

УДК 550.348.436

ПОВЕРХНОСТНО-ВОЛНОВАЯ ТОМОГРАФИЯ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА И СОПРЕДЕЛЬНЫХ ТЕРРИТОРИЙ ПО ДАННЫМ ДИСПЕРСИИ ГРУППОВЫХ СКОРОСТЕЙ ВОЛН РЭЛЕЯ И ЛЯВА

© 2022 г. А. И. Филиппова^{1,2,*}, О. А. Соловей³

Представлено академиком РАН В.В. Адушкиным 31.01.2022 г.

Поступило 31.01.2022 г.

После доработки 24.02.2022 г.

Принято к публикации 25.02.2022 г.

На основании представительных данных о дисперсии групповых скоростей поверхностных волн в диапазоне периодов 10–250 с проведено исследование глубинного строения коры и верхней мантии Кольского полуострова и сопредельных территорий. Распределения групповых скоростей волн Рэлея и Лява с оценками их горизонтального разрешения вычислялись методом поверхностно-волновой томографии. По полученным картам для западной и восточной частей Кольского полуострова рассчитаны скоростные разрезы волн SV и SH до глубины 500 км. Результаты исследования имеют более высокое горизонтальное разрешение по сравнению с существующими в настоящее время поверхностно-волновыми моделями и позволяют проследить основные особенности строения коры и верхней мантии рассматриваемой территории. Полученные результаты указывают на возможные различия в строении коры и величине радиальной анизотропии верхней мантии для западной и восточной частей Кольского полуострова.

Ключевые слова: волны Рэлея и Лява, групповые скорости, томография, Кольский полуостров

DOI: 10.31857/S2686739722060068

В настоящее время глубинное строение Кольского полуострова изучено по данным объемных (см. [1]) и поверхностных волн [2–5] в относительно крупномасштабных деталях в отличие от западной части Балтийского щита [6]. Таким образом, основной задачей данной работы является исследование глубинного строения коры и верхней мантии Кольского полуострова и сопредельных территорий (60°–80° с.ш., 15°–54° в.д.) по данным о дисперсии групповых скоростей волн Рэлея и Лява.

В качестве исходных данных использовались записи поверхностных волн от удаленных земле-

трясений на широкополосных станциях международных сейсмических сетей. Общее количество станций составило 144 для волн Рэлея и 128 для волн Лява. Всего были обработаны записи 45 землетрясений ($M_w > 5.6$, 2000–2021 гг.), произошедших за пределами рассматриваемого региона. Диапазон расстояний от эпицентров до регистрирующих станций составил примерно 2000–10000 км. В большинстве случаев это позволило выделить фундаментальную моду поверхностных волн на периодах $T = 10–250$ с.

Дисперсионные кривые групповых скоростей рассчитывались вдоль трасс “эпицентр–станция” с помощью процедуры спектрально-временного анализа [7]. Всего было рассчитано 1194 дисперсионные кривые волн Рэлея и 743 кривые для волн Лява. Полученная выборка была дополнена данными предыдущих исследований глубинного строения Арктики [2]. В результате общее количество сейсмических трасс составило 2751 и 2014 для волн Рэлея и Лява соответственно.

Погрешности вычисления дисперсионных кривых оценивались по их среднеквадратичным откло-

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук, Троицк, Москва, Россия

²Институт динамики геосфер им. академика М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

³Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

*E-mail: aleirk@mail.ru

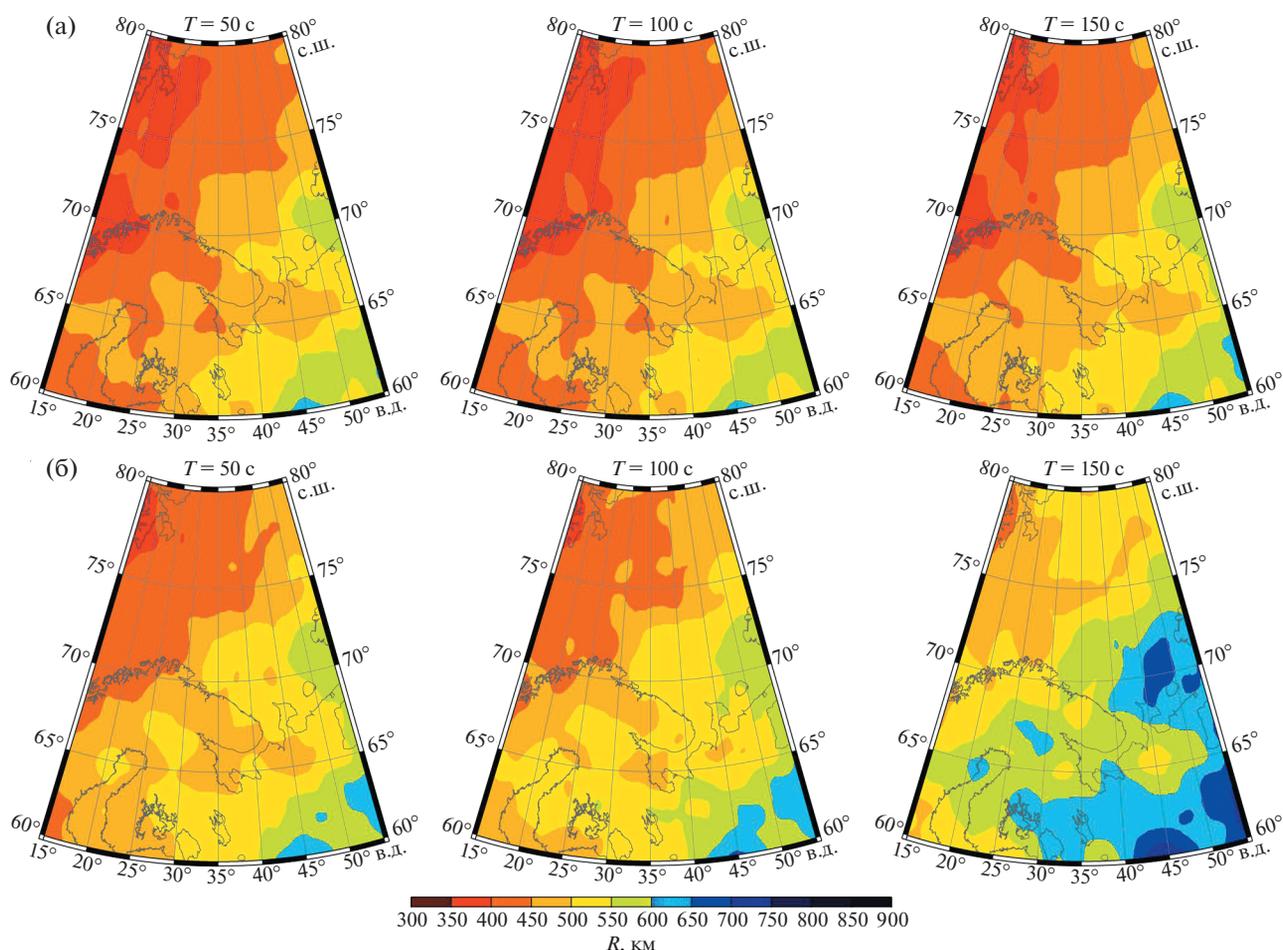


Рис. 1. Эффективный радиус осреднения (R , км) для волн Рэлея (а) и Лява (б). Над каждой картой приведен соответствующий период (T , с).

нениям (СКО), рассчитанным для кривых вдоль близких трасс [2]. В результате было получено, что наименьшие значения СКО (0.02–0.03 км/с) приурочены к интервалу периодов 20–200 с для волн Рэлея и 30–100 с для волн Лява, а на остальных периодах СКО несколько выше. На малых периодах большой разброс в значениях групповых скоростей может быть обусловлен не только ошибками вычислений, но и высокой степенью неоднородности земной коры.

