коры и мантии, выполненного по экспериментальным данным о сильных телесеизмических землетрясениях методом приемных функций *P*-волн. По обменным волнам *Ps*, зарегистрированным широкополосной сейсмической станцией Климовская (KLM), расположенной в южной части Архангельской области ($\varphi = 60.85$, $\lambda = 39.51$), в пределах подстанционной области определена структура земной коры и верхней мантии с выделением границ обмена и построен двумерный скоростной разрез земной коры. Для изучения строения литосферы Севера Русской плиты указанный метод применен впервые.

Ключевые слова: обменные волны, земная кора, метод приемных функций.

Abstract. In this paper we describe the results of the analysis of teleseismic *P* wave digital recordings from the broadband seismic station KLM, situated in the South of Arkhangelsk region. The station location is 60.85 deg of latitude and 39.51 deg of longitude. For the first time seismic stratification of the crust of the region was investigated by applying *P*-receiver function technique. The method is based on the detection of the secondary (converted) phases that are generated by the primary (*P*) wave in the crust and mantle in a vicinity of the station. As a result of the analysis of the converted *Ps* waves we have obtained the velocity model of the crust under the station.

Key words: converted waves, the crust, receiver functions method

Введение

Изучение глубинного строения земных недр – это актуальная задача во все времена и она имеет многоцелевой характер. Север Русской плиты Восточно-Европейской платформы имеет очень продолжительную историю своего развития и, как следствие, – сложное строение. Архангельская область, территориально расположенная на Севере Русской плиты, изучена сейсмологическими методами весьма неравномерно. Наиболее изученными являются места поисков и разработки алмазов. С 1988 по 1990 гг. Центром ГЕОН на профиле Костомукша-Плесецк («Рубин») проводились работы ГСЗ и МОВЗ с трехкомпонентной регистрацией смещения почвы от искусственных взрывов и землетрясений и интерпретацией рефрагированных

(продольных и поперечных) и отраженных (продольных и поперечных) волн [1]. Кроме того, широко использовался метод обменных волн землетрясений (МОВЗ) для определения строения литосферы. СРГЭ НПО «Нефтегеофизика» в 1984 г. методом ГСЗ-МОВЗ пройден профиль по северу Архангельской области Печенга-Умбозеро-Ручьи («Кварц») [2, 3]. Самым близкорасположенным к рассматриваемому нами району исследования являются профили Агат IV и Агат V (рис. 1).

Южная часть Архангельской области изучена недостаточно полно. В 2003 году в Коношском районе Архангельской области совместно с Геофизической Службой РАН установлена сейсмическая станция Климовская (KLM), входящая в Архангельскую сеть, насчитывающую семь стационарных сейсмических станций (рис. 1).

К 2008 г. накоплен большой банк цифровых трехкомпонентных записей с/с KLM далеких землетрясений мира, позволяющий определить воз-

© Французова В. И., Ваганова Н. В., Юдахин Ф. Н., Винник Л. П., Косарев Г. Л., Орешин С. И., 2011

