

УДК 550.34.06

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЛУБИННОГО СКОРОСТНОГО СТРОЕНИЯ ВОСТОЧНОЙ ОКРАИНЫ ПРОТОКРАТОНА САРМАТИЯ ПО ДАННЫМ СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ «АЛЕКСАНДРОВКА» МЕТОДОМ ПРОДОЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ ПРИЕМНИКА

Андрей Георгиевич Гоев¹✉

¹ Институт динамики геосфер имени М.А. Садовского РАН, Москва, Россия;
andr.goev@gmail.ru <http://orcid.org/0000-0001-9477-5963>

Аннотация. Построен скоростной разрез до глубины около 250 км восточной окраины протократона Сарматия (Восточно-Европейская платформа) на основе Р-функций приемника (PRF). В качестве исходных данных использованы сейсмограммы новой широкополосной станции «Александровка». В разрезе выявлены основные сейсмические границы, а также показано наличие среднелитосферной неоднородности в верхней мантии (MLD).

Ключевые слова: Восточно-Европейская платформа, Сарматия, приемные функции, сейсмология, перечные волны, PRF, MLD

Для цитирования: Гоев А.Г. Первые результаты моделирования глубинного скоростного строения восточной окраины протократона Сарматия по данным сейсмической станции «Александровка» методом продольных функций приемника // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022. № 6. С. 88–94.

DEEP VELOCITY STRUCTURE OF THE EASTERN MARGIN OF THE SARMATIAN PROTOCRATON BASED ON THE «ALEKSANDROVKA» SEISMIC STATION DATA FROM THE RECEIVER FUNCTION TECHNIQUE

Andrey G. Goev¹✉

¹ Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics RAS, Moscow, Russia;
andr.goev@gmail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9477-5963>

Abstract. A velocity section was obtained to a depth of about 250 km on the eastern margin of the Sarmatia protocraton (East-European Craton) based on P receiver functions (PRF). Seismograms of the new broadband station «Aleksandrovka» were used as initial data. The section reveals the main seismic boundaries, and also shows the presence of mid-lithospheric discontinuity in the upper mantle (MLD).

Key words: East European craton, Sarmatia, receiver functions, seismology, shear waves, MLD

For citation: Goev A.G. Deep velocity structure of the eastern margin of the Sarmatian protocraton based on the «Aleksandrovka» seismic station data from the receiver function technique. *Moscow University Geol. Bull.* 2022; 6: 88–94. (In Russ.).

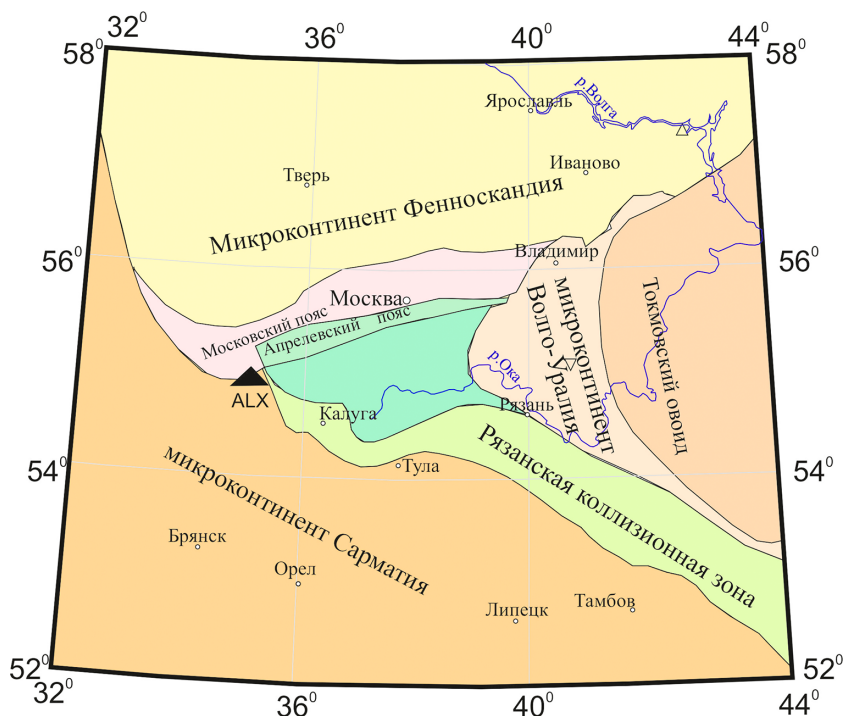
Введение. Знания о глубинном строении Земли в целом или отдельного региона чрезвычайно важны для понимания процессов, происходящих в земных недрах. На их основе проводится геодинамическое и тектоническое моделирование, формируются представления о вещественном составе коры и мантии.

