



## ВЫЯВЛЕНИЕ ДРЕЙФА ЧАСОВ В СЕЙСМИЧЕСКИХ ЗАПИСЯХ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ СДВИГОВ ДЛЯ СЕТИ СТАНЦИЙ

**Н.Н. Беловежец<sup>1,2</sup>, Я.М. Бережнев<sup>1,2</sup>, А.В. Яковлев<sup>1</sup>, С.С. Абраменков<sup>1,2</sup>, И.Ф. Абкадыров<sup>1,3</sup>**

<sup>1</sup>*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,*

<sup>2</sup>*Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия,*

<sup>3</sup>*Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук, 683006,  
Петропавловск-Камчатский, бульвар Пуйпа, 9, Россия,  
e-mail: BelovezhetsNN@ipgg.sbras.ru*

В записях автономных сейсмологических станций нередко встречаются некорректные записи их собственного времени, вызванные дрейфом кварцевых часов прибора. В данной работе предложена методика обнаружения подобных ошибок времени для сети сейсмических станций, основанная на анализе кросс-корреляционных функций сейсмического шума с применением инверсии Монте-Карло с цепями Маркова без использования эталонного сигнала. Предложенная методика была апробирована на данных временной сейсмической сети, установленной на острове Парамушир в 2021–2022 гг., для которых были успешно определены временные сдвиги и внесены поправки в кросс-корреляционные функции.

*Шумовая сейсмическая интерферометрия, дрейф часов, временной сдвиг сейсмических записей*

## DETECTION OF CLOCK ERRORS IN SEISMIC RECORDS AND ESTIMATION OF TIME SHIFTS FOR A SEISMIC NETWORK

**N.N. Belovezhets<sup>1,2</sup>, Y.M. Berezhev<sup>1,2</sup>, A.V. Jakovlev<sup>1</sup>, S.S. Abramenkov<sup>1,2</sup>, I.F. Abkadyrov<sup>1,3</sup>**

<sup>1</sup>*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,  
Koptuyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,*

<sup>2</sup>*Novosibirsk State University, Pirogova Str., 1, Novosibirsk, 630090, Russia,*

<sup>3</sup>*Institute of Volcanology and Seismology FB RAS, 683006, Petropavlovsk-Kamchatsky, Piyra Blv., 9, Russia,  
e-mail: BelovezhetsNN@ipgg.sbras.ru*

In the records of autonomous seismological observations occurrence of quartz watch clock drift often leads to incorrect time records. This paper presents a method for detecting such errors in a seismic station network based on the analysis of ambient seismic noise cross-correlation functions using Monte-Carlo Markov chain (MCMC) approach without using a reference signal. The proposed method was tested on the seismic data of a temporary seismic network installed on Paramushir Island in 2021–2022 for which time shifts were successfully estimated and corrections to the cross-correlation functions were made.

*Ambient seismic noise interferometry, clock error, seismic data time shifts*

## **ВВЕДЕНИЕ**

Для множества сейсмологических методов обработки ключевое значение имеет синхронизация сейсмограмм с абсолютным временем, основанная на корректности отметок всемирного координированного времени (UTC) в исходных сейсмических записях. В нормальном режиме работы сейсмологическая станция с некоторой периодичностью получает с помощью GPS-антенны эталонное время со спутника и синхронизирует с ним свои кварцевые часы. Если же станции не удастся связаться со спутником, то отметки времени во внутреннем формате продолжают выставляться по собственным часам станции, которые, к сожалению, подвержены явлению дрейфа часов. В случае длительного отсутствия сигнала от спутника из-за повреждения антенны или из-за погодных условий ошибка синхронизации начинает накапливаться в исходных сейсмических записях, что является серьезной проблемой при последующей обработке и анализе.

