

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

А.Н. Беседина, И.В. Батухтин, А.А. Остапчук

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт динамики геосфер Российской академии наук

В работе проведен анализ записей микросейсмического шума в диапазоне высоких частот на территории Восточно-Европейской платформы, которая характеризуется мощными отложениями рыхлых осадочных пород, а также высоким уровнем антропогенных помех. С помощью кросс-корреляции сейсмических шумов показано, что для группы «Михнево» характерно присутствие как объемных, так и поверхностных волн. Для группы «Ростов» основной вклад в микросейсмический шум вносят поверхностные источники, обусловленные влиянием вблизи расположенного водохранилища.

Введение

Многочисленные теоретические исследования и численное моделирование показали, что кросс-корреляция сейсмического шума определяет функцию источника (функцию Грина), которая описывает распространение поверхностных волн между двумя станциями-приемниками. Использование методов кросс-корреляции компонент сейсмического шума имеет большой потенциал для изучения структуры Земли на различных масштабах. Методы исследования строения земной коры и верхней мантии с помощью мониторинга сейсмического шума стали широко развиваться последние десять лет [Shapiro et al., 2005; Bensen et al., 2007; Королева и др., 2009; Campillo et al., 2011]. Использование записей сейсмического шума позволяет увеличить объем исходных данных и провести томографию поверхностными волнами в более быстрые сроки, чем стандартными методами.

В основе этого метода лежит кросс-корреляция компонент сейсмического шума, который является результатом наложения источников, распределенных по поверхности Земли [Snieder, 2004]. Данная методика позволила исследовать, например, низкоскоростные и высокоскоростные аномалии в разломной зоне в Калифорнии [Shapiro et al., 2005; Campillo et al., 2011], структуру земной коры в центральной Мексике [Campillo et al., 2003] и на Сибирской Платформе [Королева и др., 2009]. Исследование структурных особенностей по большей части проводится при анализе источников шума, которые составляют поверхностные волны Рэлея и Лява в диапазоне периодов 5–120 с, что позволяет исследовать структурные особенности вплоть до 500 км по глубине. Если направление глубинной томографии по записям сейсмического шума получило широкое распространение, то исследование локальных особенностей строения и механических характеристик участков земной коры не столь широко развито. Большим преимуществом данного метода является, в частности, отсутствие необходимости использования искусственных источников сейсмических колебаний и возможность перманентных

наблюдений в течение длительного времени. Исследования показывают, что для более высоких частот существенный вклад в сейсмический шум оказывают объемные волны [Roux et al., 2005; Koper et al., 2010; Landes et al., 2010; Wang et al., 2010]. Однако вклад энергии и распределение источников шума определяется частотным диапазоном и условиями проведения измерений, что особенно значимо для сейсмического шума в высокочастотной области, для которых шум по большей части носит антропогенный характер.

В работе проведен анализ записей микросейсмического шума в диапазоне высоких частот на территории Восточно-Европейской платформы (ВЕП), которая характеризуется мощными отложениями рыхлых осадочных пород, а также высоким уровнем антропогенных помех.

Данные

Исследование энергетического состава высокочастотной области микросейсмического шума проводилось по данным мониторинга на двух площадках «Михнево» областей (Московская – $54^{\circ}57'$ с.ш., $37^{\circ}46'$ в.д.) и «Ростов» (Ростовская – $47^{\circ}31'$ с.ш., $42^{\circ}18'$ в.д.) с помощью систем группирования сейсмических датчиков. Обе группы имеют круговую конфигурацию. Группа «Михнево» [Санина и др., 2008] включает 10 вертикальных короткопериодных датчиков СМ-3КВ (рабочая полоса 0.5–40 Гц, чувствительность – $7.45 \cdot 10^{-6}$ (мкм/с)/отсчет), а также 2 трехкомпонентных. Один датчик располагается в центральной точке, остальные — на трех концентрических окружностях (рис. 1, а).

