

Т. Ю. Королева, Т. Б. Яновская, С. С. Патрушева

ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ВЕРХНЕЙ МАНТИИ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЫ ПО ДАННЫМ СЕЙСМИЧЕСКОГО ШУМА

Введение

Метод поверхностно-волновой томографии, основанный на использовании сейсмического шума, получил широкое распространение в последние годы благодаря тому, что позволяет использовать всю сейсмическую запись. Это существенно увеличивает объем исходных данных, и, главное, делает возможным применение этого метода для асейсмичных зон. Этот метод основан на том, что кросс-корреляционная функция шума на двух станциях, полученная осреднением по длительному интервалу времени, определяет функцию Грина для поверхностной волны [1–5], что дает возможность оценивать групповые и фазовые скорости на трассах между станциями [6,7]. В настоящей работе такой подход использован для исследования строения верхней мантии Восточно-Европейской платформы и окружающих областей. Восточно-Европейская платформа (ВЕП) является главной тектонической структурой Европейской России, но ее глубинное строение остается до сих пор мало изученным, так как сеть сейсмических станций на территории ВЕП очень редка, а сильные землетрясения в ее пределах не происходят. Используемый в настоящей работе метод оказывается более пригодным для изучения таких областей, поскольку данные о дисперсии групповой скорости определяются не на трассах эпицентр-станция, а на трассах станция-станция, количество которых можно подобрать достаточно большим, несмотря на небольшое число станций.

Имеющиеся к настоящему времени сведения о глубинном строении ВЕП ограничиваются исследованиями вдоль профиля станций сети NARS [8], использующими полную запись поверхностных волн, и результатами работы [9], основанными на томографии фазовых скоростей, определенных на нескольких профилях между станциями в западной части ВЕП. Однако эти исследования характеризуются очень малой разрешающей способностью из-за редкой сети станций. Относительно строения восточной части ВЕП сведения вообще отсутствуют, так же как и о строении прилегающих областей. Появление новых цифровых станций на территории ВЕП позволило использовать метод построения дисперсионных кривых на основе сейсмического шума и получить достаточное количество данных для применения методики поверхностно-волновой томографии. Это дало возможность выявить особенности глубинного строения верхней мантии (до 300 км) на территории ВЕП и прилегающих областей, в том числе и Балтийского щита.

1. Процедура обработки данных

Процедура построения дисперсионных кривых групповых и фазовых скоростей на трассах между станциями на основе анализа кросс-корреляционной функции записей шума на парах станций описана в работах [10,11].

Построение корреляционной функции производится после первичной обработки сейсмограмм, выполненной независимо на двух станциях. Записи длительностью около суток синхронизируются; по таким записям вычисляется кросс-корреляционная функция. Записи фильтруются узкополосными фильтрами, и по отфильтрованным записям также вычисляются корреляционные функции. Полученные таким способом функции суммируются по дням за длительный период времени.

Первым этапом обработки явилось создание базы данных — записей сейсмического шума на станциях за один и тот же промежуток времени (до одного года), что требовало большого объема памяти, так как записи, получаемые из IRIS, оцифрованы с шагом 1 с. Составленная таким способом база включала записи 20 станций. Из этой базы выбирались записи на парах станций, фильтровались узкополосными фильтрами, и по отфильтрованным записям вычислялись корреляционные функции за каждые сутки, которые затем суммировались. Это обеспечивало подавление некогерентного шума и одновременно позволяло оценить функцию Грина поверхностной волны для положений источник-приемник на выбранной паре станций.

По временам, соответствующим максимумам огибающих кросс-корреляционных функций фильтрованных записей, вычислялись групповые скорости, которые относились к центральной частоте фильтра, — такая процедура аналогична спектрально-временному анализу записей поверхностных волн землетрясений [12]. В настоящей работе использовались только корреляционные функции вертикальной компоненты шума, которые отражают функцию Грина волны Рэлея.

