

УДК 550.348

Причины артефактов в шумовой поверхностно-волновой томографии, возникающих при исследовании мантии, и способы их устранения

© 2020 г. Т.Ю. Королева¹, Т.Б. Яновская², Е.Л. Лыскова²

¹ФИЦ ЕГС РАН, г. Санкт-Петербург, Россия; ²СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Шумовая поверхностно-волновая томография (ambient noise tomography) получила широкое распространение в последние годы для изучения строения коры и верхней мантии. Метод основан на том, что кросскорреляционная функция (ККФ) сейсмического шума на двух станциях, осреднённая за длительный (не менее года) интервал времени, определяет функцию Грина поверхностной волны. Это позволяет оценивать групповые и фазовые скорости поверхностных волн на трассах между станциями, что, в свою очередь, позволяет с помощью использования методов поверхностно-волновой томографии оценивать пространственное распределение скоростей S -волн. При этом предполагается, что шум обусловлен внешними источниками, которые распределены по поверхности Земли случайно и равномерно. Но как было нами ранее показано, длиннопериодный шум, используемый при исследовании мантии, создаётся не внешними, а внутренними источниками, каковыми являются землетрясения, а их распределение по поверхности Земли крайне неравномерно. Эта неравномерность усиливается в случае, когда в изучаемый период времени происходит сильное землетрясение, сопровождающееся серией афтершоков. Это приводит к тому, что максимумы ККФ, определяющей дисперсионную кривую поверхностной волны, сдвигаются в сторону меньших времён, а групповые скорости соответственно завышаются. Этот эффект имеет место как для волн Релея (ККФ компонент $Z-Z$), так и для волн Лява (ККФ компонент $T-T$). Но в случае волн Лява имеет место дополнительный эффект, обусловленный отличием поляризации волн Лява, распространяющихся от кластера землетрясений, от перпендикуляра к межстанционной линии. В этом случае компонента T , перпендикулярная линии между станциями, будет содержать некоторый вклад от волны Релея, которая имеет меньшую скорость, чем волна Лява. Это приводит к занижению скорости волны Лява. Из этого следует, что для получения более корректных дисперсионных кривых как волн Релея, так и особенно волн Лява, необходимо при усреднении ККФ использовать такие временные интервалы, в которых бы по возможности отсутствовали кластеры землетрясений.

Ключевые слова: сейсмический шум, волны Релея и Лява, дисперсионные кривые.

Для цитирования: Королева Т.Ю., Яновская Т.Б., Лыскова Е.Л. Причины артефактов в шумовой поверхностно-волновой томографии, возникающих при исследовании мантии, и способы их устранения // Российский сейсмологический журнал. – 2020. – Т. 2, № 2. – С. 58–65. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.2.05>

Введение

Шумовая поверхностно-волновая томография – метод определения скоростного строения верхних слоёв Земли, получивший широкое распространение с начала этого столетия. Он основан на том, что кросскорреляционная функция (ККФ) шума на двух станциях, в случае, когда источники шума распределены равномерно по поверхности, определяет функцию Грина поверхностной волны на трассе между станциями [Lobkis, Weaver, 2001; Snieder, 2004]. В действительности, конечно, распределение источ-

ников шума неравномерно [например, Stehly et al., 2006; Yang, Ritzwoller, 2008], что, однако, не мешает активно его использовать для определения групповых и фазовых скоростей поверхностных волн [Yang et al., 2007; Bensen et al., 2008; Stehly et al., 2009] и, как следствие, построения скоростных моделей коры и верхней мантии [Yao et al., 2008; Moschetti et al., 2010; Li et al., 2012]. При этом существенную роль играет процедура подготовки данных, направленная на снижение вклада землетрясений в итоговую ККФ, а также осреднение ККФ за длительный (как правило, не менее года) период времени, чтобы

сделать распределение источников более равномерным. Для получения групповых скоростей, как правило, используется процедура, подробно описанная в работе [Bensen et al., 2007], включающая, помимо прочего, амплитудную нормализацию – однобитную [Campillo, Paul, 2003] или нормализацию путём деления на бегущее среднее значение, а также спектральное отбеливание, или модификации этой процедуры, например, использование более коротких (не 24-часовых, а четырёхчасовых) временных промежутков, за которые вычисляется ККФ [Poli et al., 2012], нелинейное суммирование, включающее вычисление производной по времени [Shirzad, Shomali, 2015], или дополнительную фильтрацию [Moreau et al., 2017]. Также было показано, что проблема неравномерного распределения источников частично решается использованием только волн коды [Froment et al., 2010].

