

УДК 550.348

Карты распределения скоростей волн Релея на территории Кавказа по данным кавказской сети CNET

© 2020 г. Т.Ю. Королева

ФИЦ ЕГС РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Для определения латерального распределения групповых и фазовых скоростей волн Релея используется метод шумовой сейсмотомографии, позволяющий по кросскорреляционным функциям обработанных соответствующим образом записей шума на паре станций оценивать дисперсионные кривые вдоль трасс, соединяющих эти станции. По записям вертикальной компоненты 67 сейсмостанций кавказской сети CNET за 2018 г. вычислены кросскорреляционные функции для всевозможных межстанционных трасс. С помощью спектрально-временного анализа получены дисперсионные кривые групповой и фазовой скорости волны Релея для периодов 5–30 с. Сделана двумерная поверхностно-волновая томография, в результате чего получено латеральное распределение скоростей для периодов 7–22 с, что отражает скоростное строение на глубинах 5–25 км. Приведены карты распределения групповой и фазовой скорости волны Релея на территории Кавказа для периодов 7, 10, 12, 14, 17 и 22 с. Карты скоростей для периодов 7–12 с хорошо коррелируют с региональной геологией.

Ключевые слова: сейсмический шум, дисперсионные кривые, волны Релея, поверхностно-волновая томография.

Для цитирования: Королева Т.Ю. Карты распределения скоростей волн Релея на территории Кавказа по данным кавказской сети CNET // Российский сейсмологический журнал. — 2020. — Т. 2, № 3. — С. 70–77. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.3.06>

Введение

Начиная с 2017 г., в рамках реализации проекта о создании кавказской сейсмической сети (CNET) [Sandvol *et al.*, 2017] на территории России, Армении, Азербайджана и Грузии была развернута целая сеть (свыше 70) широкополосных сейсмостанций. Часть станций образовала плотный сейсмический профиль, пересекающий большую часть Малого Кавказа и весь Большой Кавказ, остальные дополнили местные региональные сети [Mackey *et al.*, 2017]. Большой Кавказ является частью Альпийско-Гималайского складчатого пояса, испытавшей за последние 5 млн. лет быстрое поднятие, что делает его очень интересным объектом для изучения. Здесь проводились как глобальные [Villaseñor *et al.*, 2001], так и локальные [Zabelina *et al.*, 2016] исследования, однако полученные скоростные модели характеризовались низким разрешением и были несколько противоречивы, что было связано, в том числе, с недостаточным количеством качественных данных.

Метод шумовой сейсмотомографии активно используется для определения скоростной структуры верхних слоёв Земли. Основан он на том, что кросскорреляционная функция шума на двух станциях, усреднённая за достаточно длительный интервал времени, определяет функцию Грина для поверхностной волны [Lobkis, Weaver, 2001; Snieder, 2004], что даёт возможность оценивать групповые и фазовые скорости поверхностных волн на трассах между станциями [Shapiro *et al.*, 2005; Yang *et al.*, 2007]. Метод обладает тем преимуществом, что, во-первых, позволяет выделять сравнительно небольшие периоды поверхностных волн, а во-вторых, поскольку скорости определяются вдоль межстанционных трасс, его разрешение зависит преимущественно от плотности сети станций, поэтому он получил широкое распространение при исследовании тех регионов, где имеются достаточно густые сети станций [Moschetti *et al.*, 2007; Lin *et al.*, 2007]. Полученные средние вдоль межстанционных трасс дисперсионные кривые используются как входные данные для двумерной поверхностно-

волновой томографии: по ним определяется латеральное распределение скоростей поверхностных волн для отдельных периодов. Полученные распределения в дальнейшем можно использовать как для самостоятельных интерпретаций [Bensen et al., 2008; Szanyi et al., 2013], так и для получения вертикальных скоростных разрезов и, как следствие, трёхмерного распределения скоростей S -волны [Li et al., 2012; Яновская и др., 2014]. С появлением сети станций CNET появилась возможность применить этот метод для исследования Кавказа, что и было сделано в данной работе.