Распределения групповых скоростей поверхностных волн рассчитывались методом двумерной томографии для случая сферической поверхности [8]. Их горизонтальное разрешение оценивалось путем вычисления эффективного радиуса осреднения [8]. Наилучшее разрешение было достигнуто нами для Кольского полуострова и практически всего бассейна Баренцева моря (рис. 1). Значения эффективного радиуса осреднения для этой территории составляют 350–450 км для волн Рэлея ($T = 15–150$ с) и 400–500 км для волн Лява

($T = 20–100$ с). На более коротких и длинных периодах разрешение закономерно ухудшается, что связано с использованием меньшего количества сейсмических трасс (рис. 2, 3). Достигнутая нами разрешающая способность выше, чем у имеющихся в данный момент поверхностно-волновых моделей для всей Арктики [2–5]. На периодах 20–40 с наши результаты характеризуются разрешением, близким к модели BARMOD [9], а с увеличением периода – превосходят ее благодаря использованию почти в 2 раза большего количества сейсмических трасс.

Анализ распределений вариаций групповых скоростей поверхностных волн на отдельных периодах (рис. 2, 3) позволяет сделать следующие выводы относительно глубинного строения рассматриваемой территории. Учитывая чувствительность групповых скоростей волн Рэлея и Лява к скоростному строению среды, на периоде 20 с полученные карты должны отражать вариации мощности осадочных отложений [8]. Наиболее

