

УДК 550.347

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АЗИМУТАЛЬНОЙ АНИЗОТРОПИИ ВЕРХНЕЙ МАНТИИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЫ ПО ДАННЫМ СТАНЦИЙ “ОБНИНСК” И “МИХНЕВО”

© 2019 г. В.В. Адушкин¹, А.Г. Гоев¹, Г.Л. Косарев², И.А. Санина¹

¹ Институт динамики геосфер РАН, г. Москва, Россия

² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

Приведены результаты определения параметров сейсмической анизотропии верхней мантии центральной части Восточно-Европейской платформы, которая, согласно активно развивающимся в последние десятилетия тектоническим концепциям, состоит из разновозрастных мегаблоков (микроплит). Объектом изучения была зона сочленения трех основных мегаблоков платформы – Фенноскандии, Волго-Уралии, Сарматии. Для решения поставленной задачи применен метод *SKS/SKKS* анизотропии. Суть метода состоит в использовании *SKS*-фаз для получения величин сдвига по времени между двумя квазипоперечными волнами, формирующимися при прохождении поперечной волны через анизотропную среду, а также в моделировании азимута оси максимальной скорости, по которой распространяется “быстрая” квазипоперечная волна. Методика не позволяет получить точные оценки глубины залегания анизотропного слоя. Однако большие периоды *SKS*-волн и ярко выраженные анизотропные свойства оливина, основного материала, слагающего верхнюю мантию, позволяют сделать предположение о приуроченности выявляемых эффектов к мантийным процессам. Авторами использованы данные станций “Обнинск” (OBN) и “Михнево” (MNV), расположенных в зоне тройственного сочленения мегаблоков. Для анализа было отобрано 1266 событий, зарегистрированных на станции OBN, и 472 – на станции MNV. Полученные для каждой станции оценки азимута оси максимальной скорости и величины запаздывания квазипоперечных волн позволяют считать анизотропию мантии исследуемого региона слабой. Время запаздывания для станции OBN составляет 0.4 с, для станции MNV – 0.2 с, что является ожидаемым результатом для тектонически-спокойных платформенных областей. Строго субширотное направление оси максимальной скорости ($\alpha=90^\circ$ для станции OBN и 100° для станции MNV) согласуется с известным направлением движения Восточно-Европейской литосферной плиты. Для станции OBN выявлены две группы событий с существенно разными оценками азимута оси максимальной скорости. Для событий с преимущественно западным направлением прихода сейсмических волн запаздывание составляет 0.4 с при азимуте 90° ; при обработке событий с восточным направлением прихода, наряду с согласованным решением, выявляется второй выраженный локальный экстремум, соответствующий углам $\sim 160^\circ$ и запаздыванию $\sim 0.5\text{--}1$ с. Для станции MNV также выявлен второй локальный экстремум, соответствующий аналогичным углам, однако с меньшим временем запаздывания ($\sim 0.1\text{--}0.2$ с). Можно предположить, что наличие двух экстремумов связано с анизотропными параметрами двух мегаблоков, вблизи границы сочленения которых расположены станции OBN и MNV.

Ключевые слова: анизотропия, сейсмология, тектоника, *SKS/SKKS*, поперечные волны.

Введение

Исследования по оценке азимутальной упругой анизотропии верхней мантии по наблюдениям и анализу сейсмических *SKS/SKKS*-волн от удаленных землетрясений были начаты в 1984 г., когда авторы работы [Винник, Косарев, Макеева, 1984] предложили

использование явления расщепления распространяющейся в анизотропной среде поперечной волны на две квазипоперечных. Поперечные волны $SKS/SKKS$, поляризованные по SV , расщепляются на быструю и медленную квазипоперечные волны, каждая из которых имеет SH - и SV -компоненты. Анализ соотношения SH - и SV -компонент в записях $SKS/SKKS$ -волн позволяет исследовать азимутальную анизотропию в районе пункта наблюдения (сейсмической станции). На каждой сейсмической станции определяется как минимум два анизотропных параметра: α – азимут направления распространения квазипоперечной “быстрой” волны и δt – запаздывание “медленной” волны относительно “быстрой” при прохождении их через анизотропную среду. Ввиду тесной взаимосвязи тектонических явлений в коре с процессами, происходящими в верхней мантии, эти исследования получили повсеместное распространение и продолжают в мире до сих пор (см., например, [Becker et al., 2015]).

В начале девяностых годов прошлого века две исследовательские группы опубликовали результаты масштабных работ по анализу анизотропных параметров для сотен станций по всему земному шару [Silver, Chan, 1991; Vinnik et al., 1992; Helffrich, Silver, Given, 1994]. Для Восточно-Европейской платформы исследования анизотропии на основе $SKS/SKKS$ -фаз проводились по данным станции “Обнинск” (OBN). В [Silver, Chan, 1991] для этой станции по неуказанному набору событий были получены $\delta t=0.5$ с и $\alpha=-5^\circ$. Позже для той же станции по 12 событиям были получены значения $\delta t=0.68$ с, $\alpha=-19^\circ$ [Helffrich, Silver, Given, 1994]. Другими авторами [Vinnik et al., 1992; Винник, Косарев, 1997] для станции OBN по 6 событиям были получены значения $\delta t=0.5$ с, $\alpha=160^\circ$. Представленные результаты можно считать независимыми, поскольку авторы названных работ использовали разные наборы исходных событий. Так, на рис. 1 можно видеть, что одна группа исследователей [Helffrich, Silver, Given, 1994] анализировала события, сосредоточенные в восточном направлении (9 событий из 12). Результаты другой группы [Vinnik et al., 1992] основаны на меньшем количестве событий (6 трасс), но более равномерно распределенных по азимутальным направлениям.

