

Глубинное строение Кольского полуострова и Баренцева моря по данным поверхностных волн

Филиппова А.И.^{1,2}

¹ *Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Троицк, aleirk@mail.ru*

² *Институт динамики геосферы им. академика М.А. Садовского РАН, Москва*

Аннотация. Составлена представительная выборка дисперсионных кривых групповых скоростей волн Рэлея и Лява в диапазоне периодов 10–250 с, как можно более плотно и равномерно пересекающих Кольский полуостров и Баренцево море. Всего рассчитано 1194 дисперсионных кривых для волн Рэлея и 743 – для волн Лява. Для дальнейших расчетов полученная выборка дополнена 1555 трассами для волн Рэлея и 1265 трассами для волн Лява, полученными нами ранее в ходе исследований глубинного строения Арктики. Методом поверхностно-волновой томографии для случая сферической поверхности построены карты распределений групповых скоростей поверхностных волн (по 18 карт для каждого типа волн) и выполнены оценки их горизонтального разрешения. Полученные результаты характеризуются более высоким горизонтальным разрешением по сравнению с существующими в настоящее время глобальными и региональными моделями для исследуемой области и позволяют проследить основные особенности строения коры и верхней мантии рассматриваемой территории. На периодах до 20 с для волн Рэлея и 30 с для волн Лява полученные распределения характеризуют строение верхней части коры, а выявленные скоростные аномалии коррелируют с мощностью осадочных отложений. Для периода 50 с полученное распределение для волн Рэлея отражает основные особенности вариаций глубины Мохо. Характер дисперсии для периодов 60–150 с обусловлен распределением горизонтальных неоднородностей до глубины около 250 км. В этом диапазоне периодов максимальными скоростями характеризуется весь Балтийский щит. Для периодов более 150 с, вариации скоростей поверхностных волн не превышают 3 %.

Ключевые слова: поверхностные волны, томография, земная кора, верхняя мантия, Кольский полуостров, Баренцево море.

Deep structure of the Kola Peninsula and Barents Sea from surface wave data

Filippova A.I.^{1,2}

¹ *Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of RAS, Moscow, Troitsk, aleirk@mail.ru*

² *Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of RAS, Moscow*

Abstract. We compile a representative dataset of Rayleigh and Love wave group velocity dispersion curves in the period range 10–250 s, which cover the Kola Peninsula and Barents Sea as dense and uniform as possible. In total, 1194 and 743 dispersion curves are calculated for Rayleigh and Love waves, respectively. In further analysis, 1555 (Rayleigh waves) and 1265 (Love waves) seismic paths from our previous studies of the Arctic deep velocity structure are added to the obtained results. We map distributions of surface wave group velocities at separate periods using a method of surface wave tomography developed for a sphere. 18 resulting maps and estimates of their lateral resolution are calculated for each type of surface waves. The results obtained are characterized by better lateral resolution in comparison with the available global and regional surface wave models for the considered area. They allow us to trace the main features of the deep velocity structure of the crust and upper mantle. At the period of 20 s for Rayleigh waves and 30 s for Love waves, the group velocity distributions are influenced by the upper crust and the revealed anomalies are correlated with a thickness of the sedimentary layer. At 50 s, Rayleigh wave dispersion relates to main variations of the Moho depth. At 60–150 s periods, velocity inhomogeneities up to the depth of about 250 km influence surface wave dispersion. In this period range, the Baltic Shield is characterized by maximum group velocities. With increasing the period, surface wave velocity variations do not exceed 3 %.

Keywords: surface waves, tomography, crust, upper mantle, Kola Peninsula, Barents Sea.

Введение

Задачей данной работы является исследование глубинного строения коры и верхней мантии Кольского полуострова и Баренцева моря (60–80° с.ш., 15–54° в.д.) по данным о дисперсии групповых скоростей волн Рэля и Лява. Актуальность задачи обусловлена тем, что в отличие от западной части Балтийского щита, изученной довольно детально (Pedersen et al., 2013), поверхностно-волновые модели для рассматриваемой территории (Середкина, 2019; Lebedev et al., 2017; Levshin et al., 2001, 2007; Seredkina, 2019) имеют невысокое горизонтальное разрешение.