При попытках распространить метод шумовой поверхностно-волновой томографии на изучение строения Земли на больших глубинах (верхней мантии) оказалось, что он встречает дополнительные трудности. В частности, ККФ, осреднённая за разные промежутки времени, оказывается разной [Яновская, Королева, 2011]. Для получения скоростных разрезов на глубинах, отвечающих верхней мантии, необходимо использовать данные о дисперсии поверхностных волн на периодах более 30–40 с. А объяснить содержание таких длиннопериодных волн в шуме за счёт «внешних» источников – океанических или атмосферных [Yang, Ritzwoller, 2008] – довольно трудно. Сопоставление дисперсионных кривых волн Релея, полученных усреднением ККФ за разные временные промежутки, показало, что основным источником шума на таких периодах являются землетрясения. И хотя влияние землетрясений на состав шума снижается за счёт амплитудной нормализации [Bensen et al., 2007], в случае, когда большое число очагов оказывается в одном районе, их скопление (кластеризация) существенно нарушает исходное предположение о равномерности распределения источников. Рассмотрим далее, к чему это приводит.

Причины артефактов

В случае равномерного расположения источников по поверхности, вклады тех источников, которые располагаются вне продолжения линии между станциями, взаимно уничтожаются, так что ККФ определяется за счёт наложения вкладов только от источников, располагающихся вдоль этой линии (пунктир на рис. 1), в этом случае разность времён прихода волны на

станции (А и В на рис. 1) будет одной и той же, и эти волны будут складываться синфазно. Но если где-то (в области S) имеет место скопление источников, то они внесут определённый вклад в ККФ. Разность времён прихода волн на эти станции ($T_{SA} - T_{SB}$) будет меньше времени пробега вдоль участка АВ, и, соответственно, вклад от источников в области S приведёт к занижению времени максимума в спектре ККФ, что в свою очередь даст завышенное значение скорости.

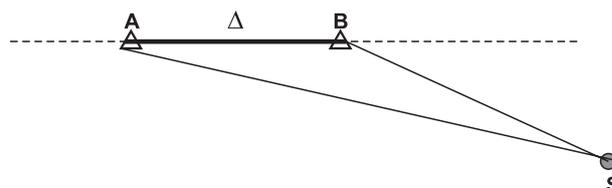


Рис. 1. Схема, поясняющая завышение скорости, определяемой по ККФ, за счёт влияния кластера землетрясений.

В случае равномерного распределения источников шума по поверхности вклады в ККФ дают только источники, расположенные вдоль пунктирной линии

Такие кластеры землетрясений имеют место в случае, когда сильное землетрясение сопровождается достаточно длительной серией афтершоков. Но такое искажение дисперсионной кривой имеет место, когда сигнал можно рассматривать как скалярный. Это справедливо для волн Релея, если дисперсия скорости определяется по корреляции вертикальных составляющих шума ($Z-Z$). В случае же сигнала, являющегося вектором, как в случае волны Лява, ситуация усложняется. Кроме завышения скорости, аналогичного скалярному случаю, следует учитывать отклонение направления вектора колебаний в волне Лява, приходящей от кластера землетрясений, от направления «трансверсальной» компоненты T , ортогональной межстанционной трассе (рис. 2). При этом вклад в трансверсальные компоненты T , по которым рассчитывается ККФ, будет содержать ещё и некоторый вклад от радиальной компоненты волны Релея R . Такая ситуация будет происходить как на одной станции, так и на другой. На рис. 2 горизонтальные компоненты в волнах Лява и Релея изображены только для одной станции, чтобы не загромождать рисунок. Таким образом, в случае наличия кластера землетрясений T -компоненты записей на станциях будут содержать некоторый вклад от волны Релея, а поскольку скорость волны Релея меньше, чем скорость волны Лява, то определяемая по ККФ T - T скорость волны Лява будет занижена.