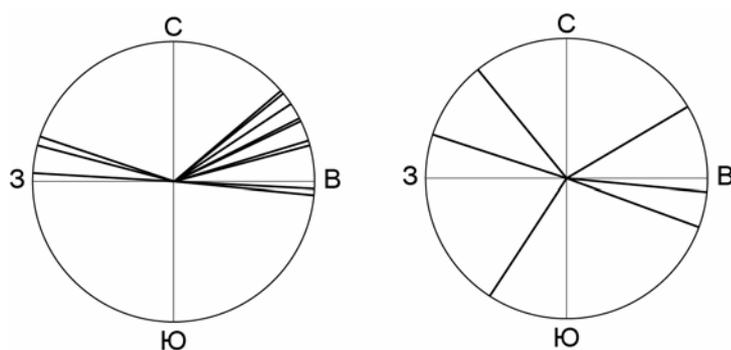


Рис. 1. Диаграммы азимутального распределения событий для станции OBN: слева – по [Helffrich, Silver, Given, 1994], справа – по [Vinnik et al., 1992]

Fig. 1. Diagrams of the azimuthal distribution of events for the OBN station: left – according to [Helffrich, Silver, Given, 1994], right – according to [Vinnik et al., 1992]

В обсуждаемых работах получены разные, но всегда субмеридиональные направления оси максимальной скорости. В одной из более поздних работ [Ваганова, 2012] зафиксировано ее субширотное направление, однако эта работа сфокусирована на исследованиях северных регионов Восточно-Европейской платформы и не содержит сведений о количестве и качестве использованного материала для станции OBN.

К настоящему времени накоплен существенный объем новой сейсмологической информации, что, в частности, позволяет не только провести повторные оценки анизотропных параметров для сейсмостанции OBN, но и впервые выполнить такие же оценки для близлежащей станции MHV (54.95 °с.ш., 37.76 °в.д.).

Результаты оценки анизотропных свойств среды для сейсмостанции OBN

Сейсмостанция OBN укомплектована широкополосным велосиметром STS-1 [Землетрясения..., 2010] с предельным периодом 300 с. Для исследования использовались 1266 событий из каталога *Global Centroid Moment Tensor Catalog (CMT)* [Dziwonski et al., 1981; Ekstrom et al., 2012] за 2001–2015 гг. в диапазоне эпицентральных расстояний 65° – 120° с магнитудами более 5.5. Для анализа отбирались события с изолированными, не интерферирующими ни с какими другими, SKS/SKKS-фазами, на горизонтальных компонентах которых отношение сигнал/шум не ниже 3. В большинстве случаев обрабатывалась SKS-фаза (рис. 2, *вверху*). Для каждого события выполнялся переход из системы координат ZNE (Z – вертикальная компонента записи, N – горизонтальная, ориентированная в направлении север–юг, E – горизонтальная, ориентированная в направлении восток–запад) к системе координат ZRT, в которой R – радиальная компонента, совпадающая с направлением от источника к станции, T – поперечная (тангенциальная), получаемая путем поворота R в плане на 90° по часовой стрелке. При оценке изолированности целевых фаз, помимо визуального определения, критериями служили низкие амплитуды на Z -компоненте сейсмограммы и характерная эллиптическая траектория движения частиц на дневной поверхности, имеющая большую ось, ориентированную параллельно направлению R -компоненты (рис. 2, *внизу, справа*).

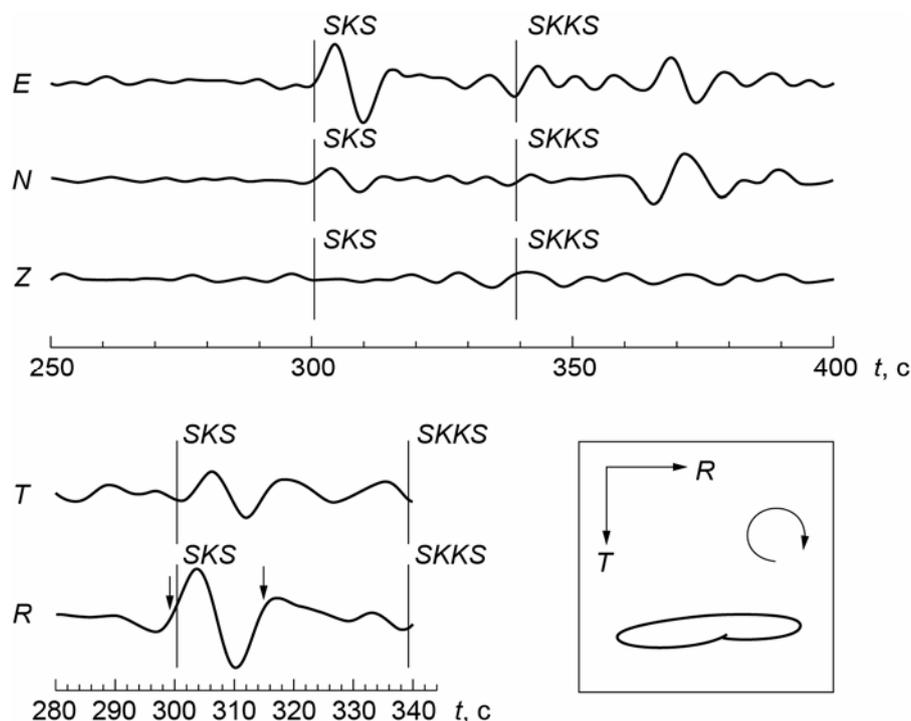


Рис. 2. *Вверху:* пример фильтрованной записи события, обработанного для станции OBN. *Внизу:* сейсмограммы T - и R -компонент с отмеченными стрелками границами временного интервала, выбранного для инверсии; амплитуда T -компоненты для наглядности увеличена в 5 раз (*слева*) и траектория движения частиц в выбранном интервале (*справа*, в плане для SKS-фазы)

Fig. 2. *Top:* Example of the filtered event record processed for the OBN station. *Bottom:* seismograms of T - and R -components, the arrows indicate the time range chosen for the inversion; the amplitude of the T -component is 5 times increased for the clarity (*left*); trajectory of particle motion in the chosen range (in plan for the SKS-phase, *right*)

В результате, для станции OBN было отобрано 46 лучших событий (табл. 1), удовлетворяющих перечисленным выше критериям. Звездочкой в таблице отмечены 36 событий, оставшихся после удаления записей с $\alpha \geq 3.0$ с.

