

УДК 550.34.06

ТОЧНОСТЬ ЛОКАЦИИ ЭПИЦЕНТРОВ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ ПО ДАННЫМ МАЛОАПЕРТУРНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ГРУППЫ “МИХНЕВО”: НУЖНЫ ЛИ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СЕЙСМИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ?

© 2020 г. И.А. Санина, С.Г. Волосов, А.Г. Гоев, Н.Л. Константиновская,
М.А. Нестеркина, С.А. Тарасов

Институт динамики геосфер им. академика М.А. Садовского РАН, г. Москва, Россия

Приведены результаты оценки точности определения координат эпицентров сейсмических событий по данным малоапертурной сейсмической группы “Михнево” на примере локации взрывов, производимых на карьерах, расположенных в центральной части Восточно-Европейской платформы. Показано, что точность локации в значительной степени зависит от уровня микросейсмического фона, т.е. от отношения сигнал/шум (R). При достаточном для уверенного выделения вступлений сейсмических волн $R \geq 2$ малоапертурная группа самостоятельно обеспечивает высокую точность локации эпицентров событий и последующую их ассоциацию с ближайшими по координатам карьерами. При низком отношении сигнал/шум ($R \leq 2$) точность локации снижается, и в этом случае данные, полученные от дополнительной станции, могут быть полезны.

Ключевые слова: Восточно-Европейская платформа, временная сеть, малоапертурная сейсмическая группа, волновые формы, сейсмические события.

Введение

Основная сейсмичность Восточно-Европейской платформы связана с проведением буровзрывных работ на карьерах при добыче таких полезных ископаемых, как известняки, доломиты, железистые кварциты, граниты и др. За 15 лет, прошедших с момента создания малоапертурной сейсмической группы “Михнево”, сформировалась уникальная база волновых форм (или волновых “портретов”), которая содержит записи взрывов, произведенных на более чем 60 карьерах, действующих в центральной части платформы. Волновые формы карьерных взрывов, регистрируемых станциями малоапертурной сейсмической группы “Михнево”, на протяжении многих лет оставались неизменными. Наличие такой базы позволяет использовать кросс-корреляционный метод волновых форм (КМВФ) для автоматической идентификации сейсмических событий и ассоциации их с известными карьерами. В основе метода лежит расчет коэффициента корреляции между новыми записями и имеющимися в базе волновыми формами от известных событий с [Адушкин и др., 2015; Китов и др., 2015].

Регистрация событий последних трёх–четырёх лет показала вариативность волновых форм от взрывов на известных карьерах и их несовпадение с хранящимися в базе [Нестеркина и др., 2018]. Основной причиной отмеченных изменений является внедрение новых технологий проводимых на карьерах буровзрывных работ и применение новых взрывчатых веществ. Эти меры направлены на снижение сейсмического эффекта от взрывных работ и улучшение экологической обстановки в местах размещения карьеров. Однако снижение сейсмического эффекта влечет за собой уменьшение отношения

сигнал/шум, определяемого как $R=A_s/A_m$, где A_s – амплитуда полезного сигнала; A_m – амплитуда микросейсмического фона, что неизбежно приводит к значительным трудностям при регистрации событий, вычислении координат их эпицентров и определении природы. В сложившейся ситуации сейсмическая группа, обладающая по сравнению с одиночной станцией повышенными регистрационными возможностями в силу более высокого отношения сигнал/шум на суммотрассе (теоретически в \sqrt{N} , где N – число датчиков в группе), становится эффективным, если не единственным, инструментом контроля за техногенной сейсмичностью. Последующее применение КМВФ позволяет однозначно определить природу события, если его волновая форма имеется в базе данных. Экспериментально установлено, что используемое при обработке данных малоапертурной сейсмической группы “Михнево” программное обеспечение дает возможность определять координаты эпицентров локальных и региональных событий с погрешностью до ± 20 км на расстояниях порядка 500 км. Точность локации уменьшается, если по техническим причинам работают не все регистрирующие каналы группы или $R \leq 2$. В таких случаях ошибка определения координат эпицентра может достигать 50 км, что влечет за собой ложную ассоциацию события с ближайшим к полученным координатам карьером или отнесение события к разряду “природа не установлена”. Традиционный подход с привлечением данных других станций практически не пригоден для территории Восточно-Европейской платформы, в центральной части которой ввиду её асейсмичности отсутствует сеть сейсмических станций. Единственными источниками сейсмологической информации в регионе исследования являются наблюдения, проводимые на малоапертурной группе “Михнево” и Центральной сейсмологической обсерватории “Обнинск”.

Опыт наших наблюдений показывает, что целый ряд карьерных взрывов в Калужской, Владимирской, Московской, Тульской областях регистрируется только станциями группы “Михнево” [Сведения..., 2017]. Возникают естественные вопросы – способна ли малоапертурная сейсмическая группа заменить собой сейсмическую сеть и достаточна ли точность локации события по данным одной сейсмической группы для однозначной идентификации его природы. Возможность проведения исследований для поиска ответа появилась в 2017 г., когда в рамках работ по изучению глубинного строения литосферы центральной части Восточно-Европейской платформы на ее территории Институтом динамики геосфер РАН (ИДГ РАН) была установлена временная сейсмическая сеть из трех пунктов наблюдения, оборудованных широкополосными трехкомпонентными сейсмическими станциями. Станции временной сети вместе со станциями малоапертурной сейсмической группы “Михнево” формируют площадную систему наблюдений с расстояниями между пунктами регистрации порядка 100 км.

Регистрация сейсмических событий станциями малоапертурной группы “Михнево” и определение координат эпицентров

В современной модификации малоапертурная сейсмическая группа “Михнево” (далее – группа MHVAR) состоит из 15 станций, размещенных на площади около 1.2 кв. км. Три станции – одна короткопериодная (вертикальная) и две широкополосные (трехкомпонентные) – находятся в центре группы, в штольне на глубине ~ 20 м; остальные – восемь вертикальных и четыре трехкомпонентных – помещены в герметичные боксы, распределенные по трем концентрическим окружностям на глубине 1 м [Sanina et al., 2012]. Для обработки получаемых данных и локации регистрируемых событий используется программа *ELWIN*, разработанная в Кольском филиале ЕГС РАН [Асминг, 2004].