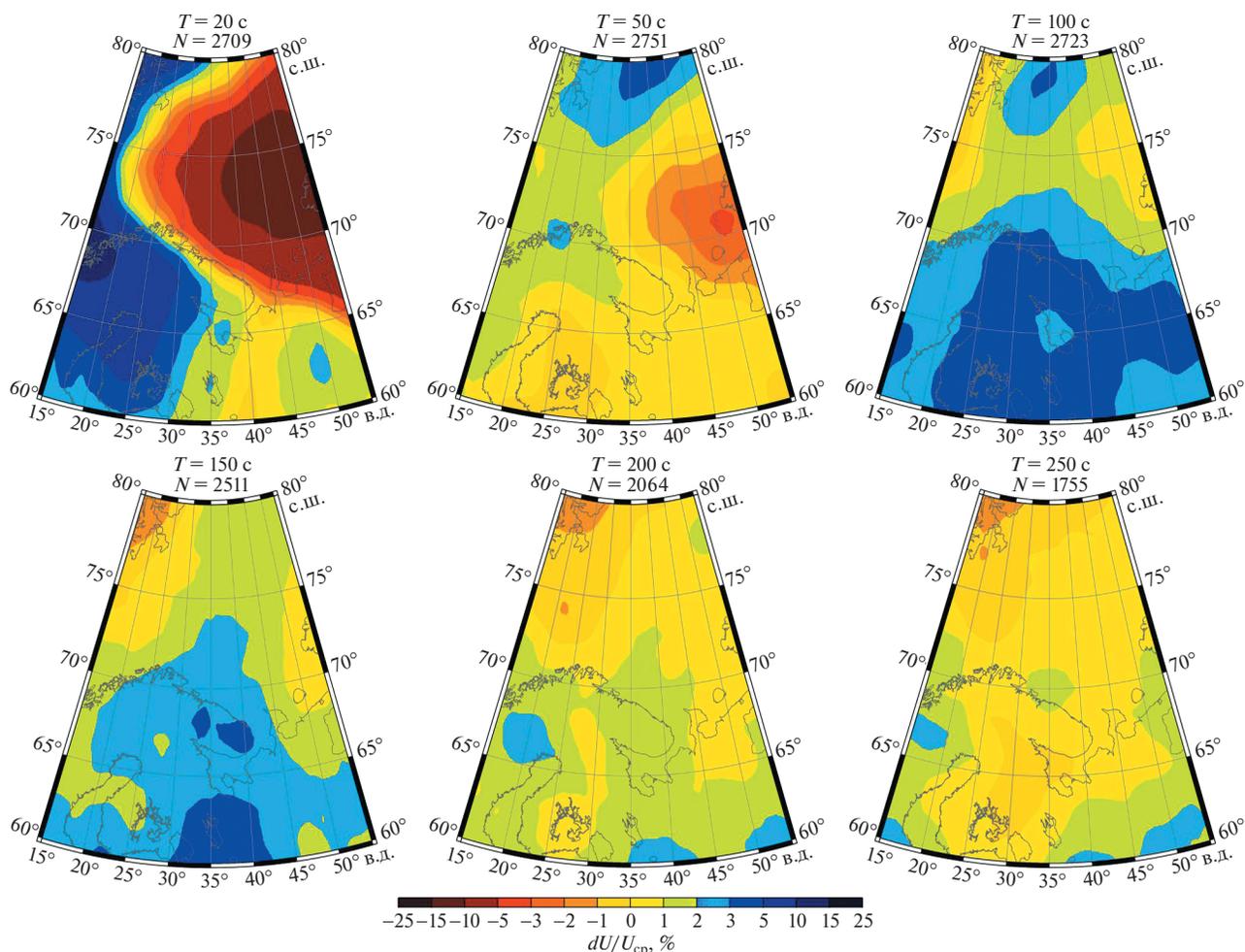


Рис. 2. Вариации групповых скоростей волн Рэлея относительно средних значений ($\delta U/U_{cp}$, %). Средние значения групповых скоростей составляют 2.96, 3.78, 3.85, 3.77, 3.70 и 3.72 км/с для периодов 20, 50, 100, 150, 200 и 250 с соответственно. Над каждой картой приведены соответствующий период (T , с) и количество используемых трасс (N).

ярко выявленные скоростные аномалии коррелируют с мощностью осадков для волн Рэлея ($T = 20$ с, рис. 2). Так, минимумы групповых скоростей наблюдаются в восточной части бассейна Баренцева моря, где согласно модели EUNaseis мощность осадков достигает 12–18 км [10]. Значения скоростей волн Рэлея понижены и в его западной части с мощностью осадков 4–8 км. Большая часть Балтийского щита характеризуется высокими значениями скоростей поверхностных волн, что согласуется с практически полным отсутствием осадочного слоя для этой территории. На востоке Кольского полуострова значения скоростей поверхностных волн несколько уменьшаются, что может быть связано с наличием здесь тонкого (до 2 км) слоя осадков [10].

Для волн Рэлея на периоде 50 с полученное распределение отражает основные особенности вариаций глубины Мохо, которая уменьшается от

35–40 км под восточной частью бассейна Баренцева моря до 30–35 км под западной [10], что сопровождается увеличением групповых скоростей (рис. 2). 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. Карты для более высоких периодов колебаний (до 150 с) отражают распределение горизонтальных неоднородностей до глубины ~250 км. В этом диапазоне периодами скоростями волн Рэлея характеризуется весь Балтийский щит, что может быть обусловлено наличием здесь мощной высокоскоростной литосферы, причем скорости несколько увеличиваются в восточном направлении. Пониженные скорости поверхностных волн на этих и более длинных периодах наблюдаются под Шпицбергом, что согласуется с известными данными о глубинном строении мантии под архипелагом [3, 5, 9]. Для периодов более 150 с, где вариации ско-

