ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2020, том 494, № 2, с. 38–41

УДК 550.347

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ АЗИМУТАЛЬНОЙ УПРУГОЙ АНИЗОТРОПИИ ВЕРХНЕЙ МАНТИИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ВОРОНЕЖСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАССИВА

© 2020 г. А. Г. Гоев^{1,*}, Э. В. Калинина²

Представлено академиком РАН В. В. Адушкиным 22.06.2020 г. Поступило 15.07.2020 г. После доработки 20.07.2020 г. Принято к публикации 22.07.2020 г.

Приведены оценки азимутальной упругой анизотропии верхней мантии Воронежского кристаллического массива по данным трех трехкомпонентных широкополосных станций Воронежской сейсмической сети – "Сторожевое" (VSR), "Новохопёрск" (VRH) и "Галичья гора" (LPSR) методом SKS/SKKS-анализа. Моделировались два параметра – величина сдвига по времени между двумя квазипоперечными волнами (δt), формирующимися при прохождении поперечной волны (например, SKS) через анизотропную среду и азимут оси максимальной скорости α (оси симметрии), по которой распространяется "быстрая" квазипоперечная волна. В результате проведенного исследования для станции VSR анизотропные параметры определены, как $\alpha = 40^{\circ}$, $\delta t = 0.6$ с; для станции VRH – $\alpha = 40^{\circ}$, $\delta t = 0.1$ с; для станции LPSR – $\alpha = 40^{\circ}$, $\delta t = 0.4$ с. С учетом относительной близости расположения станций данные всех станций также были суммированы и дали результат – $\alpha = 40^{\circ}$, $\delta t = 0.4$ с. Принимая во внимание полную согласованность полученных оценок, а также совпадение выявленного α с направлением движения Евразийской плиты в этом регионе, делаются выводы о наличии в регионе уверенно выявляемой относительно слабой анизотропии верхней мантии северо-восточного азимута, вызванной современными тектоническими процессами.

Ключевые слова: анизотропия, сейсмология, тектоника, мантия, SKS/SKKS-анализ **DOI:** 10.31857/S2686739720100035

Воронежский кристаллический массив (ВКМ) является одной из наиболее крупных положительных структур Восточно-Европейской платформы, представляет собой погребенный выступ докембрийского фундамента, ограниченный системой авлакогенов и впадин. Имеет четко выраженные структурные ограничения: с северо-востока и юго-запада Пачелмским и Днепрово-Донецким рифейскими авлакогенами, а с северозапада и юго-востока Оршанской и Прикаспийской впадинами палеозойского заложения. В регионе проведены эксперименты по определению сейсмической анизотропии коры до глубин 45-50 км, основанные на глубинных геотраверсах "Гранит", "Чёрное море-Воркута" и 1-ЕВ, а также проекте "Астра". В рамках последнего было констатировано наличие анизотропии подкор-кового слоя верхней мантии [1, 2].

В работе методом оценки азимутальной упругой анизотропии был выбран широко распространенный в мировой практике и никогда ранее не применявшийся к BKM SKS/SKKS-анализ [3, 4]. Метод является хорошо апробированным и позволяет получать достоверный и устойчивый результат на основе данных одиночных широкополосных станций. Его суть состоит в использовании эффекта расщепления поперечной волны (например, SKS) на две квазипоперечные, распространяющиеся с разной скоростью, при прохождении через анизотропную среду. Моделируются два параметра – величина запаздывания "медленной" волны относительно "быстрой" (δt) и азимут поляризации "быстрой" волны (α). Первый параметр определяет величину анизотропии, а второй предпочтительную ориентацию анизотропного вещества.

Лабораторными экспериментами установлено что оливин как основной минерал слагающий верхнюю мантию обладает выраженными анизотропными свойствами [5]. Принимая во внима-

¹ Институт динамики геосфер им. М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

² Федеральный исследовательский центр Единая геофизическая служба Российской академии наук, Воронеж, Россия

^{*}E-mail: andr.goev@gmail.com



Рис. 1. а — Азимутальное распределение использованных событий. События с близкими азимутами объединены. б — изолинии значений целевой функции для объединенных данных по всем станциям. Звездочкой отмечен минимум целевой функции.

ние большие периоды SKS-волн (для данного исследования записи фильтровались в диапазоне от 10 до 30 с), а также возможность наличия больших объемов ориентированного оливин-содержащего вещества, получаемые данной методикой результаты, вероятнее всего, относятся к верхней мантии [6].