Метод исследования и фактический материал

Метод шумовой сейсмотомографии включает в себя предварительную обработку данных, направленную, в том числе, на устранение влияния землетрясений, вычисление и суммирование кросскорреляционных функций, определение дисперсионных характеристик скоростей поверхностных волн и поверхностно-волновую томографию. В данной работе использовались записи за 2018 г. вертикальных компонент 67 сейсмических станций сети CNET, расположенных в России, Грузии, Азербайджане и Арме-

нии (рис. 1). Кросскорреляционные функции вертикальных компонент позволяют определить дисперсию скоростей волны Релея. Если были доступны записи канала LHZ, использовались они, в противном случае использовались записи канала VHZ. Предварительная обработка данных, включающая амплитудную нормализацию путём деления на бегущее среднее значение и спектральное отбеливание, производилась по методике, подробно описанной в [Bensen et al., 2007], кросскорреляционные функции вычислялись за сутки и суммировались за период времени от трёх месяцев до одного года, в зависимости от времени работы станций.

Для вычисленных таким образом кросскорреляционных функций применялся спектрально-временной анализ [Levshin et al., 1989], модифицированный для автоматических вычислений. Зависимости групповых и фазовых скоростей от периода были получены вдоль 1779 межстанционных трасс для интервала периодов от 5 до 30 с. Однако для дальнейших вычислений мы использовали только те дисперсионные кривые, отношение сигнал/шум для которых превышало 10, а также полученные вдоль трасс, длина которых превышала утроенную длину волны, что необходимо для построения надёжных дисперсионных

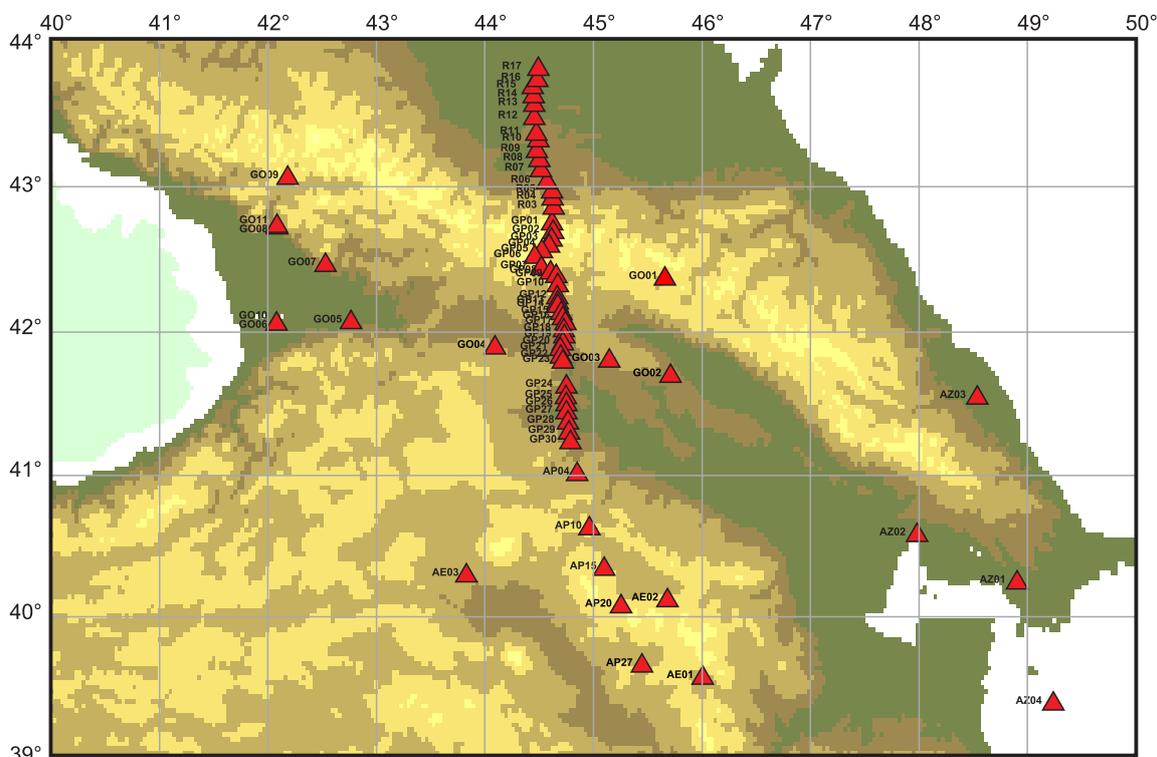


Рис. 1. Расположение станций (красные треугольники), записи которых использовались для дальнейших вычислений.