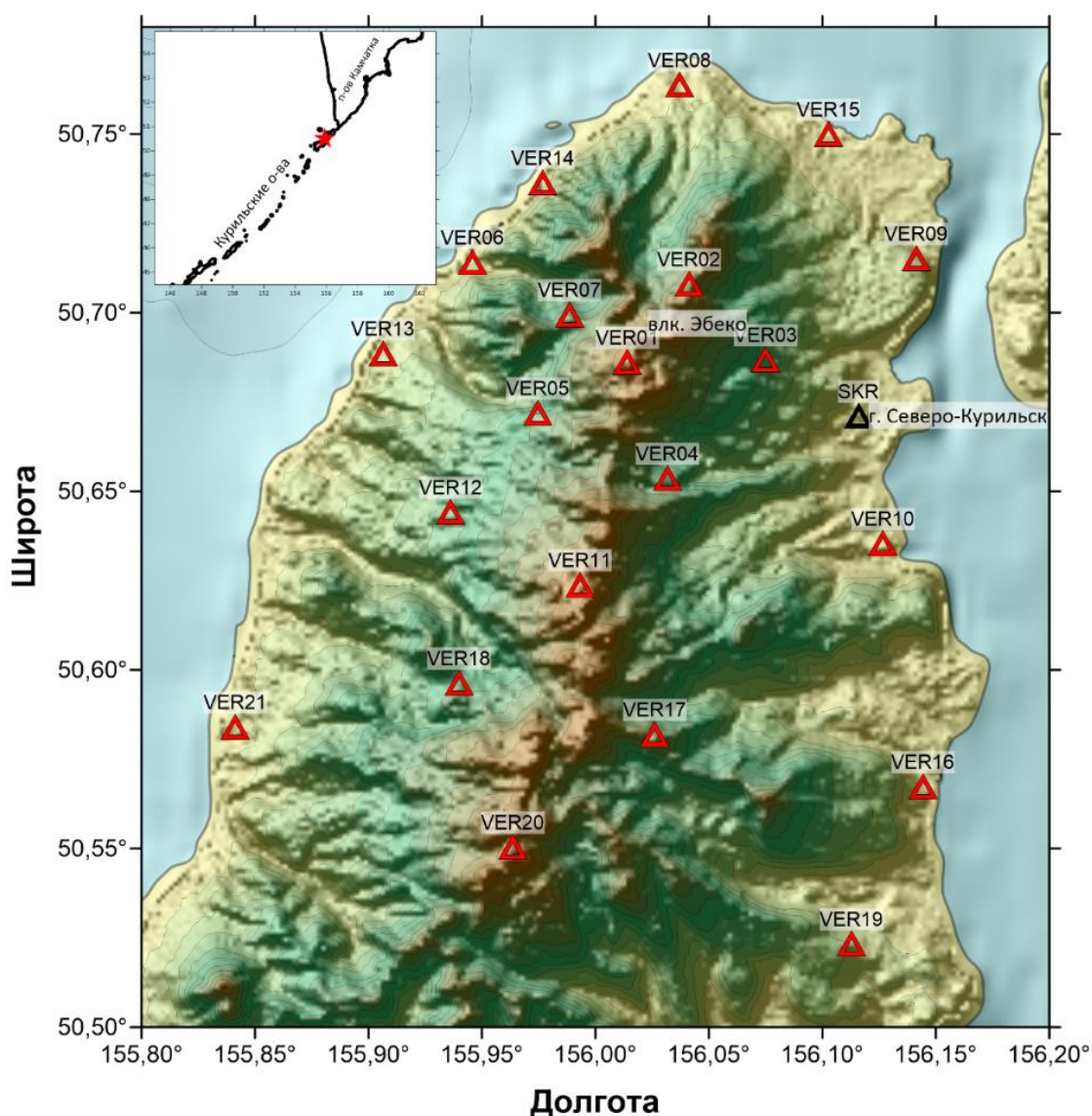
Пассивная сейсмическая интерферометрия основана на преобразовании квази-случайного волнового поля в полезные сигналы [Paiz et al., 2018], обычно для восстановления строения среды, например, в [Shapiro et al., 2005; Sabra et al., 2005] или определения параметров источника шума, например, в [Ermer et al., 2017]. Этот метод основан на выделении из сейсмического шума функции Грина на паре сейсмических станций, которая характеризует среду между этими станциями, путем кросс-корреляции сейсмических записей.

