



ИЗВЛЕЧЕНИЕ ПОПЕРЕЧНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ ИЗ ЗАПИСЕЙ СЕЙСМИЧЕСКОГО ШУМА НА ТАШТАГОЛЬСКОМ ЖЕЛЕЗОРУДНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ МЕТОДОМ ПАССИВНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Ярослав Максимович Бережнев^{1,✉}, Надежда Николаевна Беловежец², Георгий Дмитриевич Рукавишников³

^{1,2}Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

^{1,2}Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия,

³АО «ВНИМИ», 199106, 22-я Линия В.О., 3, корпус 1, оф. 406, Санкт-Петербург, Россия,

³Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Новосибирск, Красный пр., 54, Россия,

¹BerezhnevYM@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0037-7871>

²BelovezhetsNN@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5730-5305>

³geodmiruk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8228-2870>

Аннотация. В настоящей работе впервые к данным сейсмического шума, зарегистрированным на Таштагольском железорудном месторождении, был применен метод пассивной интерферометрии. В качестве данных были использованы непрерывные сейсмические записи одних суток с шести сейсмических станций. Метод пассивной интерферометрии основывается на анализе кросс-корреляционных функций сейсмического шума. На итоговых кросс-корреляциях были успешно выделены поперечные сейсмические волны, распространяющиеся между сейсмическими станциями. Результаты работы дают основание полагать, что в дальнейшем для данных шахт будет возможно проведение исследований с помощью шумовой сейсмической томографии.

Ключевые слова: шумовая сейсмическая интерферометрия, поперечная сейсмическая волна, железорудное месторождение, Таштагольское месторождение, шахта

Финансирование: Работа была выполнена в рамках государственного задания FSUS-2022-0019.

Для цитирования: Бережнев Я.М., Беловежец Н.Н., Рукавишников Г.В. Извлечение поперечной сейсмической волны из записей сейсмического шума на Таштагольском железорудном месторождении методом пассивной интерферометрии // Геофизические технологии. 2024. № 3. С. 65–73. doi:10.18303/2619-1563-2024-3-65.

SEISMIC SHEAR-WAVE EXTRACTION FROM AMBIENT SEISMIC NOISE RECORDS AT THE TASHTAGOL IRON USING THE PASSIVE INTERFEROMETRY METHOD

Yaroslav M. Berezhnev^{1,✉}, Nadezhda N. Belovezhets², Georgy D. Rukavishnikov³

^{1,2}Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Koptug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

^{1,2}Novosibirsk State University, Pirogova Str., 1, Novosibirsk, 630090, Russia,

³VNIMI JSC, St. Petersburg, 22 Line V.O., 3/1, of. 406, 199106, Russia,

³N.A. Chinakal Institute of Mining SB RAS, Krasny Ave, 54, Novosibirsk, 630091, Russia

¹BerezhnevYM@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0037-7871>

²BelovezhetsNN@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5730-5305>

³geodmiruk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8228-2870>

Abstract. In this paper, the passive interferometry method was applied for the first time to seismic noise data recorded at the Tashtagol iron ore deposit. The passive interferometry method is based on the analysis of cross-correlation functions of seismic noise. Continuous seismic records from one day at six seismic stations formed the data set used in this analysis. We have successfully identified shear seismic waves propagating between seismic stations on the obtained cross-correlations. The results demonstrate the potential of using ambient seismic noise tomography to study mining data.

Keywords: ambient seismic noise interferometry, seismic shear-wave, iron ore deposit, Tashtagol deposit, mine

Funding: The study was carried out as part of government assignment, Project FSUS-2022-0019.

For citation: Berezhnev Ya.M., Belovezhets N.N., Rukavishnikov G.D. Seismic shear-wave extraction from ambient seismic noise records at the Tashtagol iron using the passive interferometry method // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2024. No. 3. P. 65–73. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2024-3-65.

ВВЕДЕНИЕ

Сейсмические наблюдения при разработке месторождений твердых полезных ископаемых играют важную роль в мониторинге напряженно-деформированного состояния среды и предупреждении об опасных для человека и инфраструктуры событиях [Еременко и др., 2022]. Традиционно используются лишь сейсмические записи, для которых возможно определить первые вступления продольных и поперечных волн с целью локализации очага и оценки энергии сейсмического события [Мулев и др., 2022]. Однако, согласно мировому опыту [например, Czarny et al., 2016; Liu et al., 2018], использование не только записей волновых форм сейсмических событий, которые происходят нерегулярно в пространстве и времени, но и записей сейсмического шума является перспективным направлением в сейсмическом мониторинге различных геологических объектов.