Таблица 1. События, использованные для оценки параметров анизотропии для станции OBN

Дата	Расстояние, °	Азимут, °	Магнитуда	α , °	δt , с
13.01.2001	98.01	306.5	6.4	120	3.0
29.01.2001	94.43	84.84	5.9	70	3.0
19.03.2001	94.11	91.11	6	90	3.0
04.04.2001*	97.54	88.21	5.9	10	0.8
20.05.2001*	99.24	322.86	5.5	50	1.9
23.08.2001*	103.98	75.53	5.8	140	1.0
07.10.2001	102.03	78.36	5.7	80	3.0
10.01.2002*	101.67	78.73	6	160	1.0
17.03.2002	99.97	181.05	5.5	170	3.0
06.06.2002*	103.03	72.39	5.7	150	1.0
06.06.2002*	103.03	72.39	5.7	140	0.9
07.08.2002*	99.72	298.93	5.6	90	0.6
08.09.2002*	102.04	78.34	6.5	160	2.2
16.09.2002*	101.9	78.57	5.9	160	1.7
17.09.2002*	101.92	78.48	5.7	160	1.6
20.12.2002*	104.64	73.97	5.8	150	2.6
02.03.2003	104.03	224.1	5.6	130	3.0
25.08.2003	100.26	324.78	5.5	50	3.0
22.09.2003*	83.4	295.12	6.2	100	1.2
22.12.2003	87.53	341.97	6.1	160	3.0
11.01.2004*	92.58	166.57	6.1	160	2.4
17.04.2004*	97	92.74	6.1	80	1.4
29.04.2004*	98.7	303.11	5.6	120	2.9
29.06.2004	99.26	303.98	5.8	120	3.0
15.11.2004*	99.61	292.64	6.6	100	1.3
20.11.2004*	98.86	300.92	6.2	110	2.4
11.04.2005*	103.85	75.93	5.9	10	0.1
04.06.2005*	97.15	175.66	5.7	110	2.0
05.02.2006*	87.61	65.29	6.3	150	1.4
09.06.2006*	102.55	182.73	5.6	170	1.6
11.08.2006*	98.26	319.76	6	20	0.1
16.08.2006*	86.34	158.04	5.6	150	1.8
15.10.2006*	104.55	12.15	6.2	180	1.9
10.09.2007*	101.3	292.11	6.1	80	0.8
26.11.2007	98.42	320.36	5.7	50	3.0
26.06.2011*	97.1	83.09	6.4	160	1.9
15.08.2011*	105.4	288.5	5.7	50	0.9
30.08.2011*	94.6	95.28	6.9	180	0.9
12.09.2011*	102.4	77.49	6.0	160	2.7
13.10.2011*	90.2	105.05	6.2	20	1.5
14.11.2011*	90.3	90.26	6.4	100	0.2
18.01.2012*	90.2	90.26	5.8	90	0.5
20.03.2012*	99.5	316.41	7.4	50	1.4
21.04.2012*	95.1	84.6	6.7	80	2.9
01.06.2012*	93.8	84.92	5.8	170	2.2
04.06.2012*	102.3	297.39	6.3	50	0.5

Записи с $\alpha \geq 3.0$ с удалялись, поскольку такое большое значение этого параметра может быть получено только в тектонически активных регионах и не характерно для центральной части платформенной области. Пространственное распределение очагов использованных для анализа событий показано на рис. 3.

Рис. 3. Пространственное распределение очагов событий, использованных при анализе для станции OBN (треугольник)

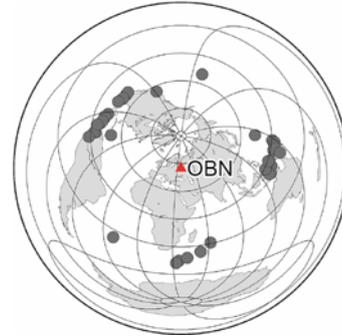


Fig. 3. The spatial distribution of the sources of events used in the analysis for the OBN station (triangle)

Индивидуальные решения для оставшихся после удаления 36 событий по параметру α явно делятся на две группы – одна с $\alpha \approx 100^\circ$ (21 событие), другая с $\alpha \approx 160^\circ$ (15 событий). В связи с этим азимутальные распределения анализировались отдельно для полного набора из 36 событий, для 21 события с $\alpha \approx 100^\circ$ и для 15 событий с $\alpha \approx 160^\circ$ (рис. 4). Разный цвет линий на рис. 4 отображает направление вращения частиц на поверхности: красный – по часовой стрелке (правое вращение), синий – против часовой стрелки (левое вращение). Теоретически при переходе азимута события через азимут оси наибольшей скорости наблюдаемое направление вращения частиц на поверхности должно меняться на противоположное.

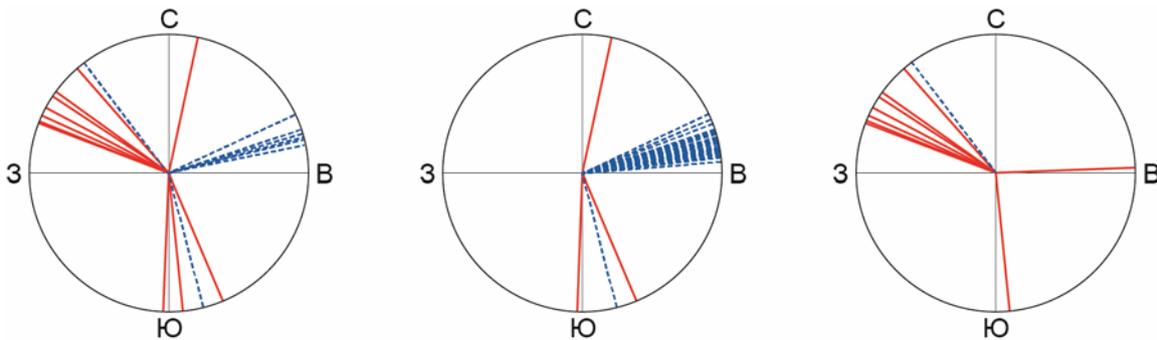


Рис. 4. Диаграммы азимутального распределения для 36 событий (слева), 21 события с $\alpha \approx 100^\circ$ (по центру) и 15 событий с $\alpha \approx 160^\circ$ (справа). Красные линии – правое вращение, синие – левое