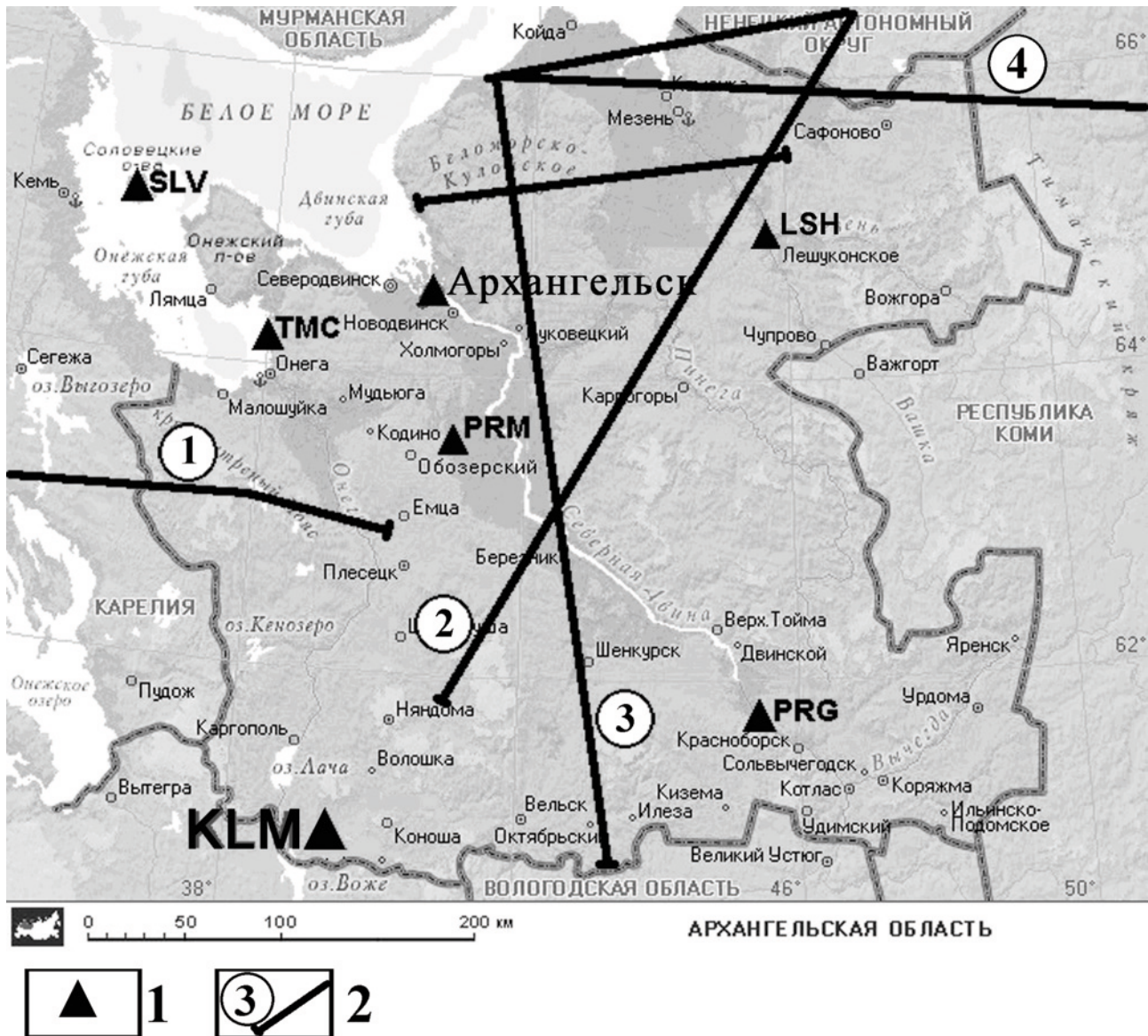


Рис. 1. Схема расположения станций Архангельской сети и глубинных сейсмических профилей ГСЗ, МОВ, ГСЗ-МОВЗ: 1 – станции Архангельской сети; 2 – глубинные сейсмические профили: 1 – Костомукша-Плесецк («Рубин»), 2 – Агат IV, 3 – Агат V, 4 – Печенга-Умбозеро-Ручьи («Кварц»)

возможности изучения структуры коры и верхней мантии по данным только одной сейсмической станции. Используемая для исследований методология функций приемника (receiver functions) обладает рядом преимуществ, особенно важных для Архангельской сети, поскольку позволяет для получения представления о глубинном строении значительных по площади территорий проводить предварительные изучения отдельных участков среды на отдельных станциях. Суть метода заключается в накоплении большого объема данных о телесеизмических событиях, преобразовании системы координат с учетом азимута и поляризации обменной волны, стандартизации получен-

ных компонент с последующим суммированием в точке обмена.

Полученные функции приемника затем инверсировались в скоростной разрез земной коры под с/с KLM. Обратная задача решалась методом регуляризации [4], при котором задача сводится к решению системы линейных уравнений, содержащих в качестве параметров скорости продольных и поперечных волн (V_p , V_s), плотности (ρ) и мощности слоев.

Исходные данные и методика обработки

Сейсмостанция KLM расположена на юге Архангельской области, оснащена цифровой

аппаратурой типа SDAS разработки НПП “Гео-тех+” совместно с Геофизической Службой РАН с датчиками СМЗ-ОС, обеспечивающей регистрацию событий в частотном диапазоне 0.02–7.0 Гц, 16-разрядным АЦП и частотой опроса 20 отсчетов/сек. Для обработки было отобрано несколько десятков землетрясений на эпицентральных расстояниях от 35 до 90°, в диапазоне азимутальных направлений от 0 до 180°, с магнитудами от 5.0 до 7.2 и глубинами очагов до 340 км. Записи имеют четкое вступление импульсного характера с большим превышением амплитуды первого вступления над шумом.