Кроме определения строения Земли было показано, что по кросс-корреляционным функциям возможно определение временного сдвига на сейсмических станциях [Stehly et al., 2007; Sens-Schöenfelder, 2008; Hable et al., 2018]. Однако упомянутые исследования использовали подход с эталонной кросс-корреляцией, который не подходит для случаев, в которых большая часть сейсмических данных имеет потенциальные ошибки синхронизации. Для решения этой проблемы предложена методика, не требующая использования эталонной кросс-корреляции, которая была успешно апробирована на данных временной сейсмической сети, установленной на острове Парамушир в 2021–2022 гг.

## **РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ И ДАННЫЕ**

Остров Парамушир, являющийся наиболее гористым из крупных островов Курильской дуги, расположен на ее северной окраине в непосредственной близости от Камчатского полуострова. В северной части острова, всего в шести километрах от г. Северо-Курильск, расположен вулкан Эбеко, который с 2016 г. находится в состоянии высокой вулканической активности, выраженной в периодических фреато-магматических извержениях. В настоящее время в районе работает одна постоянная сейсмическая станция (SKR) Камчатского филиала Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба” Российской академии наук (КФ ФИЦ ЕГС РАН), расположенная в г. Северо-Курильск. С целью изучения распределения сейсмической активности внутри постройки вулкана, а также изучения строения питающей системы, в июне 2021 года вокруг вулкана была установлена временная сеть сейсмических станций (рис. 1). Сеть включала в себя 21 станцию с одинаковым комплектом оборудования, принадлежащего ИНГГ СО РАН и НГУ. Каждый комплект включал в себя широкополосный сейсмический сенсор Guralp CMG-6T, с полосой пропускания 50 Гц–30 с, сейсмический регистратор DataCube3 с внешней GPS-антенной, а также группы из 10 батарей “Бакен ВЦ1” общей емкостью 700 А·ч. Каждая станция имеет встроенную карту памяти емкостью 32 Гб, на которую сохраняются записанные данные. При частоте регистрации 100 Гц, которая была использована в этом эксперименте, объема карты

памяти хватает для сохранения непрерывных трехкомпонентных сейсмических записей длительностью 283 дня. Следует отметить, что станция VER19 была повреждена медведем уже через три дня после установки, таким образом, одновременно работали не более 20 временных станций.



**Рис. 1.** Положение временных сейсмических станций и постоянной станции КФ ФИЦ ЕГС РФН показано красными и черными треугольниками, соответственно. На вставке красной звездочкой показано положение района исследования

При монтаже станции сейсмический сенсор устанавливается на постамент, представляющий из себя тротуарную плитку, жестко закрепленную на дне ямы, глубиной около 70–80 см. Сверху укрывается контейнером, предотвращающим вероятность смещения сенсора и его уровня. Батареи питания и регистратор располагаются в отдельной яме рядом – таким образом после установки станции, на поверхности остается только замаскированный приемник GPS-антенны, что делает его наиболее уязвимой для внешних факторов частью сейсмической станции. Повреждение антенны не выводит станцию из рабочего режима, однако последующая запись сейсмических сигналов происходит с отметками внутренних кварцевых часов, которые без периодической синхронизации со спутниками GPS могут накапливать существенную ошибку из-за дрейфа часов.

## ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Рассеянные волновые поля состоят из волн со случайными амплитудами и фазами, которые распространяются во всех возможных направлениях, и поэтому содержат информацию о всех возможных путях пробега. При достаточно длительном наблюдении распределение внешних источников случайным образом изменяется, и это приводит к тому, что сейсмический шум можно рассматривать как случайное поле [Shapiro et al., 2005]. Для случайного волнового поля с источниками, равномерно распределенными по всей среде, показано, что среда воздействует на испускаемый сейсмическим источником импульс в виде дельта-функции как функция Грина [Snieder, 2004]. Теоретические исследования показали, что кросс-корреляция рассеянных волновых полей (сейсмического шума) может обеспечить оценку функции Грина между станциями [Larose et al., 2004; Wapenaar, 2004]. Функцию кросс-корреляции можно интерпретировать как волны, исходящие от мнимого источника, которым является одна сейсмическая станция, и зарегистрированные на другой. Так как реальные условия не соответствуют теоретическим предположениям, перед вычислением функции кросс-корреляции необходимо предварительно обработать данные [Bensen et al., 2007].

Наличие дрейфа часов проявляется в смещении во времени всей кросс-корреляционной функции относительно такой же без дрейфа: правая часть функции перемещается ближе к  $t = 0$ , левая часть соответственно удаляется от нуля или наоборот. Следовательно, при отсутствии сдвига во времени кросс-корреляции за определенные промежутки времени (например, за сутки) имеют более высокий коэффициент корреляции (СС) между собой, за счет того, что сейсмический шум слабо меняется за время наблюдений. На этой идее и основан метод определения ошибок часов сейсмической станции.

Процедура определения временных сдвигов осуществляется путем реализации нескольких последовательных этапов:

- На первом шаге производится отбор кросс-корреляций с хорошим качеством сигнала (например, по критерию отношения сигнала к шуму) за определенные промежутки времени (например, в нашем случае были рассчитаны суточные кросс-корреляции). В результате получается набор суточных функций кросс-корреляции, рассчитанных для каждой компоненты каждой пары станций.
- Далее для каждой текущей пары станций рассчитываются коэффициенты корреляции между суточными функциями кросс-корреляции с различными временами относительного сдвига. При этом коэффициенты корреляции (СС) отдельно рассчитываются для каждой из компонент тензора кросс-корреляций. В результате определяется сдвиг во времени ( $\epsilon$ ), который максимизирует коэффициент корреляции.
- На следующем шаге определяется значение сдвига во времени для каждой пары станций и каждого промежутка времени путем вычисления взвешенного среднего ( $\bar{\epsilon}$ ) между всеми компонентами тензора кросс-корреляций ( $\epsilon_i, i = 1 \dots 9$ ), где весом выступает коэффициент корреляции:  $\bar{\epsilon} = \frac{\sum_{i=1}^9 CC_i^2 \epsilon_i}{\sum_{i=1}^9 CC_i^2}$ . Ошибкой определения считается взвешенная дисперсия  $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^9 CC_i^2 (\epsilon_i - \bar{\epsilon})^2}{\frac{8}{9} \sum_{i=1}^9 CC_i^2}}$ . Если ошибка получалась меньше чем шаг дискретизации, то она приравнялась к шагу дискретизации.
- Затем для определения абсолютного сдвига во времени для каждой пары станций используется инверсия Монте-Карло цепей Маркова [Taylor, Hillers, 2020] на основе алгоритма Метрополиса-