Fig. 4. Diagrams of azimuthal distribution for 36 events (left), for 21 events with $\alpha \approx 100^\circ$ (centre), and for 15 events with $\alpha \approx 160^\circ$ (right). Red lines – right rotation of particles on the surface, blue – left rotation

Решение искалось в виде минимума целевой функции, зависящей от параметров α и δt , как было описано, например, в работе [Vinnik et al., 1992]:

$$E(\alpha, \delta t) = \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{\int (T_n(t) - T_n^*(t, \alpha, \delta t))^2 dt}{\int R_n^2(t) dt} \right]^{1/2},$$

где α – пробный азимут “быстрой” оси; δt – запаздывание “быстрой” квазипоперечной волны относительно “медленной”; n – номер события; N – общее количество событий;

$T_n(t)$ и $R_n(t)$ – наблюдаемые компоненты, тогда как $T_n^*(t, \alpha, \delta t)$ – синтетическая поперечная компонента. Синтетическая компонента вычислялась как $T^*(t) = F(t) * R(t)$, где $F(t)$ – результат обратного преобразования Фурье от

$$f(\omega) = -0.5 \sin 2\alpha \frac{1 - e^{-i\omega\delta t}}{\cos^2 \alpha + e^{-i\omega\delta t} \sin^2 \alpha}.$$

Пробные углы α варьировались в диапазоне 0° до 180° (с шагом 10°), а времена запаздывания δt – в диапазоне от 0.1 до 3.0 с шагом 0.1 с. Величина шага обусловлена ограничениями точности используемого метода.

Изолинии значений целевых функций $E(\alpha, \delta t)$ для трех названных выше наборов данных представлены на рис. 5. Можно видеть, что в каждом из распределений прослеживается зона абсолютного минимума в интервале значений α от 80° до 110° и δt от 0.3 с до 0.5 с. В качестве решения авторы предлагают использовать данные, полученные по максимальному набору событий, а именно $\alpha=90^\circ$, $\delta t=0.4$ с (см. рис. 5, слева). Важно также отметить, что для событий с преимущественно восточными азимутами выявляется второй четко выраженный минимум с $\alpha \approx 160^\circ$ и $\delta t \approx 0.5$ с.

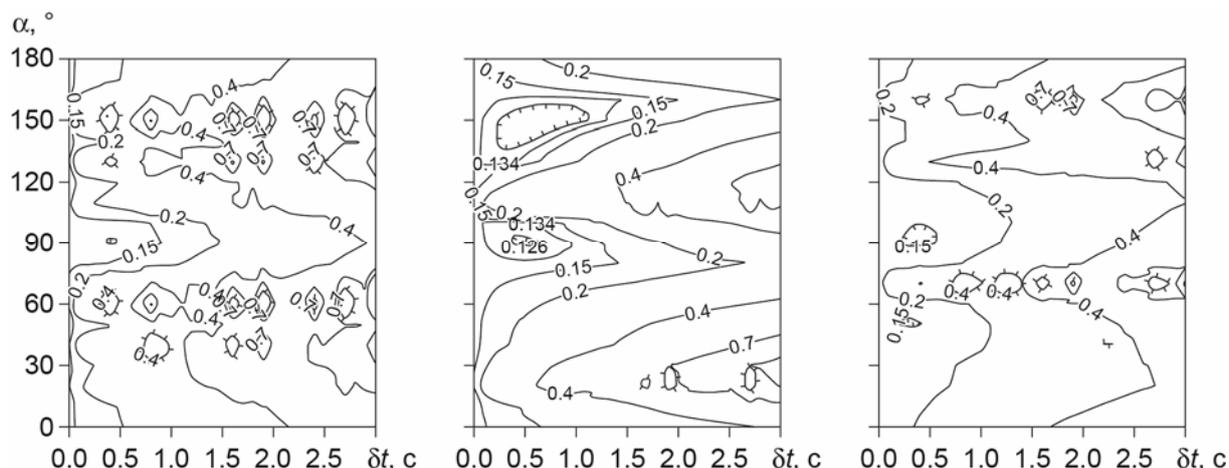


Рис. 5. Изолинии значений целевой функции $E(\alpha, \delta t)$ по данным станции OBN. Решения, полученные для полного набора из 36 событий (слева, $\alpha=90^\circ$, $\delta t=0.4$ с); для 21 события с индивидуальными решениями α порядка 160° (по центру, $\alpha=100^\circ$, $\delta t=0.3$ с); для 15 событий с индивидуальными решениями α порядка 90° (справа, $\alpha=90^\circ$, $\delta t=0.4$ с)

Fig. 5. The isolines of the values of the objective function $E(\alpha, \delta t)$ according to the data of the OBN station. The solution obtained for the complete set of 36 events (left, $\alpha=90^\circ$, $\delta t=0.4$ s); for 21 events with individual solutions $\alpha \approx 160^\circ$ (center, $\alpha=100^\circ$, $\delta t=0.3$ s); for 15 events with individual solutions $\alpha \approx 90^\circ$ (right, $\alpha=90^\circ$, $\delta t=0.4$ s)

Результаты оценки анизотропных свойств среды для сейсмостанции МНУ

Сейсмостанция МНУ находится в 80 км от станции OBN и укомплектована велосиметром STS-2 [Землетрясения..., 2010] с предельным периодом 120 с. Оценка анизотропных параметров с использованием SKS/SKKS-фаз для этой станции выполнялась впервые и проводилась по методике, аналогичной описанной выше для станции OBN.