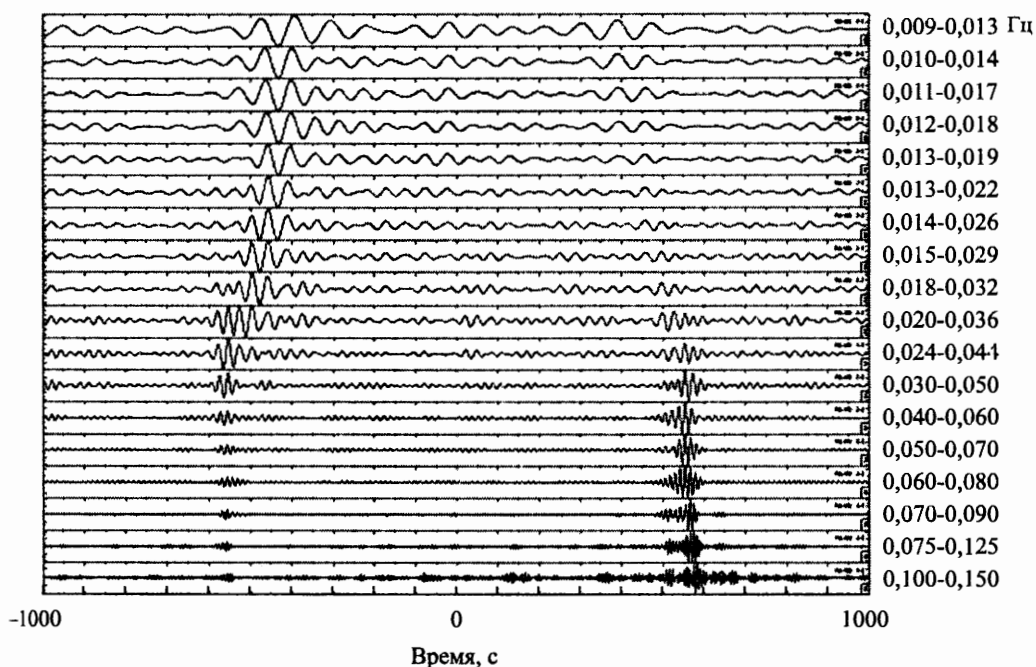


Рис. 1. Результаты узкополосной фильтрации корреляционной функции записей станций PUL-ARU. Справа указаны полосы частот

Пример результатов фильтрации корреляционной функции шума на станциях PUL-ARU приведен на рис. 1. Отметим, что несимметричность кросс-корреляционных функций, явно видимая на этом рисунке, вызвана неравномерным распределением источников шума [11].

2. Методика построения скоростных разрезов

Исходными данными для решения задачи поверхностно-волновой томографии были дисперсионные кривые групповых скоростей волн Рэлея по 119 межстанционным трассам, изображенным на рис. 2. Поскольку скорости рэлеевских волн зависят, глав-

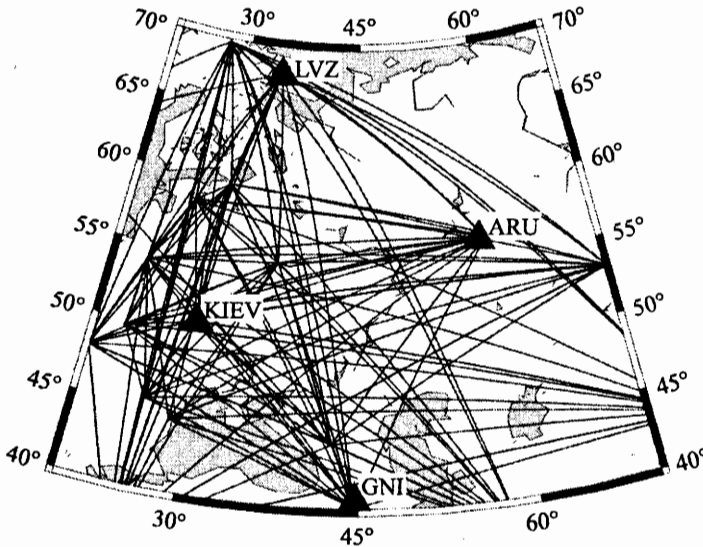


Рис. 2. Трассы между станциями, по которым определялись корреляционные функции шума