Записи станций группы MHVAR могут быть осложнены достаточно сильными помехами, связанными как с атмосферными процессами (группа размещена в лесном массиве), так и с хозяйственной деятельностью населения (на расстоянии около 3 км от группы расположено садовое товарищество). В связи с этим при обработке сейсмических записей для выделения полезного сигнала применяется фильтрация, выбираемая с учетом характеристик используемой аппаратуры и наиболее вероятной частоты полезного сигнала. Использование фильтра при первичной обработке позволяет надежно выделять группы P - и S -волн для событий на региональных расстояниях до 3000 км. При более детальной обработке для каждого события полосовой фильтр подбирается индивидуально. Определяется азимут на источник сигнала, который при наличии четкого первого вступления P -волны рассчитывается по временам задержек прихода сигнала на каждый датчик. При отсутствии четкого первого вступления для определения азимута используются две процедуры – “*beam-forming*” ($B-F$) и $F-k$ анализ. Процедура $B-F$ предполагает суммирование записей разных датчиков со сдвигами, соответствующими определенным значениям направления и скорости прихода волны, что приводит к максимизации амплитуды полезного сигнала на суммотрассе; $F-k$ анализ является аналогом процедуры $B-F$ в частотной области. Алгоритм вычисляет азимут приходящей плоской волны и ее кажущуюся скорость для указанного пользователем фрагмента записи сейсмической группы [Асминг, 2004].

Примеры записей двух промышленных взрывов разной мощности, произведенных 05.01.2015 г. ($M=2.1$) и 28.12.2018 г. ($M=1.4$) в Тульской области на карьере “Новогуровский”, удаленном от группы MHVAR на 60 км, представлены на рис. 1, 2. Все записи отфильтрованы в полосе 1–10 Гц; для каждой трассы справа указан диапазон измерения амплитуд в отсчетах (1 отсч. – $7.45 \cdot 10^{-3}$ нм/с). Результаты локации эпицентров взрывов показаны на соответствующих врезках.

На записях взрыва 05.01.2015 г. (см. верхний фрагмент рис. 1), вступления P - и S -волн выделяются четко благодаря высокому значению отношения сигнал/шум ($R>3$); азимут определялся по вертикальным каналам двумя способами – по задержкам времени вступлений и с применением процедуры $B-F$. В обоих случаях ошибка была минимальной – расхождение между рассчитанным и фактическим эпицентром взрыва было менее 0.5 км. Для определения точных координат взрыва на борту карьера был дополнительно установлен временный сейсмический пункт ИДГ РАН.

При $R>3$ для уверенной локации события с использованием программы *ELWIN* достаточно записей трех каналов, что подтверждается расчетами координат с использованием каналов С11, С12, С31 (см. нижний фрагмент рис. 1). И в этом случае расстояние между рассчитанным эпицентром взрыва и фактическим составило менее 1 км. Отметим, что при соотношении сигнал/шум, как в рассматриваемом примере, даже при минимальном количестве работающих каналов по данным малоапертурной сейсмической группы эпицентр события определяется достаточно точно.

Характерные для карьера “Новогуровский” волновые формы не менялись более 10 лет, что позволяло идентифицировать взрывы автоматически, применяя методы кросс-корреляции. Однако в последние годы мощность взрывов на этом карьере заметно снизилась – максимальная магнитуда взрывов в 2018 г. составляла 1.8; при этом уменьшилось до $R<2$ и отношение сигнал/шум.

Волновые формы взрыва меньшей мощности, произведенного на карьере “Новогуровский” 28.12.2018 г. ($M=1.4$), показаны на рис. 2. Вступление P -волны на записях выделяется нечетко, определить азимут можно только с применением процедуры $B-F$; ошибка в определении координат эпицентра в этом случае составила 5 км.