Центральная часть Восточно-Европейской платформы (ВЕП) — место соединения в единый континент трех архейских протократонов (мегаблоков) — Фенноскандии, Волго-Уралии и Сарматии (рис. 1). Поэтому знания о ее глубинном строении могут быть важны с точки зрения понимания особенностей эволюции Земли. Определяющую роль при решении этой задачи играют косвенные геофизические методы, преимущественно сейсмологические. К настоящему моменту известно множество методов исследования, использующих в качестве источника возбуждения как естественные процессы

(землетрясения), так и искусственные (химические и ядерные взрывы). Каждый используемый тип источника имеет свои преимущества и недостатки. При применении искусственных источников хорошо известны их параметры, однако для достижения значений энергии, необходимых для проникновения возбуждаемых волн достаточно глубоко (например, в верхнюю мантию), необходимо использовать очень мощные взрывы (такие, как ядерные), что невозможно из-за густонаселенности территории. Для получения детальных глубинных скоростных разрезов на основе использования пассивных источников возбуждения необходима разветвленная сеть сейсмических станций, отсутствующая в центральной части ВЕП из-за ее асейсмичности.

Практически единственный сейсмологический метод, позволяющий получить глубинные скоростные разрезы с высокой вертикальной разрешающей

Рис. 1. Тектоническая схема центральной части Восточно-Европейской платформы, по [Минц и др., 2010]. Черным треугольником отмечена сейсмическая станция «Александровка» (ALX)



способностью по данным одиночных широкополосных сейсмических станций, — метод функций приемника. Метод основан на использовании обменных волн, формирующихся в непосредственной близости от станции при прохождении через среду волн от телесейсмических событий. Впервые предложенный в 1977 г. [Vinnik et al., 1977], он получил широкое распространение и сейчас используется практически повсеместно при решении задач восстановления глубинного строения.

Регион исследования и регистрирующая аппаратура. Регион исследования — место древней коллизии древних архейских протократонов (мегаблоков) Фенноскандия и Сарматия. Ряд исследователей (например, [Claesson et al., 2001]) изучаемый район относят к Осницко-Микашевичскому вулканическому поясу, сложенному преимущественно диоритами и габбро, и рассматривают как активную северо-западную окраину мегаблока Сарматия. Эта геологическая структура, в свою очередь, состоит из нескольких архейских провинций с различным геологическим возрастом: от 3,5 до 2,7 млрд лет [Bogdanova et al., 2016].

С геологической точки зрения исследуемый район расположен в переходной зоне от Московской синеклизы к Воронежской антеклизе (Калужско-Бельской структурной зоне), на оси Западно-Двинско-Калужского подвижного пояса [Геологический..., 2007], охватывающего территории Тульской, Калужской и существенной части Смоленской областей, и находится в вытянутой зоне шириной около 20–30 км с северо-западным простиранием.

В качестве исходных данных в работе использованы сейсмограммы телесейсмических событий, зарегистрированных широкополосной станцией «Александровка» (ALX). Она расположена на полигоне геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова на территории национального парка «Угра» в Юхновском районе Калужской области (координаты станции 54,89° с. ш., 35,01° в. д.). Станция укомплектована широкополосным датчиком Guralp 6TD с максимальным периодом регистрации сейсмических сигналов 30 с и регистратором RefTek 130. Аппаратура установлена в геофизической немагнитной обсерватории на территории базы и в удалении от жилых объектов (рис. 2).

Рис. 2. Место установки сейсмической станции. Слева — немагнитный павильон, справа — постаменты для установки оборудования