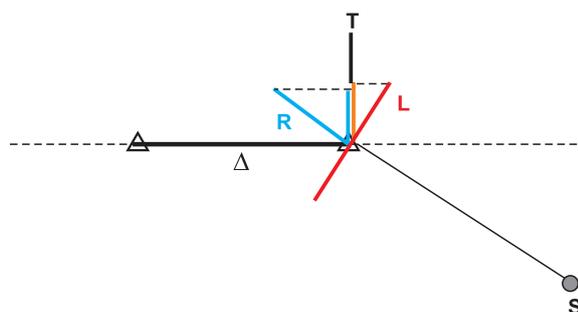


Рис. 2. Схема, иллюстрирующая появление вклада релеевской волны в компоненту T

Простейший метод устранения артефактов

Перечисленные артефакты в дисперсионных кривых волн Релея и Лява, получаемых из ККФ сейсмического шума, приводят к искажениям в скоростных разрезах поперечных волн и, соответственно, к искажению результатов латеральных распределений скоростей, получаемых методами томографии. В частности, это приводит к существенному искажению коэффициента анизотропии среды по искажённым скоростным разрезам волн SV и SH . Для подавления этих искажений важно строить ККФ путём суммирования за такие промежутки времени, когда бы отсутствовали кластеры землетрясений (т.е. сильные землетрясения, сопровождающиеся большим числом афтершоков), расположенные в стороне от межстанционной линии, причём не очень далеко, т.к. в противном случае их влияние проявится на существенно отличающихся значениях времени и поэтому может быть легко исключено [Yanovskaya et al., 2016]. Для исключения влияния кластеров землетрясений, не очень сильно отклоняющихся от продолжения межстанционной линии, в [Yanovskaya et al., 2016] было предложено для построения суммированной ККФ использовать только те годы, в которые отсутствовали мощные кластеры землетрясений, и выполнять суммирование за достаточно длительные промежутки времени (до трёх лет), чтобы обеспечить более или менее равномерное распределение очагов.

Такой метод позволяет существенно улучшить качество получаемых дисперсионных кривых, однако полностью справиться с искажением скоростей не удаётся. Это можно продемонстрировать на примере сравнения дисперсионных кривых, полученных по одной и той же трассе по данным землетрясений и шума. Мы сравнили дисперсионные кривые, полученные по записи землетрясения, произошедшего в 2009 г. в окрестности г. Аквила, Италия, с дисперсионными кривыми, полученными по ККФ запи-

сей шума на этих же станциях с записями шума на станции AQU, расположенной практически в том же месте, где находился и очаг землетрясения. ККФ вычислялись по методике, подробно описанной в [Bensen et al., 2007], включающей первичную подготовку данных, амплитудную нормализацию и спектральное отбеливание, и были просуммированы за 2001, 2002 и 2003 гг., в течение которых очаги землетрясений были распределены более или менее равномерно. На рис. 3 изображены дисперсионные кривые для пары станций AQU («Аквила», Италия) и SUW («Сувалки», Польша), полученные по близко расположенным трассам по данным землетрясений и шума. Видно, что если на периодах до 40 с кривые хорошо совпадают, то на периодах свыше 40 с скорость релеевской волны, полученная по данным шума, оказывается завышенной относительно той, которая получена по данным от землетрясения. Скорость волны Лява здесь тоже оказывается завышенной.

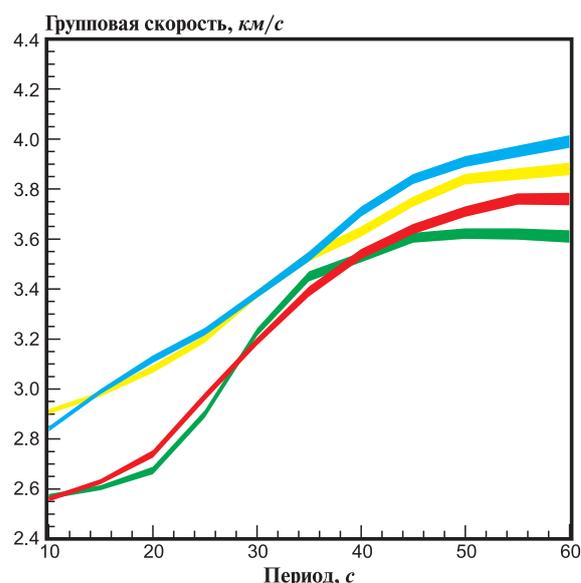


Рис. 3. Дисперсионные кривые волн Релея (зелёная и красная линии) и Лява (жёлтая и синяя линии).

