

УДК 550.34.06

А.Г. Гоев¹, И.А. Санина², Н.Л. Константиновская³, О.В. Овчинникова⁴

ВОЗМОЖНОСТИ ИЗУЧЕНИЯ СЛАБОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЫ С ПОМОЩЬЮ НОВОЙ ШИРОКОПОЛОСНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ «АЛЕКСАНДРОВКА»

Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН,
119334, Москва, Ленинский пр-кт, 38, корп. 1

Institute Sadovsky of Geosphere Dynamics RAS,
119334, Moscow, Leninsky prospect, 38-1

Рассмотрены регистрационные возможности новой широкополосной сейсмической станции «Александровка». Установлено, что ее аппаратное обеспечение и условия установки позволяют проводить мониторинг центральной части Восточно-Европейской платформы с целью идентификации событий небольшой магнитуды и уточнения координат лоцируемых событий. Показано, что критерий распознавания генезиса событий, разработанный ранее для малоапертурной сейсмической группы «Михнево», может быть применен к записям одиночной сейсмической станции.

Ключевые слова: природная сейсмичность, малоапертурная группа, карьерные взрывы, распознавание событий.

The registration possibilities of the new broadband seismic station “Aleksandrovka” are considered. It has been established that its hardware and installation conditions make it possible to monitor the central part of the East European craton in order to identify events of small magnitude and to clarify the coordinates of located events. It is shown that the criterion for recognizing the genesis of events, developed earlier for the MSG “Mikhnevo”, can be applied to the records of a single seismic station.

Keywords: natural seismicity, small-aperture array, quarry blasts, event recognition.

Введение. Так как, на территории Восточно-Европейской платформы (ВЕП) практически полностью отсутствует природная сейсмичность, ранее не ставилась задача создания и развития разветвленной сети сейсмических станций. С 2004 г. на базе ИДГ РАН в Подмосковье была создана малоапертурная сейсмическая группа (MSG) «Михнево». Группа успешно решает задачи по регистрации событий на телесеизмических, региональных и техногенных (до 1000 км) расстояниях [Взрывы..., 2013]. Однако существует широкий круг задач геофизики и сейсмологии, для решения которых недостаточно одиночной сейсмостанции или малоапертурной группы (например, задач по определению скоростного строения той или иной тектонической структуры, различий в динамических параметрах сред и т. д.). В связи с этим ставится задача открытия новых сейсмических станций в различных тектонических структурах на ВЕП.

Центральная часть ВЕП — регион с большой антропогенной нагрузкой и развитым промышленным производством. На этой территории действуют десятки карьеров по добыче различных полезных

ископаемых, таких, как известняки, доломиты, железистые кварциты, граниты и т. д., предприятий, ведущих добычу руд с использованием шахтных и массовых взрывов. Зная общее потребление взрывчатых веществ (ВВ) в этой части России, которое составляет около 500 тыс. т/год, поток сейсмической энергии от взрывных работ оценивается величиной $E_{вз} = 4,2 \cdot 10^{13}$ Дж/год. В связи с этим в ряде случаев сейсмические сигналы от взрывных работ принимаются за природные землетрясения, они оказываются помещенными в сейсмологические бюллетени и каталоги, искажая тем самым информацию о реальной природной сейсмичности [Адушкин и др., 2003].

Аппаратурное оснащение и геологические условия. Сейсмическая станция «Александровка» (ALX) установлена 01.10.2017 на полигоне геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и начала регистрацию сейсмических событий на территории национального парка «Угра», расположенного в Юхновском районе Калужской области (координаты станции 54.89^0 с. ш., 35.01^0 в. д.). Станция укомплектована широкополосным датчиком Guralp 6TD с максимальным периодом регистрации

¹ Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, ст. науч. с., канд. физ.-мат. н.; e-mail: andr.goev@gmail.com

² Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, гл. науч. с., докт. физ.-мат. н.; e-mail: iasanina51@gmail.com

³ Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, науч. с.; e-mail: konstnat@list.ru

⁴ Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, вед. инженер; e-mail: olgaovtch@mail.ru



Рис. 1. Место установки сейсмической станции: *а* — немагнитный павильон, *б* — постаменты для установки оборудования