Если группа «Михнево» обеспечивает постоянный сейсмический мониторинг локальной и региональной сейсмичности с 2004 года на центральной части ВЕП, то работа группы «Ростов» носила сезонный характер – наблюдения проводились с конца апреля по конец октября 2016 года. Группа «Ростов» состояла из центрально-

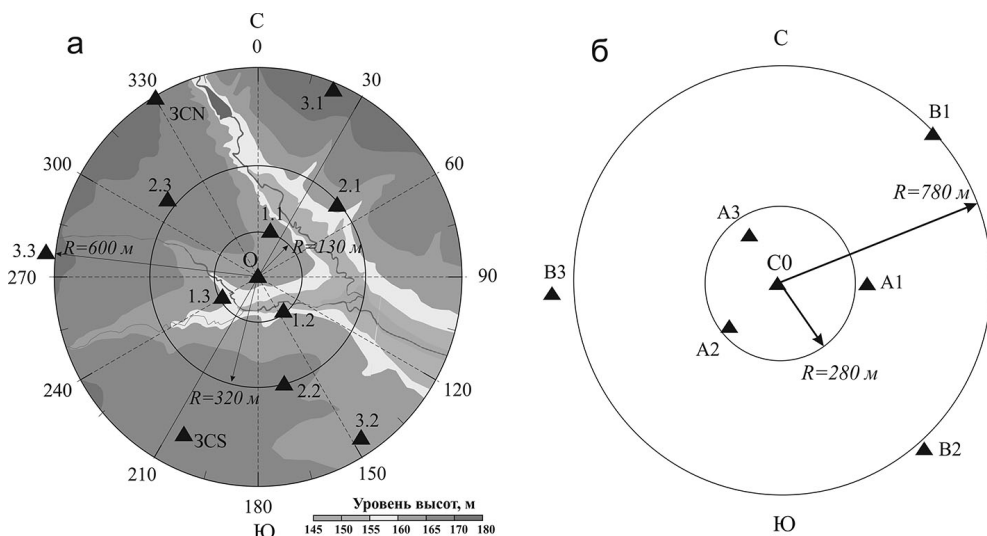


Рис. 1. Схема конфигурации малоапертурной группы «Михнево» (а) и «Ростов» (б). Треугольниками показано место расположения сейсмических датчиков; 3CN и 3CS – трехкомпонентные станции группы «Михнево»

го широкополосного трехкомпонентного сейсмоприемника RefTek 151–60 (рабочая полоса 0.0083–40 Гц, чувствительность (мкм/с)/отсчет) и 6 короткопериодных трехкомпонентных датчиков СПВ-3К (рабочая полоса 0.5–65 Гц, чувствительность (мкм/с)/отсчет), расположенных на двух концентрических окружностях (рис. 1, б). В обоих случаях регистрация велась на 24-канальную АЦП с частотой оцифровки записи 200 Гц.

Для анализа кросс-корреляционной функции сейсмического шума использовались данные длительностью один месяц: январь 2017 года – для группы «Михнево» и август 2016 года – для группы «Ростов». Поскольку кросс-корреляционная функция микросейсмического шума между двумя станциями описывает функцию Грина среды между этими точками-приемниками [Snieder, 2004], в данной работе проводится исследование функций источника по измерительным точкам, расположенным вдоль профилей. Для группы «Михнево» рассмотрены станции 0, 1.1, 1.2, 1.3, 2.2, 3.2, расположенные по направлению 150–330°, и станции 0, 1.2, 1.3, 3.1, расположенные по направлению 30–210° (рис. 1, а). Технические сбои при регистрации не позволили включить в рассмотрение большее количество станций. Для второй группы анализ корреляционной функции шума проводился по 3 направлениям: 1 – станции А1, С0, В3; 2 – станции А2, С0, В1; 3 – станции А3, С0, В2 (рис. 1, б).

Методы

При использовании корреляционных методов анализа шума сейсмический шум рассматривается как волновое поле, образованное произвольными равномерно распределенными источниками, усредненными по большому интервалу времени. В этом случае кросс-корреляционная функция шума между двумя станциями описывает функцию Грина среды между точками-приемниками. При этом основной вклад вносят источники, расположенные на линии, соединяющей станции-приемники вне отрезка между станциями [Королева и др., 2009; Snieder, 2004]. Схема распространения волн от произвольного источника показана на рис. 2. Результирующая корреляционная функция является функцией времени, при этом временной сдвиг может принимать как положительные, так и отрицательные значения.