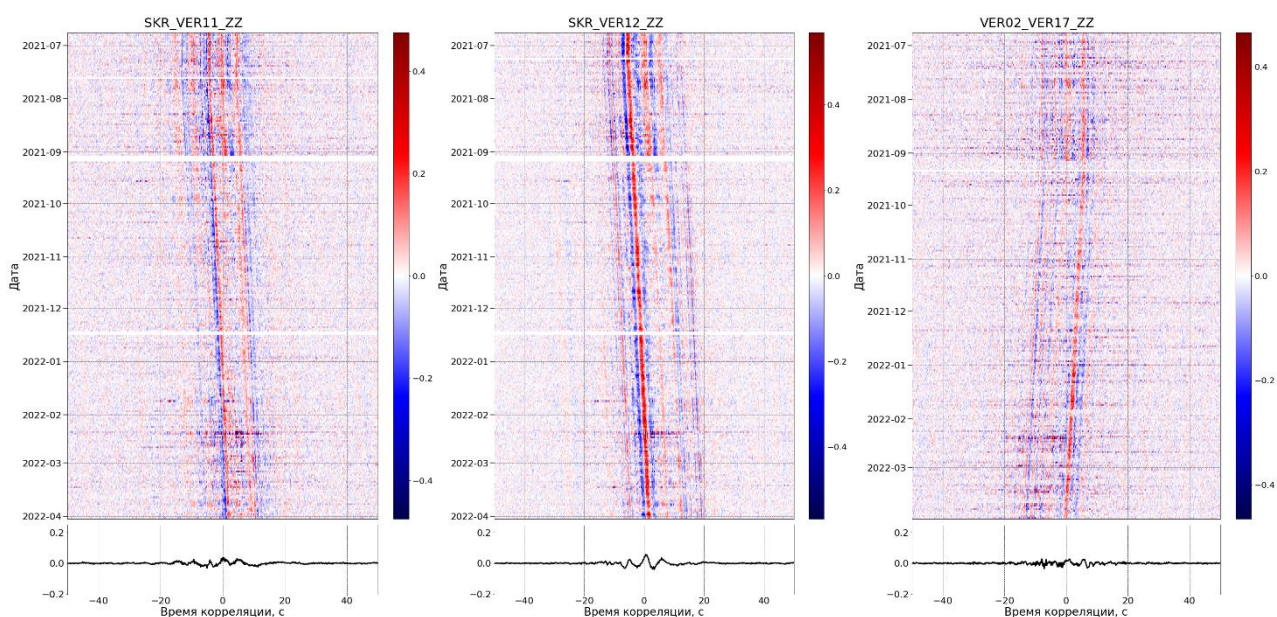
Гастингса [Hastings, 1970]. Нами было решено использовать данный метод инверсии, потому что линеаризованные постановки [Tarantola, 2005] требуют предположений об априорном распределении вероятности.

- Наконец, в предположении, что хотя бы одна станция не имеет дрейфа собственных часов, определяются временные сдвиги на отдельных станциях.

## ОБРАБОТКА ДАННЫХ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Используя непрерывные сейсмические записи, были построены суточные функции кросс-корреляций. Ниже приведена последовательность действий, которые были реализованы для их построения.

- Предварительная фильтрация каждой компоненты суточной трассы, согласно частотной характеристике сейсмической станции;
- внесение инструментальной поправки, убирающей влияние станции;
- понижение частоты дискретизации сигнала до 10 Гц и повторная фильтрация трасс в окне частот 0.33–4 Гц;
- нормализация трасс во временной и частотной области, согласно [Bensen et al., 2007]. В качестве временной нормализации была использована нормализация скользящим средним модулем (running absolute mean) с предварительной фильтрацией в окне далеких землетрясений в полосе частот 15–30 сек. В качестве нормализации в частотной области использовалось спектральное отбеливание в окне частот фильтрации 0.33–4 Гц, которое применялось к двухчасовым отрезкам;
- вычисление функций кросс-корреляции длиной 2 часа с перекрытием в час и их суммирование за полные сутки. На рисунке 2 представлены кросс-корреляции с временным сдвигом за весь период работы для пары станций SKR и VER12.