Построение функции кросс-корреляции сейсмического шума позволяет восстановить функцию Грина между двумя сейсмическими станциями, при этом одна из станций выступает в качестве виртуального источника волн, а другая в качестве приемника [Shapiro, Campillo, 2004; Sabra et al., 2005]. Поскольку поверхностные волны доминируют в сейсмическом шуме, зарегистрированном на поверхности, в большинстве исследований с использованием данного подхода, направленных на кросс-корреляционный анализ данных сейсмологических сетей, восстанавливаются поверхностные волны, в основном для построения скоростных моделей среды, например, в [Lin et al., 2013; Boué et al., 2014]. В условиях наблюдений на поверхности восстановление объемных волн является гораздо более сложной задачей, однако существуют успешные примеры [например, Zhang et al., 2009; Nakata et al., 2011]. В случае же наблюдений в условиях шахт в сейсмическом шуме доминируют объемные сейсмические волны, преимущественно поперечные [Olivier et al., 2015], что также подтверждается теоретическими оценками [Snieder et al., 2002]. Их успешное извлечение позволяет повысить точность построения скоростных моделей [Olivier et al., 2015] при неизменных затратах на проведение наблюдений, поскольку уменьшает количество неизвестных по сравнению с использованием сейсмических событий (время в очаге, местоположение гипоцентра). Кроме того, использование этих волн делает возможным проведения мониторинга с помощью сейсмической томографии, т. к. получаемые модели не будут подвержены влиянию нестационарного пространственного распределения гипоцентров сейсмических событий.

В настоящем исследовании впервые в России с помощью метода пассивной интерферометрии были выделены поперечные сейсмические волны, распространяющиеся между сейсмическими станциями, из непрерывных сейсмических данных шахтной сети наблюдений, а именно Таштагольского железорудного месторождения.

ТАШТАГОЛЬСКОЕ ЖЕЛЕЗОРУДНОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ И СЕЙСМИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

Таштагольское железорудное месторождение разрабатывается АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат». Из-за глубины разработки и наличия хрупких горных пород при отработке месторождения возникают сейсмические события, приводящие к нарушению технологического процесса и повреждению техники [Гаврилов и др., 2024]. В настоящее время горные работы на месторождении ведутся на глубинах от 400 до 1000 м от поверхности, очистные работы ведутся на глубинах от 500 до 800 м от поверхности [Штирц, Колтышев, 2015]. На Таштагольском месторождении с 2022 г. функционирует сейсмическая сеть ССМ «GITS» (разработанная и изготовленная в АО «ВНИМИ»), состоящая из расположенных непосредственно в шахте, ориентированных по сторонам света 15 датчиков ДРЦ-11, представляющих собой трехкомпонентные акселерометры, настроенные на регистрацию колебаний в диапазоне 0.5–100 Гц [Рукавишников и др., 2023].

В данной работе были использованы непрерывные сейсмические данные, зарегистрированные в течение одних суток шестью сейсмическими станциями, расположенными на расстоянии друг от друга от 400 до 2700 м. Пример суточной сейсмической записи и ее спектрограммы представлены на рис. 1.