Толщина линий соответствует коридору ошибок. Зелёная и жёлтая линии получены по записи землетрясения в Аквиле на станции SUW, красная и синяя получены по ККФ записей шума на паре станций AQU-SUW

Альтернативный метод устранения артефактов

Обнаружив это, мы решили опробовать другой метод фильтрации данных для построения ККФ. Мы исключили из рассмотрения все участки записей шума, где могли быть записи от землетрясений магнитудой больше 5.

Для этого мы использовали бюллетень землетрясений, сформированный на сайте Международного сейсмологического центра [On-line Bulletin, 2016]. На этапе предварительной подготовки записей шума из них вырезалась часть записи протяжённостью 7200 с, соответствующая времени прихода сейсмических волн от землетрясения на станцию. Для этого вычислялось время прихода сейсмических волн на каждую из пары станций, и далее обе записи синхронно занулялись, начиная с наименьшего из времён. Далее вычислялись кросскорреляционные функции.

Однако оказалось, что у полученных таким образом ККФ столь низкое отношение сигнал/шум на периодах свыше 30 с, что построить по ним дисперсионные кривые не представлялось возможным. По-видимому, это связано с тем, что, исключая землетрясения, мы тем самым исключаем источник поверхностных волн, дающих основной вклад в ККФ на таких периодах. Тогда мы решили исключать из рассмотрения не все участки записей шума, где могли быть записи от землетрясений магнитудой больше 5, а только те, где могли быть записи от землетрясений, локализованных в определённых местах, — в области так называемых «кластеров» землетрясений, где их происходило очень много за ограниченный интервал времени. На рис. 4 представлено распределение землетрясений за 2005 г. по всему земному шару по данным Международного сейсмологического центра [On-line Bulletin, 2016]. Видно, что одна из областей «кластеризации» находится в районе Суматры (обозначена на рисунке прямоугольником). Мы зану-

лили записи сейсмического шума, соответствующие времени прихода сейсмических волн от землетрясений, расположенных в этой области. На рис. 5 слева представлены ККФ записей станций OBN и ARU, полученные по полной записи и по записи без таких землетрясений, а справа — полученные по ним дисперсионные кривые в сравнении с дисперсионной кривой за 2003 г., когда «кластеров» землетрясений не было. Видно, что удаление из исходных записей соответствующих землетрясений приводит к заметному улучшению ККФ и, как следствие, дисперсионных кривых.

Однако, как мы писали выше, мы не использовали для своей работы записи сейсмического шума за годы, когда имела место явная кластеризация землетрясений, подобная представленной на рис. 4, соответственно, возникает вопрос, имеет ли смысл подобная процедура для тех лет, в которые, согласно нашим оценкам [Yanovskaya et al., 2016], такой кластеризации не было. Для того, чтобы ответить на этот вопрос, мы проделали описанную выше процедуру по исключению вклада от землетрясений из той же, указанной на рис. 4, области для записей станций AQU и SUW за 2001, 2002 и 2003 гг., вычислили ККФ и построили по ним дисперсионные кривые. На рис. 6 показано сравнение полученных таким образом дисперсионных кривых для этой пары станций с дисперсионными кривыми, полученными по данным о землетрясениях и полученными по шуму без исключения вклада от землетрясений. Видно, что, исключив некоторые землетрясения, нам удалось несколько уменьшить расхождение.