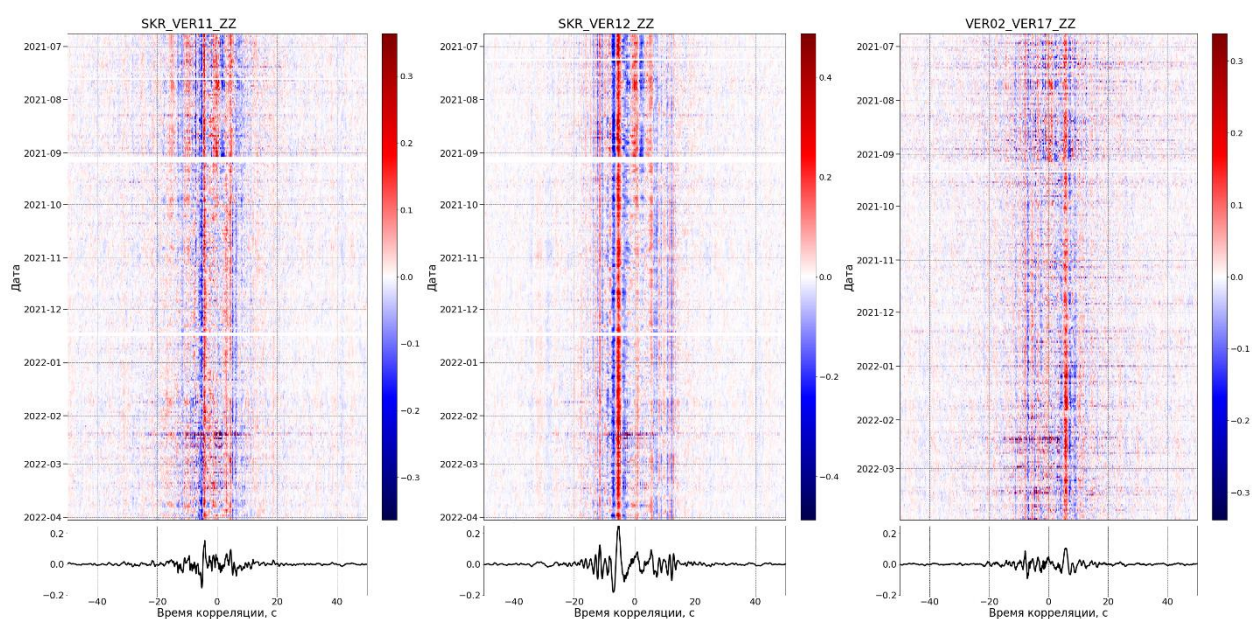


**Рис. 2.** Суточные кросс-корреляции для пар станций SKR-VER11, SKR-VER12 и VER02-VER17 за весь период работы станций. Внизу каждого рисунка показана суммарная кросс-корреляция

Дальнейшая обработка производилась с использованием рассчитанных на предыдущем этапе кросс-корреляций:

- Так как кросс-корреляции достаточно сильно зашумлены, производилась их предварительная фильтрация с помощью усечения сингулярного спектра матрицы и винеровской фильтрации аддитивного шума [Moreau et al., 2017];
- исключение из анализа кросс-корреляций с соотношением сигнала к шуму меньше 2;
- определение относительных временных сдвигов, которые максимизируют коэффициент корреляции между всеми суточными кросс-корреляциями для каждой компоненты тензора кросс-корреляций;
- определение средневзвешенного сдвига и ошибки определения сдвига, согласно описанному выше алгоритму;
- определение с помощью инверсии абсолютного значения сдвига для каждой пары станций и внесение полученных поправок в функции кросс-корреляции (рис. 3).

Были определены временные сдвиги для всех пар станций, после чего определены ошибки часов для отдельных станций. В результате инверсии полученные неопределенности итогового решения оказались меньше 0.0005 сек, следовательно, ошибка определения величины временного сдвига равна как минимум шагу дискретизации сигнала (в данном случае 0.1 с). На трех станциях (рис. 4) ошибка часов станции за все время работы составила более 5 с. На этих станциях наблюдается линейный дрейф часов сейсмических станций, и также в начале дрейфа часов наблюдается резкий скачок величины временного сдвига, который может быть принят в качестве оценки точности определения величины дрейфа (в данном случае – 0.13 с). Для остальных сейсмических станций сдвиги не превышают одной секунды, и при этом не имеют выраженных трендов и локализованы во времени, что может говорить о том, что сейсмические станции смогли восстановить соединение со спутником и синхронизировать внутренние часы с абсолютным временем.