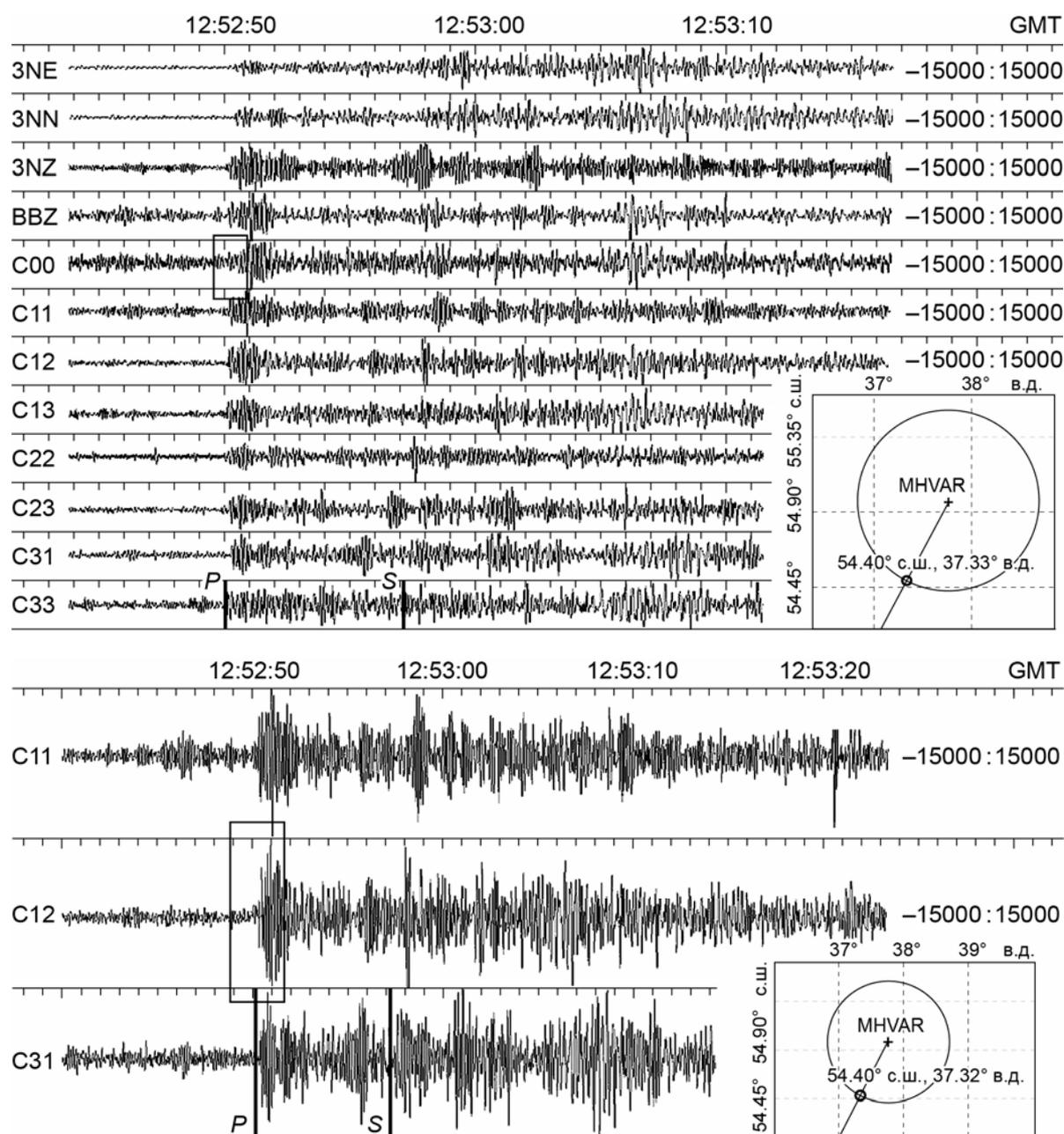


Рис. 1. Карьер “Новогуровский”. Волновые формы взрыва 05.01.2015 г. ($M=2.1$), зарегистрированного станциями группы MHVAR. Для каждой трассы слева указан её номер, справа – диапазон измерений амплитуд в отсчетах (1 отсч. – $7.45 \cdot 10^{-3}$ нм/с). Все записи отфильтрованы в полосе 1–10 Гц. Вертикальными отрезками отмечены вступления P - и S -волн; прямоугольные контуры – окна расчета азимута с применением процедуры $B-F$. Нижний фрагмент демонстрирует локацию по трем трассам при $R>3$. На врезках здесь и далее – результаты локации эпицентра взрыва

Fig. 1. Quarry “Novogurovsky”. Wave forms of the blast on January 5, 2015 ($M=2.1$), recorded by stations of the MHVAR array. Number of each trace is indicated on the left. On the right is the range of amplitudes in counts (1 count – $7.45 \cdot 10^{-3}$ nm/s). All records are filtered in the 1–10 Hz band. The vertical segments mark the arrival of the P and S waves; rectangular contours – azimuth calculation windows using the $B-F$ procedure. The lower fragment shows the location along three paths at $R>3$. The insets here and below show the results of the location of the epicenter of the blast

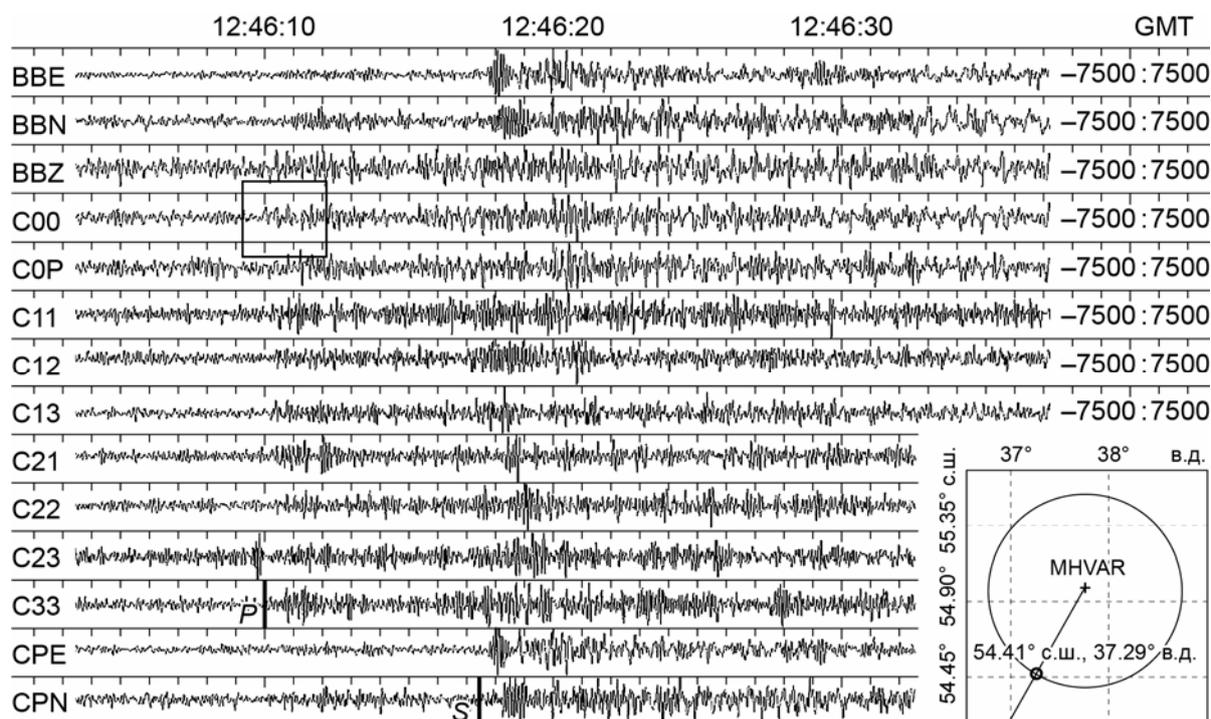


Рис. 2. Карьер “Новогуровский”. Волновые формы взрыва 28.12.2018 г. ($M=1.4$), зарегистрированного станциями группы MHVAR, и результаты локации его эпицентра. Комментарии см. на рис. 1

Fig. 2. Quarry “Novogurovsky”. Wave forms of the blast of December 28, 2018 ($M=1.4$), recorded by the stations of the MHVAR array, and the results of the location of its epicenter. See comments in Fig. 1

В ситуациях, когда ошибка определения координат эпицентра события значительна, как в случае взрыва 28.12.2018 г. ($M=1.4$), они уточняются с применением дополнительных методов обработки. Например, возможно создание обобщенных волновых форм с применением к ним вейвлет-преобразования [Санина и др., 2016] и последующего использования корреляционного метода волновых форм. Большую помощь в определении координат эпицентра и идентификации источника события может оказать привлечение данных даже от одной сейсмической станции, расположенной на удалении в несколько десятков километров от группы.