30 с и регистратором RefTek 130. Аппаратура установлена в геофизической немагнитной обсерватории на территории базы в удалении от жилых объектов (рис. 1). Однако место установки — не специально подготовленный сейсмический бункер или шахта, что может сказаться на шумовой составляющей сейсмических записей. Для определения приемлемости уровня естественных шумов на станции ALX был применен стандартный подход сопоставления уровня зарегистрированного сейсмического шума с данными мировой сети [Peterson, 1993]. Для этого по непрерывной сейсмограмме за первый месяц регистрации после удаления записей природных и техногенных событий выполнены оценки спектральной плотности шума. Затем эти оценки были сопоставлены с максимальными и минимальными значениями, описанными в работе [Peterson, 1993] (рис. 2). На основе полученных результатов можно сделать вывод о кондиционности условий установки станции ALX и возможности уверенной регистрации сейсмических колебаний в широком диапазоне частот.

С тектонической точки зрения станция расположена в переходной зоне от Московской синеклизы к Воронежской антеклизе (в Калужско-Бельской структурной зоне). Эти структуры входят в состав Восточно-Европейской платформы. Осадочный слой в районе расположения станции имеет мощность около 1000 м и представлен разновозрастными отложениями глин, песков, песчаников, аргиллитов и т. д. Фундамент сложен преимущественно кристаллическими сланцами и гнейсами протерозойского и архейского возраста. Александровский полигон расположен на оси Западно-Двинско-Калужского подвижного пояса [Геологический атлас., 2007], охватывающего территории Тульской, Калужской и существенную часть Смоленской области и находится в вытянутой зоне шириной около 20–30 км северо-западного простирания. Эта структура ограничена серией согласно лежащих глубинных разломов протяженностью 160–200 км (рис. 3) [Петров, 2003].

С точки зрения древних тектонических структур, слагающих ВЕП, станция ALX расположена

в Осницко-Микашевичском вулканическом поясе, сложенном преимущественно диоритами и габбро и рассматриваемом как активная северо-западная окраина мегаблока Сарматия [Claesson et al., 2001]. Эта геологическая структура состоит из нескольких архейских провинций с различным геологическим возрастом от 3,5 до 2,7 млрд лет [Bogdanova et al., 2016]. Очевидно, что полигон геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова «Александровка» расположен в важнейшем с геологической точки зрения месте, и анализ записей сейсмостанции ALX дает возможность уточнить не только параметры локальных сейсмических событий, но и дать оценку скоростной структуры древней платформенной области. Такие оценки позволят сделать новые выводы об эволюции и геодинамике ВЕП.

Методика обработки. В течение месяца станция «Александровка» регистрирует более 80 событий различной природы: землетрясения на телесеизмических и региональных расстояниях, а также промышленные взрывы, производимые на карьерах в Курской, Тульской и Калужской областях. Составляется каталог, в котором отражаются координаты события, время в очаге, магнитуда, времена прихода волн P и S . Пример типичных волновых форм события, зарегистрированного станцией «Александровка», приведен на рис. 4. Отчетливо видны первые вступления волн P и S , что позволяет уверенно лоцировать это событие.

Как упоминалось выше, основные регистрируемые события на ВЕП — промышленные взрывы на многочисленных карьерах по добыче разнообразных полезных ископаемых (известняки, доломиты, железистые кварциты и др.) Поэтому наибольший интерес представляют регистрация и идентификация карьерных взрывов, находящихся на различных эпицентральных расстояниях от станции «Александровка».

В качестве примера, на рис. 5 приведены записи промышленного взрыва на карьере Михайловского ГОКа, расположенного на расстоянии 290 км от станции наблюдения. Записи четкие, хорошо видны вступления волн P и S , а также поверхностной волны Lg , отношения сигнал/шум составляют более 3, что поз-