ным образом, от распределения скоростей поперечных волн в среде (зависимость от плотности и скорости продольных волн очень слабая), то в конечном счете задачей поверхностно-волновой томографии является нахождение трехмерного распределения скорости поперечных волн $V_S(z, \varphi, \lambda)$. Эта задача разбивается на две более простые задачи: двумерную задачу томографии и одномерную обратную задачу восстановления вертикального скоростного разреза по дисперсионной кривой. В зависимости от количества исходных данных такое разбиение может быть произведено двояко. Либо вначале для отдельных периодов решается двумерная томографическая задача оценки горизонтальных вариаций скорости поверхностной волны, что позволяет строить локальные (точнее, локально-сглаженные) дисперсионные кривые в отдельных точках территории, а затем в этих точках решается одномерная обратная задача определения вертикальных распределений скорости поперечной волны в этих точках. Либо по межстанционным дисперсионным кривым вначале решается обратная одномерная задача определения среднего по трассе скоростного разреза, а затем по полученным значениям скоростей поперечных волн на отдельных глубинах решается двумерная задача

томографии и тем самым оцениваются горизонтальные вариации скорости поперечной волны на выбранных глубинах.

В случае фазовой скорости, для которой можно записать связь между вариацией фазовой скорости и возмущением скорости поперечных волн в виде

$$\delta C(x, y, \omega) = \int_0^{\infty} \left[\frac{\partial C}{\partial V_S} \right]_{\omega, z} \delta V_S(x, y, z) dz$$

эти способы эквивалентны [13]. Для групповых скоростей это не очевидно, так как для них соотношения, аналогичные данному, записать нельзя. Кроме того, задача инверсии дисперсионной кривой групповой скорости в скоростной разрез поперечных волн является существенно нелинейной, и решение оказывается сильно зависящим от выбора начального приближения [14]. Обычно первый способ используется в случае очень большого числа наблюдений, а второй удобно применять, когда трасс мало [15]. В рассматриваемом случае (119 трасс) можно было использовать как один, так и другой подход. При этом оказалось, что оба подхода приводят к одному и тому же решению в пределах погрешности.

3. Результаты

На разных трассах дисперсионные кривые были получены в несколько разных интервалах периодов, что определялось как расстоянием между станциями, так и спектральным составом шума в использованные интервалы времени. На некоторых трассах удалось построить дисперсионные кривые в интервале периодов 10–150 с, но, в основном, этот интервал составлял 10–100 с, а в некоторых случаях верхний предел был равен 70 с. Поскольку данных для периодов 10–15 с было недостаточно, а скорости поверхностных волн именно на этих периодах отражают строение коры, мы не определяли строение коры, а ограничились построением скоростных разрезов только в верхней мантии на глубинах 50–300 км, где результаты получались практически по всем 119 трассам и могли считаться надежными.

Дисперсионные кривые, отвечающие разным трассам, оказались существенно различными, что указывает на горизонтальную неоднородность строения рассматриваемой территории. Пример такого различия иллюстрирует рис. 3, на котором показаны дисперсионные кривые на трассах от станции KIEV в разных направлениях: KIEV-LVZ — на север, KIEV-ARU — на запад и KIEV-GNI — на юго-запад. Уже из этого рассмотрения можно заключить, что в верхней мантии северной части региона можно ожидать высоких скоростей поперечных волн, тогда как в южной части скорости должны быть значительно ниже. Карты латеральных

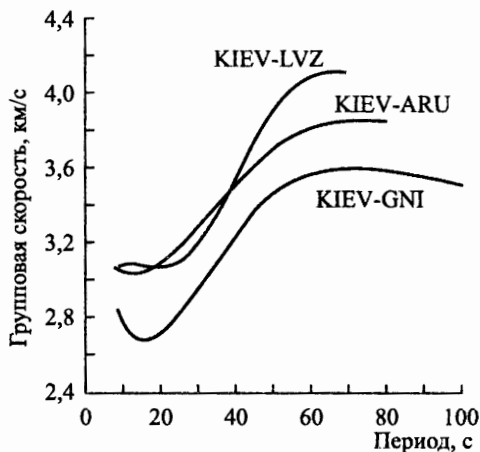


Рис. 3. Примеры дисперсионных кривых, полученных по корреляционным функциям шума на трех трассах