Были использованы 417 событий, удовлетворяющих критериям магнитуды и удаленности; 37 событий, представленных в табл. 2, соответствуют полному набору критериев. Как и при анализе данных для станции OBN, из отобранных событий были исключены события с запаздыванием ≥ 3.0 с. Азимутальное распределение для оставшихся после этого 16 трасс (в таблице отмечены звездочкой) показано на рис. 6, *слева*; расположение их очагов – на рис. 6, *справа*.

Таблица 2. События, использованные для оценки параметров анизотропии для станции MNV

Дата	Расстояние, °	Азимут, °	Магнитуда	α , °	δt , с
06.03.2011*	114.3	273.2	6.3	100	0.9
07.04.2011	97.3	314.3	6.7	60	3.0
20.06.2011*	116.6	269.8	6.5	80	0.4
26.06.2011*	97.1	84	6.4	170	1.9
15.08.2011	105.4	289.5	5.7	30	3.0
24.08.2011	108.9	284.1	7.0	20	3.0
30.08.2011*	94.6	94.4	6.9	100	0.3
12.09.2011	102.4	78.5	6.0	160	3.0
13.10.2011	90.2	106	6.2	110	3.0
14.10.2011	106.9	77	6.5	160	3.0
14.11.2011*	90.3	91.2	6.4	100	0.2
22.11.2011*	109.8	271.4	6.6	10	0.8
14.12.2011	107.1	78.5	7.1	160	3.0
14.01.2012*	70.8	83.9	5.8	160	1.3
18.01.2012*	90.2	91.2	5.8	120	0.4
11.02.2012*	90.3	91.3	5.6	10	2.8
14.03.2012*	107.8	73.7	6.2	180	0.3
20.03.2012	99.5	307.4	7.4	50	3.0
21.03.2012	105.5	78.5	6.6	160	3.0
21.04.2012	95.1	85.5	6.7	90	3.0
14.05.2012*	114.2	273.7	6.2	180	0.3
28.05.2012*	118.5	261.3	7.8	160	1.8
01.06.2012*	93.8	85.8	5.8	100	0.9
04.06.2012	102.3	298.4	6.3	40	3.0
09.02.2013	103.2	291.6	6.9	30	3.0
18.02.2013	74.5	257.1	5.6	30	3.0
23.02.2013	96.7	95	5.9	10	3.0
06.04.2013	99	83.2	7.0	80	3.0
16.04.2013	101.1	79.6	6.6	70	3.0
19.04.2013	96.3	101.8	5.8	20	3.0
07.07.2013	108	70.2	7.3	150	3.0
12.08.2013*	97	92.4	6.1	180	1.2
12.08.2013	111.1	292	6.3	40	3.0
13.08.2013	99.7	294.8	6.7	40	3.0
21.09.2013*	91.5	100.5	6.1	20	2.5
19.11.2013*	88.3	87.9	6.0	10	0.6

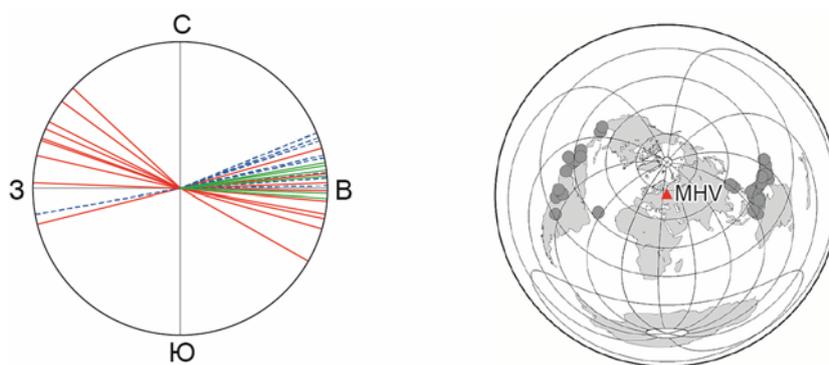


Рис. 6. Диаграмма азимутального распределения событий, использованных для станции МНВ, (слева), и схема распределения их очагов (справа). Красные линии – правое вращение частиц на поверхности; синие – левое; зеленые – линейное

Fig. 6. Diagram of azimuthal distribution of events used for the MHV station (left) and the location of the sources of events (right). Red lines on the diagram – right rotation of particles on the surface; blue – left rotation; green – linear rotation

На представленной на рис. 7 схеме изолиний целевой функции $E(\alpha, \delta t)$, построенной для событий, зарегистрированных станцией МНВ, четко прослеживается локальный минимум с $\alpha=90^\circ$ и $\delta t=0.2$ с. Кроме этого, как и для станции ОВН, выделяется второй локальный минимум с $\alpha \approx 160^\circ$ и $\delta t \approx 0.1-0.2$ с.

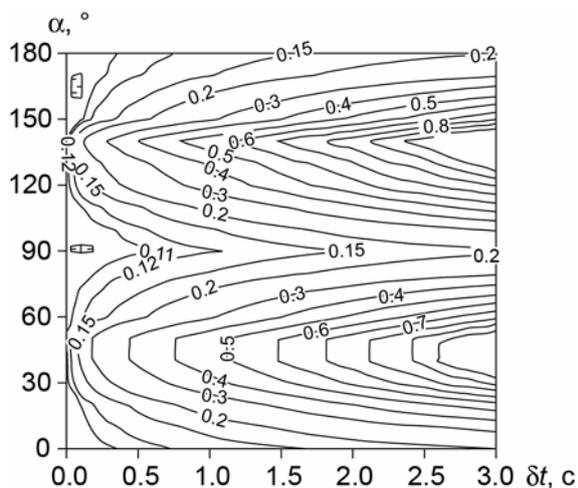


Рис. 7. Изолинии значений целевой функции $E(\alpha, \delta t)$ по данным станции МНВ. Решение, полученное для 16 событий, – $\alpha=90^\circ$, $\delta t=0.2$ с

Fig. 7. Isolines of the values of the objective function $E(\alpha, \delta t)$ according to the data of the MHV station. The solution obtained for 16 events – $\alpha=90^\circ$, $\delta t=0.2$ s

Принимая во внимание отличие полученных в рамках настоящего исследования результатов от ранее опубликованных оценок и близкое расположение станций МНВ и ОВН, авторы провели дополнительное исследование. Из списков, приведённых в табл. 1, 2, были отобраны события, зарегистрированные на обеих станциях – таких событий оказалось всего 11. Диаграмма азимутального распределения этих событий и схема расположения их эпицентров приведены на рис. 8. Станции ОВН и МНВ обозначены одним треугольником, что связано с их близким расположением и масштабом рисунка.