Временная локальная сейсмическая сеть Института динамики геосфер РАН

В рамках исследований глубинного строения центральной части Восточно-Европейской платформы в 2017 г. Институтом динамики геосфер РАН были установлены три временных сейсмических пункта, которые оборудованы широкополосными трехкомпонентными датчиками и по настоящее время проводят непрерывную регистрацию сейсмических событий. Расположение станций обусловлено необходимостью построения субширотного профиля для наиболее полного изучения коллизионной зоны тройного сочленения мегаблоков центральной части платформы [Структура..., 2006; Глубинное..., 2010].

Сведения об аппаратном оснащении станций временной сети, их коды и координаты приведены в таблице (далее в тексте при упоминании станций временной сети ИДГ РАН используются их коды, указанные в таблице).

Аппаратурное оснащение и координаты станций временной сети ИДГ РАН

Пункты регистрации	Код станции	Координаты		Датчики	Период, с
		° с.ш.	° в.д.		
“Александровка”	ALX	54.89	35.01	Guralp CMG-6TD	30
“Шатура”	SHAT	55.21	39.97	RefTek 151-60	60
“Воскресенск”	VOSK	55.33	38.88	RefTek 151-60	60

Важное условие оценки качества установки любой сейсмической станции – исследование уровня естественных шумов в месте ее расположения. В 1993 г. в работе [Peter-son, 1993] с привлечением данных большого количества размещенных по всему миру станций были получены оценки параметров спектральной плотности шумов и установлены пределы их вариаций. Для каждой станции временной сети ИДГ РАН оценки спектральной плотности шумов были выполнены по записям, полученным на них в течение первого месяца регистрации. При анализе из непрерывных записей удалялись интервалы, соответствующие по времени землетрясениям и техногенным событиям. Полученные кривые спектральных плотностей шумов (рис. 3) лежат в пределах, установленных в названной выше работе, что позволяет говорить об уверенной регистрации сейсмических событий станциями временной сети ИДГ РАН.

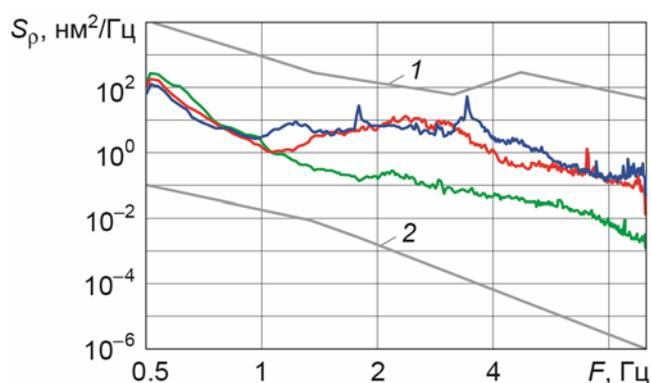


Рис. 3. Распределение спектральной плотности сейсмических шумов, полученное для станций временной сети ИДГ РАН по наблюдениям за первый месяц регистрации: станция ALX (зеленая кривая), станция SHAT (красная), станция VOSK (синяя). Показаны максимальные (кривая 1) и минимальные (кривая 2) допустимые значения этого параметра

Fig. 3. The distribution of the spectral density of seismic noise obtained for stations of the temporary network of the IDG RAS according to observations for the first month of registration: ALX station (green curve), SHAT station (red), VOSK station (blue). The maximum (curve 1) and minimum (curve 2) permissible values of this parameter are shown

Из полученных оценок следует, что наиболее “тихой” является станция ALX (зеленая кривая на рис. 3), что связано, по-видимому, с её установкой в специально организованной геофизической обсерватории на полигоне МГУ “Александровка”. Именно на этой станции в 2017–2019 гг. зарегистрировано максимальное число событий. Более “шумными” оказались станции VOSK (синяя кривая) и SHAT (красная кривая).

Надо отметить, что достаточно высокий уровень шумов в полосе 1.5–5 Гц затрудняет регистрацию, осложняя локацию событий на локальных и региональных расстояниях, но не влияет на регистрацию событий телесеизмических. Пример регистрации одного и того же события группой МНВАР и станциями временной сети ИДГ РАН приведен на рис. 4.

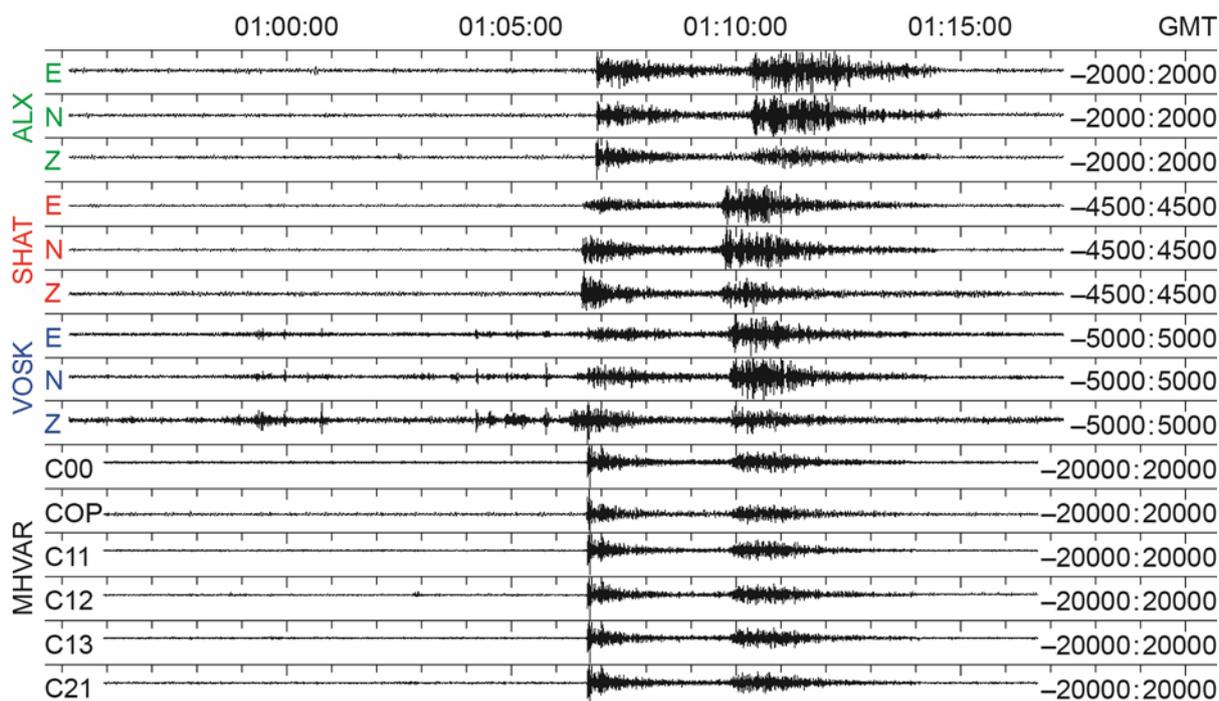


Рис. 4. Волновые формы землетрясения, произошедшего в Туркмении 07.01.2018 г. ($M=4.9$). Представлены записи компонент E, N, Z на станциях временной сети ИДГ РАН и записи Z-компоненты на станциях группы MHVAR. Справа указаны амплитуды в отсчетах: для станций группы MHVAR 1 отсч. – $7.45 \cdot 10^{-3}$ нм/с, для станций сети ИДГ РАН 1 отсч. – 1.261 нм/с