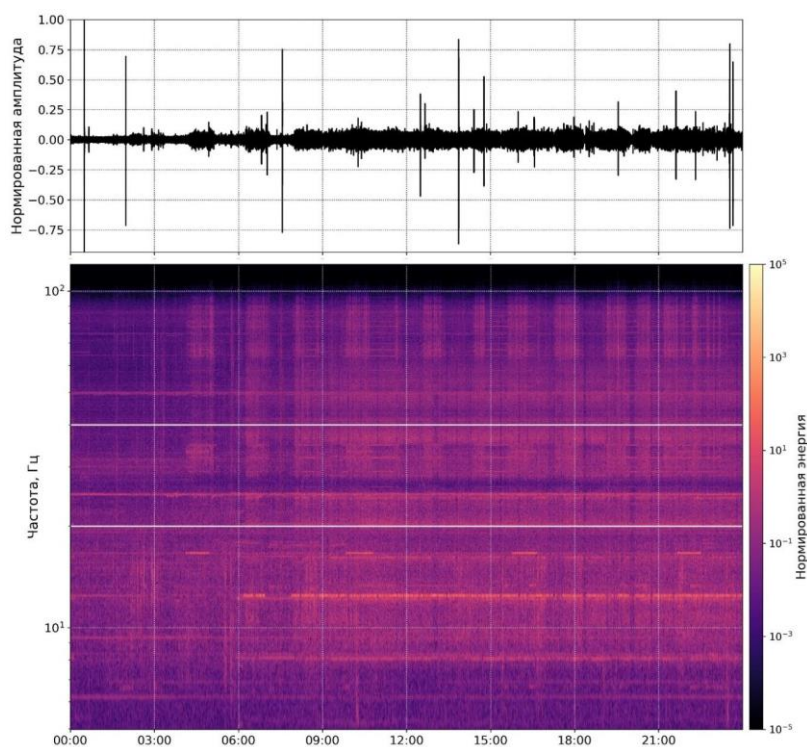


Рис. 1. Пример суточной сейсмической записи (сверху) и ее спектрограммы (снизу). Белыми горизонтальными полосками выделена используемая в дальнейшем анализе полоса частот 20–40 Гц.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для построения функций кросс-корреляций были использованы суточные непрерывные сейсмические записи. В записях присутствуют электрические помехи (на частоте 50 Гц и кратных ей), что можно наблюдать на рис. 1. Поэтому перед тем как приступить к дальнейшему анализу, к исходным записям был применен режекторный фильтр, как показано на рис. 2. Для последующей обработки сигнала была выбрана полоса частот 20–40 Гц, поскольку в ней не доминируют сейсмические события, а распределение энергии наиболее стационарно за время наблюдения.

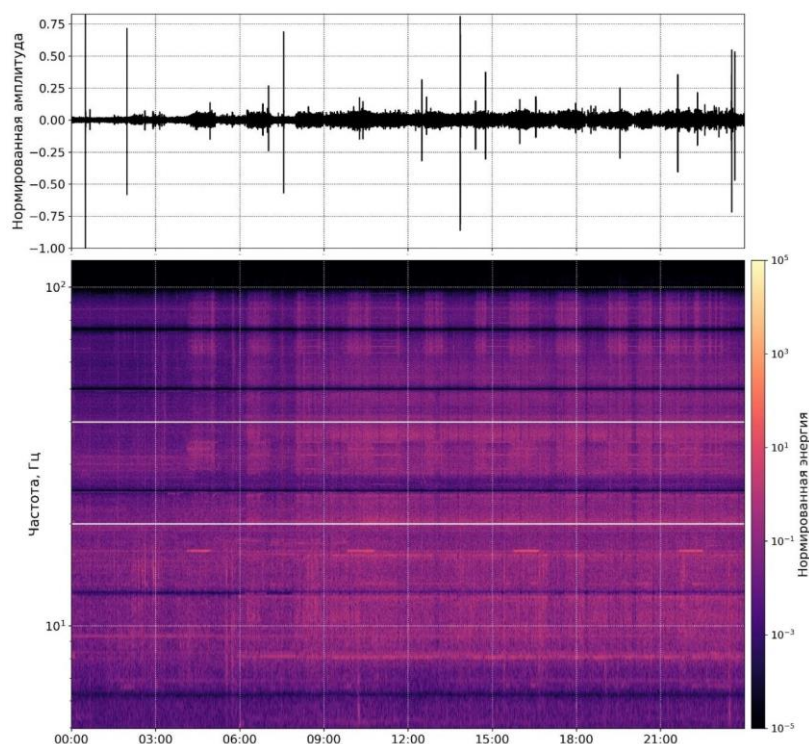


Рис. 2. Пример фильтрованной суточной сейсмической записи (сверху) и ее спектрограммы (снизу). Белыми горизонтальными полосками выделена используемая в дальнейшем анализе полоса частот 20–40 Гц.

Далее к фильтрованным сейсмическим записям применялась следующая последовательность операций:

- предварительная фильтрация каждой компоненты суточной записи в диапазоне частот 20–40 Гц;
- понижение частоты дискретизации сигнала до 250 Гц и повторная фильтрация записей в диапазоне частот 20–40 Гц;
- разбиение сигнала на 10-секундные отрезки с шагом в 2.5 с;
- нормализация получившихся отрезков в частотной и временной областях, согласно [Bensen et al., 2007]. В качестве временной нормализации была использована однобитная нормализация. В качестве нормализации в частотной области использовалось сглаженное спектральное отбеливание в окне частот фильтрации 20–40 Гц;
- вычисление функций кросс-корреляции и их осреднение в скользящем окне длиной 20 мин с шагом в 5 мин.