Рядом со станциями подписаны их коды

кривых [Bensen *et al.*, 2007]. В результате для томографии в зависимости от периода использовалось от 368 до 912 дисперсионных кривых. При этом для периодов меньше 7 с и больше 22 с количество межстанционных трасс, вдоль которых удалось получить значения скоростей, оказалось недостаточным для томографии, так что она делалась в интервале периодов от 7 до 22 с. Гистограмма, показывающая количество трасс, вдоль которых вычислялись групповые и фазовые скорости, для отдельных периодов приведена на рис. 2.

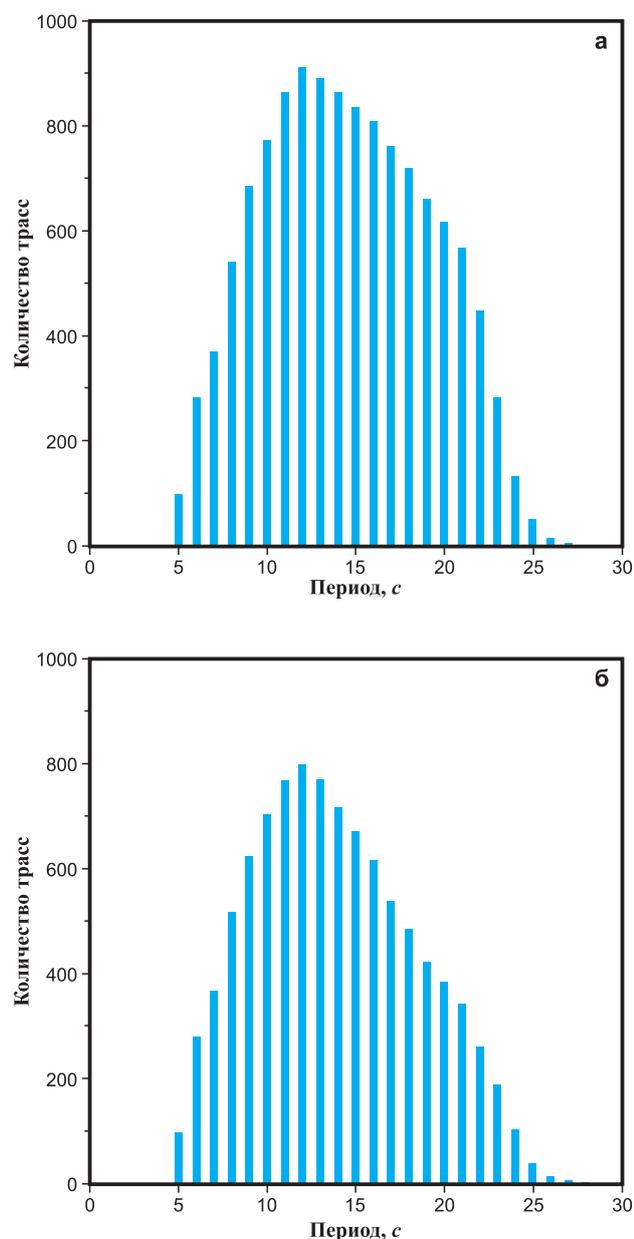


Рис. 2. Количество трасс, используемых в томографии, для каждого из периодов: а — для определения групповых скоростей; б — для определения фазовых скоростей

Двумерная томография делалась по методу, предложенному в работе [Дитмар, Яновская, 1987]. Согласно этому методу, невязки скорости ищутся в виде коэффициентов разложения по базисным функциям, при этом на них накладывается минимум ограничений — гладкость и ограниченность. Скорость определялась в области, ограниченной координатами от 39 до 44°N и от 42 до 48°E, с шагом 0.5°. При этом необходимо помнить, что из-за отсутствия информации в точках, не пересекаемых лучами, мы получаем не точное значение скорости в точке, а сглаженное по некоторой области вокруг данной точки, и оценка этой области сглаживания — также необходимый элемент поверхностно-волновой томографии. В данной работе разрешающая способность данных оценивалась величиной радиуса эквивалентной области сглаживания [Yanovskaya, Ditmar, 1990].