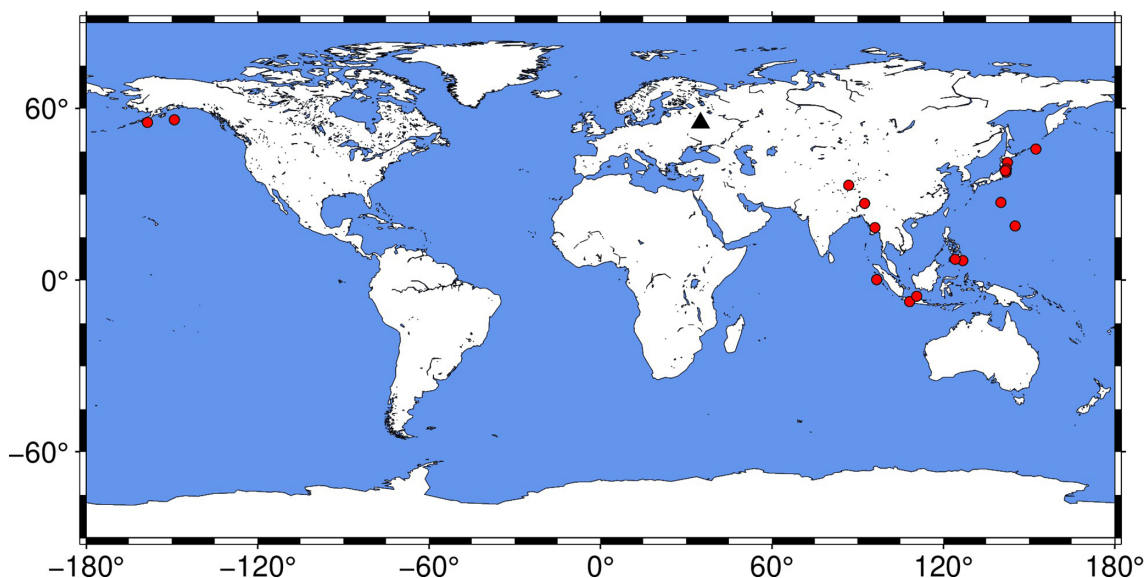


Рис. 3. Карта распределения эпицентров событий, отобранных для обработки (красные круги). Черным треугольником отмечено положение станции ALX

Материалы и методы исследований. Как уже отмечалось, имея в распоряжении записи одиночной сейсмической станции, практически единственный способ получить достоверный глубинный скоростной разрез — применение метода функций приемника. Метод обычно разделяют на две составляющие по типам используемых обменных фаз — P -функция приемника (или PRF) использует обменные и кратные волны P - S (P_s) и, соответственно, S -функция приемника (или SRF), использующая обменные и кратные волны S - P (S_p). Автор использовал только PRF из-за недостаточного на данный момент количества зарегистрированных событий, пригодных для расчета SRF.

Для получения индивидуальных функций приемника использован подход, многократно апробированный и детально описанный в литературе (например, в [Vinnik, 1977]). Поэтому кратко остановимся только на наиболее важных аспектах методики. В первую очередь сейсмические события отбираются в соответствии с эпицентрными расстояниями. Для PRF источники возбуждений должны находиться в диапазоне эпицентрных расстояний 40 – 100° . Такие удаления обеспечивают, с одной стороны, достаточную глубину проникновения сейсмических волн для исследования верхней мантии, а с другой — позволяют избежать зоны тени. Для получения параметров анализируемых событий (а именно времени в очаге, глубины и координат) использован каталог CMT (Global Centroid Moment Tensor Catalog) [Dziewonski et al., 1981; Ekstrom et al., 2012]. Также эмпирически установлено, что события с магнитудой $<5,5$ чрезвычайно редко пригодны для обработки, потому их не использовали. Для дальнейшего анализа отобраны события с импульсной формой колебания первой падающей продольной волны и высоким (>3) отношением сигнал/шум. Для получения индивидуальных функций приемника к

отобранным событиям применен набор стандартных процедур, включающий в себя переход в лучевую систему координат, деконволюцию и частотную фильтрацию.

Проанализированы телесеismicические события, зарегистрированные сейсмической станцией ALX с декабря 2017 по июнь 2021 г. В непрерывном ряду данных наблюдаются значительные пропуски, достигающие до полугода. По этой причине после применения описанных выше процедур удалось отобрать только 17 индивидуальных PRF. Распределение эпицентров, отобранных для обработки событий, приведено на рис. 3.

Результаты исследований и их обсуждение.

К важным преимуществам метода PRF относится возможность оценить особенности зоны фазовых переходов, находящейся на глубине 410 и 660 км. Эти границы отвечают фазовым трансформациям оливина в вадслеит и рингвудита в бриджманит [Ringwood, 1991]. Каждый из этих переходов сопровождается скачкообразным повышением значений скорости объемных волн, поэтому на границах зон фазовых переходов формируются обменные волны с относительно большой амплитудой (2 – 4% от амплитуды продольной волны). Чтобы выявить интересные обменные фазы, наблюдаемые PRF были приведены к одному эпицентрному расстоянию (67°) и суммированы с поправками за глубину конверсии (построен стек). Стек приведен на рис. 4.