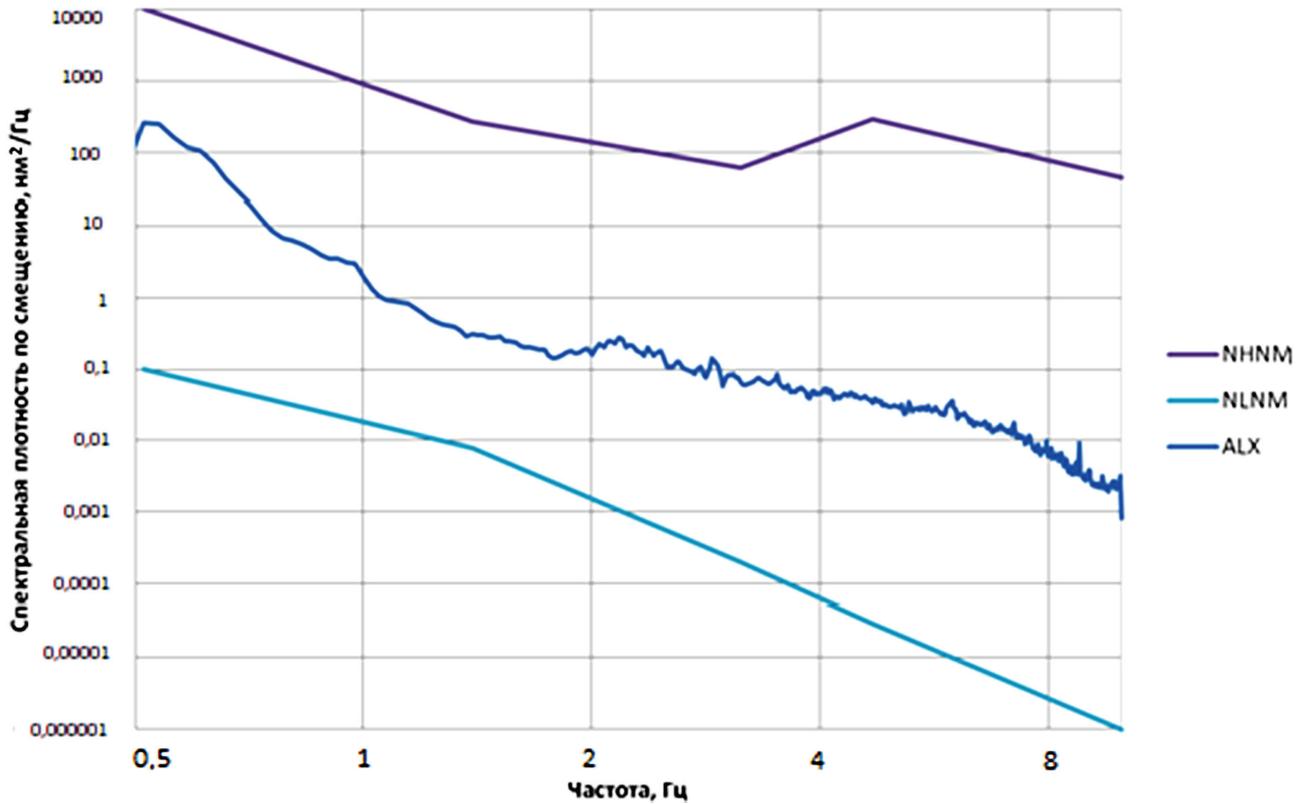


Рис. 2. Спектральная плотность сейсмического шума для станции ALX по данным, полученным за первый месяц регистрации. NLNM и NHNM — минимальные и максимальные допустимые значения сейсмического шума, по [Peterson, 1993]