Значения функции при положительном сдвиге по времени соответствуют вкладу источников слева от приемника 1, при отрицательном сдвиге по времени – вкладу источников справа от приемника 2 (в соответствии с обозначениями на рис. 2) [Королева и др., 2009; Snieder, 2004].

Для расчета функции источника использовался алгоритм, предложенный в [Bensen et al., 2007]. Основной процесс представляет собой последовательное вы-

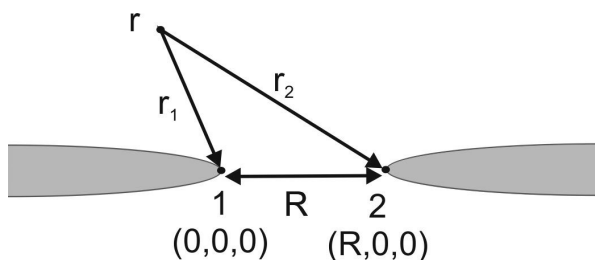


Рис. 2. Схема распространения волн от произвольного источника r , r_1 и r_2 – расстояние от источника до станций-приемников, R – расстояние между станциями. Серым показаны области, соответствующие источникам, которые вносят основной вклад в корреляционную функцию [Snieder, 2004]

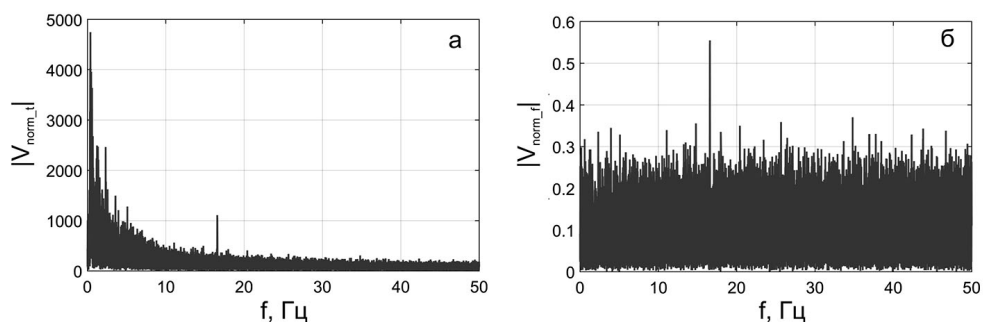


Рис. 3. Спектр суточной записи скорости после нормировки во временной (а) и частотной (б) области

полнение нескольких этапов. На первом этапе проводилось уменьшение частоты опроса исходных данных в 2 раза до 100 Гц, полосовая фильтрация в диапазоне 0.5–40 Гц и формирование записей длительностью одни сутки. Дни, где присутствовали разрывы в данных, не использовались при анализе. Далее с помощью нормализации сформированных суточных рядов во временной и частотной области удалялись активные источники сейсмических колебаний (взрывы, землетрясения и стационарные источники шума вблизи места установки станций). В данной работе использовалась однобитная нормализация [Larose et al., 2004], которая заключается в представлении сигнала в виде 1 для всех положительных отчетов и -1 – для всех отрицательных. Это метод нормализации сигнала широко используется (например, в [Campillo et al., 2003; Shapiro et al., 2005]) благодаря простой реализации и получению достаточно высокого соотношения сигнал/шум корреляционной функции [Bensen et al., 2007; Королева и др., 2009]. Нормализация в частотной области («выбеливание» спектра) (рис. 3, б) выполнялась путем деления комплексного спектра (рис. 3, а) на сглаженное значение амплитудного спектра в бегущем окне. Также проводилось удаление модулированных колебаний режекторным фильтром на частотах 12,5 и 25 Гц, а также на частотах 8, 16 и 32 Гц.

На последнем этапе проводилось посуточное построение кросс-корреляционной функции в частотной области, переход во временную область и суммирование по дням за рассматриваемый временной промежуток.