Несмотря на относительно небольшое число наблюдаемых трасс, на стеке отчетливо прослеживаются обменные волны P_{410s} и P_{660s} , причем максимумы амплитуды наблюдаются на суммотрассах, отвечающих целевым значениям глубины 410 и 660 км. Наблюдаемые времена вступления P_{410s} и P_{660s} составляют $42,1$ и $66,9$ с (за 0 принято время вступления первой продольной волны) соответ-

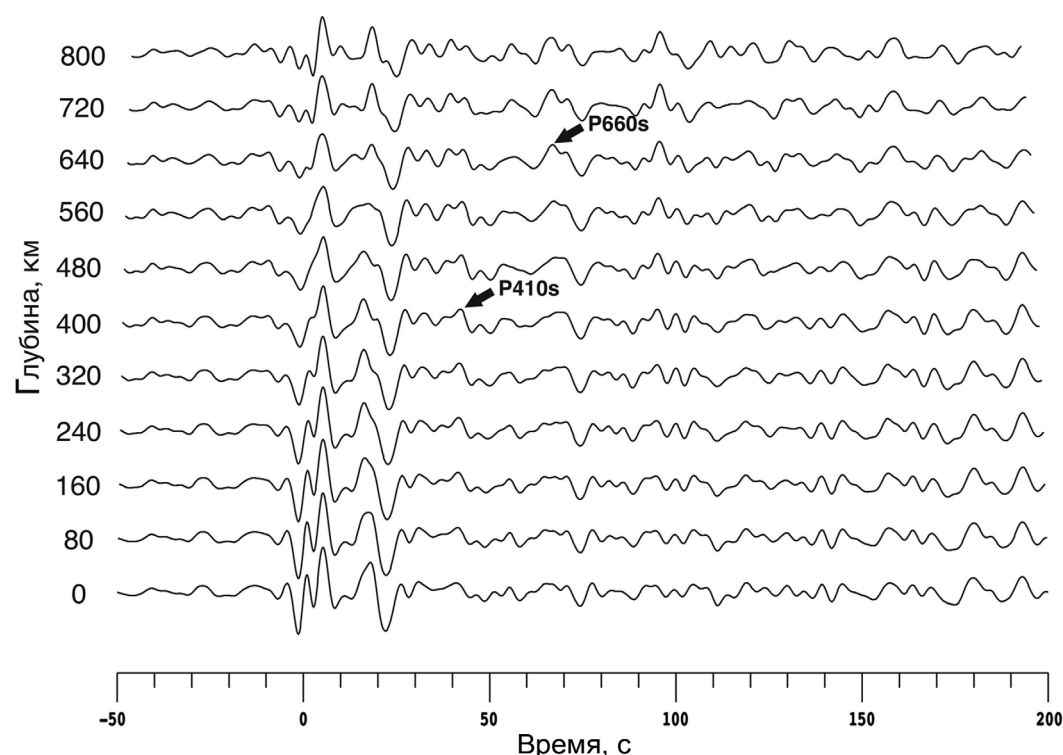


Рис. 4. Суммарные PRF для различных пробных глубин. Хорошо выявляются обменные волны от границ зоны фазовых переходов 410 и 660 км. Обменные волны, сформировавшиеся на этих границах, указаны стрелками

ственно. Согласно стандартной скоростной модели IASP91 [Kennett, Engdahl, 1991] ожидаемые времена вступления обменных волн составляют 44 и 67,9 с. На основании того, что каждая из анализируемых фаз наблюдается на стеке раньше стандартных значений, можно сделать вывод о средних повышенных значениях скорости сейсмических волн в верхней мантии.

Для восстановления глубинного скоростного разреза был использован алгоритм, предложенный в [Алешин, 2021]. В его основе лежит метод Левенберга–Марквардта [Press et al., 2007]. Прямая задача решалась с использованием матричного алгоритма Томсона–Хаскелла [Haskell, 1962]. Для получения скоростных моделей сгенерировано 40 000 случайных пробных моделей. Они состояли из 13 слоев, свободными параметрами для которых были значения скорости поперечных волн и отношение скорости продольных и поперечных волн, а также мощность каждого слоя. Для стабилизации инверсии скорость на глубине 250 км фиксировалась на значениях согласно IASP91. Дополнительными инвертируемыми параметрами, наряду с PRF, были невязки времен пробега фаз 410 и 660 км в верхней мантии для продольных и поперечных волн относительно модели IASP91 (Δt_p и Δt_s). Эти параметры рассчитывали по методике, приведенной в [Vinnik et al., 2016]. Для получения окончательного распределения пространство параметров модели было разбито на ячейки. Окончательное решение представлено как область сгущения минимизированных случайных исходных моделей, синтетические PRF от которых лучше всего соответствовали наблюдаемым данным. Для получения окончательного решения из всего набора минимизированных начальных моделей

отобрано около 1%, синтетические PRF от которых наилучшим образом отвечают наблюдениям. Полученные апостериорные функции распределения визуализировали с использованием цветовой палитры. Выделяли те ячейки, через которые прошло наибольшее количество отобранных минимизированных пробных моделей (рис. 5). Итоговой моделью считаются медианные значения по выборке.