**Рис. 3.** Суточные кросс-корреляции для пары станций SKR-VER11, SKR-VER12 и VER02-VER17 за весь период работы станций с внесенными поправками. Внизу каждого рисунка показана суммарная кросс-корреляция

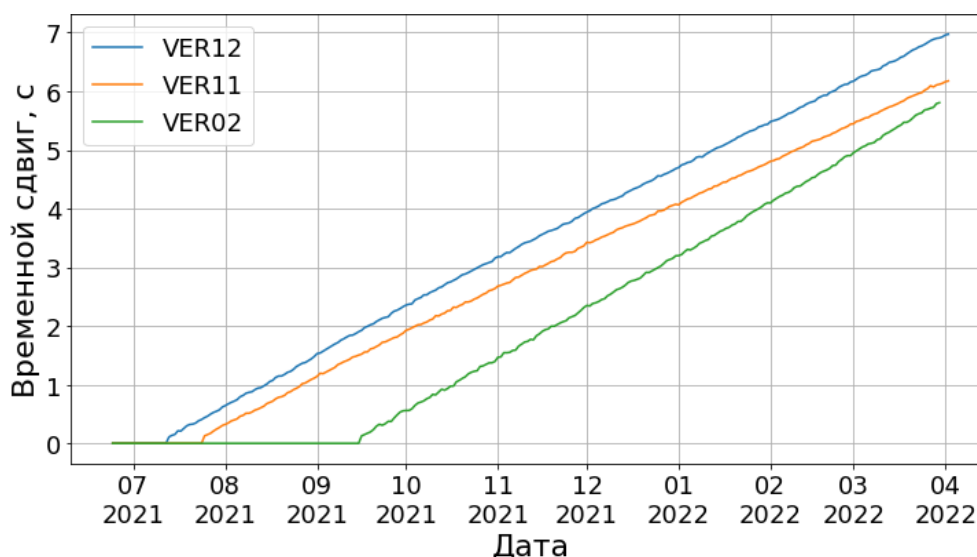


Рис. 4. Абсолютные значения временного сдвига для станций VER02, VER11, VER12 в зависимости от времени работы станций

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная методика выявления дрейфа часов в сейсмических записях и расчета соответствующих временных сдвигов для сети станций позволяет эффективно обнаруживать даже малые ошибки часов сейсмических станций. Методика была апробирована на данных временной сейсмологической сети, установленной на о. Парамушир в 2021–2022 гг. В результате на трех сейсмических станциях был определен временной сдвиг с оценкой точности в 0.13 с, который за все время работы станций превысил 5 с. На остальных станциях временной сдвиг оказался не больше 1 с. Очевидно, что в подобной ситуации коррекция отметок времени абсолютно необходима для дальнейшей обработки и анализа сейсмических данных. Необходимо отметить, что предложенный подход возможно применять не только для суточных кросс-корреляций, но и на меньших промежутках времени. Это позволит определять дрейф часов сейсмической станции в течении суток, что может быть крайне полезно для корректировки времен прихода сейсмических волн, например, от землетрясения.

Выражаем благодарность КФ ФИЦ ЕГС РАН за предоставление данных с постоянной сейсмической станции SKR.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-27-00374.

### ЛИТЕРАТУРА

### 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.
- Ermert L., Sager K., Afanasiev M., Boehm C., Fichtner A.** Ambient seismic source inversion in a heterogeneous Earth: theory and application to the Earth’s hum // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2017. – Vol. 122 (11). – P. 9184–9207, doi: 10.1002/2017JB014738.