северной части региона можно ожидать высоких скоростей поперечных волн, тогда как в южной части скорости должны быть значительно ниже. Карты латеральных

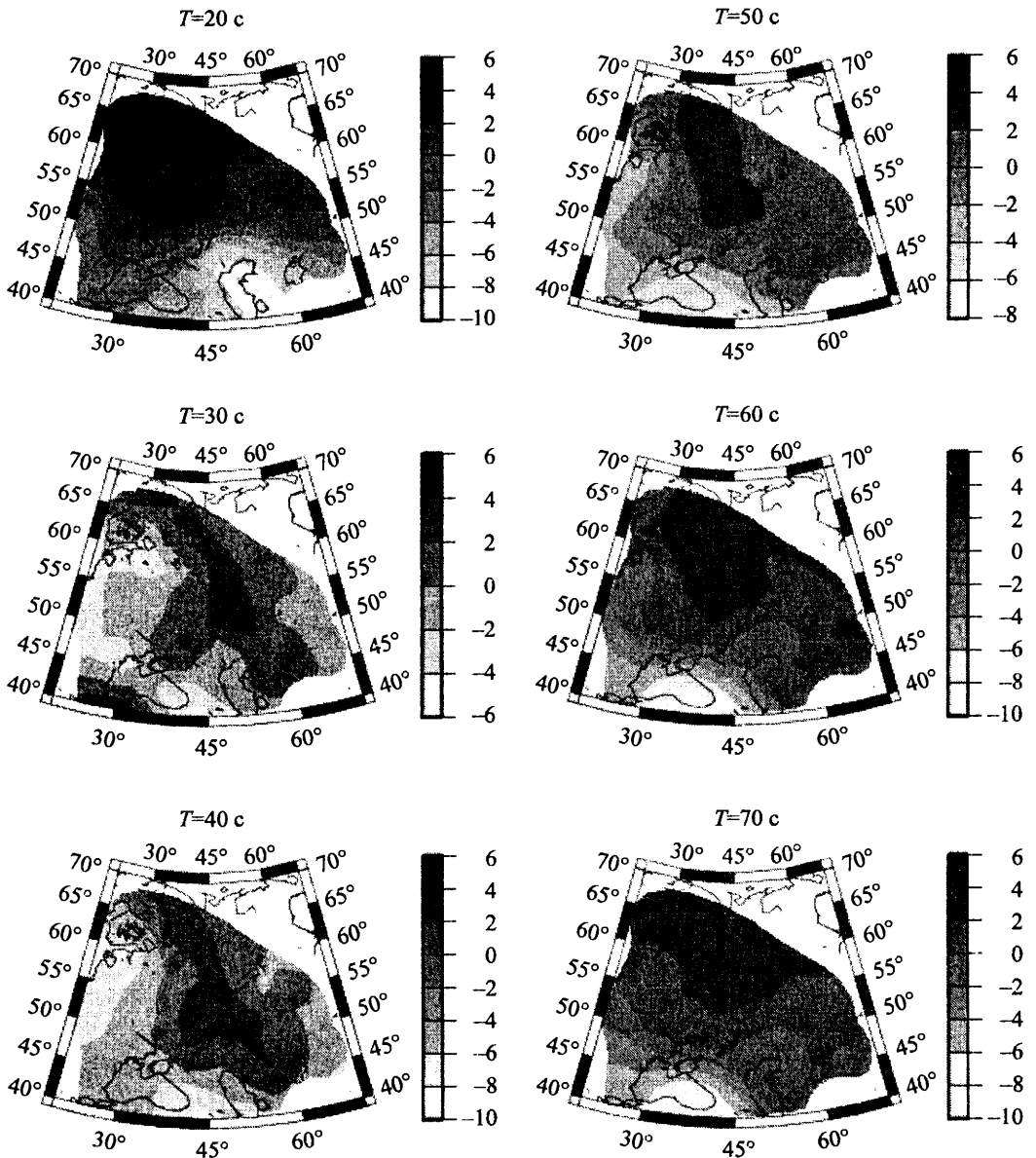


Рис. 4. Полученные методом двумерной томографии карты распределения вариаций групповой скорости рэлеевской волны относительно средней для территории дисперсионной кривой.

На шкалах справа от каждой карты приведены значения относительных вариаций скорости