В работе использованы сейсмограммы, записанные на трех широкополосных сейсмостанциях Воронежской сейсмической сети - "Сторожевое" (VSR), "Новохопёрск" (VRH) и "Галичья гора" (LPSR). Все они оснащены датчиками СМ3-ОС с полосой пропускания 0.1-50 с. В качестве каталога событий использованы данные лаборатории сейсмического мониторинга ВКМ. Из каталога отбирались события с магнитудой >5.5, находящиеся в диапазоне эпицентральных расстояний 65°-120°. Критерием отбора сейсмограммы для ее обработки являлась, в первую очередь, изолированность вступления SKS/SKKS-фазы от других нецелевых вступлений (S, S_{diff} и др.) [7]. В результате, из более 1000 записей удаленных телесейсмических событий с 2010 по 2019 гг., было отобрано 27 событий для станции VSR; 19 для станции VRH и 15 для станции LPSR. Решение искалось в виде минимума целевой функции (среднеквадратической разности между наблюденной и теоретической Т-компонентами, рассчитанной перебором пробных α и δt с шагом $\pm 10^{\circ}$ и ± 0.1 с соответственно), как было описано, например, в работе [8]. Точность полученных оценок составляет ± шаг по перебору для каждого параметра [7].

Для всех станций получены локализованные значения минимумов целевых функций, соответствующих: для VSR – $\alpha = 40^\circ$, $\delta t = 0.6$ с, для VRH – $\alpha = 40^{\circ}, \delta = 0.1$ с, для LPSR – $\alpha = 40^{\circ}, \delta t = 0.4$ с. Учитывая близость расположения станций, было также получено общее решение для всех обрабатываемых данных, соответствующее значениям $\alpha = 40^{\circ}, \delta t = 0.4$ с (рис. 1).

Примененный подход не позволяет установить точную глубину, к которой приурочены анизотропные параметры. Однако, как показано в работе [8], можно произвести приблизительные оценки мощности анизотропного слоя. Используя среднюю величину запаздывания для всех анализируемых станций ($\delta t = 0.4$) и стандартную скорость SKS-волн в мантии (4.5 км/с), мощность определяется равной 80 км, что еще раз указывает на мантийную природу выявленного эффекта.

Наиболее вероятной причиной, вызывающим ориентацию больших объемов мантийных ксенолитов, обычно называют астеносферный поток (или иной поток подплавленного мантийного вещества) [9]. При этом разделяют современные геодинамические процессы и, так называемую, "вмороженную" анизотропию. Последний тип связывают с подкорковой литосферой, сохраняющей ориентацию вещества с последнего времени тектонической активности. В данном случае, учитывая совпадение определенных азимутов оси симметрии мантийного вещества и современного направления движения Евразийской плиты в районе ВКМ (рис. 2), сделан вывод о приуроченности анизотропных эффектов современным тектоническим процессам.

Полученные результаты согласуются с глобальными моделями мантийной анизотропии, полученными по поверхностным волнам [10, 11]. В работе [10] показано, что азимут направления



Рис. 2. Тектоническая схема эрозионного среза докембрия ВКМ [12]. *1* – условные границы крупных структур ВЕП; *2* – границы основных структур ВКМ; *3* – тектонические нарушения различного порядка; *4* – сейсмические станции; *5* – главное направление оси симметрии мантийного вещества; *6* – направление движения Евразийской плиты (по [13]).

оси максимальной скорости порядка 40° отвечает глубинам в диапазоне 50—150 км, что также согласуется с приведенными в работе оценками мощности анизотропного слоя.

В работе [7] показано, что азимут оси симметрии мантийного вещества, определенный той же методикой для станции Обнинск, имеет азимут 90°. Исходя из этого можно предположить, что несмотря на близость регионов, поле напряжений в мантии, вероятно, существенно отличается, что подчеркивает обособленность ВКМ от сопредельных территорий ВЕП.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в соответствии с темами НИР № АААА-А19-119022090015-6 и 0152-2019-0005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кашубин С.Н. Сейсмическая анизотропия и эксперименты по ее изучению на Урале и Восточно-Ев-

ропейской платформе. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 182 с.