Методология приемных функций (или функций приемника) P-receiver function (PRF) [5, 6] хорошо известна и широко используется во всем мире, направлена на регистрацию, выделение, интерпретацию обменных волн Ps. Метод PRF эффективен для исследования глубокой структуры Земли до 800 км. В методе приемных функций Р обменные волны распространяются от источника как продольные, а на границах в области сейсмической станции преобразуются в поперечные. Обменная волна входит в состав коды Р-волны. Задача состоит в выделении этих фаз на фоне случайных помех и различных регулярных волн. Для этого необходимо знать свойства обменных волн и использовать их в алгоритме обработки исходных сейсмограмм. Проходя путь от границы обмена к поверхности с меньшей скоростью по сравнению с рефрагированной продольной волной Р, обменные волны Ps вступают на записи с некоторым запаздыванием по отношению к волне Р, их порождающей. Время запаздывания зависит от расстояния между источником и станцией и глубины

границы, на которой произошел обмен. При фиксированной глубине обмена время запаздывания обменной волны Ps уменьшается с увеличением эпицентрального расстояния и возрастает с его уменьшением. Поскольку поперечная волна Ps в изотропной среде поляризована как SV, искомая волна выделяется в плоскости источник-приемник в направлении, перпендикулярном направлению поляризации в Р волне. Поскольку амплитуда обменной волны Ps намного меньше амплитуды Р волны, то наиболее ответственным моментом обработки является выделение сигнала обменной волны на фоне различных волн и помех.

Обработка данных включает следующие процедуры (рис. 2): частотную фильтрацию исходных записей, поворот осей на источник, стандартизацию компонент, получение индивидуальных приемных функций для каждого землетрясения, суммирование трасс от нескольких землетрясений. Обработка сейсмограмм отобранных землетрясений проводится с помощью пакета программ Seismic Handler (разработчик Клаус Штамлер) под операционной системой Linux, а также с помощью собственных разработок сотрудников ИФЗ РАН.

На первом этапе осуществляется частотная фильтрация с целью устранения колебаний как слишком высоких, содержащих в себе эффекты случайного рассеяния на неоднородностях, так и слишком низких частот, снижающих разрешающую способность. Рабочий диапазон периодов составляет от 2 до 10 сек. Далее осуществляется поворот осей С-Ю, В-З на угол, равный азимуту прихода основной Р-волны. В результате исходные оси Z, N, E преобразуются в оси Z, R, T, где

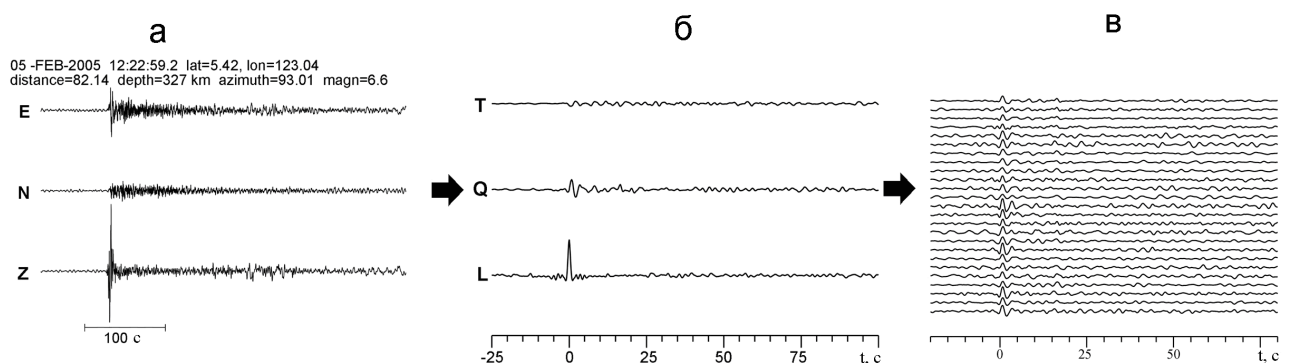


Рис. 2. Пример этапов обработки: а – вид исходной трехкомпонентной записи одного из землетрясений; б – итоговые стандартизованные составляющие (L – главная, направлена вдоль смещений в Р волнах, Q – направлена вдоль смещений в SV волнах, T – тангенциальная, направлена вдоль смещений в SH волнах); в – Q – компоненты нескольких десятков землетрясений, принятых к обработке

R – радиальная, а T – тангенциальная составляющие. На втором этапе оси Z и R преобразуются в оси L и Q, где ось L соответствует направлению поляризации P-волны, а ось Q перпендикулярна оси L в плоскости источник-приемник. Математически это преобразование состоит в нахождении собственных векторов ковариационной матрицы, полученной при вычислении ковариаций вертикальной и радиальной компонент. На следующем этапе обработки итоговые компоненты L, Q, T стандартизируются применением деконволюционного фильтра, сформированного на участке итоговой сейсмограммы, содержащей падающую P-волну и часть ее коды. В итоге получены трансформированные стандартизованные записи (рис. 2, б), где L – компонента с единичной амплитудой соответствует главному направлению смещений и характеризует волну P, Q – компонента ортогональна к главной в той же плоскости и является оптимальной для выделения обменной волны Ps, T – тангенциальная компонента. Процедуры выполняются для большого набора землетрясе-

ний от многих источников, находящихся на различных эпицентральных расстояниях от станции (рис. 2, в).