Использование скользящего окна с 75-процентным перекрытием и последующее осреднение в скользящем окне по 240 наблюдениям необходимо для подавления некогерентных во времени шумов на получаемых кросс-корреляциях и улучшения ее сходимости к оценке функции Грина [Seats et al., 2012].

Далее, перед окончательным суммированием, чтобы улучшить соотношение сигнала к шуму, были применены:

- фильтрация с помощью усечения сингулярного спектра матрицы и винеровской фильтрации аддитивного шума (SVD-WF) [Moreau et al., 2017];
- исключение из суммирования кросс-корреляций с соотношением сигнала к шуму меньше 50.

Оставшиеся после вышеперечисленных процедур кросс-корреляции (рис. 3, 4) суммировались линейно (рис. 5, 6). На полученных суммарных кросс-корреляциях отчетливо прослеживается волновой пакет на временах корреляции примерно от 0.2 до 1 с, имеющий соотношение сигнал–шум более 200, что хорошо демонстрируют рис. 5 и 6. На основании теоретических оценок [Snieder et al., 2002] и результатов других исследований сейсмического шума в подземных условиях [Olivier et al., 2015], данный волновой пакет вероятнее всего представляет собой поперечную сейсмическую волну. При оценке времени пробега по времени максимума огибающей сигнала, диапазон скоростей извлеченных волн составляет от 2000 до 3800 м/с, а средняя длина волны ~50 м, что соответствует диапазону значения для поперечной волны в геологических условиях Таштагольского месторождения [Рукавишников и др., 2023].

Исследование частотно-временных и поляризационных свойств извлеченных сейсмических волн требует времени наблюдений более двух недель [Olivier et al., 2015] для достоверного выделения первых вступлений, которые в настоящем исследовании, несмотря на высокие значения соотношения сигнал–шум (более 200), могут быть искажены влиянием нестационарных источников сигнала.

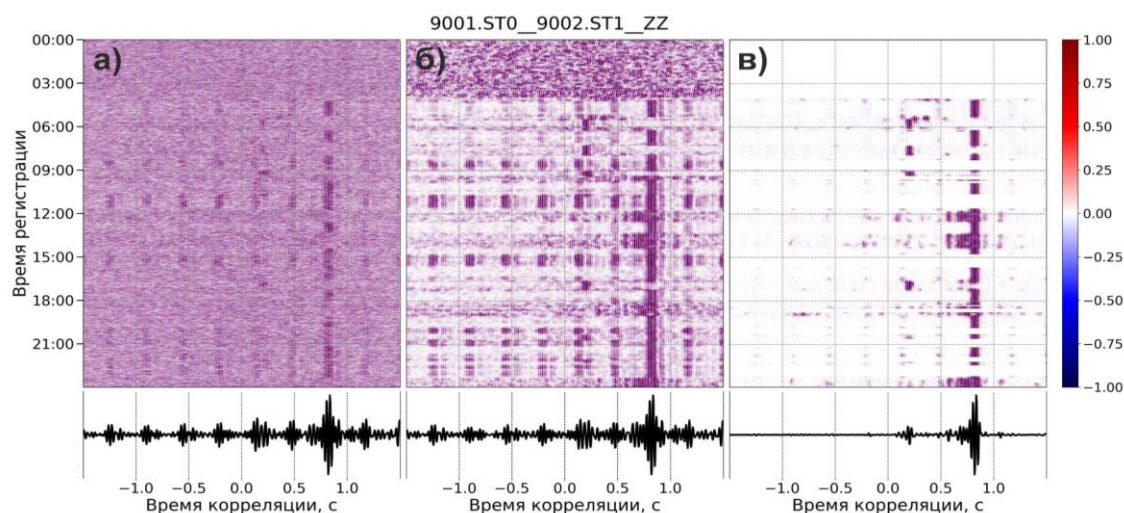


Рис. 3. Пример влияния на кросс-корреляции процедур обработки: а – до осреднения в скользящем окне, б – после осреднения, в – после SVD-WF и отбрасывания по соотношению сигнал–шум. Внизу каждой коррелограммы изображена суммарная кросс-корреляция.