Fig. 4. Wave forms of the earthquake that occurred in Turkmenistan on January 7, 2018 ($M=4.9$). Records of the components E, N, Z at the stations of the temporary network of the IDG RAS and the records of the Z-component at stations of the MHVAR array are presented. The amplitudes are in counts and indicated on the right: for stations of the MHVAR array, 1 count – $7.45 \cdot 10^{-3}$ nm/s, for stations of the network, 1 count – 1.261 nm/s

Землетрясение, записи которого представлены на рис. 4, произошло 07.01.2018 г. с магнитудой 4.9 на берегу Каспийского моря в Туркмении вблизи города Туркменбаши; гипоцентр землетрясения находился на глубине 10 км. Можно видеть, что на записях станций ALX и SHAT первые вступления P - и S -волн выделяются достаточно уверенно. На записях станции VOSK присутствуют значительные техногенные помехи, в связи с чем выделение вступлений P - и S -волн для локации события весьма затруднено.

К сожалению, уровень шумов и техногенных помех на станциях временной сети ИДГ РАН очень высок. Если при таких условиях первые вступления волн от телесеismicких землетрясений с $M > 5$ выделяются достаточно уверенно, то прослеживание вступлений волн при регистрации событий с $M < 3$ часто не представляется возможным.

В качестве примера на рис. 5 представлена запись взрыва, произведенного 24.01.2018 г. ($M=2.8$) в одном из крупнейших карьеров Михайловского горно-обогатительного комплекса, расположенного в Курской области.

Приводимые записи являются отфильтрованными, и на них уверенно выделяются первые вступления P - и S -волн, зарегистрированных станциями группы MHVAR и станцией ALX временной сети ИДГ РАН; на остальных станциях выделение первых вступлений практически невозможно.

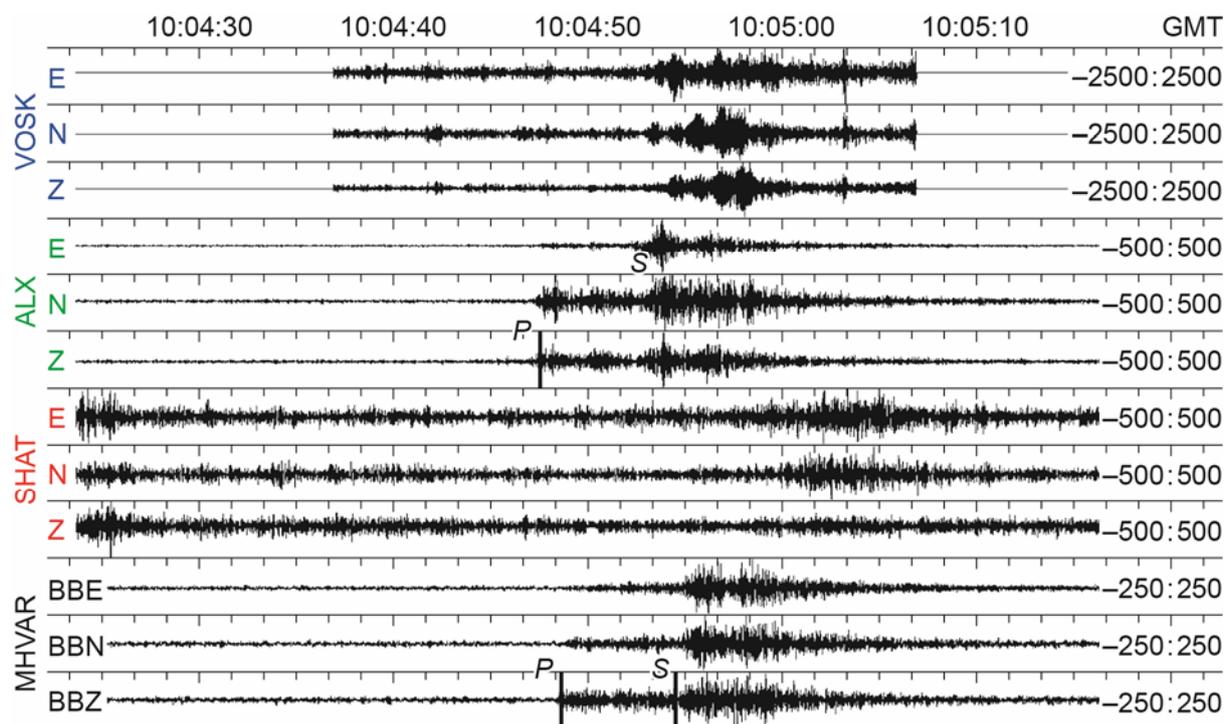


Рис. 5. Волновые формы взрыва, произведенного 24.01.2018 г. ($M=2.8$) в карьере Михайловского горно-обогатительного комбината, Курская обл. На записях станций группы MHVAR и станции ALX отмечены вступления P - и S -волн. Комментарии см. на рис. 4

Fig. 5. Wave forms of the blast produced on January 24, 2018 ($M=2.8$) in the “Mikhailovskiy” quarry, Kursk Region. On the records of stations of the MHVAR array and station ALX, the arrivals of P - and S -waves are marked. See comments in Fig. 4

Рассмотрим более подробно результаты регистрации сейсмических событий в январе 2018 г., когда станции группы MHVAR зарегистрировали 195 сейсмических событий, 66 из которых были промышленными взрывами. Станции временной сети ИДГ РАН в тот же период зарегистрировали 71 событие разной природы. В основном, это были землетрясения на телесеismicких расстояниях с $M>4$, девять событий – землетрясения на региональных расстояниях до 3500 км с $M>2.5$, двадцать – промышленные взрывы на эпицентральных расстояниях 50–500 км с магнитудами 1.1–3.2, которые и были выбраны нами для оценки точности локации сейсмических событий по данным группы MHVAR. Важно, что эти взрывы были зарегистрированы и станциями группы MHVAR, и станциями временной сети ИДГ РАН.