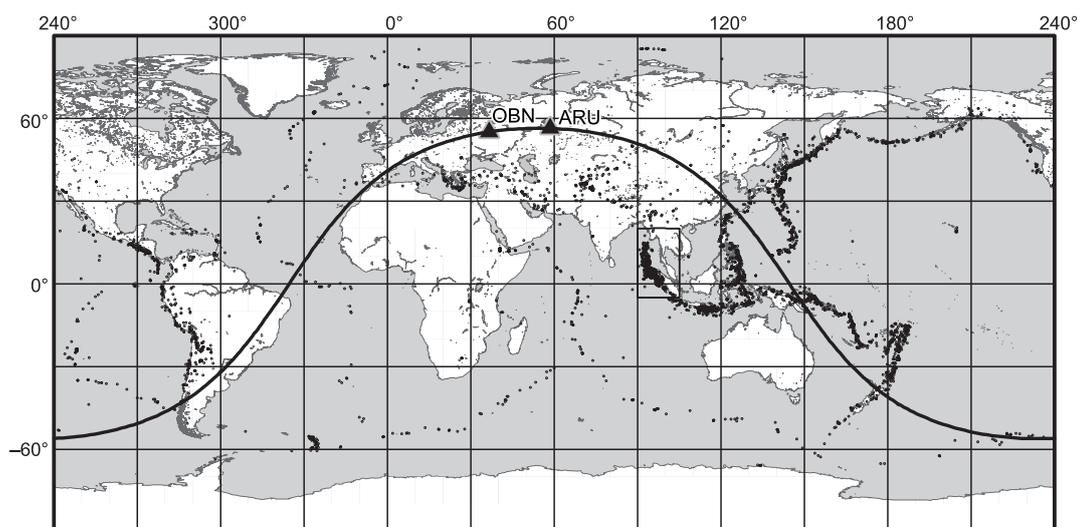


Рис. 4. Распределение землетрясений за 2005 г.

Треугольники — станции, для записей которых вычислялась впоследствии ККФ, также показана дуга большого круга, соединяющая эти станции, и её продолжение. Прямоугольником ограничена область, в пределах которой происходили землетрясения, записи от которых занулялись

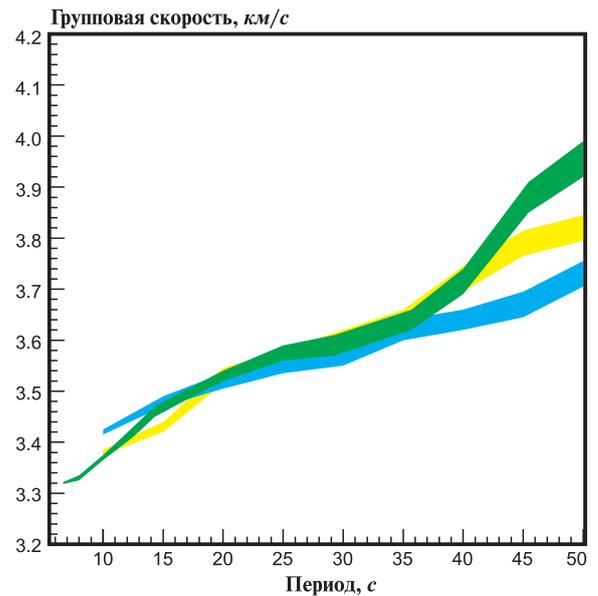
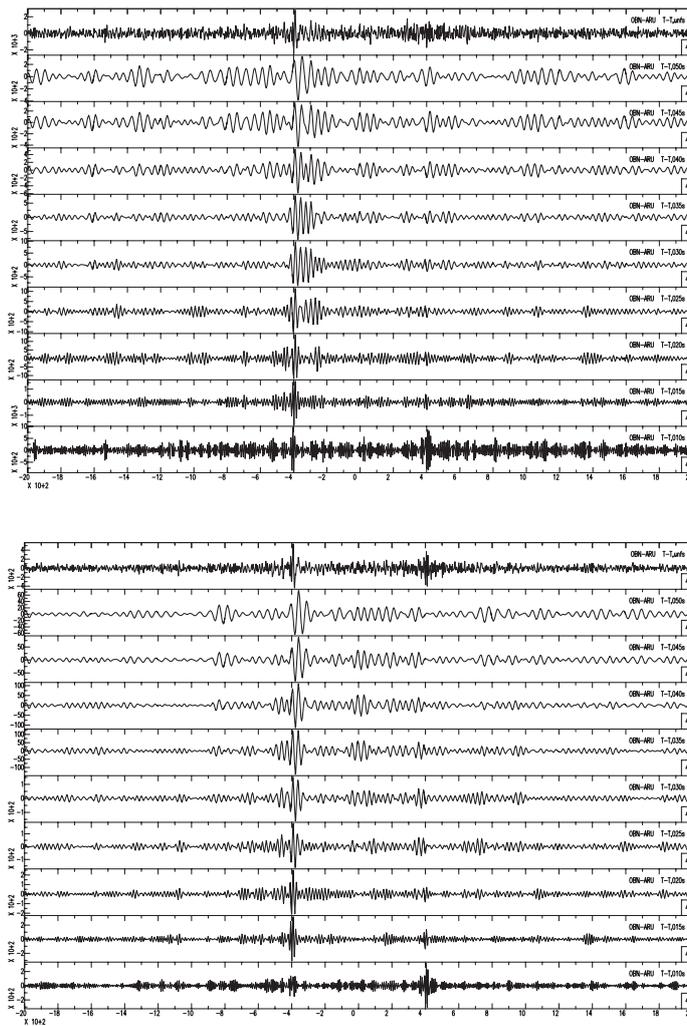