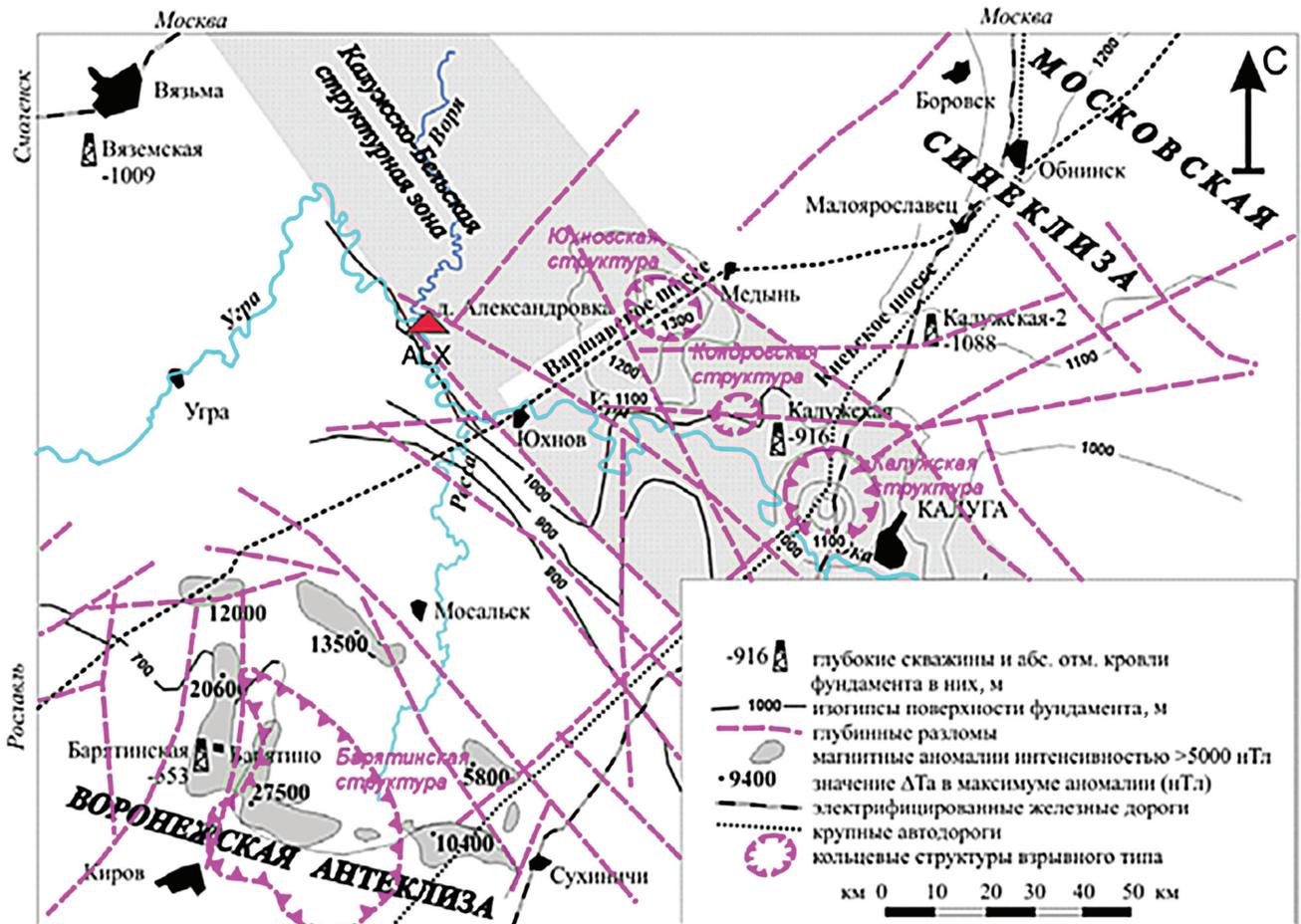


Рис. 3. Структурная карта поверхности кристаллического фундамента, по [Петров, 2003]. Красным треугольником отмечено положение станции «Александровка» (ALX)

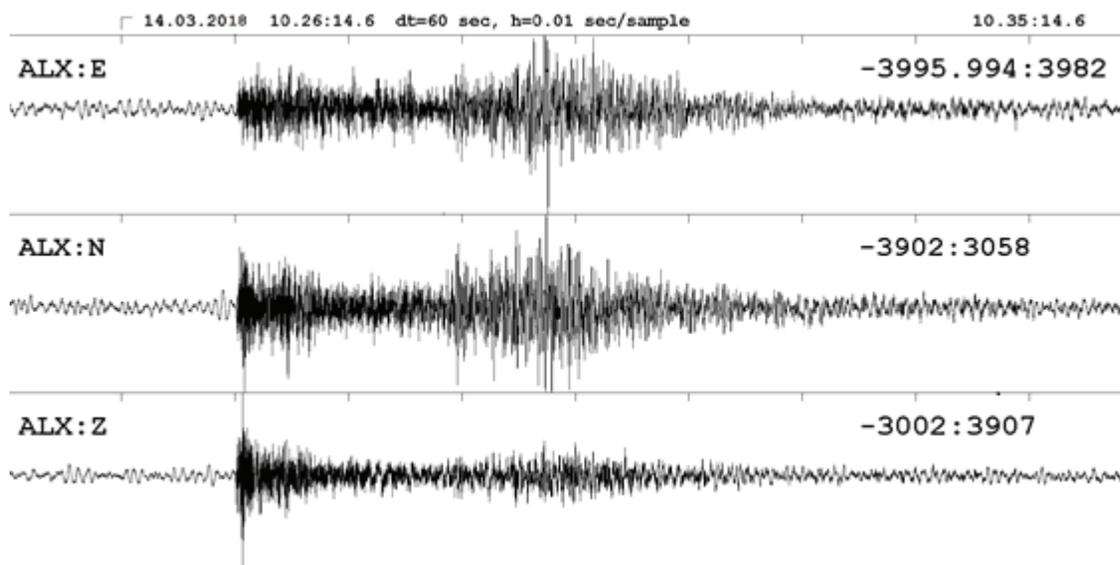


Рис. 4. Волновые формы землетрясения, произошедшего в Румынии 14.03.2018, зарегистрированные станцией «Александровка» (ALX): $T_0=10:24:48$ (GMT), $R=1167$ км, $mb=4,6$