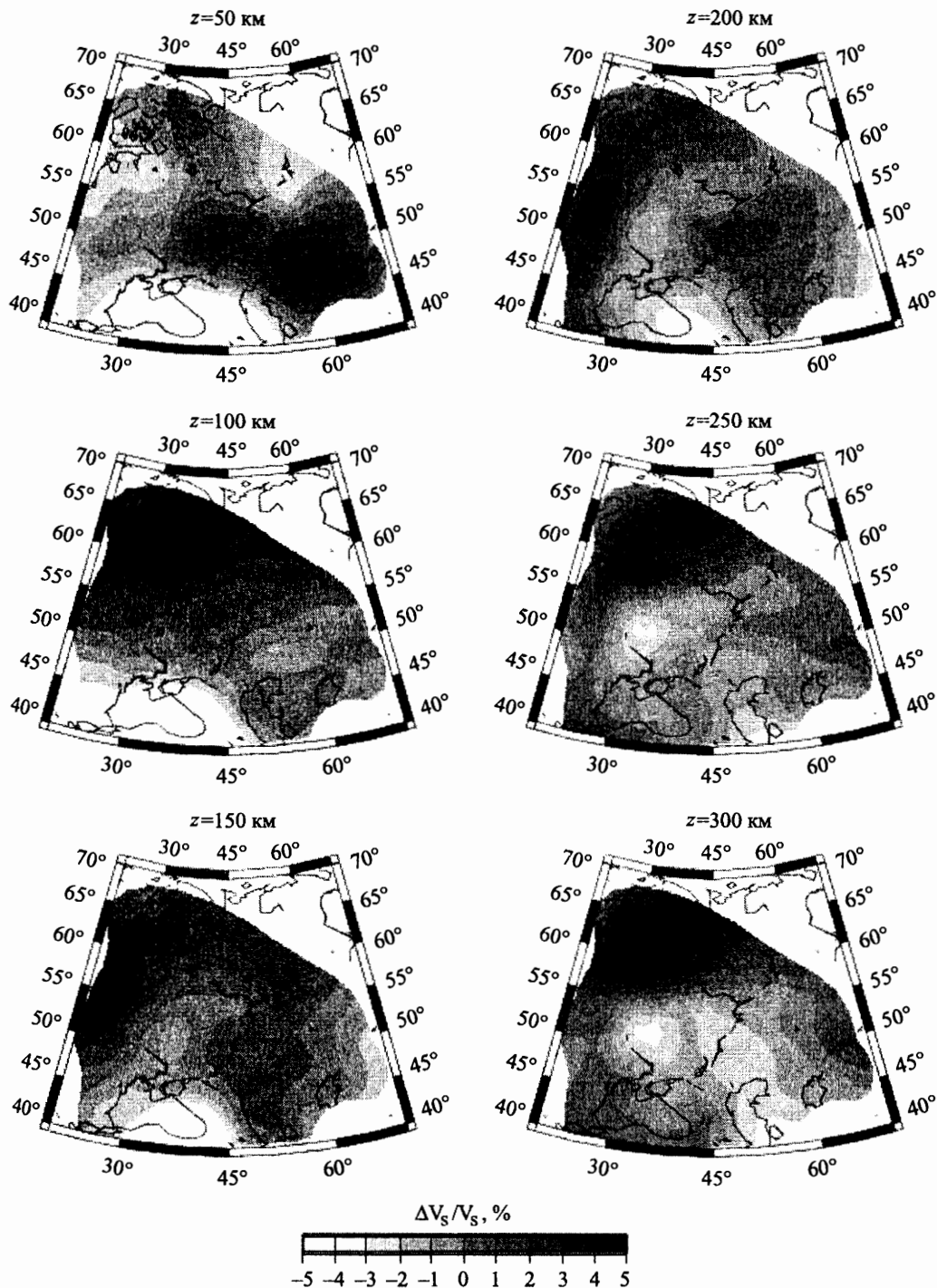


Рис. 5. Карты вариаций скорости поперечных волн в верхней мантии на глубинах 50–300 км, полученные методом поверхностно-волновой томографии

распределений поправок к средним для территории групповым скоростям для периодов 20–70 с изображены на рис. 4. Поскольку густота трасс различна в разных частях рассматриваемой территории, то картирование производилось только в тех частях области, где разрешение могло считаться удовлетворительным. В качестве оценки разрешения, как и в предыдущих исследованиях по поверхностно-волновой томографии, был принят радиус эффективной области сглаживания [16]. Разрешение считалось приемлемым, когда радиус эффективной области сглаживания не превышал 1000 км. На рисунке также видно, что повышенными скоростями характеризуется северо-западная часть региона, а пониженными — южная.

Как уже указывалось выше, томографическое восстановление распределения скоростей поперечных волн в верхней мантии выполнялось двумя способами, и результаты оказались практически совпадающими. На рис. 5 изображены горизонтальные вариации скорости на разных глубинах. Как и карты вариаций групповых скоростей, эти карты также изображены только в области удовлетворительного разрешения.

Заключение

В изучаемой области выделяются четко зоны повышенной скорости, которые можно приурочить к Балтийскому и Украинскому щитам (рис. 5). Украинский щит как зона повышенной скорости проявляется на глубинах 150–200 км, тогда как Балтийский щит выделяется на всех глубинах, начиная со 100 км. На глубинах 150–200 км зоны повышенной скорости, отвечающие обоим щитам, объединены, что может свидетельствовать о генетической связи этих структур. Как на Балтийском, так и на Украинском щитах практически отсутствует низкоскоростная астеносфера.