Независимая обработка одних и тех же событий, зарегистрированных двумя разными станциями, показала полную согласованность полученных результатов: решение по данным станции ОВН – $\alpha=90^\circ$, $\delta t=0.3$ с, по данным станции МНВ – $\alpha=100^\circ$, $\delta t=0.3$ с (рис. 9).

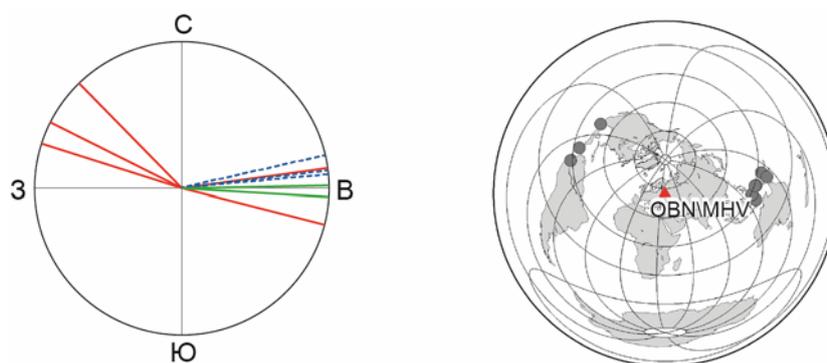


Рис. 8. Диаграмма азимутального распределения событий, зарегистрированных одновременно на станциях OBN и MHV (слева), и схема расположения их очагов (справа). Условные обозначения см. на рис. 6

Fig. 8. Diagram of the azimuthal distribution of events recorded simultaneously at the OBN and the MHV stations (left), and the location of sources of the events (right). Notations see in Fig. 6

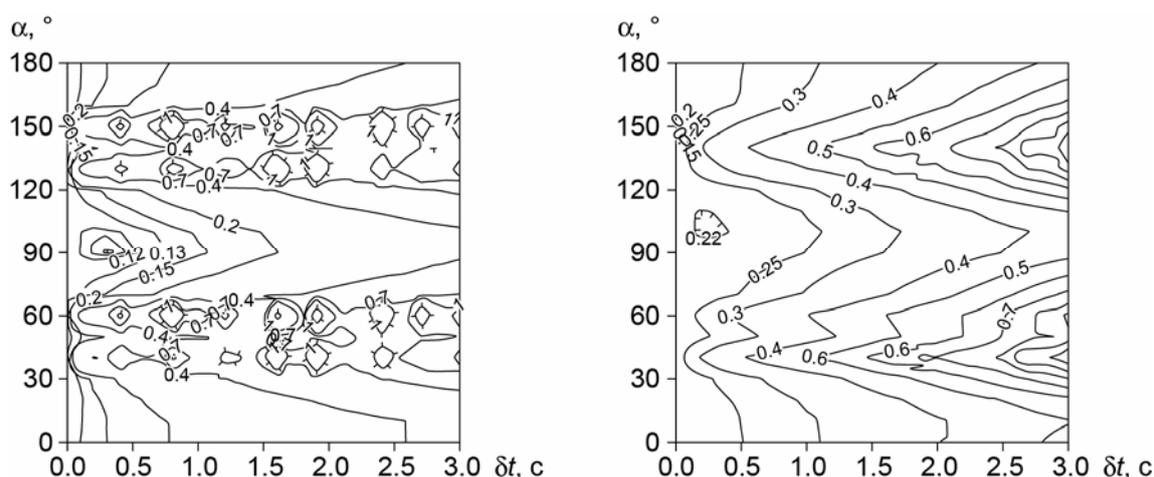


Рис. 9. Изолинии значений целевой функции $E(\alpha, \delta t)$ для событий, зарегистрированных одновременно станциями OBN и MHV: слева – решение, полученное по данным станции OBN; справа – по данным станции MHV

Fig. 9. Isolines of the values of the objective function $E(\alpha, \delta t)$ for events recorded simultaneously by the OBN and the MHV stations. Left: the solution obtained from the OBN station data; right: the solution obtained from the MHV station data

Заключение

В работе представлены результаты повторной оценки анизотропных параметров (направления главной оси симметрии α и величины запаздывания δt), выполненной для центральной части Восточно-Европейской платформы методом *SKS/SKKS* по данным сейсмических станций “Обнинск” (OBN) и “Михнево” (MHV).

Оценки для сейсмической станции OBN получены по набору данных, более представительному по сравнению с использованным ранее при аналогичных исследованиях; для сейсмической станции MHV оценки анизотропных параметров методом *SKS/SKKS* выполнены впервые.

Для станции OBN азимут направления главной оси симметрии α составляет 100° ; запаздывание δt , характеризующее величину анизотропии, – 0.4 с. Для этой станции выявлены две группы событий с разными индивидуальными решениями – для одной $\alpha \approx 90^\circ$, для другой $\alpha \approx 160^\circ$.

Более детальный анализ показал, что при совместной обработке событий группы с индивидуальными решениями, близкими к 160° , получаем общее решение $\alpha = 100^\circ$, $\delta t = 0.3$ с. Однако при этом выявляется четко выраженный побочный локальный минимум, соответствующий $\alpha \approx 160^\circ$ и $\delta t \approx 0.5$ с. Кроме того, эпицентры большинства событий этой группы расположены к востоку от станции OBN. Отметим, что приводимый в [Helffrich, Silver, Given, 1994] результат $\alpha = -19^\circ$ (161° с учетом 180-градусной периодичности) также получен по событиям преимущественно с восточного относительно станции OBN направления (см. рис. 1). Причина явного разделения событий на две группы с противоположенными азимутами и существенно различающимися результатами на данный момент неясна – можно допустить, например, существование, по меньшей мере, двух анизотропных слоев.