- Hable S., Sigloch K., Barruol G., Stahler S.C., Hadziioannou C.** Clock errors in land and ocean bottom seismograms: high-accuracy estimates from multiple-component noise cross-correlations // *Geophysical Journal International*. – 2018. – Vol. 214. – P. 2014–2034, doi: 10.1093/gji/ggy236.
- Hastings W.K.** Monte Carlo sampling methods using Markov Chains and their applications // *Biometrika*. – 1970. – Vol. 57 (1). – P. 97–109, doi: 10.1093/biomet/57.1.97.
- Larose E., Derode A., Campillo M., Fink M.** Imaging from one-bit correlations of wideband diffuse wave fields // *Journal of Applied Physics*. – 2004. – Vol. 95 (12). – P. 8393–8399, doi: 10.1063/1.1739529.
- 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.
- Paitz P., Sager K., Fichtner A.** Rotation and strain ambient noise interferometry // *Geophysical Journal International*. – 2019. – Vol. 216. – P. 1938–1952, doi: 10.1093/gji/ggy528.
- Sabra K.G., Gerstoft P., Roux P., Kuperman W.A.** Surface wave tomography from microseisms in Southern California // *Geophysical Research Letters*. – 2005. – Vol. 32 (14). – P. L14311, doi: 10.1029/2005GL023155.
- Sens-Schönfelder C.** Synchronizing seismic networks with ambient noise // *Geophysical Journal International*. – 2008. – Vol. 174 (3). – P. 966–970, doi: 10.1111/j.1365-246X.2008.03842.x.
- Shapiro N.M., Campillo M., Stehly L., Ritzwoller M.H.** High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise // *Science*. – 2005. – Vol. 307 (5715). – P. 1615–1618, doi: 10.1126/science.110833.
- Snieder R.** Extracting the Green's function from the correlation of coda waves: A derivation based on stationary phase // *Physical Review E*. – 2004. – Vol. 69. – P. 046610, doi: 10.1103/PhysRevE.69.046610.
- Stehly L., Campillo M., Shapiro N.M.** Traveltime measurements from noise correlation: stability and detection of instrumental time-shifts // *Geophysical Journal International*. – 2007. – Vol. 171 (1). – P. 223–230, doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03492.x.
- Tarantola A.** *Inverse problem theory and methods for model parameter estimation*. – SIAM, Philadelphia, 2005. – 333 p.
- Taylor G., Hillers G.** Estimating temporal changes in seismic velocity using a Markov chain Monte Carlo approach // *Geophysical Journal International*. – 2020. – Vol. 220 (3). – P. 1791–1803, doi: 10.1093/gji/ggz535.
- Wapenaar K.** Retrieving the elastodynamic Green's function of an arbitrary inhomogeneous medium by cross correlation // *Physical Review Letters*. – 2004. – Vol. 93. – P. 254301, doi: 10.1103/PhysRevLett.93.254301.

#### **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

*БЕЛОВЕЖЕЦ Надежда Николаевна* – инженер лаборатории сейсмической томографии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: шумовая сейсмическая интерферометрия, поверхностно-волновая томография.

*БЕРЕЖНЕВ Ярослав Максимович* – инженер лаборатории сейсмической томографии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: пассивная сейсмическая интерферометрия, мониторинг изменений сейсмических скоростей.

*ЯКОВЛЕВ Андрей Владимирович* – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории сейсмической томографии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: алгоритмы сейсмической томографии, сейсмология вулканов, геодинамика зон коллизии и субдукции, планирование и установка временных сетей сейсмических станций.



*АБРАМЕНКОВ Сергей Сергеевич* – кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник лаборатории сейсмической томографии ИНГГ СО РАН. Основные научные интересы: вулканическая сейсмичность, обработка сейсмических данных, анализ когерентности волнового поля.

*АБКАДЫРОВ Ильяс Фаритович* – инженер лаборатории сейсмической томографии ИНГГ СО РАН. Основные научные интересы: микросейсмическое зондирование, сейсмология вулканов, планирование и установка временных сетей сейсмических станций.

*Статья поступила в редакцию 6 декабря 2022 г.,  
принята к публикации 8 декабря 2022 г.*