Зона пониженной скорости выявлена в южной части исследуемой области. Хотя мы не определяли строение коры, но по карте распределения групповой скорости, отвечающей периоду 20 с, можно сделать вывод, что в Прикаспийской депрессии кора характеризуется в среднем весьма низкой скоростью. Это может быть обусловлено наличием там мощного низкоскоростного осадочного слоя. В мантии же, начиная с глубины 50 км, низкие скорости, характерные для астеносферы, выявляются в Черноморской впадине и под горным массивом Кавказа. Следует отметить также появление низкоскоростной аномалии в центральной части территории на глубинах 200–300 км.

В работе [17] приводятся вариации скорости поперечных волн на глубинах от 80 до 670 км в обширной области, включающей ВЕП и часть Западной Европы. Однако разрешающая способность данных, использованных в этой работе, слишком низкая, чтобы выделить латеральные вариации структуры. Тем не менее тенденция понижения скорости в центре ВЕП явно прослеживается на глубинах, превышающих 140 км.

Обнаруженные в настоящем исследовании пониженные скорости на глубинах 200–300 км в области с центром $\sim 52^\circ$ с. ш. и 32° в.д. располагаются в центральной части Днепровско-Донецкого авлакогена, который по современным представлениям является палеорифтом [18]. Как известно из других исследований (например, [14]) глубинного строения рифтовых зон, в них наблюдается повышенный тепловой поток и соответственно пониженные скорости в верхней мантии. В данном случае отмеченные в этой зоне пониженные скорости являются, по-видимому, реликтовым образованием. Наличие такого рода аномалий скорости подтверждает гипотезу о том, что в древние эпохи в этом месте находился континентальный рифт.