Результаты

В данной работе представлены предварительные результаты анализа корреляционной функции вертикальной компоненты сейсмического шума для двух районов центральной части ВЕП. На рис. 4 приведены корреляционные функции шума с учетом расположения датчиков для группы «Михнево». По распространению пиков кросс-корреляционной функции пар датчиков для каждого профиля можно выделить кажущиеся скорости распространения источников шума. Для профиля 150–330° характерно присутствие объемных и поверхностных волн со скоростями распространения $V = 4.5$ км/с, $V = 2.7$ км/с и менее (рис. 4, а). По профилю 30–210° получены более высокие значения кажущихся скоростей распространения волн $V = 4.8$ км/с, $V = 3.7$ км/с, $V = 3.3$ км/с и менее (рис. 4, б). Результаты корреляционного анализа шума по данным группы «Ростов» показаны на рис. 5. На всех профи-

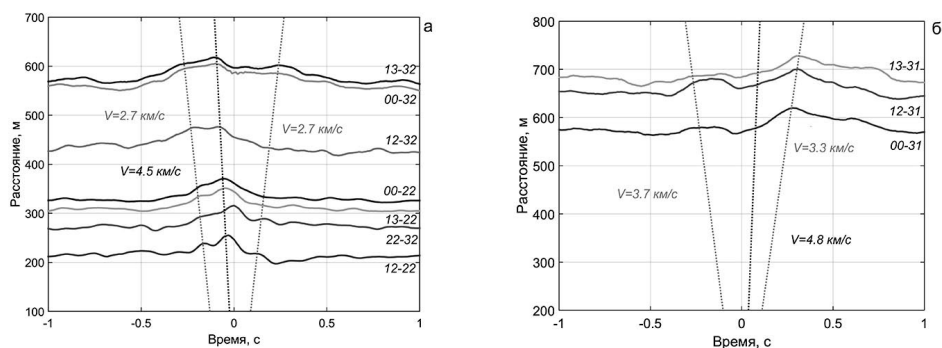


Рис. 4. Кросс-корреляционные функции, рассчитанные по двум направлениям для малоапертурной группы «Михнево»: а) профиль 150–330°; б) профиль 30–210°. Расположение используемых датчиков показано на рис. 1, а. Пунктирными линиями показана кажущаяся скорость распространения волн

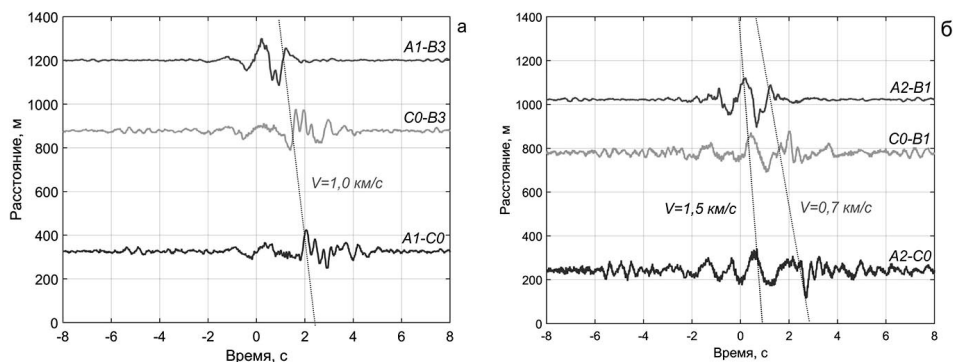


Рис. 5. Кросс-корреляционные функции, рассчитанные по трем направлениям для малоапертурной группы «Ростов»: а) профиль A1–C0–B3; б) профиль A2–C0–B1. Расположение используемых датчиков показано на рис. 1, б. Пунктирными линиями показана кажущаяся скорость распространения волн

лях четко видно распространение поверхностных волн со скоростями $V = 1.5$ км/с, $V = 1,0$ км/с и менее.

Обсуждение результатов

Распределение источников микросейсмического шума определяется рассматриваемым диапазоном частот. Сейсмический шум в широком диапазоне частот зависит главным образом от ветра и техногенного шума, хотя движения водных масс также могут вносить свой вклад [International..., 2002].