Для сейсмической станции MHV, расположенной на расстоянии 80 км от станции OBN, получено решение, хорошо согласующееся с решением для станции OBN – $\alpha = 90^\circ$, $\delta t = 0.2$ с. Более того, по результатам анализа экспериментального материала для станции MHV также прослеживается второй локальный минимум, соответствующий $\alpha \approx 160^\circ$ и $\delta t \approx 0.1-0.2$ с.

Сейсмические станции OBN и MHV находятся в зоне сочленения мегаблоков (рис. 10), мощности и особенности глубинного строения которых, как это показано в [Bogdanova, Gorbatshev, Garetsky, 2016], пока не установлены.

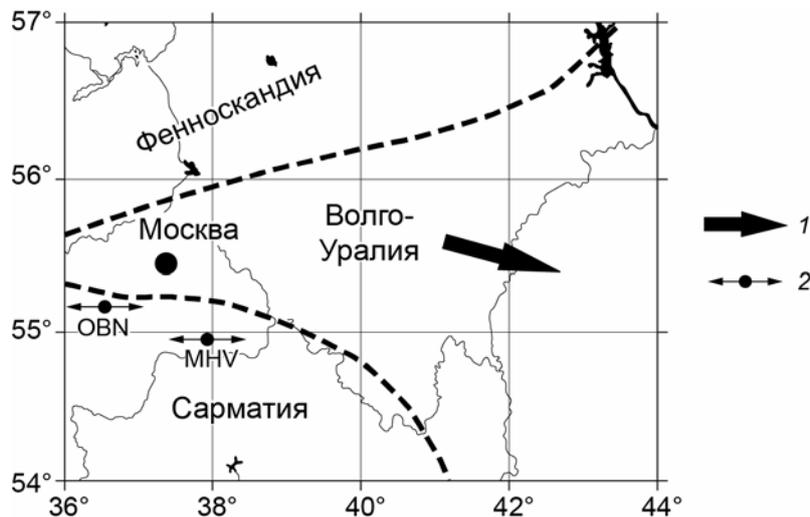


Рис. 10. Тектоническая схема центральной части Восточно-Европейской плиты (по [Bogdanova, Gorbatshev, Garetsky, 2016]) с указанием местоположения станций OBN и MHV и направлений оси анизотропии. 1 – направление движения Восточно-Европейской плиты по [Khain, Lomize, 1995]; 2 – местоположение станций, стрелки – направление оси анизотропии (главное направление оси симметрии мантийного вещества)

Fig. 10. A tectonic scheme (according to [Bogdanova, Gorbatshev, Garetsky, 2016]) of the central part of the East European craton with locations of the OBN and the MHV stations and the directions of the axis of anisotropy. 1 – direction of movement of the East European craton (by [Khain, Lomize, 1995]); 2 – location of stations, arrows – direction of the axis of anisotropy

Можно предположить, что, поскольку обе станции находятся вблизи границ сочленения мегаблоков, два выявленных в настоящей работе локальных минимума с α порядка 90° и 160° , характеризуют “вмороженную” анизотропию разных мегаблоков и, возможно, отображают эффект астеносферного потока мантийного вещества, связанного с направлением движения литосферной плиты, которое установлено по данным GPS, геотектонического и палеомагнитного моделирования [Хаин, Ломизе, 1995]. На рис. 10 видно, что направление движения литосферной плиты совпадает с главным направлением оси симметрии мантийного вещества.

Следует отметить, что факторы, вызывающие наличие анизотропии можно разделить на две группы. Первая группа – “реликтовые”, возникшие в результате древних геодинамических процессов, вторая – “современные”, вызванные конвективными процессами и движением литосферных плит. Основываясь на полученных результатах, можно предположить, что в данном случае мы наблюдаем интегральный эффект взаимодействия этих групп факторов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 17-05-01099).

Литература

- Ваганова Н.В. Измерение параметров азимутальной сейсмической анизотропии Восточно-Европейской платформы по наблюдениям обменных SKS-волн // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы Седьмой Международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2012. С.74–78.
- Винник Л.П., Косарев Г.Л., Макеева Л.И. Анизотропия литосферы по наблюдениям волн SKS и SKKS // Докл. АН СССР. 1984. Т. 278, № 6. С.1335–1339.
- Винник Л.П., Косарев Г.Л. Расщепление поперечных волн в мантии переходной зоны мантии // Докл. РАН. 1997. Т. 353, № 4. С.531–534.
- Землетрясения России в 2008 году / Под ред. А.А. Маловичко и др. Обнинск: ГС РАН, 2010. 224 с.
- Хаин В.Е., Ломизе М.Г. Геотектоника с основами геодинамики: Учебник для студентов геологических специальностей вузов. М.: Изд-во МГУ, 1995. 480 с.
- Becker T.W., Schaeffer A.J., Lebedev S., Conrad C.P. Toward a generalized plate motion reference frame // Geophys. Res. Lett. 2015. N 42. P.3188–3196.
- Bogdanova S.V., Gorbatshev R., Garetsky R.G. Europe/East European Craton. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Elsevier, 2016. 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. N 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. N 200-201. P.1–9.
- Helffrich G., Silver P.G., Given H. Shear wave splitting variation over short spatial scales on continents // Geophys. J. Int. 1994. N 119. P.561–573.
- Kosarev G.L., Makeyeva L.I., Vinnik L.P. Inversion of the P wave particle motion for crystal structure in Fennoscandia // Phys. Earth Planet. Int. 1987. N 47. P.11–24.
- Silver P.G., Chan W.W. Shear wave splitting and subcontinental mantle deformation // J. Geophys. Res. 1991. N 96. P.1449–1454.
- Vinnik L.P., Farra V., Romanowicz B. Azimuthal anisotropy in the Earth from observations of SKS at Geoscope and NARS broadband stations // Bull. Seismol. Soc. Am. 1989. N 79. P.1542–1558.
- 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. N 111. P.433–447.