Результаты данной работы значительно более детальны по сравнению с теми, которые были получены ранее. Они дают возможность интерпретировать полученные аномалии скорости с точки зрения тектонических особенностей региона.

Работа поддержана грантом РФФИ 08-05-00355.

Указатель литературы

1. *Snieder R.* Extracting the Green's function from the correlation of coda waves: a derivation based on stationary phase // *Phys. Rev. E*, 2004. V. 69, 046610.
2. *Lobkis O. I., Weaver R. L.* On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field // *J. Acoust. Soc. Am.*, 2001. V. 110. P. 3011–3017.
3. *Weaver R. L., Lobkis O. I.* Diffuse fields in open systems and the emergence of the Green function (L) // *J. Acoust. Soc. Am.*, 2004. V. 116. P. 2731–2734.
4. *Roux P., Sabra K. G., Kuperman W. A.* Ambient noise cross correlation in free space: Theoretical approach // *J. Acoust. Soc. Am.*, 2005. V. 117. P. 79–84.
5. *Sabra K. G., Roux P., Kuperman W. A.* Emergence rate of the time-domain Green's function from the ambient noise correlation function // *J. Acoust. Soc. Am.*, 2005. V. 118, P. 3524–3531.
6. *Shapiro N. M., Campillo M.* Emergence of broadband Rayleigh waves from correlation of the ambient seismic noise // *Geophys. Res. Lett.*, 2004. V. 31, L07614.
7. *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.
8. *Muyzer E., Paulssen H., Snieder R.* A seismic cross-section through the east European continent // *Geophys. J. Int.*, 1999. V. 136. P. 695–704.
9. *Фарафонова Ю. Г., Яновская Т. Б.* Строение верхней мантии западной части Восточно-Европейской платформы по скоростям поверхностных волн // *Физика Земли*. 2003. № 8. С. 3–10.
10. *Bensen G. D., Ritzwoller M. H., Barmin P., Levshin A. L., Lin F. C., Moschetti M. P., Shapiro N. M., Yang Y.* Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements // *Geophys. J. Int.*, 2007. V. 169. P. 1239–1260
11. *Королева Т. Ю., Яновская Т. Б., Патрушева С. С.* Использование сейсмического шума для определения структуры верхней толщи Земли // *Физика Земли*. 2009. № 5. С. 3–14.
12. *Levshin A. L., Pisarenko V. F., Pogrebinsky G. A.* On a frequency-time analysis of oscillations // *Ann. Geophys.*, 1972. V. 28. P. 211–218.
13. *Нолет Г.* Распространение сейсмических волн и сейсмическая томография // *Сейсмическая томография / Под ред. Г. Нолет. М.: Мир, 1990. С. 9–33.*
14. *Яновская Т. Б., Кожеевников В. М., Соловей О. А., Акчуриш К. Р.* Строение верхней мантии в Азии по фазовым и групповым скоростям релеевских волн // *Известия РАН. Физика Земли*. 2008. № 8. С. 22–31.
15. *Фарафонова Ю. Г., Панца Дж. Ф., Яновская Т. Б., Дольони К.* Структура верхней мантии в Альпийской зоне по данным поверхностно-волновой томографии // *ДАН*. 2007. Т. 416. № 3. С. 388–391.
16. *Дитмар П. Г., Яновская Т. Б.* Обобщение метода Бэйкуса-Гильберта для оценки горизонтальных вариаций скорости поверхностных волн // *Изв. АН СССР. Физика Земли*. 1987. № 6. С. 30–40.
17. *Marquering H., Snieder R.* Shear-wave velocity structure beneath Europe, the northeastern Atlantic and the western Asia from waveform inversion including surface-wave mode coupling // *Geophys. J. Int.*, 1996. V. 127. P. 283–304.
18. Проект GEORIFT: глубинное строение и эволюция Днепровско-Донецкой впадины и вала Каринского / Под ред. В. И. Старостенко, Р. А. Стифенсон // *Строение и динамика литосферы Восточной Европы. ГЕОКАРТ, ГЕОС. М., 2006. Вып. 2. С. 291–342.*