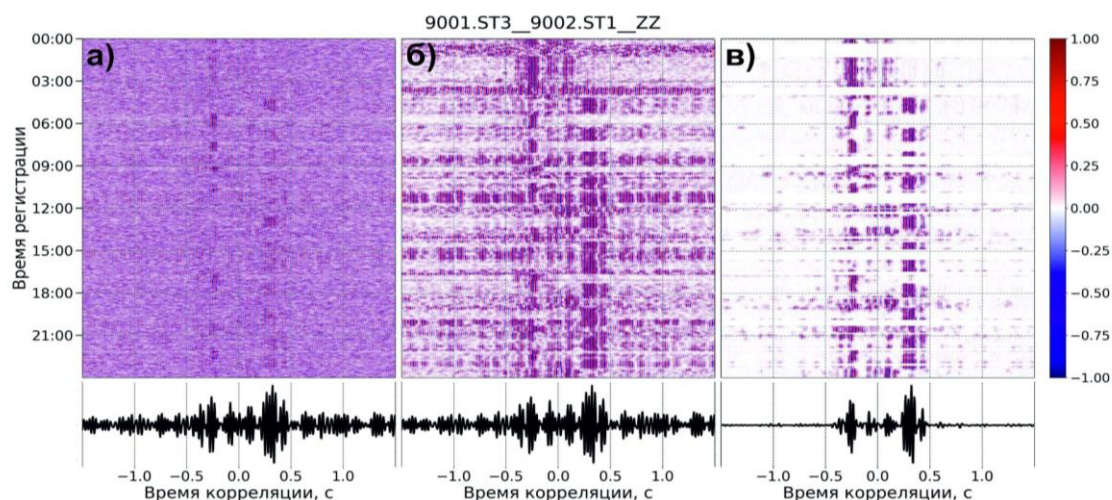


Рис. 4. Пример влияния на кросс-корреляции процедур обработки: а – до осреднения в скользящем окне, б – после осреднения, в – после SVD-WF и отбрасывания по соотношению сигнал–шум. Внизу каждой коррелограммы изображена суммарная кросс-корреляция.

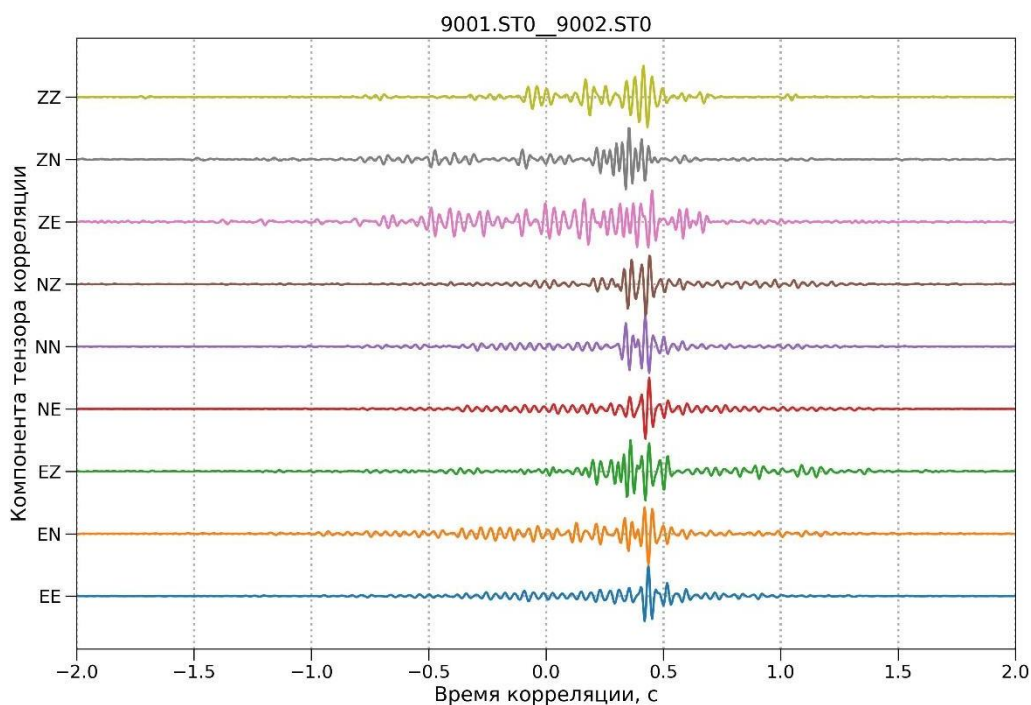


Рис. 5. Пример суммарных кросс-корреляций для одной пары станций для всех компонент.