Рис. 5. Слева сверху – ККФ (здесь и далее – T -компоненты) для пары станции OBN-ARU за 2005 г., слева снизу – ККФ для той же пары станций за тот же год, но из записи убрана часть, соответствующая по времени приходу волн от землетрясений в области, обозначенной на рис. 4 прямоугольником. Справа – дисперсионные кривые.

Толщина линий соответствует коридору ошибок, синяя линия – полученная по ККФ полных записей за 2005 г., жёлтая линия – полученная по ККФ записей за 2005 г., из которых убраны землетрясения, зелёная линия – полученная по ККФ записей за 2003 г.

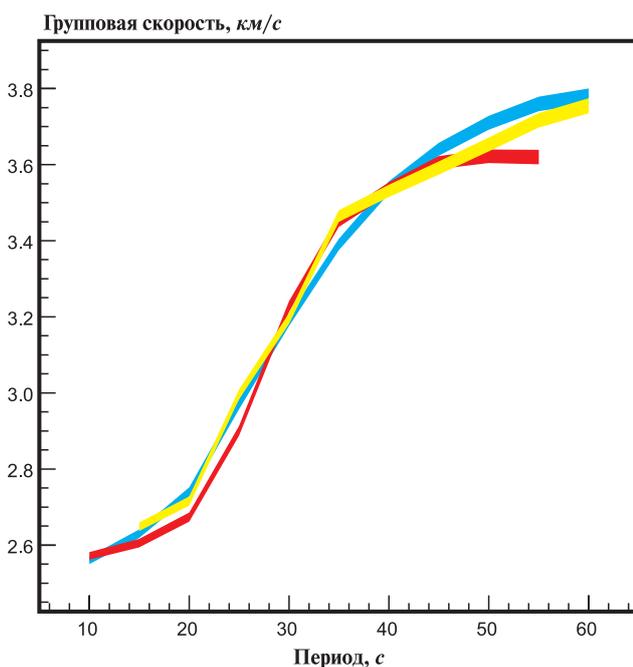


Рис. 6. Дисперсионные кривые волны Релея.

Толщина линий соответствует коридору ошибок. Красная линия получена по записи землетрясения в Аквиле на станции SUW, синяя получена по ККФ полных записей шума на паре станций AQU-SUW, жёлтая – по ККФ записей шума на тех же станциях, из которых исключены некоторые землетрясения

на больших периодах с дисперсионными кривыми, полученными по землетрясениям, хотя полностью с ним справиться не удалось.

Заключение

Таким образом, в работе показано, что удаление из записей сейсмического шума записей лишь от некоторых землетрясений позволяет уменьшить искажение дисперсионных кривых на периодах свыше 30–40 с. В то же время, метод требует определённой доработки, а именно, более формализованного анализа распределения землетрясений для определения временных интервалов, в которых следует исключать записи при построении ККФ. Такой подход будет более эффективен для получения ККФ, очищенных от влияния кластеров, чем простое исключение записей за годы, характеризующиеся наличием сильных землетрясений, сопровождающихся большим числом афтершоков. Это позволит строить существенно менее искажённые дисперсионные кривые, что важно для структурных построений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-05-00522).