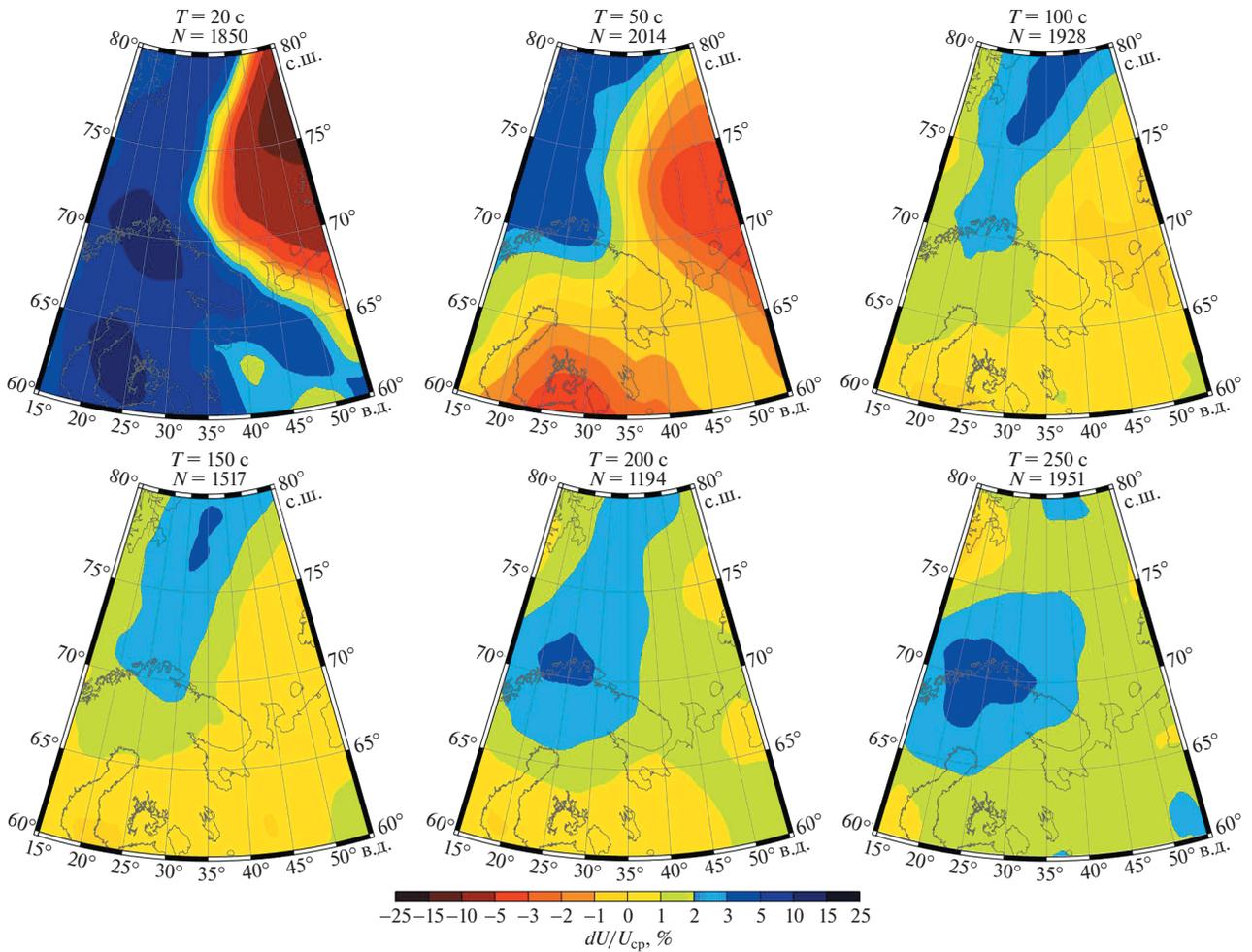


Рис. 3. Вариации групповых скоростей волн Лява относительно средних значений ($\delta U/U_{cp}$, %). Средние значения групповых скоростей составляют 3.22, 4.04, 4.34, 4.40, 4.44 и 4.49 км/с для периодов 20, 50, 100, 150, 200 и 250 с соответственно. Над каждой картой приведены соответствующий период (T , с) и количество используемых трасс (N).