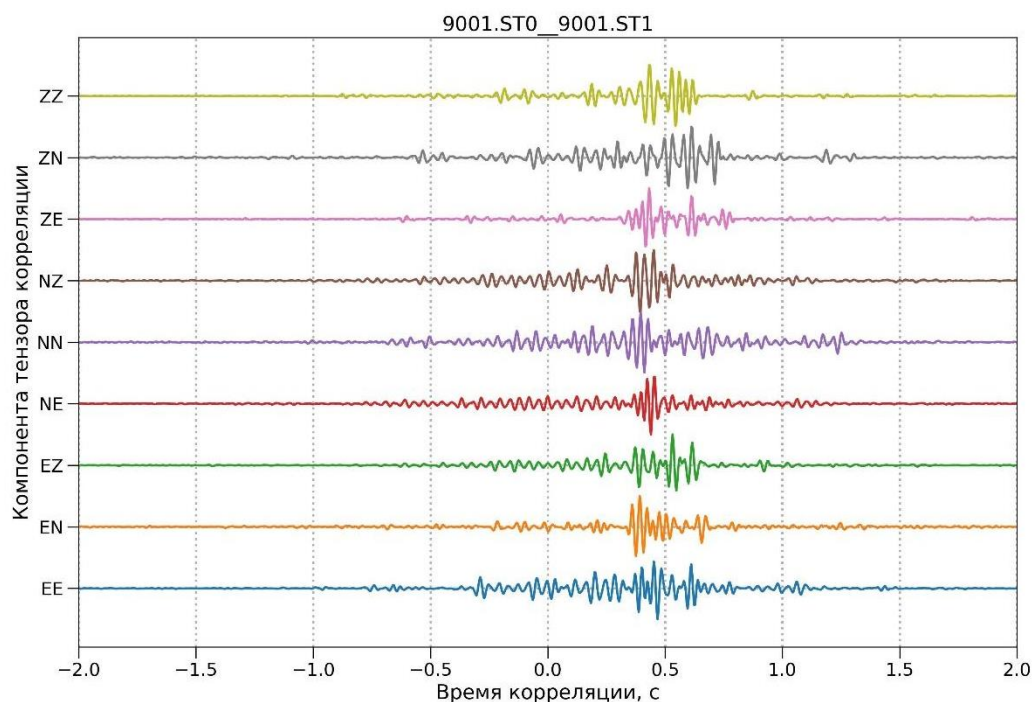


Рис. 6. Пример суммарных кросс-корреляций для одной пары станций для всех компонент.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод пассивной интерферометрии был успешно применен к непрерывным сейсмическим данным, зарегистрированным в течение одних суток на Таштогальском железорудном месторождении. В результате применения метода на 15 парах станций на кросс-корреляциях различных компонент были выделены поперечные сейсмические волны, распространяющиеся между сейсмическими станциями. Полученный результат дает основание для дальнейшей работы по анализу сейсмического шума,

регистрируемого в шахтах. Можно сделать предположение, что обработка записи сейсмического сигнала длительностью более двух недель позволит определить первые вступления извлекаемых сейсмических волн, что сделает возможным применение шумовой сейсмической томографии для построения скоростных моделей с целью решения задач мониторинга напряженно-деформированного состояния среды.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Гаврилов А.Г., Штирц В.А., Рукавишников Г.Д.** Современные подходы контроля напряженно-деформированного состояния массива горных пород по данным сейсмических наблюдений на Таштагольском железорудном месторождении // Горная промышленность. 2024. № 3S. С. 32–36. doi:10.30686/1609-9192-2024-3S-32-36.
- Еременко А.А., Мулев С.Н., Штирц В.А.** Мониторинг геодинамических явлений микросейсмическим методом при освоении удароопасных месторождений // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2022. № 1. С. 12–22. doi:10.15372/FTPRPI20220102.
- Мулев С.Н., Рукавишников Г.Д., Мороз Д.И., Пашкова В.И., Мороз Н.Е.** Мониторинг напряженного состояния сейсмическими и расчетными методами на шахтах АО «Воркутауголь» // Уголь. 2022. № 12. С. 88–93. doi:10.18796/00415790-2022-12-88-93.
- Рукавишников Г.Д., Мулёв С.Н., Гаврилов А.Г.** Опыт применения и перспективы развития системы сейсмического мониторинга ГИТС на Таштагольском железорудном месторождении // Горная промышленность. 2023. № S1. С. 90–95. doi:10.30686/1609-9192-2023-S1-90-95.
- Штирц В.А., Колтышев В.Н.** Отработка блоков и распределение толчков после массовых взрывов в условиях Таштагольского месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 7. С. 54–59.
- Bensen G.D., Ritzwoller M.H., Barmin M.P., Levshin A.L., Lin F., 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. Vol. 169 (3). P. 1239–1260. doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03374.x.
- Boué P., Poli P., Roux P., Campillo M., Briand X.** Phase velocity tomography of surface waves using ambient noise cross-correlation and array processing // Journal of Geophysical Research. 2014. Vol. 119 (1). P. 519–529. doi:10.1002/2013JB010446.
- Czarny R., Marcak H., Nakata N., Pilecki Z., Zbigniew I.** Monitoring velocity changes caused by underground coal mining using seismic noise // Pure and Applied Geophysics. 2016. Vol. 173. P. 1907–1916. doi:10.1007/s00024-015-1234-3.
- Lin F., Li D., Clayton R.W., Hollis D.** High-resolution 3D shallow crustal structure in Long Beach, California: Application of ambient noise tomography on a dense seismic array // Geophysics. 2013. Vol. 78 (4). P. Q45–Q56. doi:10.1190/geo2012-0453.1.
- Liu Y., Zhang H., Fang H., Yao H., Gao J.** Ambient noise tomography of three-dimensional near-surface shear-wave velocity structure around the hydraulic fracturing site using surface microseismic monitoring array // Journal of Applied Geophysics. 2018. Vol. 159. P. 209–217. doi:10.1016/j.jappgeo.2018.08.009.
- Moreau L., Stehly L., Boué P., Lu Y., Larose E., Campillo M.** Improving ambient noise correlation functions with an SVD-based Wiener filter // Geophysical Journal International. 2017. Vol. 211. P. 418–426. doi:10.1093/gji/ggx306.