воляет уверенно лоцировать это событие. На рис. 6 приведены записи волновых форм от взрыва на карьере Бронцы, расположенного на расстоянии 125 км от станции наблюдения. На рис. 6 хорошо видно, что на нефильтрованных записях найти первые вступления волн P и S невозможно. Требуется применять фильтрацию для идентификации события. Большое количество записей, полученных от промышленных взрывов, осложнены микросейсмическим шумом, что может сказаться на точности локации.

Проанализированы отношения сигнал/шум. Окно для шума составляло 20 с, для сигнала — 5 с. Результаты анализа приведены в табл. 1.

Как видно из данных табл. 1, наибольшее соотношение R характерно для взрывов на карьере Михайловского ГОКа, несмотря на его удаленность от места регистрации. Как показано в работе [Адушкин и др., 2013], взрывы производятся с большой мощностью заряда взрывчатого вещества (ВВ), около 500–1800 т.

Таблица 1

Отношения сигнал/шум, рассчитанные для промышленных взрывов, зарегистрированных на станции «Александровка».

Дата	Время в очаге (GMT)	Регион	Амплитуда (в отсчетах)		Отношение сигнал/шум, R
			сигнал	шум	
27.02.2018	08:59:52	Михайловский ГОК	3288	708	4,64
14.03.2018	09:25:55	Михайловский ГОК	2554	584	4,37
03.04.2018	09:09:49	Михайловский ГОК	2644	818	3,23
20.10.2017	10:56:49	Машково	1100	907	1,21
24.10.2017	08:45:55	Пятовский	1288	778	1,63
08.11.2017	09:10:38	Пятовский	1963	1912	1,03
17.11.2017	10:18:55	Машково	4797	2527	1,90
19.02.2018	10:28:57	Бронцы	1133	828	1,37
05.12.2017	10:35:11	Машково	2703	1900	1,42
13.12.2017	09:46:37	Пятовский	1276	970	1,32

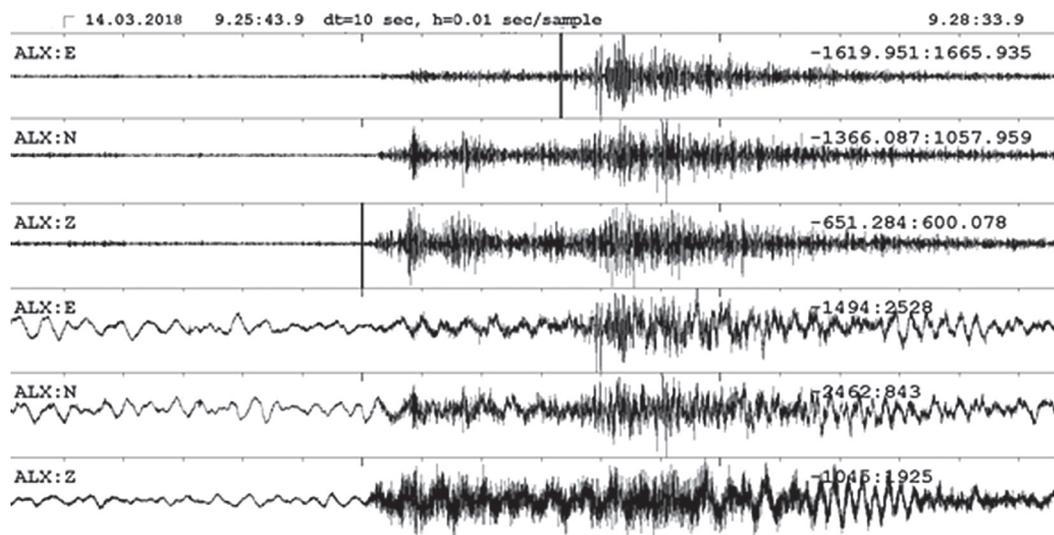


Рис. 5. Волновые формы от промышленного взрыва на карьере Михайловского ГОКа, расположенного в Курской области, зарегистрированные станцией «Александровка» (ALX) 14.03.2018, $T_0=09:25:55$ (GMT), $R=290$ км, $ml=2,8$. Верхние три канала фильтрованы в диапазоне 1–10 Гц. Нижние три — нефильтрованная запись. Указаны первые вступления волн P и S