ростей поверхностных волн не превышают 3%, на характер дисперсии скоростей поверхностных волн оказывает влияние строение верхней мантии на глубинах более ~ 250 км. Таким образом, в этом диапазоне глубин мантия становится менее дифференцированной по скоростям по сравнению с вышележащими слоями.

Для более детального исследования глубинного строения Кольского полуострова по полученным картам (рис. 2, 3) были определены локальные дисперсионные кривые в западной (68° с.ш., 30° в.д.) и восточной (67° с.ш., 37° в.д.) частях полуострова (рис. 4а) и проведена их инверсия в скоростные разрезы волн SV (по волнам Рэлея) и SH (по волнам Лява) до глубины 500 км (рис. 4б). Вычисления проводились методом сопряженных градиентов для модели среды с двумя слоями коры с постоянными скоростями S-волн и одиннадцатью слоями мантии с линейным изменением

скорости с глубиной на полупространстве аналогично [2, 5].

В результате было получено, что для западной части полуострова мощность коры составляет 43 км, а для восточной — около 36 км. Скоростные разрезы волн SV отличаются между собой до глубины примерно 100 км, а на больших глубинах они становятся практически идентичными (рис. 4б), что также проявляется в близости групповых скоростей волн Рэлея на периодах более 50 с (рис. 2, 4а). Различия в скоростных разрезах волн SH для рассматриваемых регионов наблюдаются до глубины примерно 300 км (рис. 3б), что также отражено в отличиях групповых скоростей волн Лява (рис. 2, 4а). Наибольший интерес представляет разница скоростей волн SV и SH, характеризующая радиальную анизотропию вещества мантии [8]. Так, верхняя мантия в окрестности 68° с.ш. и 30° в.д. характеризуется анизотропны-