Литература

- Яновская Т.Б., Королева Т.Ю. О влиянии землетрясений на кросскорреляционную функцию сейсмического шума // *Физика Земли*. – 2011. – № 9. – С. 3–12.
- 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 broad-band surface wave dispersion measurements // *Geophysical Journal International*. – 2007. – V. 169. – P. 1239–1260.
- Bensen G.D., Ritzwoller M.H., Shapiro N.M. Broad-band ambient noise surface wave tomography across the United States // *Journal of Geophysical Research*. – 2008. – V. 113. – B05306(1)–B05306(21).
- Campillo M., Paul A. Long-range correlations in the diffuse seismic coda // *Science*. – 2003. – V. 299. – P. 547–549.
- Froment B., Campillo M., Roux R., Gouedard P., Verdel A., Weaver R.L. Estimation of the effect of non-isotropically distributed energy on the apparent arrival time in correlations // *Geophysics*. – 2010. – V. 75. – SA85–SA93.
- 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, N 1. – P. 131–143.
- Lobkis O.I., Weaver R.L. On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field // *The Journal of the Acoustical Society of America*. – 2001. – V. 110. – P. 3011–3017.
- Moreau L., Stehly L., Boue P., Lu Y., Larose E., Campillo M. Improving ambient noise correlation functions with an SVD-based wiener filter // *Geophysical Journal International*. – 2017. – V. 211(1). – P. 418–426.
- Moschetti M.P., Ritzwoller M.H., Lin F.C., Yang Y. Crustal shear wave velocity structure of the western United States inferred from ambient seismic noise and earthquake data // *Journal of Geophysical Research*. – 2010. – V. 115. – B10306(1)–B10306(20).
- On-line Bulletin* // International Seismological Centre [Site]. – URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin>. – United Kingdom, Thatcham: Internat. Seismol. Centre, 2016. doi: <http://doi.org/10.31905/D808B830>
- Poli P., Pedersen H.A., Campillo M. & Polenet Lapnet working group. Emergence of body waves from cross-correlation of seismic noise // *Geophysical Journal International*. – 2012. – V. 188. – P. 549–558.
- 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.
- Shirzad T., Shomali Z.H. Extracting seismic body and Rayleigh waves from the ambient seismic noise using the rms-stacking method // *Seismological Research Letters*. – 2015. – V. 86. – P. 173–180.
- Snieder 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.
- Stehly L., Campillo M., Shapiro N.M. A study of the seismic noise from its long range correlation properties // *Journal of Geophysical Research*. – 2006. – V. 111. – B10306(1)–B10306(12).
- Stehly L., Fry B., Campillo M., Shapiro N.M., Guilbert J., Boschi L., Giardini D. Tomography of the Alpine region from observations of seismic ambient noise // *Geophysical Journal International*. – 2009. – V. 178. – P. 1338–1350.
- Yang Y., Ritzwoller M.H. Characteristics of ambient seismic noise as a source for surface wave tomography // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. – 2008. – V. 9. – Q02008(1)–Q02008(18).
- 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.
- Яновская Т.Б., Королева Т.Ю., Лыскова Е.Л. Effect of earthquakes on ambient noise surface wave tomography in upper-mantle studies // *Geophysical Journal International*. – 2016. – V. 205. – P. 1208–1220.

Yao H., Beghein C., Van Der Hilst R.D. Surface-wave array tomography in SE Tibet from ambient seismic noise and two-station analysis. II: Crustal and upper mantle structure // *Geophysical Journal International*. – 2008. – V. 173. – P. 205–219.

Сведения об авторах

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.gsras.ru

Лыскова Евгения Леонидовна, канд. физ.-мат. наук, доцент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» (СПбГУ), г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: e.lyskova@spbu.ru

Causes of artifacts in ambient noise surface wave tomography in mantle investigations and ways for their elimination

© 2020 T.Yu. Koroleva¹, T.B. Yanovskaya², E.L. Lyskova²

¹GS RAS, Saint-Petersburg, Russia; ²SPbSU, 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, which are used in surface-wave tomography. This makes it possible to ultimately estimate the spatial distribution of the S-wave velocities. The method is well-grounded on the assumption that the “noise” is a result of the superposition of surface waves propagating from sources uniformly distributed over the surface. Therefore, the initial data, which are long-period seismic records, are subjected to preliminary processing, an important stage of which is normalization, which allows reducing the effect of earthquakes and averaging the resulting CCFs over a long time interval. At the same time, we have shown that earthquakes mainly contribute to noise at periods above 30-40 s, whose sources are distributed unevenly. Therefore, in cases of clustering of foci in a certain limited area, for example, because of aftershocks after a strong earthquake, the CCF maxima, which determines the dispersion curve of the surface wave, are shifted to shorter times, and the group velocities are correspondingly overestimated. In determining the dispersion of Love waves from CCF transversal (T-T) noise component, the presence of clusters leads to an additional underestimation of the group velocity due to the superposition on the T component (perpendicular to the inter-station path) of the radial component of the Rayleigh wave having a velocity less than the Love wave velocity. Therefore, the anisotropy coefficient, determined from the noise, is underestimated as compared to that obtained from the records of earthquakes along nearby paths. Obviously, to obtain more correct dispersion curves of both Rayleigh and Love waves, it is necessary, for summing the CCFs, to use time intervals in which earthquake clusters would be absent as far as possible.