В модели выявлен ряд особенностей. Верхняя часть коры (рис. 5, б) до глубины 13 км характеризуется стабильными значениями скорости $V_s = 3,6$ км/с, ниже по разрезу в диапазоне глубины 13–27 км наблюдается повышение скорости поперечных волн до 3,8–3,9 км/с с последующим их уменьшением до 3,7 км/с. На глубине 34–42 км наблюдается градиентный рост V_s с 3,7 до 4,2 км/с, который завершается резким скачком скорости до 4,6 км/с, маркирующим границу Мохо. Наиболее значимая особенность скоростного строения верхней мантии — выраженный слой пониженных значений скорости V_s на глубине 130–180 км.

В первую очередь обращает на себя внимание тот факт, что средние значения сейсмической скорости в полученном скоростном разрезе повышены относительно стандартной модели IASP91 (рис. 5). Этот результат не противоречит аналогичным оценкам, полученным по данным сейсмического шума для основных глубинных структур ВЕП, усредненных по площади размером $6 \times 6^\circ$ [Королева и др., 2010]. Следует также заметить, что оценки средних значений скорости V_p в верхней мантии проводились по комплексу геофизических данных с использованием мировой сети [Artemieva, 2009]. Для центральной части ВЕП отмечена повышенная скорость поперечных волн (около 6–7% от модели

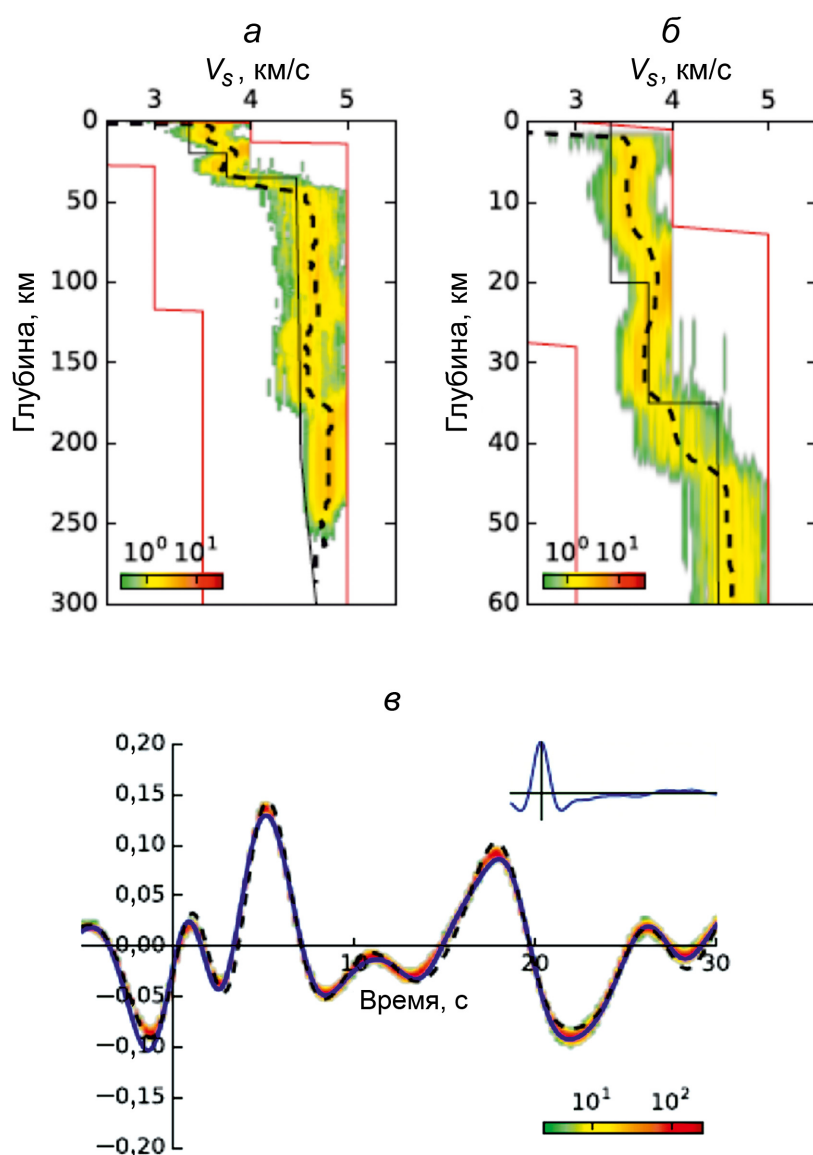


Рис. 5. Скоростная модель поперечных волн для станции ALX (а), она же, более подробно представляющая кору и границу Мохо (б). Цветом показаны поля сгущения индивидуальных минимизированных случайных моделей. Пунктирными линиями показаны медианные модели. Красные линии — границы формирования случайных начальных моделей, черные линии — модель IASP91. Наблюдаемая PRF показана синей сплошной линией. Синтетическая PRF от медианной модели показана штриховой линией (в)

IASP91). Более высокие оценки повышения скорости, приведенные в цитируемой работе, могут быть связаны как с отсутствием детальных сведений о регионе, так и со способами определения скорости (на основе методов сейсмотомографии и данных о тепловом потоке).