Данные и методы

Материалом для исследования служили записи поверхностных волн от удаленных землетрясений на каналах LHZ, LHN и LHE цифровых широкополосных сейсмических станций сетей II, IU, G, GE, DK, MN, NL, PL, CH, CZ, BE (коды сейсмических сетей соответствуют международному стандарту). Общее количество сейсмических станций для волн Рэля и Лява составило 144 и 128 соответственно (рис. 1). Всего были обработаны записи 45 землетрясений ($M_w > 5.6$, 2000–2021 гг.), произошедших на хребте Гаккеля и Срединно-Атлантическом хребте, в Средиземноморье, на Ближнем Востоке, в Средней и Центральной Азии. Отметим, что поскольку эпицентры всех выбранных для анализа сейсмических событий расположены за пределами исследуемого региона, на следующем этапе расчетов, при решении 2-D томографической задачи, исключаются ошибки, связанные с погрешностями локализации эпицентров (Ritzwoller, Levshin, 1998).

Дисперсионные кривые групповых скоростей рассчитывались вдоль трасс «эпицентр-станция». Диапазон расстояний от эпицентров выбранных для анализа землетрясений до регистрирующих станций составил примерно 2000–10000 км. В большинстве случаев это позволило выделить основную моду поверхностных волн в пределах диапазона периодов колебаний от 10 до 250 с. Дисперсионные кривые групповых скоростей фундаментальных мод поверхностных волн рассчитывались с помощью процедуры спектрально-временного анализа (Левшин и др., 1986). Для анализа использовались только записи с высоким отношением сигнал/шум. Всего, таким образом, были рассчитаны 1194 дисперсионные кривые групповых скоростей фундаментальной моды волн Рэля и 743 кривые для волн Лява. Полученная выборка была дополнена 1555 трассами для волн Рэля и 1265 трассами для волн Лява, полученными нами ранее в ходе исследований глубинного строения Арктики (Середкина, 2019).

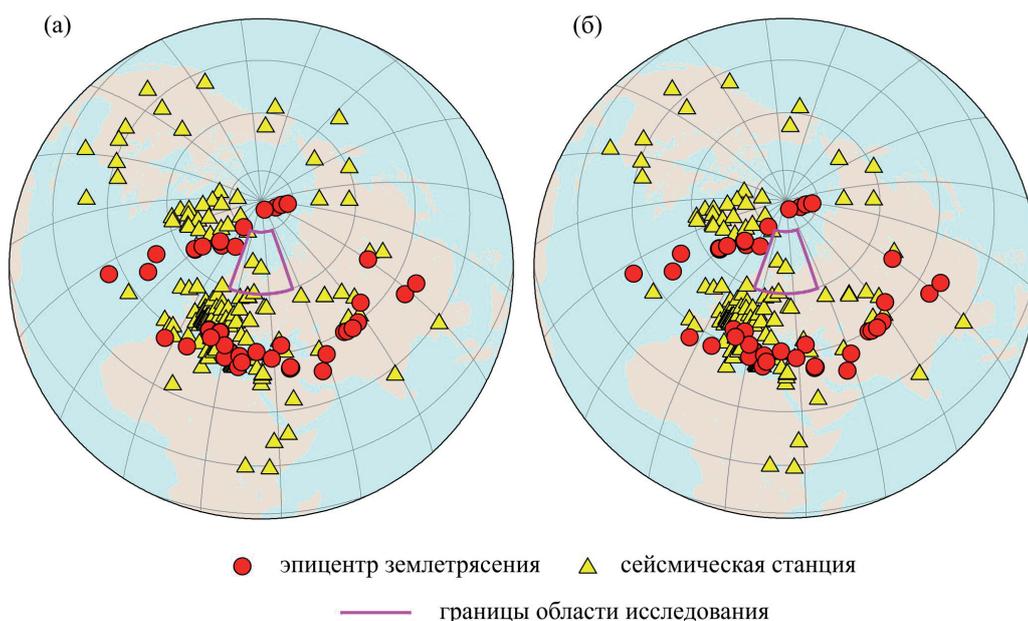


Рис. 1. Используемые для анализа землетрясения и сейсмические станции для волн Рэля (а) и Лява (б).

Fig. 1. Earthquakes and seismic stations used for the analysis of Rayleigh (a) and Love waves (b).