- Nakata N., Snieder R., Tsuji T., Lerner K., Matsuoka T.** Shear wave imaging from traffic noise using seismic interferometry by cross-coherence // *Geophysics*. 2011. Vol. 76 (6). P. SA97–SA106. doi:10.1190/geo2010-0188.1.
- Olivier G., Brenguier F., Campillo M., Lynch R., Roux P.** Body-wave reconstruction from ambient seismic noise correlations in an underground mine // *Geophysics*. 2015. Vol. 80 (3). P. KS11–KS25. doi:10.1190/geo2014-0299.1.
- Sabra K., Roux P., Kuperman W.** Emergence rate of the time-domain Green's function from the ambient noise cross-correlation function // *Journal of the Acoustical Society of America*. 2005. Vol. 118 (6). P. 3524–3531. doi:10.1121/1.2109059.
- Seats K.S., Lawrence J.F., Prieto G.A.** Improved ambient noise correlation functions using Welch's method // *Geophysical Journal International*. 2012. Vol. 188 (2). P. 513–523. doi:10.1111/j.1365-246X.2011.05263.x.
- Shapiro N.M., Campillo M.** Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise // *Geophysical Research Letters*. 2004. Vol. 31 (7). P. L07614. doi:10.1029/2004GL019491.
- Snieder R.** Coda wave interferometry and the equilibration of energy in elastic media // *Physical Review E*. 2002. Vol. 66 (4). P. 046615. doi:10.1103/PHYSREVE.66.046615.
- Zhang J., Gerstoft P., Shearer P.** High-frequency P-wave seismic noise driven by ocean winds // *Geophysical Research Letters*. 2009. Vol. 36 (9). P. L09392. doi:10.1029/2009GL037761.

REFERENCES

- Bensen G.D., Ritzwoller M.H., Barmin M.P., Levshin A.L., Lin F., 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. Vol. 169 (3). P. 1239–1260. doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03374.x.
- Boué P., Poli P., Roux P., Campillo M., Briand X.** Phase velocity tomography of surface waves using ambient noise cross-correlation and array processing // *Journal of Geophysical Research*. 2014. Vol. 119 (1). P. 519–529. doi:10.1002/2013JB010446.
- Czarny R., Marcak H., Nakata N., Pilecki Z., Zbigniew I.** Monitoring velocity changes caused by underground coal mining using seismic noise // *Pure and Applied Geophysics*. 2016. Vol. 173. P. 1907–1916. doi:10.1007/s00024-015-1234-3.
- Eremenko A.A., Mulev S.N., Shtirts V.A.** Microseismic monitoring of geodynamic phenomena in rockburst-hazardous mining condition // *Journal of Mining Science*. 2022. Vol. 58 (1). P. 10–19. doi:10.1134/s1062739122010021.
- Gavrilov A.G., Shtirts V.A., Rukavishnikov G.D.** Modern approaches to control stress-strain state of rock mass using seismic data at the Tashtagol iron mine // *Russian Mining Industry*. 2024. Vol. 3S. P. 32–36.
- Lin F., Li D., Clayton R.W., Hollis D.** High-resolution 3D shallow crustal structure in Long Beach, California: Application of ambient noise tomography on a dense seismic array // *Geophysics*. 2013. Vol. 78 (4). P. Q45–Q56. doi:10.1190/geo2012-0453.1.
- Liu Y., Zhang H., Fang H., Yao H., Gao J.** Ambient noise tomography of three-dimensional near-surface shear-wave velocity structure around the hydraulic fracturing site using surface microseismic monitoring array // *Journal of Applied Geophysics*. 2018. Vol. 159. P. 209–217. doi:10.1016/j.jappgeo.2018.08.009.
- Moreau L., Stehly L., Boué P., Lu Y., Larose E., Campillo M.** Improving ambient noise correlation functions with an SVD-based Wiener filter // *Geophysical Journal International*. 2017. Vol. 211. P. 418–426. doi:10.1093/gji/ggx306.