Глубина залегания основных сейсмических границ, в том числе границы Мохо, для территории центральной части ВЕП известна на основе интерполяции данных. Единственный профиль глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ), отработанный на этой территории и имеющий глубину исследования, превышающую мощность земной коры (профиль Калуга–Наро-Фоминск [Линькова и др., 1984]), проходит на значительном расстоянии от сейсмической станции ALX. В отчете Центра ГЕОН [Костюченко и др., 2001] приведена обобщенная карта залегания границы Мохо для центральной части ВЕП (рис. 6). Согласно этой карте глубина залегания коромантийного перехода составляет около 42 км, что согласуется с приведенными в представленной работе оценками.

Наиболее яркая особенность строения верхней мантии изучаемого региона — наличие слоя пониженной скорости относительно ее средних значений, полученных в модели. Кровля и подошва этого слоя определены на глубине 130 и 180 км соответственно. Выявленная скоростная аномалия — среднелитосферная неоднородность (или MLD, mid-lithospheric discontinuity). Она обнаружена практически повсеместно под древними кратонами на глубине около 100 км [Thybo, Perchuc, 1997]. Ее характеристики, такие, как глубина залегания кровли, а также мощность, отличаются для различных тектонических структур и, по всей видимости, зависят от условий их формирования [Sun et al., 2008; Rychert, Shearer, 2009]. В частности, для территории центральной части ВЕП наличие MLD установлено на глубине 140–180 км для Волго-Уральского мегаблока [Гоев и др., 2018], а также на глубине около 100–150 км для коллизийной зоны сочленения мегаблоков Фенноскандия, Волго-Уралья и Сарматия с вариациями глубины залегания кровли этого слоя от 70 до 100 км [Санина и др., 2014; Гоев и др., 2021].