Keywords ambient seismic noise, Rayleigh and Love waves dispersion curves.

For citation Koroleva, T.Yu., Yanovskaya, T.B., & Lyskova, E.L. (2020). [Causes of artifacts in ambient noise surface wave tomography in mantle investigations and ways for their elimination]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 2(2), 58-65. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.2.05>

References

- Bensen, G.D., Ritzwoller, M.H., Barmin, M.P., Levshin, A.L., Lin, F., et al. (2007). Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements. *Geophysical Journal International*, 169(3), 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: Solid Earth*, 113(B5).
- Campillo, M., & Paul, A. (2003). Long-range correlations in the diffuse seismic coda. *Science*, 299(5606), 547-549.
- Froment, B., Campillo, M., Roux, P., Gouedard, P., Verdel, A., & Weaver, R.L. (2010). Estimation of the effect of nonisotropically distributed energy on the apparent arrival time in correlations. *Geophysics*, 75(5), SA85-SA93.
- International Seismological Centre (2019). Retrieved from: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin>. doi: <http://doi.org/10.31905/D808B830>
- Li, H., Li, S., Song, X.D., 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.
- Lobkis, O.I., & Weaver, R.L. (2001). On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 110(6), 3011-3017.
- Moreau, L., Stehly, L., Boué, P., Lu, Y., Larose, E., & Campillo, M. (2017). Improving ambient noise correlation functions with an SVD-based Wiener filter. *Geophysical Journal International*, 211(1), 418-426.
- Moschetti, M.P., Ritzwoller, M.H., Lin, F.C., & Yang, Y. (2010). Crustal shear wave velocity structure of the western United States inferred from ambient seismic noise and earthquake data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B10).
- Poli, P., Pedersen, H.A., & Campillo, M. (2012). Emergence of body waves from cross-correlation of short period seismic noise. *Geophysical Journal International*, 188(2), 549-558.
- Shapiro, N.M., Campillo, M., Stehly, L., & Ritzwoller, M.H. (2005). High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise. *Science*, 307(5715), 1615-1618.
- Shirzad, T., & Shomali, Z.H. (2015). Extracting seismic body and Rayleigh waves from the ambient seismic noise using the rms stacking method. *Seismological Research Letters*, 86(1), 173-180.
- Snieder, R. (2004). Extracting the Green's function from the correlation of coda waves: A derivation based on stationary phase. *Physical Review E*, 69(4), 046610.
- Stehly, L., Campillo, M., & Shapiro, N.M. (2006). A study of the seismic noise from its long-range correlation properties. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B10).
- Stehly, L., Fry, B., Campillo, M., Shapiro, N.M., Guilbert, J., Boschi, L., & Giardini, D. (2009). Tomography of the Alpine region from observations of seismic ambient noise. *Geophysical Journal International*, 178(1), 338-350.
- Yang, Y., & Ritzwoller, M.H. (2008). Characteristics of ambient seismic noise as a source for surface wave tomography. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(2).
- Yang, Y., Ritzwoller, M.H., Levshin, A.L., & Shapiro, N.M. (2007). Ambient noise Rayleigh wave tomography across Europe. *Geophysical Journal International*, 168(1), 259-274.
- Yanovskaya, T., Koroleva, T., & Lyskova, E. (2016). Effect of earthquakes on ambient noise surface wave tomography in upper-mantle studies. *Geophysical Journal International*, 205(2), 1208-1220.
- Yanovskaya, T.B., & Koroleva, T.Y. (2011). Effect of earthquakes on ambient noise cross-correlation function. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 47(9), 747.
- Yao, H., Beghein, C., & Van Der Hilst, R.D. (2008). Surface wave array tomography in SE Tibet from ambient seismic noise and two-station analysis-II. Crustal and upper-mantle structure. *Geophysical Journal International*, 173(1), 205-219.

Information about authors

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

Lyskova Evgeniia Leonidovna, PhD, Associate Professor of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Saint-Petersburg State University" (SPbSU), Saint-Petersburg, Russia. E-mail: e.lyskova@spbu.ru