- Литосфера воронежского кристаллического массива по геофизическим и петрофизическим данным. Гл. ред. член-корр. РАН Н.М. Чернышов. Воронеж, 2012. 330 с.
- 3. Винник Л.П., Косарев Г.Л., Макеева Л.И. Анизотропия литосферы по наблюдениям волн SKS и SKKS // Доклады АН СССР. 1984. Т. 278. № 6. С. 1335–1339.
- Savage M.K., Wessel A., Teanby N., Hurst T. Automatic Measurement of Shear Wave Splitting and Applications to Time Varying Anisotropy at Mount Ruapehu Volcano // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2010. V. 115. B12321.
- 5. *Babuska V., Cara M.* Seismic Anisotropy in the Earth. Prague. 1991. P. 217.
- Косарев Г.Л., Макеева Л.И., Саваренский Е.Ф., Чесноков Е.М. Влияние анизотропии под сейсмостанцией на объемные волны // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1979. № 2. С. 26–37.
- Адушкин В.В., Гоев А.Г., Косарев Г.Л., Санина И.А. Оценка параметров сейсмической азимутальной анизотропии верхней мантии центральной части Восточно-Европейской платформы по данным

станций "Обнинск" и "Михнево" // Геофизические исследования. 2019. Т. 20. № 3. С. 23–35.

- Vinnik L.P., Makeyeva L.I., Milev A., Usenko A.Yu. Global Patterns of Azimuthal Anisotropy and Deformations in the Continental Mantle // Geophys. J. Int. 1992. V. 111. P. 433–447.
- Savage M.K. Seismic Anisotropy and Mantle Deformation: What have we Learned from Shear Wave Splitting? // Rev. Geophys. 1999. V. 37. P. 65–106.
- Debayle E., Ricard Y. Seismic Observations of Large-scale Deformation at the Bottom of Fast-moving Plates // Earth Planet. Sci. Lett. 2013. V. 376. P. 165–177.
- 11. Yuan K., Beghein C. Seismic Anisotropy Changes across Upper Mantle Phase Transitions // Earth and Planetary Science Letters. 2013. V. 374. P. 132–144.
- 12. Окончательный отчет по теме 34-94-51/1 "Изучение особенностей геологического строения и металлогении Воронежского кристаллического массива с целью составления прогнозно-металлогенических карт м-ба 1:500000 за 1991—1999 гг.". Отв. исп. Лосицкий В.И., Молотков С.П. Воронеж. 1999.
- 13. *Wang S., Yu H., Zhang O., Zhao Y.* Absolute Plate Motions Relative to Deep Mantle Plumes // Earth and Planetary Science Letters. 2018. V. 490. P. 88–99.

ESTIMATION OF SEISMIC AZIMUTHAL ANISOTROPY PARAMETERS OF THE UPPER MANTLE OF THE CENTRAL PART OF THE VORONEZH UPLIFT

A. G. Goev^{*a*,#} and E. V. Kalinina^{*b*}

^a Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
^b Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Voronezh, Russian Federation
[#]E-mail: andr.goev@gmail.com
Presented by Academician of the RAS V.V. Adushkin June 22, 2020

The azimuthal elastic anisotropy of the upper mantle of the Voronezh uplift is estimated from the data of three three-component broadband stations of the Voronezh seismic network – "Storogevoie" (VSR), "Novokhopersk" (VRH) and "Galichia Gora" (LPSR) from SKS/SKKS splitting. Two parameters were calculated – the time shift between two quasi-shear waves (δt), which are formed when a shear wave (for example, SKS) passes through an anisotropic medium and the azimuth of the axis of maximum speed α (axis of symmetry), along which a "fast" quasi-shear wave propagates. As a result of the study for the VSR station, the anisotropic parameters are defined as $\alpha = 40^{\circ}$, $\delta t = 0.6$ s; for VRH station – $\alpha = 40^{\circ}$, $\delta t = 0.1$ s; for the LPSR station – $\alpha = 40^{\circ}$, $\delta t = 0.4$ s. Taking into account relative close location of the stations, all the data were also summed up and yield the result – $\alpha = 40^{\circ}$, $\delta t = 0.4$ s. As all obtained results are similar with each other and coincides with the direction of Eurasian plate movement, conclusions are drawn about the presence in the region relatively weak anisotropy of the upper mantle of the north-east azimuth caused by modern tectonic processes.

Keywords: anisotropy, seismology, tectonics, mantle, SKS, SKKS analysis