Последующая операция обработки сводится к суммированию стандартизованных компонент всех землетрясений с целью подавления шума и выделения обменных волн, связанных с различными границами в коре и мантии. Суммирование производится для различных пробных глубин, определяемых диапазоном эпицентральных расстояний. В нашем случае при изменении расстояний от 35 до 90 градусов лучи P-волн захватывают глубины до 800 км. При фиксированной пробной глубине время обменной волны зависит от эпицентрального расстояния и вычисляется для каждой трассы. Суммирование всех трасс для данной пробной глубины осуществляется со сдвигами во времени относительно некоторого опорного эпицентрального расстояния, которое принимается равным 67 градусам. На рис. 3 показаны Q-трассы и так называемый стек – результат суммирования для различных пробных глубин.

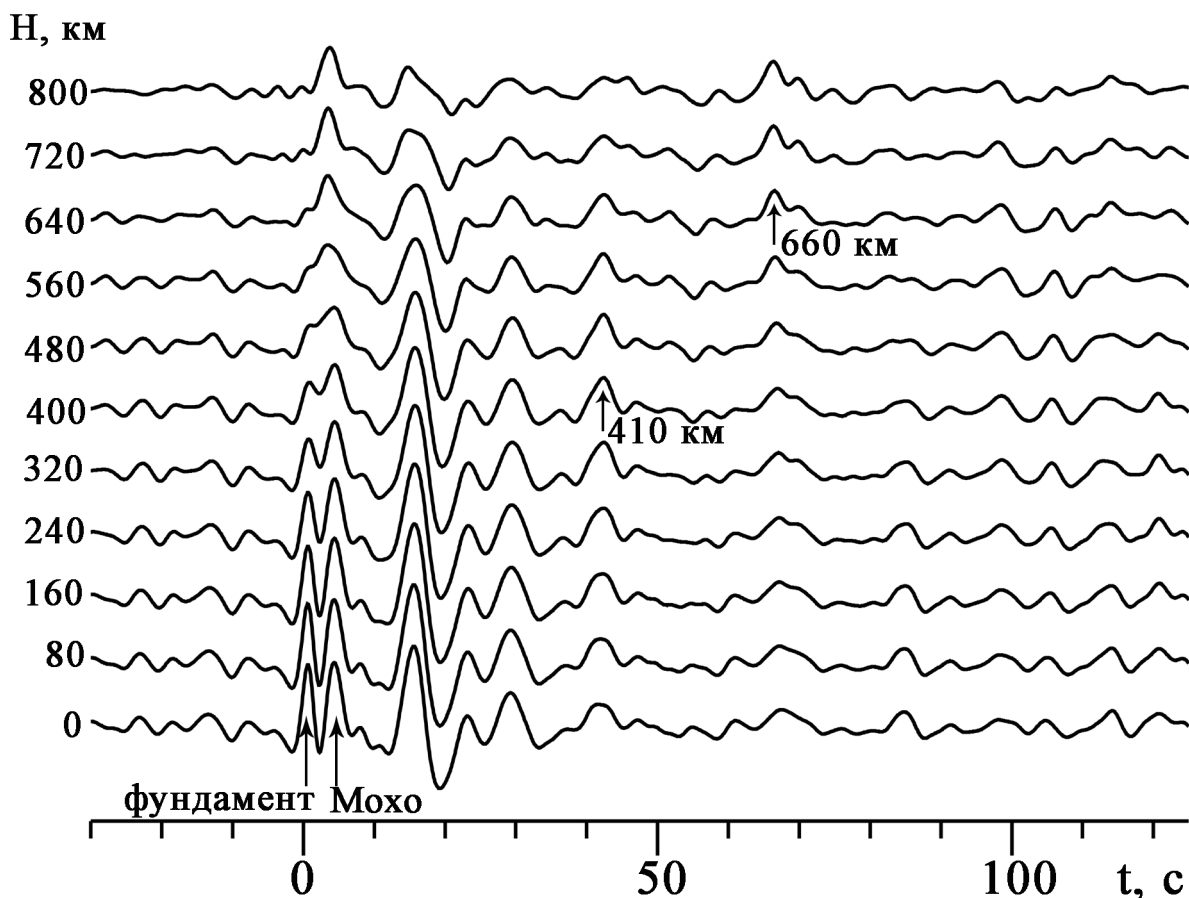


Рис. 3. Стек приемных функций P-волн с применением длиннопериодного фильтра с частотой среза 0.2 Гц