Сведения об авторах

АДУШКИН Виталий Васильевич – доктор физико-математических наук, академик, главный научный сотрудник, Институт динамики геосфер РАН. 119334, Москва, Ленинский просп., д. 38, корп. 1. Тел.: +7(495) 939-79-78. E-mail: adushkin@idg.chph.ras.ru

ГОЕВ Андрей Георгиевич – младший научный сотрудник, Институт динамики геосфер РАН. 119334, Москва, Ленинский просп., д. 38, корп. 1. Тел.: +7(910) 422-60-45. E-mail: andr.goev@gmail.com

КОСАРЕВ Григорий Леонидович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7 (499) 254-94-05. E-mail: kosarev@ifz.ru

САНИНА Ирина Альфатовна – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Институт динамики геосфер РАН. 119334, Москва, Ленинский просп., д. 38, корп. 1. Тел.: +7(495) 939-75-82. E-mail: irina@idg.chph.ras.ru

ESTIMATION OF SEISMIC AZIMUTHAL ANISOTROPY PARAMETERS OF THE UPPER MANTLE OF THE CENTRAL PART OF THE EAST-EUROPEAN CRATON ACCORDING TO THE DATA OF THE “OBNINSK” AND “MIKHNEVO” SEISMIC STATIONS

V.V. Adushkin¹, A.G. Goev¹, G.L.Kosarev², I.A. Sanina¹

¹ *Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

² *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Abstract. The results of determining the parameters of seismic anisotropy of the upper mantle of the central part of the East-European craton are given. According to the tectonic concepts actively developing in recent decades, the East-European craton consists of megablocks (microplates) of different age: there are three main megablocks – Fennoscandia, Volga-Uralia and Sarmatia. The area of their triple junction is the subject of this article. The SKS/SKKS anisotropy method was applied. Its essence is to use SKS phases in order to obtain delay times for the arrival of two quasi-shear waves that are formed during the trace of a shear wave through an anisotropic medium and gets through it with different velocities. The result is to simulate the azimuth of the maximum velocity axis along which “fast” quasi-shear wave trace and to get the delay time between “fast” and “slow” waves. The technique does not allow to obtain accurate estimates of the depth of the anisotropic layer, however, taking into account the long periods of the SKS wave and the pronounced anisotropic properties of olivine, as the main material composing the upper mantle, it is assumed that these effects are related to the mantle processes. Authors used the data from “Obninsk” (OBN) and “Mikhnevo” (MHV) stations that are located in the zone of the triple junction of blocks. For Obninsk station – 1266 events were used, for Mikhnevo station – 472. For each station, we obtained estimates of the azimuth of the maximum speed axis and the delay time of arrival of quasi-shear waves. As a result of the study, the mantle anisotropy of the region is assessed as weak, which is an expected result for tectonically stable platform regions (delay time 0.4 s for the OBN station and 0.2 s for the MHV station). The direction of the maximum speed axis is strictly sub-latitude (90° for the OBN and 100° for MHV station), which is in accordance with the known the East-European lithospheric plate motion. For the OBN station, two groups of events were identified, with significantly different results, structured by azimuth. For events mainly with western azimuths of arrival of seismic waves, the solution is 90° and 0.4 s, while processing events from the eastern direction of arrival, along with a coordinated solution, a second pronounced local extremum is detected, corresponding to angles and delay time about 0.5–1.0 s. According to the results of MHV data processing, a second local extremum was also found, corresponding to similar angles of about 160°, however, with a shorter delay time (about 0.1–0.2 s). It can be assumed that the presence of two extremums is associated

with the anisotropic parameters of two different megablocks, near the junction boundary of which are located the OBN and MHV stations.

Keywords: anisotropy, seismology, tectonics, SKS/SKKS, shear waves.

References

- Becker T.W., Schaeffer A.J., Lebedev S., and Conrad C.P., Toward a generalized plate motion reference frame, *Geophys. Res. Lett.*, 2015, no. 42, pp. 3188-3196.
- Bogdanova S.V., Gorbatshev R., Garetsky R.G. *Europe/East European Craton, Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, Elsevier, 2016, pp. 1-18.
- Dziewonski A.M., Chou T.-A. and Woodhouse J.H., Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity, *J. Geophys. Res.*, 1981, no. 86, pp. 2825-2852.
- The Earthquakes of Russia in 2008, Editor A.A. Malovichko et al. Obninsk: GS RAS, 2010. 224 p.
- Ekström G., Nettles M., and Dziewonski A.M., The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes, *Phys. Earth Planet. Int.*, 2012, no. 200-201, pp. 1-9.
- Helffrich G., Silver P.G., Given H., Shear wave splitting variation over short spatial scales on continents, *Geophys. J. Int.*, 1994, no. 119, pp. 561-573.
- Khain V.E., Lomize M.G., *Geotectonic with basics of geodynamics*, Study book for students of the geosciences departments of universities. M.: MSU, 1995, 480 p.
- Kosarev G.L., Makeyeva L.I., and Vinnik L.P., Inversion of the P wave particle motion for crystal structure in Fennoscandia, *Phys. Earth Planet. Int.*, 1987, no. 47, pp. 11-24.
- Silver P.G., Chan W.W., Shear wave splitting and subcontinental mantle deformation, *J. Geophys. Res.*, 1991, no. 96, pp. 1449-1454.
- Vinnik L.P., Farra V., Romanowicz B., Azimuthal anisotropy in the Earth from observations of SKS at Geoscope and NARS broadband stations, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1989a, no. 79, pp. 1542-1558.
- Vinnik L.P., Kosarev G.P., Makeyeva L.I., Anisotropiya litosfery po nablyudeniym voln SKS and SKKS, *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1984, vol. 278, no. 6, pp. 1335-1339.
- 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, no. 111, pp. 433-447.
- Vinnik L.P., Kosarev G.L., Shear wave splitting in the mantle transition zone, *Dokl. RAS*, 1997, vol. 353, no. 4, pp. 531-534.