Результаты и обсуждение

По определённому таким образом латеральному распределению скоростей для отдельных периодов были построены карты распределения скоростей групповых и фазовых скоростей волны Релея для периодов 7, 12, 14, 18 и 22 с (рис. 3 и 4). Так называемые «ядра чувствительности» (sensitivity kernels) показывают, в каком диапазоне глубин скорость S -волны оказывает максимальное влияние на скорости поверхностных волн. Определяются они как $(\partial u/u)/(\partial b/b)$, где u — скорость волны Релея, b — скорость поперечной волны [Levshin *et al.*, 1989]. На рис. 5 представлены ядра чувствительности для 7, 12, 17 и 22 с для групповых и фазовых скоростей. Видно, что на периоде 7 с скорость волны Релея в наибольшей степени отражает строение на глубине порядка 5 км в случае групповой скорости и 7 км — в случае фазовой скорости. Скорости на такой глубине отражают региональную геологию, что хорошо видно на приведённых картах — область пониженных скоростей соответствует расположению Куринской низменности и Скифской плиты. Такая тенденция сохраняется до периода 12 с, то есть порядка 15 км. В то же время обращает на себя внимание тот факт, что не везде под Большим Кавказом скорость повышена, что может свидетельствовать в пользу поддержки гипотезы о плавлении коры под Большим Кавказом вследствие вулканической деятельности.

Надо отметить, что, несмотря на то, что основным объектом исследования был заявлен Большой Кавказ, он не попал полностью в зону

приемлемого разрешения. Однако, поскольку в 2019 г. профиль был продолжен по российской территории, планируется дополнить имеющиеся данные данными за 2019 г. (для новых трасс)

и уже по ним строить определять пространственное распределение скорости S -волны в исследуемом регионе.