На суммированных приемных функциях хорошо выделяются следующие границы обмена (рис. 3): граница фундамент-осадки, где обменная волна имеет время задержки по отношению к падающей Р-волне порядка 0.6 сек; граница Мохо с временем задержки 4.3 сек, границы зоны фазовых переходов в мантии 410 км и 660 км (показаны стрелками) с временами задержки 42.4 сек и 66.4 сек соответственно. Эти времена практически совпадают с аналогичными для южной Финляндии, полученными по данным группы SVEKALA-РКО [7]. Это указывает на то, что скорости S-волн в мантии под с/с KLM близки к скоростям под Балтийским щитом и выше стандартных на глубинах меньше 410 км, поскольку в модели IASP91 эти же времена принято считать $t(410 \text{ км}) = 44.0 \text{ сек}$, $t(660 \text{ км}) = 67.9 \text{ сек}$. В переходной зоне между границами 410 км и 660 км разница во времени, в соответствие с моделью IASP91, составляет 24 сек, что говорит о стандартной переходной зоне в мантии на глубинах 410–660 км как в районе KLM, так и в южной части Балтийского щита. Большие амплитуды на временах 10–30 сек обусловлены наличием многократных отраженных волн. Положительную полярность имеют волны Ppps, отраженные на свободной поверхности и получившие обмен-отражение на Мохо. В противофазе к ним выходят волны Ppss, сформированные обменами – отражениями на свободной поверхности и отражением на границе Мохо.

На следующем этапе работ выполнялась инверсия полученных функций приемника для получения скоростного разреза Vs. Для обращения использовалась слоистая модель с постоянными

скоростями в слоях, состоящая из семнадцати слоев в пределах глубин 0–52 км, лежащих на полупространстве. Вариации скоростей поперечных волн выполнялись с фиксированными отношениями скоростей $V_p/V_s = 1.732$ и 1.8 соответственно в коре и мантии. Плотность задавалась по Берчу [8].

Использовалась следующая схема обращения данных PRF: по исходной модели рассчитывалась синтетическая Q-компонента (приемная функция), которая сопоставлялась с аналогичной, полученной по экспериментальным данным с/с Климовская. Затем исходная модель варьировалась вышеуказанным способом и уже по варьированной модели проводился расчет синтетической Q-компоненты с последующим сопоставлением ее с экспериментальной. Итерационный процесс продолжался до сходимости с заданной точностью синтетической и экспериментальной Q-компонент, по завершению которого последняя варьированная модель принималась за близкую к реальной. Расчеты проводились по программам, разработанным в ИФЗ РАН Г. Л. Косаревым [9].

Полученная уточненная модель земной коры до глубин 50–52 км вместе с исходной скоростной моделью представлена на рис. 4, б, фрагменты сопоставления функций приемника для исходной и выходной моделей земной коры с наблюдаемой – на рис. 4, а. Полученный скоростной разрез дает представление о структуре земной коры в подстанционной области. Здесь следует отметить, что данный разрез представляет собой один из множества моделей, удовлетворяющих исходным данным в рамках “ленты разброса”, получаемых при инверсии.