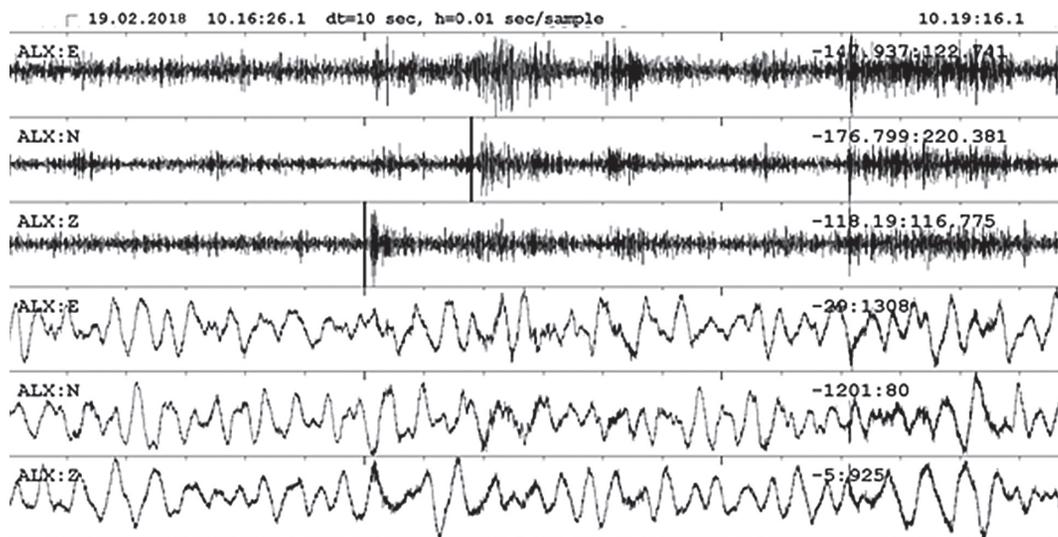


Рис. 6. Волновые формы от промышленного взрыва на карьере Бронцы, расположенного в Тульской области, зарегистрированные станцией «Александровка» (ALX) 19.02.2018: $T_0=10:16:54$ (GMT), $R=125$ км, $m_l=1,5$. Верхние три канала фильтрованы в диапазоне 1–10 Гц. Нижние три — нефильтрованная запись. Указаны первые вступления волн P и S

По результатам анализа записи рассчитаны амплитудные спектры отрезков сейсмограмм, содержащих волны P и Lg , а также спектры участков записи сейсмического шума. Спектр рассчитывали с использованием быстрого преобразования Фурье со сглаживанием. Для расчета спектра P -волны взят 5-секундный временной интервал от начала вступления; для расчета спектра шума — 20-секундный временной интервал до вступления P -волны; для расчета спектра Lg -волны — теоретический временной интервал, который рассчитывался следующим образом $\Delta/3,6 < t < \Delta/3,2$, где Δ — эпицентральный расстояние, км.

На рис. 7 приведен пример спектрального состава сигнала волн P , Lg и шума. Видно, что спектральная амплитуда полезного сигнала намного превышает спектральную амплитуду шума.

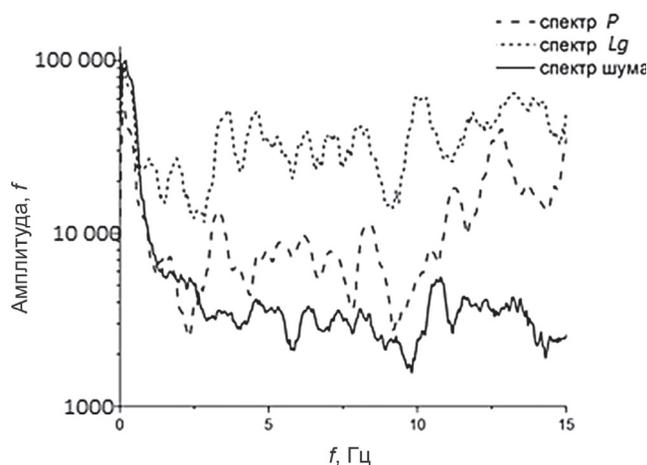


Рис. 7. Спектры волн P , Lg и шума от промышленного взрыва на карьере Михайловского ГОКа, расположенного в Курской области (14.03.2018), которые зарегистрированы станцией «Александровка» (ALX): $T_0=09:25:55$ (GMT), $R=290$ км, $m_l=2,8$