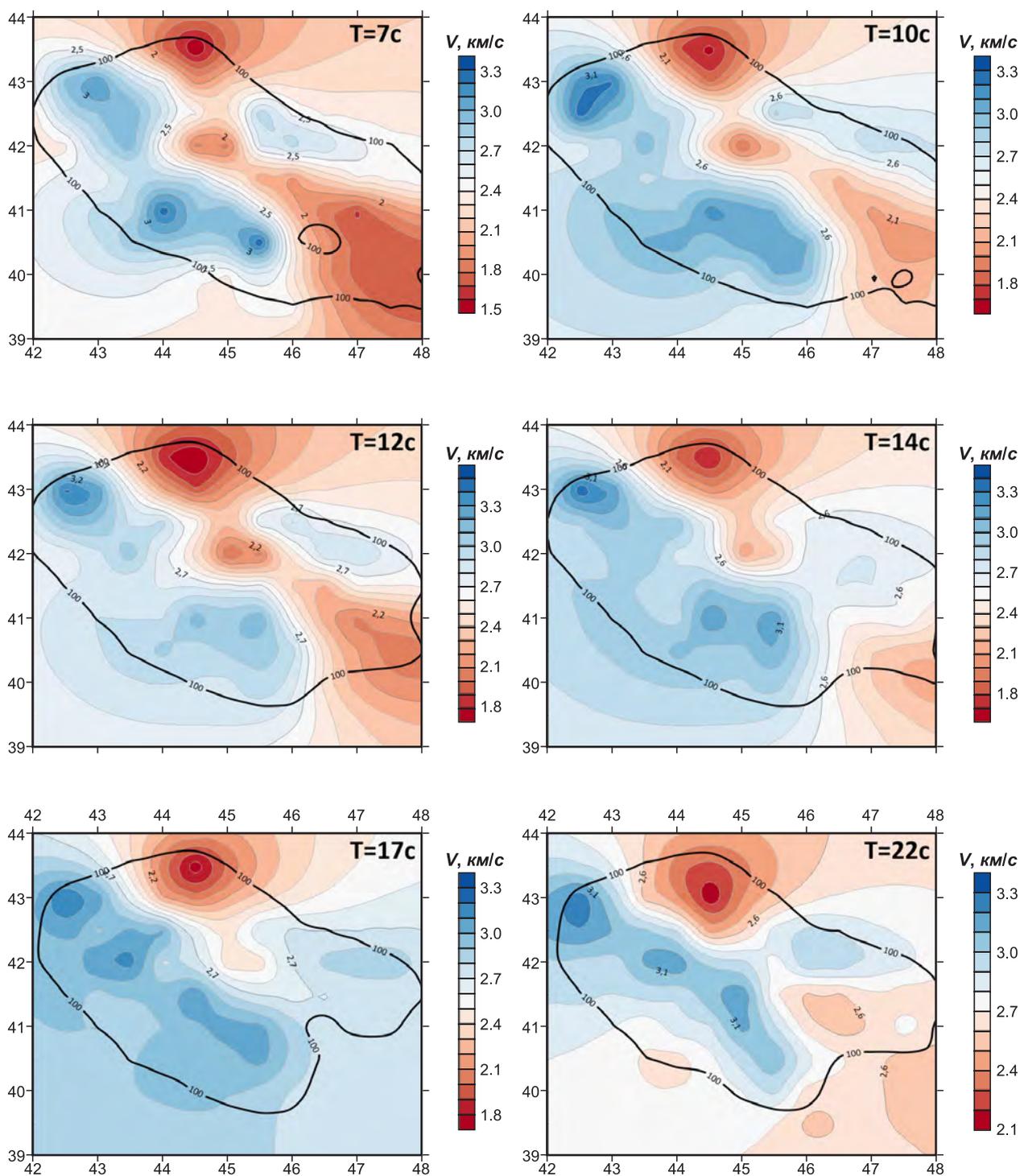


Рис. 3. Карты распределения групповых скоростей волны Релея для отдельных периодов (периоды указаны на рисунках).

Жирной линией околтурена область, где радиус эквивалентной области сглаживания не превышает 100 км