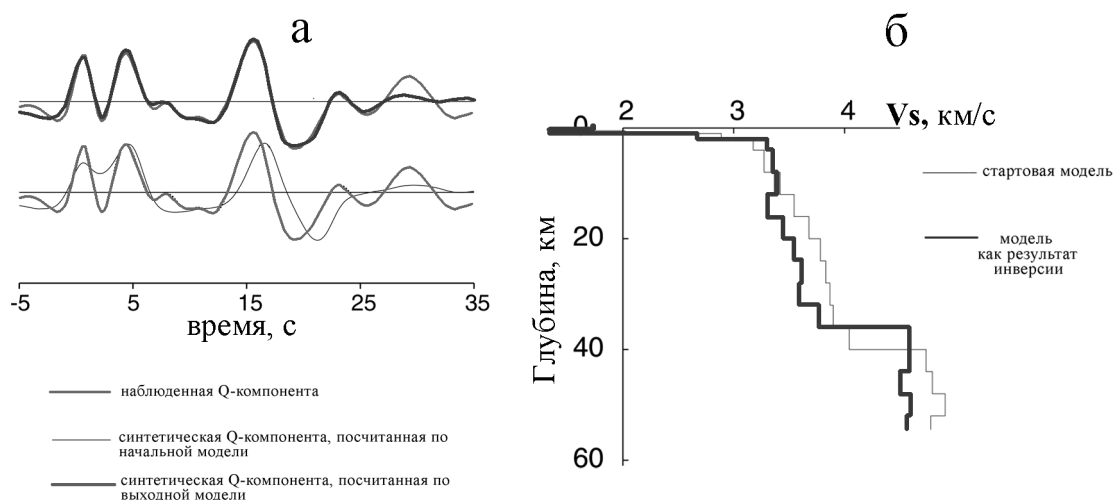


Рис. 4. Результаты инверсии функций приемника Ps-волн: а – сопоставление теоретической и экспериментальной приемной функции; б – результирующая модель скоростного строения земной коры

В скоростном разрезе выделяются кровля кристаллического фундамента на глубине 1000–1200 м, а также граница коры и мантии на глубине 36 км. Примечательно, что на выходном разрезе (рис. 4, б) на глубинах 12–16 км отмечается зона пониженных скоростей с перепадом $\Delta V_p = 0.13$ км/с и $\Delta V_s = 0.07$ км/с, также выделяемая по геологическим данным [10, 11].

Обсуждение результатов

По цифровым трехкомпонентным записям широкополосной станций Климовская методом функций приемника определена структура литосферы Севера Русской плиты, выделены основные границы в коре и мантии: граница кристаллического фундамента располагается на глубине порядка 1 км, раздел Мохо – на глубине 35–36 км, границы зоны фазовых переходов в мантии – на глубинах 410 км и 660 км. Путем обращения данных PRF получена скоростная модель земной коры под станцией Климовская.

Полученные методом приемных Р-функций скоростные характеристики сопоставлены с данными работ по изучению строения земной коры и мантии методами ГСЗ, МОВЗ, МОВ-ОГТ, взятых из разных литературных источников [12, 13, 14, 15]. Отметим, что изучаемая нами территория располагается западнее станции Коноша и прина-

длежит к зоне погружения на юго-восток кристаллического фундамента Балтийского щита в пределах Онежского выступа, на большей части которого, согласно [12], мощность осадочного чехла не превышает 1000–1500 м. Переход в глубинах залегания магнитных пород фундамента достигает у станции Коноша 500–1000 м, на бортах Воже-Лачской и Вагской депрессии 1000–1500 м. Это подтверждается также данными В. И. Макарова [16], взятых им, в свою очередь, из геологических карт [13, 15]. В отчете указывается, что сейсмостанция Климовская находится в зоне сочленения Воже-Лачского прогиба и западным окончанием Коношского поднятия, а мощность осадочного слоя в этом районе более 1000 км [16]. Кроме того, близкие значения глубины кристаллического фундамента получены в результате комплексной интерпретации геофизических исследований Центра «Теон», проводимых по профилям АГАТ IV и АГАТ V, и отраженных в публикациях сотрудников Центра Костюченко С.Л. и Егоркина А.В. [13, 14]. В частности, как следует из карт рельефа поверхности фундамента, взятой из работы [13], глубина кровли фундамента определяется по двум близкорасположенным изогипсам 1000–1500 м (рис. 5, а), а рельеф поверхности Мохоровичича – парой изогипс на глубинах 38–40 км (рис. 5, б).