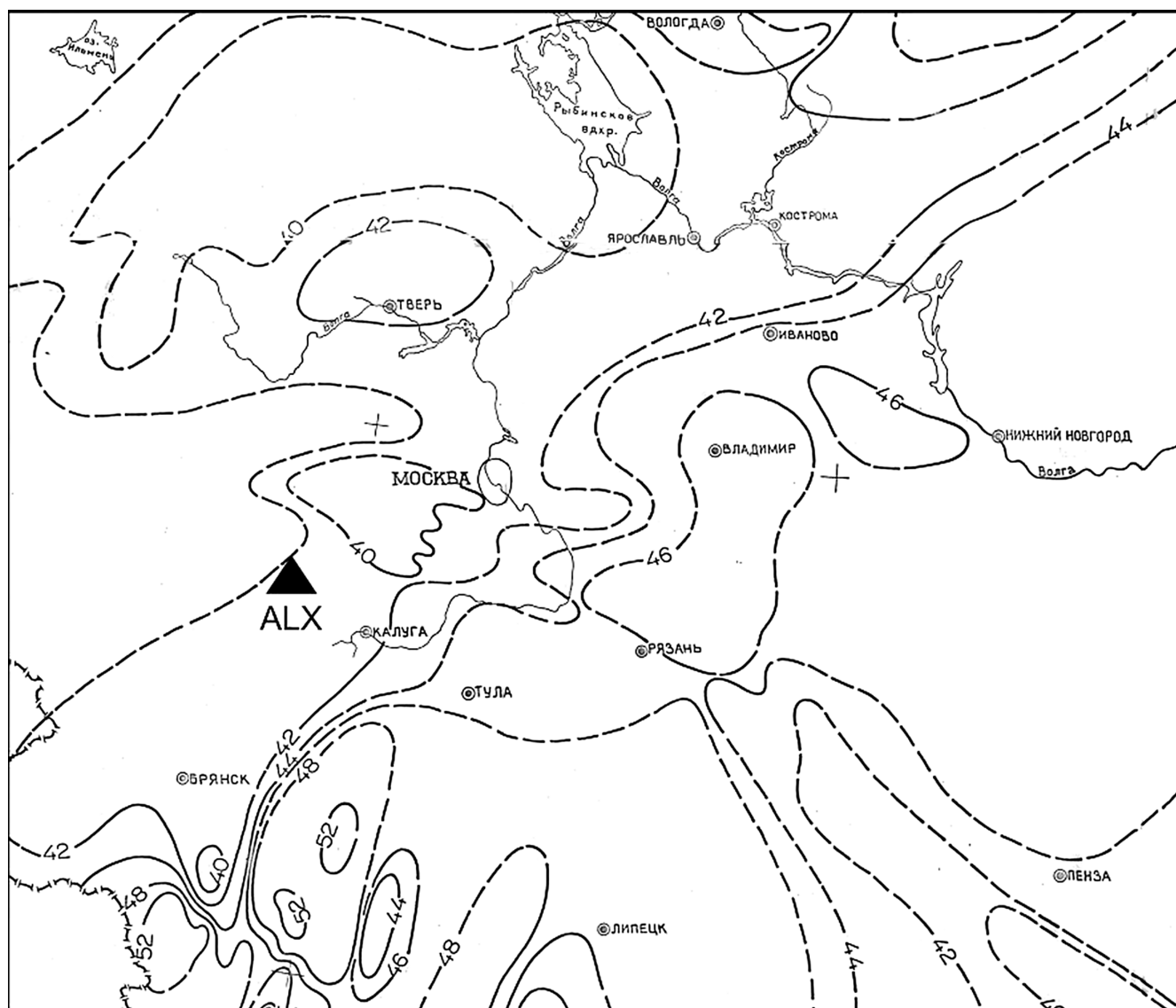


Рис. 6. Карта залегания границы Мохо для центральной части ВЕП [Костюченко и др., 2001]. Черным треугольником показано место установки сейсмостанции ALX

Важно отметить, что определенные в представленной работе оценки глубины залегания MLD, полученные на основе только PRF, не могут быть окончательными, так как на основе синтетических испытаний показано, что обменные волны, формирующиеся на границе 180 км, регистрируются на сейсмограмме практически в то же время, что и однократные волны P_{pps} от границы Мохо (18–20 с от времени вступления первой P -волны), и могут быть интерпретированы неверно [Гоев и др., 2018]. Для получения окончательного результата необходимо продолжить накопление сейсмических данных, чтобы включить в анализ обменные волны $S-P$ (SRF).

В настоящий момент нет единого мнения о природе формирования MLD. Среди высказываемых гипотез можно выделить следующие: реологическую расслоенность при температуре, близкой к точке солидуса [Thybo, 2006]; петрофизическую расслоенность в условиях либо частичного плавления вещества [Yuan, Romanowicz, 2010], либо в присут-

ствии базальтовых расплавов [Thybo, 2006; Rader et al., 2015]; изменение деформационных свойств с глубиной [Karato et al., 2015]. Ни одна из версий исчерпывающе не описывает все имеющиеся на настоящий момент сведения. Для создания удовлетворительной концепции необходимо получение новых данных о глубинном строении различных тектонических регионов.

Заключение. Проанализированы записи телесеизмических событий, зарегистрированные новой трехкомпонентной широкополосной сейсмической станцией «Александровка», расположенной на восточной окраине протократона Сарматия. Показано что средние значения скорости объемных сейсмических волн в литосфере изучаемого региона повышены относительно стандартной модели IASP91. С учетом того, что регион исследования находится в центре древней Восточно-Европейской платформы, такой результат можно считать закономерным с учетом аналогичных результатов, полученных для других платформ.

Скоростное строение земной коры в районе места установки станции не демонстрирует существенных аномалий. В средней коре выявлен слой повышенных значений скорости V_s на глубине 13–27 км. Коромантийный переход характеризуется резким скачком скорости на глубине около 42 км, что соотносится с известными оценками глубины залегания границы Мохо для этого региона.

В верхней мантии выявлен слой относительно пониженной скорости сейсмических волн на глубине 130–180 км, вероятно, маркирующий MLD. Слой пониженной скорости в верхней мантии в сопредельных областях уже выявлен в предыдущих работах автора, а также установлен для других

платформенных областей Земли. Несмотря на то что его наличие, по всей видимости, носит глобальный характер, глубина его залегания и скоростные особенности отличаются для разных регионов.

Необходимо также подчеркнуть, что полученные оценки скоростного строения верхней мантии предварительны. Необходимо продолжать накопление сейсмической информации для получения достаточного количества записей обменных волн S–P (SRF), включение которых в анализ позволит существенно повысить надежность результатов.

Финансирование. Работа выполнена по теме 122040400015-5 за счет средств федерального бюджета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алешин И.М. Построение решения обратной задачи по ансамблю моделей на примере инверсии приемных функций // Докл. РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 496. № 1. С. 63–66.

Геологический атлас Калужской области / Сост. В.С. Бобров. ПГП Калуга: «Притяжение», 2007. 70 с.

Гоев А.Г., Косарев Г.Л., Ризниченко О.Ю., Санина И.А. Скоростная модель западной части Волго-Уралии методом функции приемника // Физика Земли. 2018. № 6. С. 154–169.