- Mulev S.N., Rulavishnikov G.D., Moroz D.I., Pashkova V.I., Moroz N.E.** Monitoring of the stress state by seismic and numerical methods at the mines of JSC “Vorkutaugol” // Ugol (Russian Coal Journal). 2022. Vol. 12. P. 88–93. doi:10.18796/0041-5790-2022-12-88-93.
- Nakata N., Snieder R., Tsuji T., Lerner K., Matsuoka T.** Shear wave imaging from traffic noise using seismic interferometry by cross-coherence // Geophysics. 2011. Vol. 76 (6). P. SA97–SA106. doi:10.1190/geo2010-0188.1.
- Olivier G., Brenguier F., Campillo M., Lynch R., Roux P.** Body-wave reconstruction from ambient seismic noise correlations in an underground mine // Geophysics. 2015. Vol. 80 (3). P. KS11–KS25. doi:10.1190/geo2014-0299.1.
- Rukavishnikov G.D., Mulev S.N., Gavrilov A.G.** Experience of application and prospects for the development of the GITS seismic monitoring system at the Tashtagolsky iron ore deposit // Russian Mining Industry. 2023. Vol. 1S. P. 90–95. doi:10.30686/1609-9192-2023-S1-90-95.
- Sabra K., Roux P., Kuperman W.** Emergence rate of the time-domain Green’s function from the ambient noise cross-correlation function // Journal of the Acoustical Society of America. 2005. Vol. 118 (6). P. 3524–3531. doi:10.1121/1.2109059.
- Seats K.S., Lawrence J.F., Prieto G.A.** Improved ambient noise correlation functions using Welch’s method // Geophysical Journal International. 2012. Vol. 188 (2). P. 513–523. doi:10.1111/j.1365-246X.2011.05263.x.
- Shapiro N.M., Campillo M.** Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise // Geophysical Research Letters. 2004. Vol. 31 (7). P. L07614. doi:10.1029/2004GL019491.
- Shtirts V.A., Koltyshev V.N.** Development blocks and the distributions of aftershocks after massive explosions in the conditions of the Tashtagol deposit // Mining Informational and Analytical Bulletin. 2015. Vol. 7. P. 54–59.
- Snieder R.** Coda wave interferometry and the equilibration of energy in elastic media // Physical Review E. 2002. Vol. 66 (4). P. 046615. doi:10.1103/PHYSREVE.66.046615.
- Zhang J., Gerstoft P., Shearer P.** High-frequency P-wave seismic noise driven by ocean winds // Geophysical Research Letters. 2009. Vol. 36 (9). P. L09392. doi:10.1029/2009GL037761.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

БЕРЕЖНЕВ Ярослав Максимович – младший научный сотрудник лаборатории обработки и анализа сейсмических данных Новосибирского государственного университета, инженер лаборатории сейсмической томографии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: пассивная сейсмическая интерферометрия, мониторинг изменений сейсмических скоростей.

БЕЛОВЕЖЕЦ Надежда Николаевна – младший научный сотрудник лаборатории обработки и анализа сейсмических данных Новосибирского государственного университета, инженер лаборатории сейсмической томографии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: шумовая сейсмическая интерферометрия, поверхностно-волновая томография.

РУКАВИШНИКОВ Георгий Дмитриевич – заведующий центром геодинамического мониторинга АО “ВНИМИ”. Основные научные интересы: геомеханика блочных массивов, сейсмические наблюдения в глубоких шахтах.

*Статья поступила в редакцию 12 ноября 2024 г.,
одобрена после рецензирования 25 ноября 2024 г.,
принята к публикации 27 ноября 2024 г.*