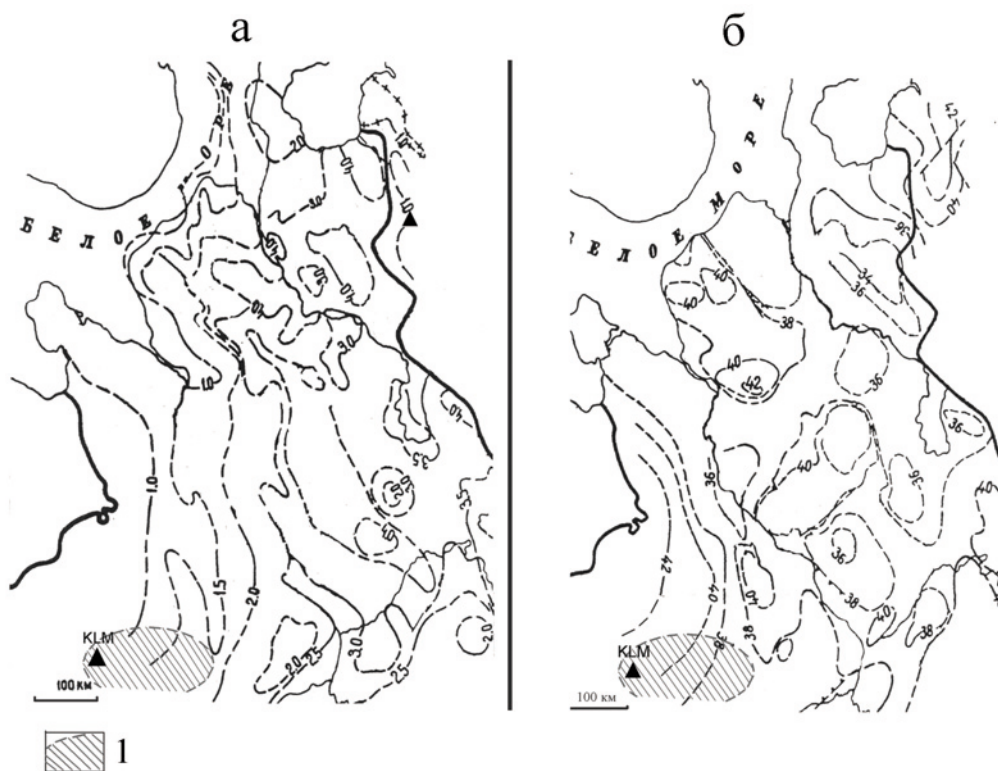


Рис. 5. Схемы рельефов поверхности фундамента (а) и Мохоровичича Мезенской синеклизы (б) [13]: 1 – изучаемая зона

Заключение

Проведенные исследования показали эффективность метода приемных функций (P-receiver functions) в изучении структуры литосферы в пределах сейсмической станции Климовская. Полученные данные согласуются с имеющимися по Русской плите представлениями о распределении сейсмических скоростей. Вместе с тем, стоит обратить внимание и на возможности получения информации о строении коры и мантии сначала по отдельным станциям с последующим обобщением данных по всем станциям для получения сейсмического разреза в целом по Русской плите, необходимого нам для расчета регионального географа. Это преимущество данного метода перед другими томографическими методами весьма привлекательно для сетей, не располагающих большим числом станций, ибо в этом случае можно проводить исследования последовательно, используя станции в разных точках при экспедиционных работах. В частности, такой подход выбран для Архангельской сети. Уже в настоящее время проводится аналогичная работа по изучению коры и мантии на Севере Русской плиты в районе сейсмической станции “Лешуконское” (LSH).

Работа выполнена при частичной поддержке Программы № 4 Президиума РАН и молодежного гранта УрО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сейсмогеологическая модель литосферы Северной Европы: Баренц-регион / под редакцией Ф. П. Митрофанова, Н. В. Шарова. – Апатиты : КарНЦ РАН, 1998. – Ч. 1.
2. Егоркин А. В. Строение земной коры и верхней мантии по профилю Мурманск – Кызыл / А. В. Егоркин [и др.] // Фонды ГЕОН, ВНИИ геофизики. – М., 1986. – 270 с.
3. Егоркин А. В. Выделение блоков древнейшей коры Балтийского щита на профиле МОВЗ-ГСЗ «Печенга-Умбозеро-Ручьи» / А. В. Егоркин [и др.] // Проблемы комплексной интерпретации геолого-геофизических данных. – Л.: Наука, 1991. – С. 107–122.
4. Тихонов А. Н. Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. – М.: Наука, 1979. – 288 с.
5. Vinnik L. P. Detection of waves converted from P to S in the mantle / L. P. Vinnik // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 1977. – 15. – P. 39–45.
6. Langston C. A. Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves / C. A. Langston // Journal of geophysical research. – 1979. – V. 84. – P. 4749–4762.
7. Kozlovskaya E. Structure and composition of the crust and upper mantle of the Archean-Proterozoic boundary in the Fennoscandian shield obtained by joint inversion of receiver function and surface wave phase velocity of recording of the SVEKALAPKO array. / E. Kozlovskaya [et al.] // Geophys. J. Int. – 2008. – 175. – P. 135–152.
8. Birch F. The velocity of compressional waves in rocks in 10 kilobars, part 2. / F. Birch // J. geophys. Res. – 1961. – V. 66 – P. 2199–2224.
9. Kosarev G. L. Inversion of teleseismic P-wave particle motions for crustal structure in Fennoscandia / G. L. Kosarev, L. I. Makeyeva L. P. Vinnik // PEPI. – 1987. – Vol. 47. – P.11–24.
10. Булин Н. К. Об одной сейсмической границе в консолидированной земной коре Евразии / Н. К. Булин // Изв. РАН СССР. Сер. – Геофизика. – 1974. – № 8. – С. 5–25.
11. Иванов С. Н. Отделитель (о природе и значении геофизической границы К1) / С. Н. Иванов // Докл. АН СССР. 1990. – Т. 311, № 2. – С.428–431.
12. Барковский А. Н. Тектоника платформенного чехла / А. Н. Барковский, Ю. Н. Оганесов; под ред. В. А. Дедеева, С. И. Домрачева, Л. Н. Розанова // Тектоника Севера Русской плиты. – Л.: Недра, 1969. – С. 31–37.
13. Костюченко С. Л. Структура и тектоническая модель земной коры Мезенской синеклизы по результатам комплексного геолого-геофизического изучения / С. Л. Костюченко // Разведка и охрана недр. – 1995. – № 5. – С. 2–7.
14. Егоркин А. В. Геологическая информативность многоволнового ГСЗ на примере изучения Севера Европейской части / А. В. Егоркин // Региональная геология и металлогения. – 2000. – № 10. – С. 85–89.
15. Губайдуллин М. Г. Региональные геолого-геофизические модели литосферы / М. Г. Губайдуллин // Литосфера и гидросфера европейского Севера России. Геоэкологические проблемы. – Екатеринбург : УрО РАН, 2001. – С. 57–67.
16. Отчет о научно-исследовательской работе «Изучение закономерностей проявления сейсмичности и геодинамических процессов в северных окраинных зонах Восточно-Европейской платформы». – 2008. – № госрегистрации 0120.0604339.