На основании совокупных данных о дисперсии групповых скоростей поверхностных волн были построены карты распределений групповых скоростей волн Рэля и Лява на отдельных периодах из интервала 10–250 с: от 10 до 30 с с шагом по периоду 5 с, от 30 до 100 с – с шагом 10 с и от 100 до 250 с – с шагом 25 с. Всего получено по 18 карт с оценками горизонтального разрешения для каждого типа поверхностных волн. Карты распределений групповых скоростей были рассчитаны методом двумерной томографии для случая сферической поверхности (Яновская, 2001, 2015; Yanovskaya et al., 2000). Для каждой из карт было оценено горизонтальное разрешение результатов путем вычисления эффективного радиуса осреднения (Яновская, 2001, 2015; Yanovskaya, Kozhevnikov, 2003), который зависит, главным образом, от плотности покрытия того или иного участка области исследования сейсмическими трассами. При интерпретации полученных карт и сопоставлении вариаций групповых скоростей с геологическим строением исследуемой области учитывалось, что волны Рэля и Лява характеризуются различной чувствительностью к параметрам среды и различной проникающей способностью (Яновская, 2015).

Результаты и обсуждение

В результате проведенных методом поверхностно-волновой томографии исследований было получено, что наилучшим разрешением характеризуется северо-западная часть области, ограниченной координатами 15–54° в.д. и 60–80° с.ш., включая практически весь бассейн Баренцева моря и Кольский полуостров (рис. 2). Значения эффективного радиуса осреднения для этой территории составляют 350–450 км для волн Рэля в диапазоне периодов 15–150 с и 400–500 км для волн Лява на периодах 20–100 с. На юго-востоке рассматриваемой области разрешение уменьшается до 500–600 км для обоих типов поверхностных волн. Кроме того, разрешение закономерно ухудшается с увеличением периода в связи с уменьшением количества сейсмических трасс, используемых для анализа. Достигнутая нами разрешающая способность превышает горизонтальное разрешение широко используемой глобальной модели (Schaeffer, Lebedev, 2013), составляющее примерно 6°, а также пре-

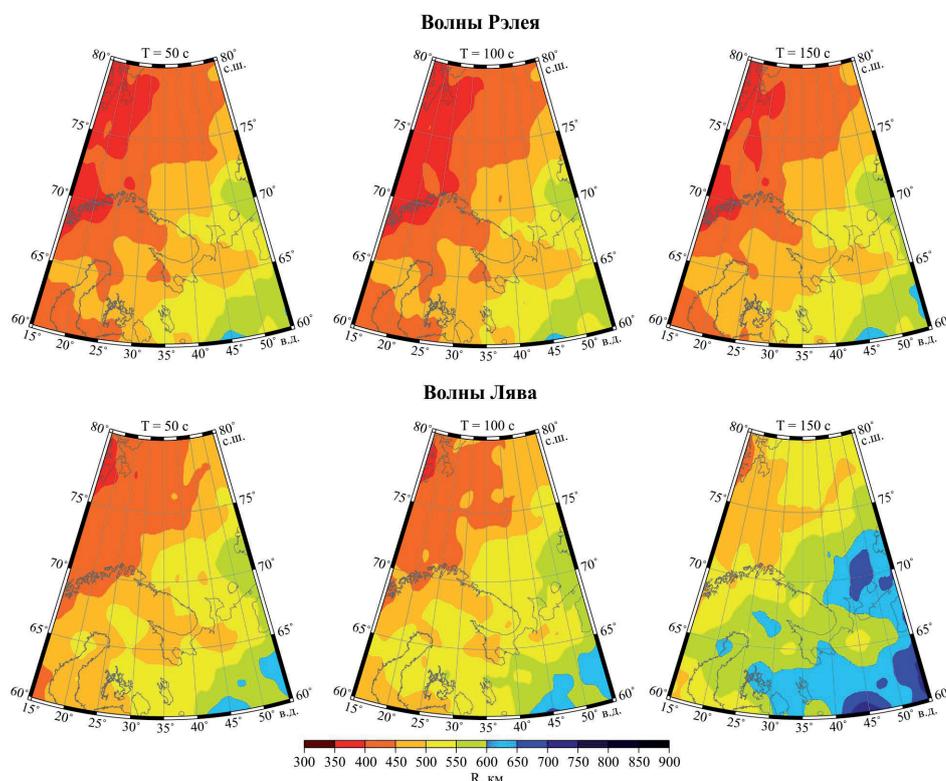


Рис. 2. Примеры карт эффективного радиуса осреднения (R, км) для волн Рэля и Лява для периодов колебаний 50, 100 и 150 с.

Fig. 2. Examples of maps of averaging radius (R, km) for Rayleigh and Love waves at the periods of 50, 100 and 150 s.