По результатам кросс-корреляционного анализа микросейсмического шума записей малоапертурной группы «Михнево» были обнаружены объемные и поверхностные волны. При этом пики корреляционной функции для профиля 150–330° отмечаются при отрицательном сдвиге времени, а для профиля 30–210° – при положительном временном сдвиге (рис. 4). Это дает основание предполагать, что источник шума находится между этими профилями и, возможно, связан с карстовыми

областями, которые образуют борта ручья, который проходит вдоль направления 120–350°. Например, при исследовании микросейсмических шумов в гротах Кунгурской карстовой пещеры отмечены интенсивные колебания в диапазоне 3–10 Гц [Кунгурская..., 2005]. Для карстовых областей в области Мертвого моря характерны частоты в диапазоне 1–75 Гц [Wust-Bloch et al., 2006]. В [Маловичко и др., 2010] отмечено, что для карстующихся пород характерны скорости порядка 1000–3000 м/с в диапазоне 10–50 Гц.

Анализ корреляционной функции шума по данным группы «Ростов» показывает ярко выраженное присутствие поверхностных волн. Максимум кросс-корреляционной функции при положительном временном сдвиге для профилей 1 и 2 и отрицательном для профиля 3 свидетельствует о влиянии Цимлянского водохранилища, расположенного севернее места проведения измерений. В пользу этого вывода говорит опыт регистрации микросейсмического шума вблизи озер в Северной Америке и Канаде [Kerman et al., 1995; Gu and Shen, 2012; Goddard et al., 2014; Moore et al., 2016], который показал наличие характерного спектрального пика на частотах около 1 Гц.

Состав сейсмического шума сильно зависит от конкретного места проведения измерений. Вопрос исследования энергетического состава высокочастотного микросейсмического шума поднимается многими исследователями. Для микросейсмического диапазона периодов 5–20 с в сейсмических шумах преобладают основные моды поверхностных волн Рэлея и Лява. Однако для более коротких периодов характерна сложная смесь поверхностных волн основной и более высокой моды, а также объемных волн [Bonney-Claudet et al., 2006].

Исследование состава микросейсмического шума в диапазоне 0.25 и 2.5 с по данным 18 сейсмических групп, расположенных по всему миру, показало, что основной вклад (около 50%) вносит волна Лява. Основная энергия этих волн связана с неглубокими водоемами вдоль побережья. Энергия Р-волн, включающих региональные, мантийные и прошедшие через внешнее ядро волны, вносит около 28% в общий состав шума. Волны Рэлея, возникающие, по большей части, вследствие техногенного шума, составляют остальную часть энергии микросейсмического шума [Korner et al., 2010]. [Landes et al., 2010] показали, что в диапазоне частот 0.1–0.3 Гц в энергетический состав шума материковой части северного полушария вносят вклад также моды Р-волн океанического происхождения. Мониторинг очаговой зоны Венчуанского землетрясения с помощью малоапертурных групп выявил наличие объемных волн в микросейсмическом шуме [Wang et al., 2010]. Исследование сейсмического шума в Калифорнии с помощью сети Паркфилд продемонстрировало наличие группы Р-волн и волн Рэлея со стороны Тихого океана [Roux et al., 2005].

Стоит отметить, что при установке малоапертурных групп ее геометрия определяется с учетом минимальной функции когерентности шумов, что затрудняет проведение корреляционного анализа шума. Однако полученные результаты позволяют говорить о целесообразности использования групп для оценки энергетического состава микросейсмического шума в диапазоне высоких частот.

Выводы

В работе приведены первые результаты корреляционного анализа сейсмического шума двух районов на территории ВЕП по данным мониторинга малоапертурных

групп. Для группы «Михнево» характерно присутствие как объемных, так и поверхностных волн. Для группы «Ростов» основной вклад в микросейсмический шум вносят поверхностные источники, обусловленные влиянием вблизи расположенного водохранилища.

Постоянный мониторинг сейсмического фона на основе автокорреляции и кросс-корреляции шума для станций и малоапертурных групп позволит исследовать изменения, происходящие в массиве. В условиях Восточно-Европейской платформы, которая характеризуется мощными отложениями рыхлых осадочных пород, а также высокими антропогенными помехами, мониторинг и анализ сейсмического шума может оказаться удобным аппаратом для контроля деформационных характеристик локальных участков массива горных пород.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (проект МК-2698.2017.5).

Литература

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.

Кунгурская Ледяная пещера: опыт режимных наблюдений / под ред. докт. геолог.-минер. наук В.Н. Дублянского. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 376 с.