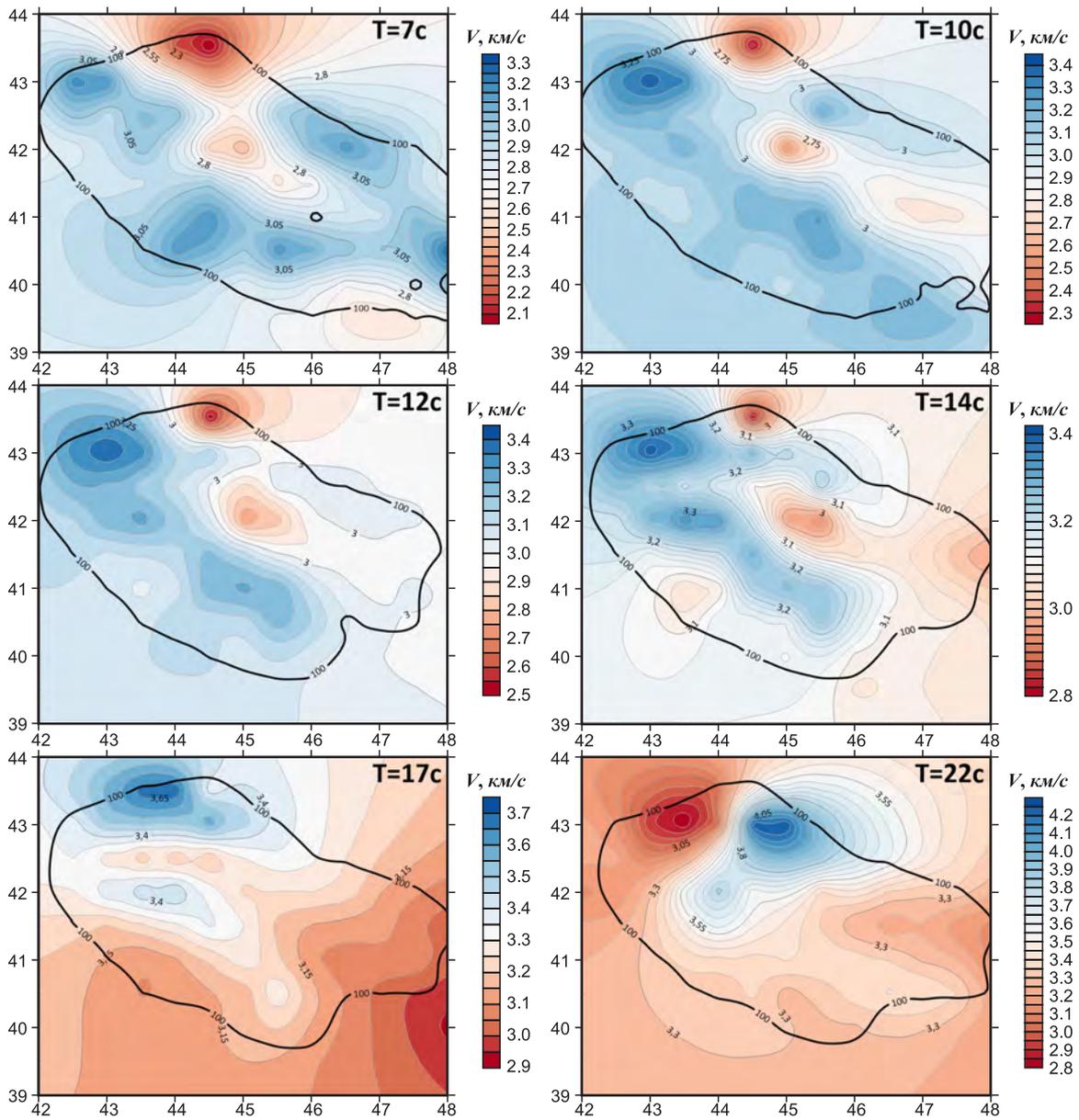


Рис. 4. Карты распределения фазовых скоростей волны Релея для отдельных периодов (периоды указаны на рисунках).

Жирной линией околтурена область, где радиус эквивалентной области сглаживания не превышает 100 км

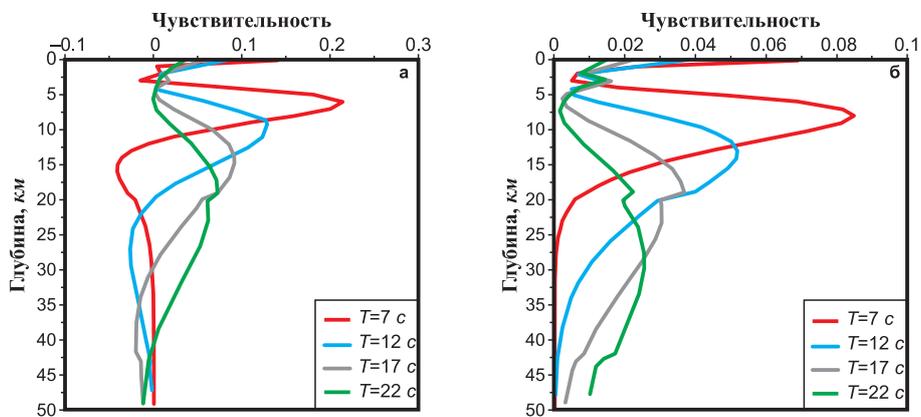


Рис. 5. Ядра чувствительности для отдельных периодов (указаны на рисунке) групповой (слева) и фазовой (справа) скорости волны Релея

Заключение

В работе получены карты распределения групповых и фазовых скоростей волны Релея для периодов 7–22 с, что позволяет судить о скоростном строении на глубинах 5–25 км. Карты можно использовать как для самостоятельной интерпретации, так и для построения скоростных разрезов *S*-волны, чем и планируется заниматься в дальнейшем, дополнив имеющиеся данные данными новых введенных в работу станций.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-01304-20.