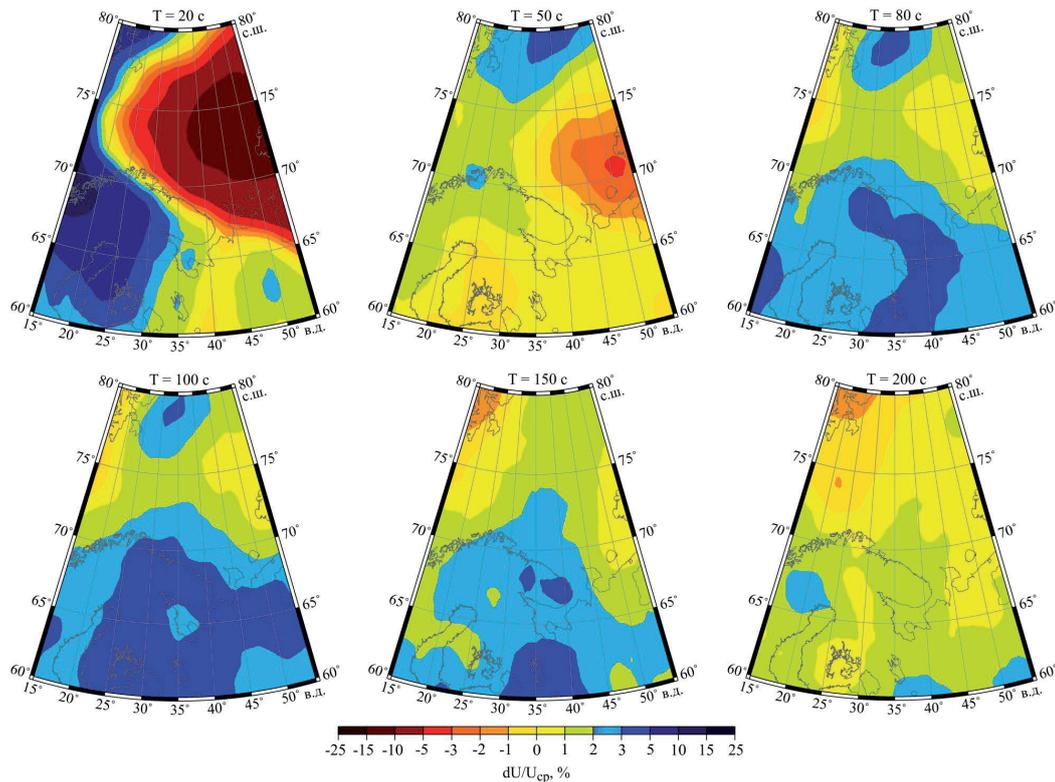


Рис. 3. Вариации групповых скоростей волн Рэлея относительно средних значений (U_{cp}) для периодов колебаний 20 ($U_{cp} = 2.96$ км/с), 50 ($U_{cp} = 3.78$ км/с), 80 ($U_{cp} = 3.86$ км/с), 100 ($U_{cp} = 3.85$ км/с), 150 ($U_{cp} = 3.77$ км/с) и 200 с ($U_{cp} = 3.70$ км/с).

Fig. 3. Rayleigh wave group velocity variations relative to average velocities (U_{av}) at the periods of 20 ($U_{av} = 2.96$ km/s), 50 ($U_{av} = 3.78$ km/s), 80 ($U_{av} = 3.86$ km/s), 100 ($U_{av} = 3.85$ km/s), 150 ($U_{av} = 3.77$ km/s) and 200 s ($U_{av} = 3.70$ km/s).

восходит поверхностно-волновые модели для всей Арктики (Середкина, 2019; Lebedev et al., 2017; Levshin et al., 2001). Для периодов 20–40 с наши результаты характеризуются разрешением близким к модели BARMOD (Levshin et al., 2007), а с увеличением периода – превосходят ее благодаря использованию большего (почти в 2 раза) количества сейсмических трасс, что в дальнейшем позволит нам получить более детальную картину неоднородностей верхней мантии.

Анализ карт распределений вариаций групповых скоростей поверхностных волн на отдельных периодах (рис. 3, 4) позволяет сделать следующие предварительные выводы относительно глубинного строения рассматриваемой территории. На периодах до 20 с для волн Рэлея и 30 с для волн Лява полученные распределения характеризуют строение верхней части коры, а выявленные скоростные аномалии коррелируют с мощностью осадочных отложений. Так, минимумы групповых скоростей наблюдаются в восточной части бассейна Баренцева моря, где согласно модели EUNAs-eis (Artemieva, Thybo, 2013) мощность осадков достигает 12–18 км. Значения скоростей волн Рэлея также понижены и в его западной части с мощностью осадков 4–8 км. Большая часть Балтийского щита характеризуется максимальными значениями скоростей поверхностных волн, что согласуется с практически полным отсутствием осадочного слоя для этой территории. При этом следует отметить, что на востоке Кольского полуострова, значения скоростей поверхностных волн несколько уменьшаются, что может быть связано с наличием здесь тонкого (до 2 км) слоя осадков (Artemieva, Thybo, 2013).