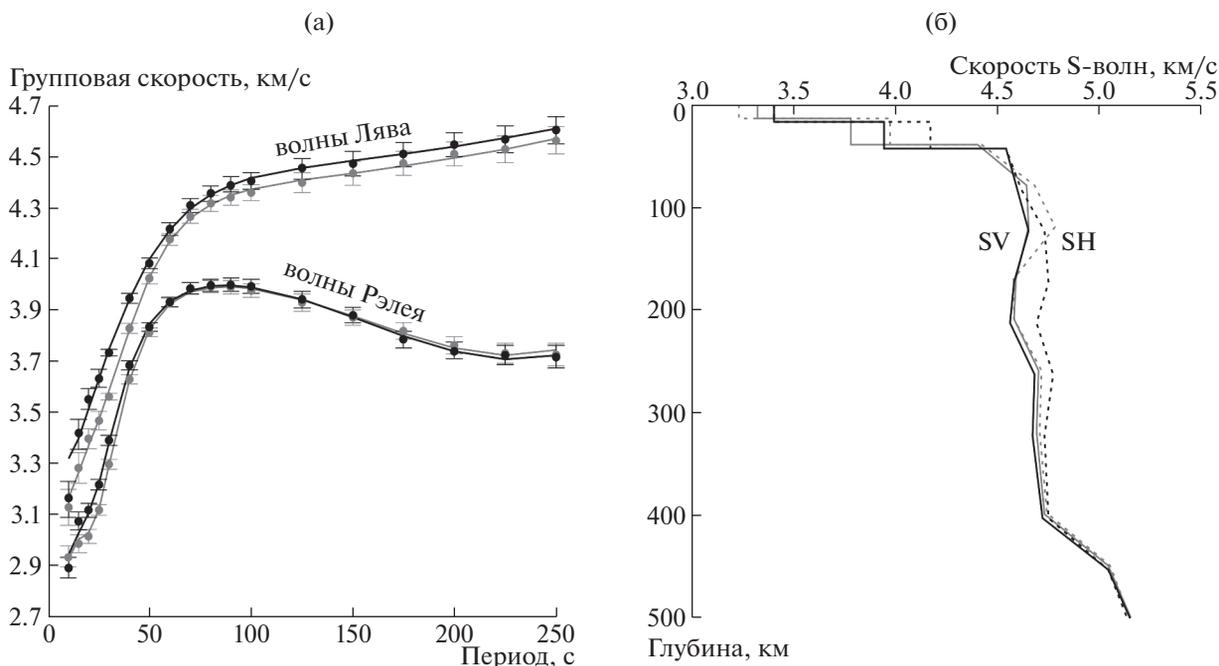


Рис. 4. (а): Локальные дисперсионные кривые волн Рэлея и Лява (кружки) с погрешностями их определения и дисперсионные кривые, соответствующие скоростным разрезам, полученным в результате инверсии (сплошные линии). Черным и серым цветом обозначены кривые для западной и восточной частей Кольского полуострова соответственно. (б): Скоростные разрезы волн SV (сплошные линии) и SH (пунктирные линии).

ми свойствами в диапазоне глубин 100–300 км, в то время как для 67° с.ш. и 37° в.д. этот диапазон существенно меньше – 70–160 км (рис. 4б). Таким образом, полученные результаты указывают на возможное различие западной и восточной частей Кольского полуострова не только в строении коры, как это было отмечено ранее в работе [1], но и в величине радиальной анизотропии в верхней мантии.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин В.В., Гоев А.Г., Санина И.А., Федоров А.В. Особенности глубинного скоростного строения центральной части Кольского полуострова методом функций приемника // Доклады РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 501. № 2. С. 180–183. <https://doi.org/10.31857/S268673972112001X>
2. Середкина А.И. Поверхностно-волновая томография Арктики // Физика Земли. 2019. № 3. С. 439–450. <https://doi.org/10.31857/S0002-33372019358-70>
3. Lebedev S., Schaeffer A.J., Fullea J., et al. Seismic Tomography of the Arctic Region: Inferences for the Thermal Structure and Evolution of the Lithosphere //

Circum-Arctic Lithosphere Evolution. London. UK: Geological Society. 2017. V. 460. P. 419–440.

4. Levshin A.L., Ritzwoller M.H., Barmin M.P., et al. 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.
5. 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>
6. Pedersen H.A., Debayle E., Maupin V., et al. 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>
7. Левшин А.Л., Яновская Т.Б., Ландер А.В. и др. Поверхностные сейсмические волны в горизонтально-неоднородной Земле. М.: Наука, 1986.
8. Яновская Т.Б. Поверхностно-волновая томография в сейсмологических исследованиях. СПб.: Наука, 2015.
9. Levshin A.L., Schweitzer J., Weidle C., et al. Surface Wave Tomography of the Barents Sea and Surrounding Regions // Geophys. J. Int. 2007. V. 170. P. 441–459. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03285.x>
10. 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. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.08.004>

SURFACE WAVE TOMOGRAPHY OF THE KOLA PENINSULA AND ADJACENT AREAS FROM RAYLEIGH AND LOVE WAVE GROUP VELOCITY DISPERSION DATA

A. I. Filippova^{a,b,#} and O. A. Solovey^c

^a*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, Troitsk, Moscow, Russian Federation*

^b*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^c*Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation*

[#]*E-mail: aleirk@mail.ru*

Presented by Academician of the RAS V.V. Adushkin January 31, 2022

We study deep structure of the crust and upper mantle of the Kola Peninsula and adjacent areas from representative data on dispersion of surface wave group velocities in the period range 10–250 s. Distributions of Rayleigh and Love group velocities with estimates of their resolution are calculated using a surface wave tomography method. For western and eastern parts of the Kola Peninsula, SV- and SH-wave velocity patterns up to the depth of 500 km are inverted from the obtained maps. Our results are characterized by higher lateral resolution than the currently existing surface wave models and allow us to trace the main structural features of the crust and upper mantle under the considered region. The obtained results indicate probable difference in the structure of the crust and the anisotropic properties of the upper mantle under the western and eastern parts of the Kola Peninsula.

Keywords: Rayleigh and Love waves, group velocities, tomography, Kola Peninsula