Литература

- Дитмар П.Г., Яновская Т.Б.* Обобщение метода Бэйкуса-Гильберта для оценки горизонтальных вариаций скорости поверхностных волн // Известия АН СССР. Физика Земли. – 1987. – № 6. – С. 30–40.
- Яновская Т.Б., Лыскова Е.Л., Королева Т.Ю.* Скоростное строение Карпатской зоны по данным шумовой поверхностно-волновой томографии // Физика Земли. – 2014. – № 5. – С. 44–50.
- Bensen G.D., Ritzwoller M.H., Barmin M.P., Levshin A.L., Lin F.C., Moschetti M.P., Shapiro N.M., Yang Y.* Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broadband surface wave dispersion measurements // Geophysical Journal International. – 2007. – V. 169. – P. 1239–1260.
- Bensen G.D., Ritzwoller M.H., Shapiro N.M.* Broadband ambient noise surface wave tomography across the United States // Journal of Geophysical Research. – 2008. – V. 113. – B05306(1)–B05306(21).
- Levshin A.L., Yanovskaya T.B., Lander A.V., Bukchin B.G., Barmin M.P., Ratnikova L.I., Its E.N.* Seismic surface waves in a laterally inhomogeneous Earth / Ed. V.I. Keilis-Borok. – Dordrecht, Boston, London: Kluwer Publ. House, 1989. – 293 p.
- Li H., Li S., Song X., Gong M., Li X., Jia J.* Crustal and uppermost mantle velocity structure beneath northwestern China from seismic ambient noise tomography // Geophysical Journal International. – 2012. – V. 188 (1). – P. 131–143.
- Lin F.C., Ritzwoller M.H., Townend J., Savage M., Bannister S.* Ambient noise Rayleigh wave tomography of New Zealand // Geophysical Journal International. – 2007. – V. 172. – P. 649–666.
- Lobkis O.I., Weaver R.L.* On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field // Journal of the Acoustical Society of America. – 2001. – V. 110. – P. 3011–3017.
- Mackey K.G., Malovichko A.A., Sandvol E.A., Nabelek J.L., Godoladze T., Babayan H., Yetirmishli G.J.* The uplift and seismic structure of the Greater Caucasus – international collaborative research mega project // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XII Международной сейсмологической школы. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – С. 3–5.
- Moschetti M.P., Ritzwoller M.H., Shapiro N.M.* Surface wave tomography of the western United States from ambient seismic noise: Rayleigh wave group velocity maps // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. – 2007. – V. 8. – Q08010. doi: 10.1029/2007GC001655
- Sandvol E., Nabelek J., Mackey K.* The Caucasus seismic network: The uplift and structure of the Greater and Lesser Caucasus // FDSN Network Information. International Federation of Digital Seismograph Networks [Site]. – URL: http://www.fdsn.org/networks/detail/XA_2017/. doi: 10.7914/SN/XA_2017
- Shapiro N.M., Campillo M., Stehly L., Ritzwoller M.H.* High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise // Science. – 2005. – V. 307. – P. 1615–1618.
- Sniieder R.* Extracting the Green's function from the correlation of coda waves: a derivation based on stationary phase // Physical Review E. – 2004. – V. 69. – 046610.
- Szanyi G., Grácz Z., Gyori E.* Ambient seismic noise Rayleigh wave tomography for the Pannonian basin // Acta Geodaetica et Geophysica. – 2013. – V. 48. – P. 209–220.
- Villaseñor A., Ritzwoller M.H., Levshin A.L., Barmin M.P., Engdahl E.R., Spakman W., Trampert J.* Shear velocity structure of central Eurasia from inversion of surface wave velocities // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 2001. – V. 123. – P. 169–184.
- Yang Y., Ritzwoller M.H., Levshin A.L., Shapiro N.M.* Ambient noise Rayleigh wave tomography across Europe // Geophysical Journal International. – 2007. – V. 168. – P. 259–274.
- Yanovskaya T.B., Ditmar P.G.* Smoothness criteria in surface wave tomography // Geophysical Journal International. – 1990. – V. 102. – P. 63–72.
- Zabelina I., Koulakov I., Amanatashvili I., El Khrepy S., Al-Arifi N.* Seismic structure of the crust and uppermost mantle beneath Caucasus based on regional earthquake tomography // Journal of Asian Earth Sciences. – 2016. – V. 119. – P. 87–99.

Сведения об авторе

Королева Татьяна Юрьевна, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН), сейсмостанция «Пулково», г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: t.koroleva@plkv.gsr.ru

Rayleigh wave velocity maps beneath the Caucasus from the Caucasus seismic network (CNET)

© 2020 T.Yu. Koroleva

GS RAS, Saint-Petersburg, Russia

Abstract Ambient noise surface wave tomography is a widely used method for determining the velocity structure of the upper layers of the Earth. It is based on the fact that the cross-correlation function (CCF) of noise at two stations, averaged over a long time interval, determines the Green's function of the surface wave. This allows us to estimate the group and phase velocities of surface waves on the paths between stations. The method was applied to the records of the vertical components of 67 seismic stations of the Caucasian network CNET network, which were obtained during 2018. The cross-correlation functions for all interstation paths were calculated. The dispersion curves of group and phase Rayleigh velocities for periods from 5 to 30 s were obtained by means of frequency-time analysis. The lateral distribution of the velocities was received for periods from 7 to 22 s, which correlate with velocity structure at depths of 5-25 km. The group and phase velocity maps for Rayleigh wave for periods 7, 10, 12, 14, 17, 22 s are presented.

Keywords Seismic noise, dispersion curves, Rayleigh waves, surface wave tomography.