Сначала координаты эпицентров промышленных взрывов были определены только по данным группы MHVAR, после чего было выполнено их переопределение с привлечением данных станций временной сети. Сравнение координат эпицентров, полученных только по данным группы MHVAR, и координат, “переопределенных” с привлечением данных временной сети, показало, что для 15 карьерных взрывов (75 % от всех рассмотренных) расхождение в оценке не превысило 1–2 км, т.е. использование дополнительных данных не привело к существенному улучшению результата. Для пяти взрывов максимальное расхождение в определении координат достигало 9 км. Детальный анализ записей станций группы MHVAR показал значительную зашумленность ($R<1.5$).

Ниже для примера рассматриваются результаты локации эпицентра промышленного взрыва, произведенного 23.01.2018 г. в 9:58:16 GMT на карьере “Хомяково” в Тульской области. Карьер удален от группы МНВАР на 62 км, от станции VOSK на 140 км, от станции ALX на 180 км и от станции SHAT на 182 км (рис. 6). Используемые для совместной обработки волновые формы вместе с результатами локации эпицентра взрыва на карьере “Хомяково” приведены на рис. 7.

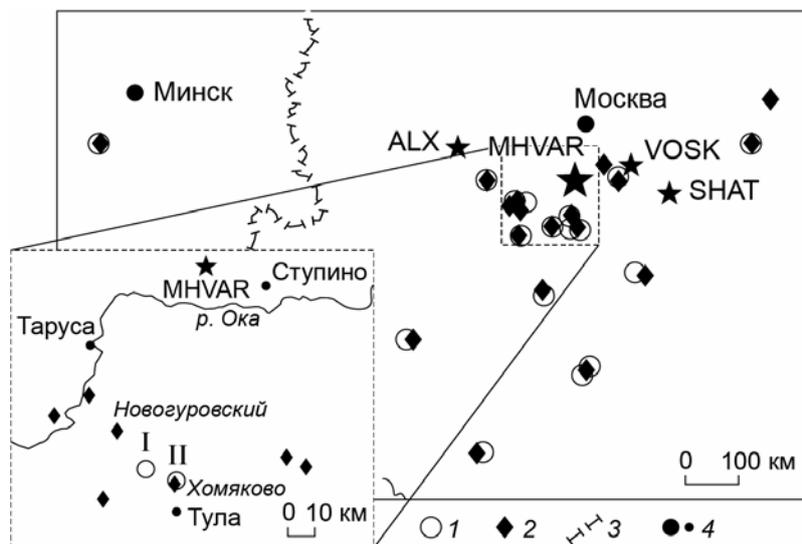


Рис. 6. Схема расположения эпицентров промышленных взрывов, зарегистрированных в январе 2018 г. станциями малоапертурной сейсмической группы “Михнево” (МНВАР – большая звездочка) и временной сети ИДГ РАН (ALX, VOSK, SHAT – малые звездочки): 1 – эпицентры взрывов; 2 – карьеры; 3 – государственная граница Российской Федерации; 4 – населенные пункты. На врезке показаны результаты локации эпицентра события 23.01.2018 г. только по данным группы МНВАР (I) и с привлечением данных станции ALX (II)

Fig. 6. Scheme The of the epicenters of industrial explosions recorded in January 2018 located by the stations of the Mikhnevo small-aperture array (МНВАР – large asterisk) and the temporary network of the IDG RAS (ALX, VOSK, SHAT – small asterisks): 1 – epicenters of blasts; 2 – quarries; 3 – the state border of the Russian Federation; 4 – settlements. The inset shows the results of the location of the epicenter of the event on January 23, 2018 only according to the МНВАР (I) data and with the use of ALX (II) station data

Первоначально обработка проводилась только по записям станций группы МНВАР с применением процедуры *B-F*. Из имеющихся 14 вертикальных каналов семь были исключены в связи с высоким уровнем техногенных помех на их записях. По результатам обработки записей оставшихся каналов были получены координаты эпицентра рассматриваемого взрыва – 54.36° N, 37.41° E. При их сопоставлении с известными координатами эпицентра взрыва 23.01.2018 г. ошибка локации составила 9 км (см. врезку на рис. 6).

Из станций временной сети ИДГ РАН для совместной обработки с записями станций группы МНВАР была выбрана запись с наиболее высоким значением отношения сигнал/шум, полученная на станции ALX. Используемые при совместной обработке волновые формы приведены на рис. 7 вместе с результатами совместной локации эпицентра взрыва на карьере “Хомяково” (на врезке).