Для периода 50 с полученные распределения отражают основные особенности вариаций глубины Мохо, которая уменьшается от 35–40 км под восточной частью бассейна Баренцева моря до 30–35 км под западной (Artemieva, Thybo, 2013), что сопровождается увеличением скоростей поверхностных волн. На континенте минимум скоростей в районе 27° в.д. и 62° с.ш. соответствует области с максимальной (до 56 км) мощностью коры под Балтийским щитом. Некоторое несоответствие

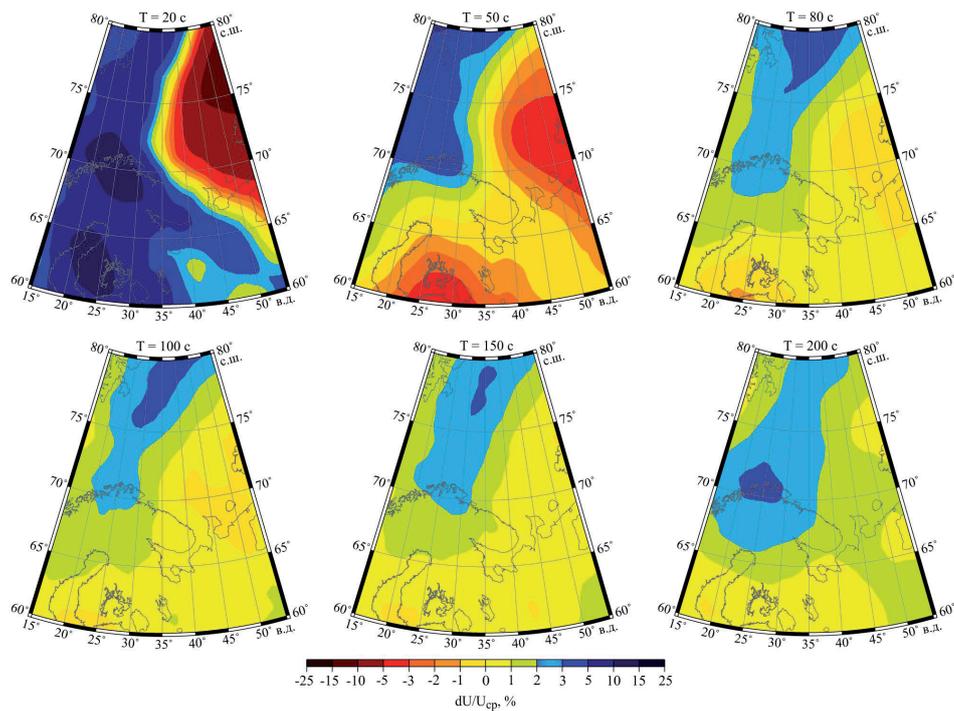


Рис. 4. Вариации групповых скоростей волн Лява относительно средних значений (U_{cp}) для периодов колебаний 20 ($U_{cp}=3.22$ км/с), 50 ($U_{cp}=4.04$ км/с), 80 ($U_{cp}=4.28$ км/с), 100 ($U_{cp}=4.34$ км/с), 150 ($U_{cp}=4.40$ км/с) и 200 с ($U_{cp}=4.44$ км/с).

Fig. 4. Love wave group velocity variations relative to average velocities (U_{av}) at the periods of 20 ($U_{av}=3.22$ km/s), 50 ($U_{av}=4.04$ km/s), 80 ($U_{av}=4.28$ km/s), 100 ($U_{av}=4.34$ km/s), 150 ($U_{av}=4.40$ km/s), and 200 s ($U_{av}=4.44$ km/s).

между уменьшением мощности коры под Кольским полуостровом от 40 км на западе до 35–38 км на востоке и уменьшением скоростей поверхностных волн в восточном направлении, вероятно, могут быть связаны с вариациями значений скоростей S-волн в коре.