For citation Koroleva, T.Yu. (2020). [Rayleigh wave velocity maps beneath Caucasus from the Caucasus seismic network (CNET)]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 2(3), 70-77. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.3.06>

References

- Bensen, G.D., Ritzwoller, M.H., Barmin, M.P., Levshin, A.L., Lin, F.C., Moschetti, M.P., Shapiro, N.M., & Yang, Y. (2007). Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements. *Geophysical Journal International*, 169, 1239-1260.
- Bensen, G.D., Ritzwoller, M.H., & Shapiro, N.M. (2008). Broadband ambient noise surface wave tomography across the United States. *Journal of Geophysical Research*, 113, B05306(1)-B05306(21).
- Ditmar, P.G., & Yanovskaya, T.B. (1987). Generalization of Backus-Gilbert method for estimation of lateral variations of surface wave velocities. *Physics of the Solid Earth. Izvestiya AS USSR*, 23(6), 470-477.
- Levshin, A.L., Yanovskaya, T.B., Lander, A.V., Bukchin, B.G., Barmin, M.P., Ratnikova, L.I., & Its, E.N. (1989). *Seismic surface waves in a laterally inhomogeneous Earth*. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Publ. House, 293 p.
- Li, H., Li, S., Song, X., Gong, M., Li, X., & Jia, J. (2012). Crustal and uppermost mantle velocity structure beneath northwestern China from seismic ambient noise tomography. *Geophysical Journal International*, 188(1), 131-143.
- Lin, F.C., Ritzwoller, M.H., Townend, J., Savage, M., & Bannister, S. (2007). Ambient noise Rayleigh wave tomography of New Zealand. *Geophysical Journal International*, 172, 649-666.
- Lobkis, O.I., & Weaver, R.L. (2001). On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field. *Journal of the Acoustical Society of America*, 110, 3011-3017.
- Mackey, K.G., Malovichko, A.A., Sandvol, E.A., Nabelek, J.L., Godoladze, T., Babayan, H., & Yetirmishli, G.J. (2017). The uplift and seismic structure of the Greater Caucasus - international collaborative research mega project. In *Materialy XII Mezhdunarodnoy seismologicheskoy shkoly "Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh"* [Proceedings of the XII International Seismological Workshop "Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data"] (pp. 3-5). Obninsk, Russia: GS RAS Publ.
- Moschetti, M.P., Ritzwoller, M.H., & Shapiro, N.M. (2007). Surface wave tomography of the western United States from ambient seismic noise: Rayleigh wave group velocity maps. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 8, Q08010. doi: 10.1029/2007GC001655
- Sandvol, E., Nabelek, J., & Mackey, K. (2017). The Caucasus seismic network: The uplift and structure of the Greater and Lesser Caucasus. *FDSN*

- Network Information. International Federation of Digital Seismograph Networks*. Retrieved from http://www.fdsn.org/networks/detail/XA_2017/. doi: 10.7914/SN/XA_2017
- Shapiro, N.M., Campillo, M., Stehly, L., & Ritzwoller, M.H. (2005). High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise. *Science*, 307, 1615-1618.
- Snieder, R. (2004). Extracting the Green's function from the correlation of coda waves: a derivation based on stationary phase. *Physical Review E*, 69, 046610.
- Szanyi, G., Grácz, Z., & Gyori, E. (2013). Ambient seismic noise Rayleigh wave tomography for the Pannonian basin. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 48, 209-220.
- Villaseñor, A., Ritzwoller, M.H., Levshin, A.L., Barmin, M.P., Engdahl, E.R., Spakman, W., & Trampert, J. (2001). Shear velocity structure of central Eurasia from inversion of surface wave velocities. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 123, 169-184.
- Yang, Y., Ritzwoller, M.H., Levshin, A.L., & Shapiro, N.M. (2007). Ambient noise Rayleigh wave tomography across Europe. *Geophysical Journal International*, 168, 259-274.
- Yanovskaya, T.B., & Ditmar, P.G. (1990). Smoothness criteria in surface wave tomography. *Geophysical Journal International*, 102, 63-72.
- Yanovskaya, T.B., Lyskova, E.L., & Koroleva, T.Yu. (2014). The velocity structure of the Carpatian zone from the ambient noise surface wave tomography. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 50(5), 632-640.
- Zabelina, I., Koulakov, I., Amanatashvili, I., El Khrepy, S., & Al-Arifi, N. (2016). Seismic structure of the crust and uppermost mantle beneath Caucasus based on regional earthquake tomography. *Journal of Asian Earth Sciences*, 119, 87-99.

Information about author

Koroleva Tat'iana Yur'ievna, PhD, Senior Researcher of the Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences (GS RAS), seismic station "Pulkovo", Saint-Petersburg, Russia. E-mail: t.koroleva@plkv.gsras.ru