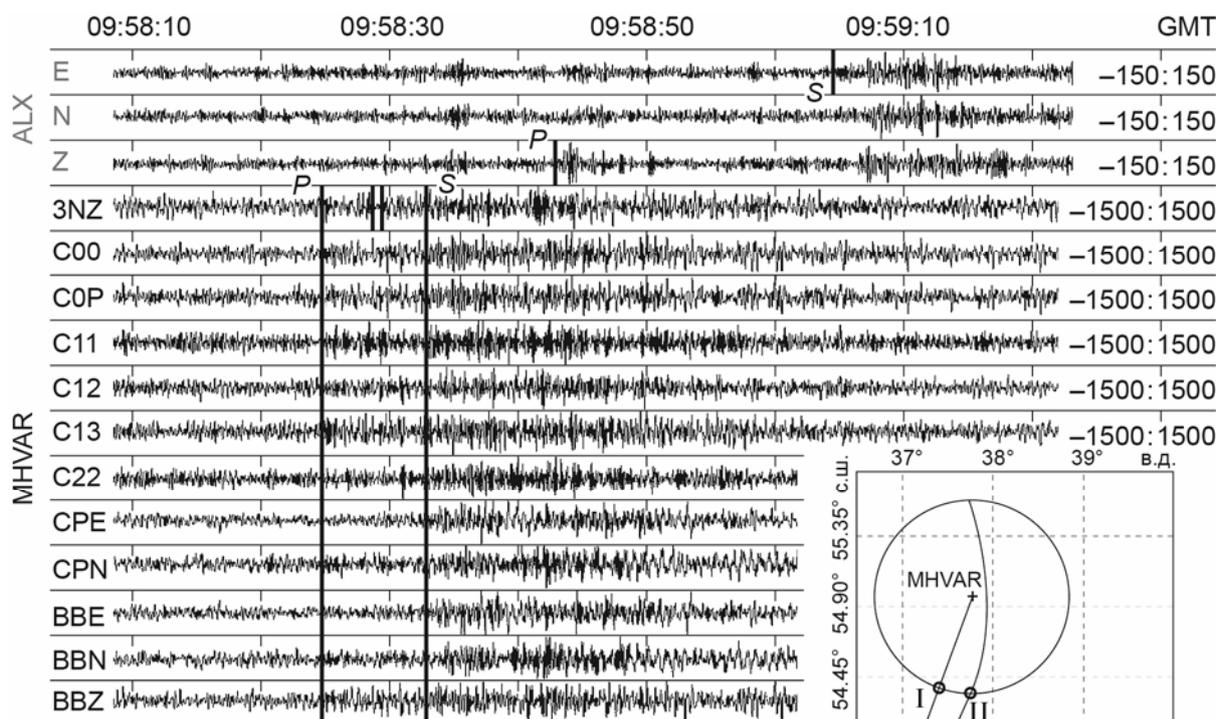


Рис. 7. Карьер “Хомяково”. Волновые формы взрыва 23.01.2018 г. и результаты локации его эпицентра по записям станции ALX и станций группы MHVAR. Для каждой записи слева указаны названия каналов, справа – диапазон измерений амплитуд в отсчетах (для группы MHVAR 1 отсч. – $7.45 \cdot 10^{-3}$ нм/с, для станции ALX 1 отсч. – 1.261 нм/с). На врезке показаны результаты локации эпицентра события только по данным группы MHVAR (I) и с привлечением данных станции ALX (II)

Fig. 7. Quarry “Khomyakovo”. The waveforms of the blast on January 23, 2018 and the results of the location of its epicenter according to records of the ALX station and stations of the MHVAR array. For each record, the names of the channels are indicated on the left, the range of measurements of the amplitudes in counts on the right (for the MHVAR array 1 count – $7.45 \cdot 10^{-3}$ nm/s, the ALX station 1 count – 1.261 nm/s). The inset shows the results of the location of the epicenter of the event only according to the data of the MHVAR (I) array and with the use of ALX (II) station data

Полученные по результатам совместной локации с использованием записей станций группы MHVAR и станции временной сети ALX координаты 54.34° N, 37.62° E хорошо согласуются с координатами, предоставленными администрацией карьера “Хомяково”, – ошибка расчетной локации составила всего 1.5 км. Схема, приводимая на врезке к рис. 6, наглядно демонстрирует, что обработка данных малоапертурной сейсмической группы, дополненных записями всего одной станции временной сети, позволила определить координаты эпицентра события с большей точностью.

Заключение

Представленные в работе исследования убедительно доказывают эффективность использования малоапертурной сейсмической группы для контроля за слабой сейсмичностью на территории центральной части Восточно-Европейской платформы. Здесь следует отметить два аспекта.

1. В отличие от одиночной станции, малоапертурная группа, как правило, регистрирует гораздо большее количество событий. При совпадении волновых форм зарегистрированных событий с имеющимися в базе данных волновыми “портретами” осуществляется однозначная идентификация события.

2. При уверенном выделении вступлений сейсмических волн ($R \geq 2$) малоапертурная группа самостоятельно обеспечивает высокую точность локации эпицентра и последующую ассоциацию события с ближайшим по координатам карьером. Как было показано, точность локации в значительной степени зависит от уровня микросейсмического фона (от отношения сигнал/шум). При низком отношении сигнал/шум ($R \leq 2$) точность локации снижается, и в этом случае данные, получаемые от дополнительной станции, могут быть полезны, но важно, чтобы эта станция была установлена на специальном постаменте в районе с низким уровнем микросейсмических помех.

На наш взгляд, дальнейшее развитие сейсмологических наблюдений в наиболее урбанизированной части Восточно-Европейской платформы должно идти по пути совершенствования методов обработки данных регистрации сейсмических событий. Для малоапертурной сейсмической группы “Михнево” решением этой проблемы должно стать расширение базы волновых форм с увеличением их длительности, включая группу поверхностных волн; создание обобщенных волновых “портретов”, учитывающих изменения формы записи; создание банка данных “характерных” частот для каждого карьера; совершенствование метода кросс-корреляции волновых форм, и использование новых методов выделения сигналов.

Работа выполнена в соответствии с темой НИР № АААА-А19-119022090015-6 и при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-05-00733А).

Литература

- Адушкин В.В., Китов И.О., Константиновская Н.Л., Непеина К.С., Нестеркина М.А., Санина И.А. Обнаружение сверхслабых сигналов на малоапертурной сейсмической антенне “Михнево” с помощью кросс-корреляции волновых форм // Докл. Академии наук. 2015. Т. 460, № 6. С.707.
- Асминг В.Э. Создание программного комплекса для автоматизации, детектирования, локации и интерпретации сейсмических событий и его использование для изучения сейсмичности Северо-Западного региона: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: Институт динамики геосфер Российской академии наук, 2004. 23 с.
- Глубинное строение, эволюция и полезные ископаемые раннедокембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы: Интерпретация материалов по опорному профилю 1-ЕВ, профилям 4В и ТАТСЕЙС. М.: ГЕОКАРТ, ГЕОС, 2010. Вып. 4. Т. 1. 408 с.; Т. 2. 400 с.
- Китов И.О., Волосов С.Г., Кишкина С.Б., Константиновская Н.Л., Непеина К.С., Нестеркина М.А., Санина И.А. Обнаружение региональных фазобъемных сейсмических волн с помощью группы трехкомпонентных датчиков // Сейсмические приборы. 2015. Т. 51, № 1. С.25–45.
- Нестеркина М.А., Константиновская Н.Л., Чулков А.Б., Куликов В.И., Волосов С.Г. Проблемы, возникающие при идентификации источника сейсмического сигнала, связанные с вариациями волновых форм (на примере карьера “Афанасьевский”) // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы XIII Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. С.184–188.
- Санина И.А., Нестеркина М.А., Константиновская Н.Л., Ризниченко О.Ю., Данилова Т.В. Применение вейвлет-анализа для уточнения каталога промышленных взрывов по данным

малоапертурной группы “Михнево” // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы XI Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2016. С.294–298.