Карты для более высоких периодов колебаний (до 150 с) отражают распределение горизонтальных неоднородностей на глубинах до ~ 250 км. В этом диапазоне периодов максимальными скоростями характеризуется весь Балтийский щит, что может быть обусловлено наличием здесь мощной высокоскоростной литосферы, причем скорости несколько увеличиваются в восточном направлении (к восточной части Кольского полуострова). Минимальные скорости поверхностных волн на этих и более высоких периодах наблюдаются под Шпицбергом, что согласуется с известными данными о глубинном строении мантии под архипелагом (Lebedev et al., 2017; Levshin et al., 2007; Sereckina, 2019). Для периодов более 150 с вариации скоростей поверхностных волн не превышают 3 %.

Заключение

Глубинное строение Кольского полуострова и Баренцева моря изучено на основании представительной выборки дисперсионных кривых групповых скоростей волн Рэля и Лява в диапазоне периодов 10–250 с методом поверхностно-волновой томографии. Полученные результаты характеризуются более высоким горизонтальным разрешением по сравнению с существующими в настоящее время глобальными и региональными моделями и позволяют проследить основные особенности строения коры и верхней мантии рассматриваемой территории.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, грант № 21-17-00161.

Литература

1. Левшин А.Л., Яновская Т.Б., Ландер А.В., Букчин Б.Г., Бармин М.П., Ратникова Л.И., Итс Е.Н. Поверхностные сейсмические волны в горизонтально-неоднородной Земле. М. Изд-во: Наука. 1986. 278 с.

2. Середкина А.И. Поверхностно-волновая томография Арктики // *Физика Земли*. 2019. № 3. С. 439–450. doi:10.1134/S106935131903008X.
3. Яновская Т.Б. Развитие способов решения задач поверхностно-волновой томографии на основе метода Бэйкуса-Гильберта // *Вычислительная сейсмология*. Вып. 32. М. Изд-во: ГЕОС. 2001. С. 11–26.
4. Яновская Т.Б. Поверхностно-волновая томография в сейсмологических исследованиях. СПб. Изд-во: Наука. 2015. 167 с.
5. Artemieva I.M., Thybo H. EUNaseis: a seismic model for Moho and crustal structure in Europe, Greenland, and the North Atlantic region // *Tectonophysics*. 2013. V. 609. P. 97–153. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2013.08.004>.
6. Lebedev S., Schaeffer A.J., Fulla J., Pease V. Seismic tomography of the Arctic region: inferences for the thermal structure and evolution of the lithosphere // *Circum-Arctic lithosphere evolution*. London. UK. Geological Society. Special Publications. 2017. V. 460. P. 419–440.
7. Levshin A.L., Ritzwoller M.H., Barmin M.P., Villasenor A., Padgett C.A. New constraints on the arctic crust and uppermost mantle: surface wave group velocities, Pn, and Sn // *Phys. Earth Planet. Inter.* 2001. V. 123. P. 185–204. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(00\)00209-0](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(00)00209-0).
8. Levshin A.L., Schweitzer J., Weidle C., Shapiro N.M., Ritzwoller M.H. Surface wave tomography of the Barents Sea and surrounding regions // *Geophys. J. Int.* 2007. V. 170. P. 441–459. doi:10.1111/j.1365-246X.2006.03285.x.
9. Pedersen H.A., Debayle E., Maupin V., the POLENET/LAPNET Working Group. Strong lateral variations of lithospheric mantle beneath cratons – example from the Baltic Shield // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2013. V. 383. P. 164–172. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.09.024>.
10. Ritzwoller M.H., Levshin A.L. Eurasian surface wave tomography: group velocities // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. P. 4839–4878. <http://dx.doi.org/10.1029/97JB02622>.
11. Schaeffer A.J., Lebedev S. Global shear speed structure of the upper mantle and transition zone // *Geophys. J. Int.* 2013. V. 194. P. 417–449. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt095>.
12. Seredkina A. S-wave velocity structure of the upper mantle beneath the Arctic region from Rayleigh wave dispersion data // *Phys. Earth Planet. Inter.* 2019. V. 290. P. 76–86. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2019.03.007>.
13. Yanovskaya T.B., Antonova L.M., Kozhevnikov V.M. Lateral variations of the upper mantle structure in Eurasia from group velocities of surface waves // *Phys. Earth Planet. Inter.* 2000. V. 122. P. 19–32. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(00\)00184-9](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(00)00184-9).
14. Yanovskaya T.B., Kozhevnikov V.M. 3D S-wave velocity pattern in the upper mantle beneath the continent of Asia from Rayleigh wave data // *Phys. Earth Planet. Inter.* 2003. V. 138. P. 263–278.