Строение литосферы по данным обменных волн под сейсмостанцией «Климовская»

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

*В. И. Французова, ведущий научный сотрудник,
кандидат физико-математических наук, доцент,
заведующая Сектором сейсмического монито-
ринга Севера Русской плиты ГС РАН
arh-seismo@yandex.ru
Тел. 8 (182) 215-568*

*Institute of Ecological Problems of the North Ural
branch RAS, Arhangelsk*

*V. I. Francuzova, Leading scientist, Candidate of
Physical and Mathematical Sciences, docent, super-
visor
Seismic monitoring sector of the North of the Russian
plate GS RAS
arh-seismo@yandex.ru
Tel. 8 (182) 215-568*

*Н. В. Ваганова, младший научный сотрудник ла-
боратории экологической сейсмологии и геохи-
мии, аспирант
nvag@yandex.ru
Тел. 8 (182) 215-687*

*N. V. Vaganova, junior researcher, graduate
nvag@yandex.ru
Tel. 8 (182) 215-687*

*Ф. Н. Юдахин, член-корреспондент РАН, доктор
геолого-минералогических наук, профессор, глав-
ный научный сотрудник лаборатории экологичес-
кой сейсмологии и геохимии
arhsc@mail.ru
Тел. 8 (182) 215-765*

*F. N. Yudakhin, Corresponding member RAS, profes-
sor, Chief scientific researcher, Doctor of Geology
and Mineralogical Sciences
arhsc@mail.ru
Tel. 8 (182) 215-765*

*Объединенный институт физики Земли РАН
им. О. Ю. Шмидта, Москва*

*Л. П. Винник, заведующий Отделением внутрен-
него строения Земли, заведующий лабораторией
сейсмологических исследований, профессор, док-
тор физико-математических наук
vinnik@dubna-2.scgis.ru
Тел. 8 (495) 254-93-25*

Institute of Physics of the Earth RAS

*L. P. Vinnik, Chief of department, Chief of Labora-
tory, Professor, Doctor of Physical and Mathematical
Sciences
vinnik@dubna-2.scgis.ru
Tel. 8 (495) 254-93-25*

*Г. Л. Косарев, ведущий научный сотрудник, канди-
дат физико-математических наук
kosarev@ifz.ru
Тел. 8 (495) 254-94-05*

*G. L. Kosarev, Leading scientist, Candidate of Physi-
cal and Mathematical Sciences
kosarev@ifz.ru
Tel. 8 (495) 254-94-05*

*С. И. Орешин, ведущий научный сотрудник, кан-
дидат физико-математических наук
sergeyi.oreshin@gmail.com
Тел. 8 (495) 254-94-05*

*S. I. Oreshin, Leading scientist, Candidate of Physi-
cal and Mathematical Sciences
sergeyi.oreshin@gmail.com
Tel. 8 (495) 254-94-05*