Маловичко Д.А., Кадебская О.И., Шулаков Д.Ю., Бутырин П.Г. Локальные сейсмологические наблюдения за карстовыми процессами // Физика Земли. 2010. № 1. С. 62–79.

Санина И.А., Волосов С.Г., Черных О.А., Асминг В.Э., Солдатенков А.М., Ризниченко О.Ю. Синтез и опыт экспериментального применения двухмерной малоапертурной сейсмической антенны «Михнево» // Сейсмические приборы. 2008. Вып. 44. С. 3–18.

Bonnefoy-Claudet S., Cotton F., Bard P.-Y. The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies: A literature review // Earth-Science Reviews. 2006. V. 79. P. 205–227.

Bensen G.D., Ritzwoller M.H., Barmin M.P., Levshin A.L., Lin, F., Moschetti, M.P., Shapiro, N.M., and Yang, Y. Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broadband surface wave dispersion measurements // Geophys. J. Int. 2007. V. 169. P. 1239–1260. doi:10.1111/j.1365-2702.2007.03374.x.

Campillo M., Paul A. Long-range correlations in the diffuse seismic coda // Science. 2003. V. 299. P. 547–549.

Campillo M., Roux P., Shapiro N.M. Correlation of seismic ambient noise to image and to monitor the solid Earth // Encyclopedia of Solid Earth Geophysics (ed. Harsh K. Gupta). DOI 10.1007/978-90-481-8702-7, Springer Science+Business Media B. V. 2011.

Ekstrom G., Abers G.A., Webb S.C. Determination of surface-wave velocities across USArray from noise and Aki's spectral formulation // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36, L18301.

Goddard K., Koper K.D., Burlacu R. Microseisms from the Great Salt Lake 2014, Abstract S41A-4444 presented at 2014 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., Dec. 15–19.

Gu Y.J., Shen L. Microseismic noise from large ice-covered lakes? // Bull. Seism. Soc. Am. 2012. V. 102. P. 1155–1166, doi:10.1785/0120100010.

International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, V.81A. (ed. Lee W.K.H.). Academic Press, New York, London, 2002. – 994 p.

Kerman B.R., Mereu R.F., Roy D. Wind-induced microseisms from large lakes, in Sea Surface Sound '94, Proceedings of the III International Meeting on Natural Physical Processes Related to Sea Surface Sound, 2015, pp. 143–156, edited by M.J. Buckingham and J.R. Potter, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore.

Koper K.D., Seats K., Benz H. On the composition of Earth's short-period seismic noise field. Bull. Seismol. Soc. Am. 2010. V. 100. P. 606–617.

Landès M., Hubans F., Shapiro N.M., Paul A., Campillo M. Origin of deep ocean microseisms by using teleseismic body waves // J. Geophys. Res. 2010. V. 115: B05302.

Larose E., Derode A., Campillo M., Fink M. Imaging from one-bit correlation of wide-band diffuse wavefields // J. Appl. Phys. 2004. V. 95. P. 8393–8399.

Moore J. R., Thorne M. S., Koper K.D., Wood J.R., Goddard K., Burlacu R., Doyle S., Stanfield E., White B. Anthropogenic sources stimulate resonance of a natural rock bridge // Geophys. Res. Lett. 2016. V. 43. P. 9669–9676, doi:10.1002/2016GL070088.

Roux P., Sabra K.G., Gerstoft P., Kuperman W.A., Fehler M.C. P-waves from cross-correlation of seismic noise // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32: L19303.

Shapiro N.M., Campillo M., Stehly L., Ritzwoller M.H. High resolution surface wave tomography from ambient seismic noise // Science. 2005. V. 307: 1. P. 615–1 618.

Snieder R. Extracting the Green's function from the correlation of coda waves: A derivation based on stationary phase // Phys. Rev. 2004. E 69: 046610.

Wang W., Ni S., Wang B. Composition of high frequency ambient noise from cross-correlation: A case study using a small aperture array // Earthq. Sci. 2010. V. 23. P. 433–438.

Wust-Bloch G.H., Joswig M. Pre-collapse identification of sinkholes in unconsolidated media at Dead Sea area by 'nanoseismic monitoring' (graphical jackknife location of weak sources by few, low-SNR records) // Geophys. J. Int. 2006. V. 167. P. 1220–1232.