Гоев А.Г., Санина И.А., Константиновская Н.Л. Особенности глубинного скоростного строения коллизийной зоны центральной части ВЕП по данным станций «Михнево» и «Обнинск» // Динамические процессы в геосферах. 2021. № 13. С. 81–89.

Королева Т.Ю., Яновская Т.Б., Патрушева С.С. Скоростное строение верхней мантии Восточно-Европейской платформы по данным сейсмического шума // Физика Земли. 2010. № 10. С. 38–47.

Костюченко С.Л., Солодилов Л.Н., Морозов А.Ф. и др. Составление структурно-геодинамической карты территории Восточно-Европейской платформы для целей минерагенического прогноза. М.: Центр ГЕОН, 2001. С. 136.

Линькова Т.М. и др. Результаты работ с аппаратурой Земля по профилю Калуга — Наро-Фоминск // Разведочная геофизика. 1984. Вып. 97. С. 25–31.

Милиц М.В., Сулейманов А.К., Бабаянц П.С. и др. Глубинное строение, эволюция и полезные ископаемые раннедокембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы: Интерпретация материалов по опорному профилю 1-ЕВ, профилям 4В и ТАТСЕЙС: В 2 т. М.: Геокарт; ГЕОС, 2010. Т. 1. 408 с.; Т. 2. 400 с.

Санина И.А., Королев С.А., Косарев Г.Л., Ризниченко О.Ю. Строение литосферы в зоне сочленения мегаблоков Восточно-Европейской платформы по данным функции приемника // Докл. РАН. 2014. Т. 456, № 3. С. 338–341.

Artemieva I.M. The continental lithosphere: Reconciling thermal, seismic, and petrologic data // Lithos. 2009. Vol. 109. P. 23–46.

Bogdanova S.V., Gorbatshev R., Garetsky R.G. EU-ROPE|East European Craton // Reference Module in Earth Systems and Environ. Scie. Elsevier, 2016.

Claesson S., Bogdanova S.V., Bibikova E.V., Gorbatshev R. Isotopic evidence of Paleoproterozoic accretion in the basement of the East European Craton // Tectonophysics. 2001. Vol. 339, N 1–2. P. 1–18.

Dziewonski A.M., Chou T.A., Woodhouse J.H. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity // J. Geophys. Res. 1981. Vol. 86. P. 2825–2852.

Ekström G., Nettles M., Dziewonski A.M. The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes // Phys. Earth Planet. Int. 2012. Vol. 200–201. P. 1–9.

Haskell N.A. Crustal reflection of plane P and SV waves // J. Geophys. Res. 1962. Vol. 67, N 12. P. 4751–4767.

Karato S.I., Ougboji T., Park J. Mechanisms and geologic significance of the mid-lithosphere discontinuity in the continents // Nature Geosci. 2015. Vol. 8. P. 509–514.

Kennett B.L.N., Engdahl E.R. Traveltimes for global earthquake location and phase identification // Geophys. J. Int. 1991. Vol. 105. P. 429–465.

Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P. Numerical Recipes: 3rd ed. The Art of Scientific Computing. N.Y.: Cambridge University Press, 2007.

Rader E., Emry E., Schmerr N. et al. Characterization and Petrological Constraints of the Midlithospheric Discontinuity // Geochem. Geophys. Geosy. 2015. Vol. 16. P. 3484–3504.

Ringwood A.E. Phase transformations and their bearing on the constitution and dynamics of the mantle // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1991. Vol. 55. P. 2083–2110.

Rychert C.A., Shearer P.M. A global view of the lithosphere-aesthenosphere boundary // Science. 2009. Vol. 324. P. 495–498.

Sun W., Fu L.Y., Saygin E., Zhao L. Insights Into Layering in the Cratonic Lithosphere Beneath Western Australia // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2018. Vol. 123. P. 1405–1418.

Thybo H. The heterogeneous upper mantle low velocity zone // Tectonophysics. 2006. Vol. 4167. P. 53–79.

Thybo H., Perchuc E. The Seismic 8° discontinuity and partial melting in continental Mantle // Science. 1997. Vol. 275. P. 1626–1629.

Vinnik L.P. Detection of waves converted from P to S in the mantle. // Physics of the Earth and Planetary Inter. 1977. Vol. 15. P. 39–45.

Vinnik L., Kozlovskaya E., Oreshin S. et al. The lithosphere LAB, LVZ and Lehmann discontinuity under central Fennoscandia from receiver functions // Tectonophysics. 2016. Vol. 667. P. 189–198.

Yuan H., Romanowicz B. Lithospheric layering in the North American craton // Nature. 2010. Vol. 466. P. 1063–1068.

Статья поступила в редакцию 31.05.2022,
одобрена после рецензирования 02.11.2022,
принята к публикации 26.01.2023