При анализе спектральный состав сигналов волн P , Lg и шума, полученные от взрыва на карьере Бронцы (рис. 8), расположенного на расстоянии 125 км от станции наблюдения, видно, что спектры волн фактически сливаются. Одной из возможных причин низкого отношения сигнал/шум может быть то, что основная трасса сейсмического луча проходит ниже границы Мохо, разделяющей мантию и достаточно неоднородную земную кору (рис. 3).

Применимость критерия для идентификации событий на станции «Александровка». Ранее было показано, что хорошо известный критерий $\lg(A_p(f)/A_{lg}(f))$ [Санина и др., 2020] имеет еще одну особенность, которая весьма полезна для идентификации событий. Установлено, что распределение логарифма отношений амплитудных спектров $\lg(A_p(f)/A_{lg}(f))$ волн P и Lg относительно частоты колебаний имеет

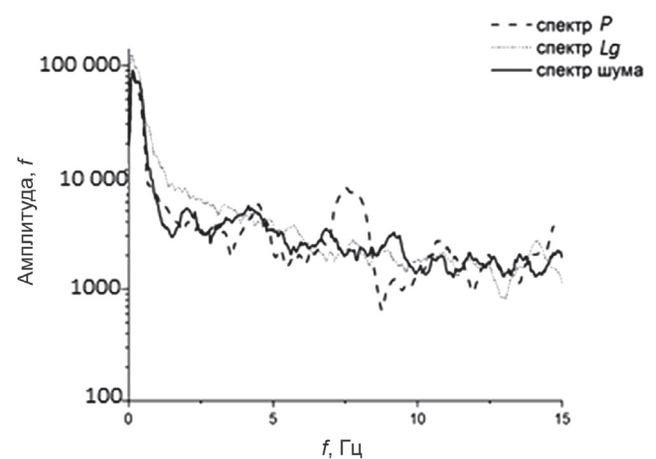


Рис. 8. Спектры волн P , Lg и шума от промышленного взрыва на карьере Бронцы, расположенного в Тульской области (19.02.2018), зарегистрированные станцией «Александровка» (ALX): $T_0=10:16:54$ (GMT), $R=125$ км, $m_l=1,5$