Структура и динамика литосферы Восточной Европы. Результаты исследований по программе EUROPROBE. М.: ГЕОКАРТ, ГЕОС, 2006. 736 с.

Peterson J. Observation and modeling of seismic background noise / U.S. Department of Interior, Geological Survey. Open-File Report 93-322. 1993. 91 p.

Sanina I., Gabsatarova I., Chernykh O., Riznichenko O., Volosov S., Nesterkina M., Konstantinovskaya N. The Mikhnevo small aperture array enhances the resolution property of seismological observations on the East European Platform // *Journal of Seismology*. 2012. V. 15. P.545–556.

Сведения об авторах

САНИНА Ирина Альфатовна – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Институт динамики геосфер им. академика М.А. Садовского РАН. 119334, Москва, Ленинский просп., д. 38, корп. 1. Тел.: +7(495) 939-75-82. E-mail: irina@idg.chph.ras.ru

ВОЛОСОВ Сергей Георгиевич – старший научный сотрудник, Институт динамики геосфер им. академика М.А. Садовского РАН. 119334, Москва, Ленинский просп., д. 38, корп. 1. Тел.: +7(495) 939-75-82. E-mail: volosovc@mail.ru

ГОЕВ Андрей Георгиевич – научный сотрудник, Институт динамики геосфер им. академика М.А. Садовского РАН. 119334, Москва, Ленинский просп., д. 38, корп. 1. Тел.: +7(495) 939-75-82. E-mail: andr.goev@gmail.com

КОНСТАНТИНОВСКАЯ Наталия Львовна – научный сотрудник, Институт динамики геосфер им. академика М.А. Садовского РАН. 119334, Москва, Ленинский просп., д. 38, корп. 1. Тел.: +7(495) 939-75-82. E-mail: konstnat@mail.ru

НЕСТЕРКИНА Маргарита Алексеевна – старший научный сотрудник, Институт динамики геосфер им. академика М.А. Садовского РАН. 119334, Москва, Ленинский просп., д. 38, корп. 1. Тел.: +7(495) 939-75-82. E-mail: nes-rita@yandex.ru

ТАРАСОВ Станислав Андреевич – младший научный сотрудник, Институт динамики геосфер им. академика М.А. Садовского РАН. 119334, Москва, Ленинский просп., д. 38, корп. 1. Тел.: +7(495) 939-75-82. E-mail: tarasovidgran@mail.ru

ACCURACY OF EPICENTERS LOCATION OF SEISMIC EVENTS BASED ON “MIKHEVO” SMALL-APERTURE SEISMIC ARRAY DATA. DO ADDITIONAL SEISMIC STATIONS NEEDED?

I.A. Sanina, S.G. Volosov, A.G. Goev, N.L. Konstantinovskaya,
M.A. Nesterkina, S.A. Tarasov

Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. The results of evaluating the accuracy of determining coordinates of the epicenters of seismic events that are registries by small-aperture array Mikhnevo are given. Quarry blasts located in the central part of the East European platform were used as a source of the events. With confident identification of seismic wave arrivals (signal to noise ratio ≥ 2), the small-aperture group independently provides high location accuracy and subsequent association of the event with the nearest quarry in coordinates. It is shown that the accuracy of the loca-

tion strongly depends on the microseismic level, i.e. from signal to noise ratio. With a low signal to noise ratio ($R \leq 2$), the accuracy of the location decreases and in this case, the data received from the additional seismic stations can be useful.

Keywords: East-European craton, temporary seismic network, small-aperture seismic array, waveforms, seismic events.

References

- Adushkin V.V., Kitov I.O., Konstantinovskaya N.L., Nepeina K.S., Nesterkina M.A., Sanina I.A., Detection of ultraweak signals on the Mikhnevo small-aperture seismic array by using cross-correlation of waveforms, *Doklady Earth Science*, 2015, vol. 460, no. 6, pp. 707-709.
- Asming V.E., Creation of a software package for automation, detection, location and interpretation of seismic events and its use to study the seismicity of the North-West region, *Abstract of dissertation for the degree of PhD of physical and mathematical sciences*, Moscow, Institute of Geospheres Dynamics RAS, 2004, 23 p.
- Deep structure, evolution and mineral deposits of the Early Precambrian basement of the East European platform: an interpretation of the data from 1-EU geotraverse, the 4B and Tatseis profiles*, Moscow, GEOKART, GEOS, 2010, vol. 1, 408 p.; vol. 2, 400 p.
- Kitov I.O., Volosov S.G., Kishkina S.B., Konstantinovskaya N.L., Nepeina K.S., Nesterkina M.A., Sanina I.A., Detection of regional phases of seismic body waves using an array of three-component sensors, *Seismic instruments*, 2016, vol. 52, no. 1, pp. 19-31, doi: 10.3103/S0747923916010060
- Nesterkina M.A., Konstantinovskaya N.L., Chulkov A.B., Kulikov V.I., Volosov S.G., Problems arising in identifying the source of a seismic signal associated with variations in waveforms (using the Afanasyevsky quarry as an example), *Modern methods for processing and interpreting seismological data, Materials of the XIII International Seismological School*, 2018, pp. 184-188.
- Peterson J., *Observation and modeling of seismic background noise*, U.S. Department of Interior, Geological Survey. Open-File Report 93-322, 1993, 91 p.
- Sanina I., Gabsatarova I., Chernykh O., Riznichenko O., Volosov S., Nesterkina M., Konstantinovskaya N., The Mikhnevo small aperture array enhances the resolution property of seismological observations on the East European Platform, *Journal of Seismology*, 2012, vol. 15, pp. 545-556.
- Sanina I.A., Nesterkina M.A., Konstantinovskaya N.L., Riznichenko O.Yu., Danilova T.V., The use of wavelet analysis to refine the catalog of industrial explosions according to the Mikhnevo low-aperture group, *Modern methods of processing and interpretation of seismological data, Materials of the XI International Seismological School*, 2016, pp. 294-298.
- Structure and dynamics of the lithosphere of Eastern Europe. Results of studies under the EUROPROBE program*, Moscow: GEOKART, GEOS, 2006. 736 p.