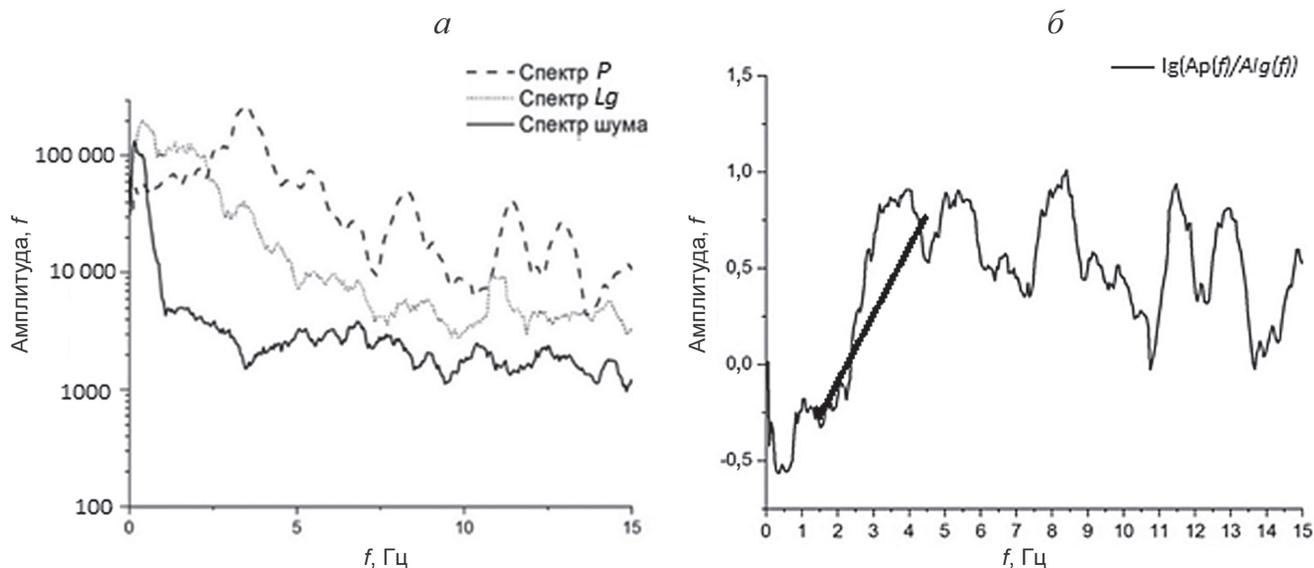


Рис. 9. Спектры волн *P*, *Lg* и шума (*a*) и логарифм отношения амплитудных спектров $\lg(A_p(f)/A_lg(f))$ (*б*) для землетрясения, произошедшего в Румынии 14.03.2018, которое зарегистрировано станцией «Александровка» (ALX): $T_0=10:24:48$ (GMT), $R=1167$ км, $mb=4,6$. Положительный тренд на участке 1,5–4,5 Гц показан жирной черной линией

определенный тренд, аппроксимирующий функцию возрастания или убывания, и этот тренд различен для взрывов и землетрясений. Этот критерий показал эффективность для наблюдений на группе МСГ «Михнево». [Санина и др., 2020].

В качестве примера рассмотрим его применимость для станции «Александровка» к записям зарегистрированных сейсмических событий. Пример — землетрясение в Румынии, произошедшего 14.03.2018. Результаты обработки приведены на рис. 9, можно заметить ярко выраженный положительный тренд на участке 2–5 Гц.

Рассмотрим применение этого критерия для идентификации промышленных взрывов, предполагая, что он должен быть отрицательным. На рис. 10 приведен логарифм отношения амплитудных спектров $\lg(A_p(f)/A_lg(f))$ от взрыва на карьере

Михайловского ГОКа 14.03.2018, расположенного в Курской области. Выделяется отрицательный тренд на участке 2–5 Гц.

Однако далеко не на всех анализируемых записях карьерных взрывов удается выявить ожидаемый отрицательный тренд. Это хорошо видно на рис. 11, показывающем отношение амплитудных спектров $\lg(A_p(f)/A_lg(f))$ от промышленного взрыва на карьере Бронцы.

Результаты использования этого критерия приведены в табл. 2.

Как видно из данных табл. 2, положительный коэффициент тренда сохраняется для землетрясений, однако предполагаемый отрицательный тренд для взрывов наблюдается не всегда. Неустойчивость знака тренда в значительной степени объясняется низким отношением сигнал/шум.

Таблица 2

Уравнения линейного тренда в частотном диапазоне 2–5 Гц для взрывов и землетрясений, зарегистрированных на станции «Александровка»

Дата	Время в очаге (GMT)	<i>R</i> , км	Природа	Регион	<i>ml</i>	Уравнение тренда	
14.03.2018	10:24:48	1167	землетрясение	Румыния	4,6	$y=0,27946x-0,41138$	
08.10.2017	01:49:38	1167			4,0	$y=0,27825x-0,83671$	
15.11.2017	19:48:00	1857		Восточный Кавказ	5,6	$y=0,26146x-0,42378$	
27.02.2018	08:59:52	290	взрыв	Михайловский ГОК	2,7	$y=0,0259x-0,76645$	
14.03.2018	09:25:55	290			2,8	$y=-0,08012x-0,37029$	
03.04.2018	09:09:49	290			2,7	$y=0,2295x-1,24371$	
20.10.2017	10:56:49	183		Машково	1,3	$y=0,0634x-0,26488$	
24.10.2017	08:45:55	71		Пятовский	1,4	$y=0,08221x-0,07016$	
08.11.2017	09:10:38	72	1,4		$y=0,05795x-0,17126$		
17.11.2017	10:18:55	188	взрыв	Машково	1,1	$y=0,00713x+0,12482$	
19.02.2018	10:16:54	125		Бронцы	1,5	$y=0,12298x-0,58084$	
05.12.2017	10:35:11	187		Машково	1,4	$y=-0,02388x-0,06624$	
13.12.2017	09:46:37	71			Пятовский	1,4	$y=0,09733x-0,42374$

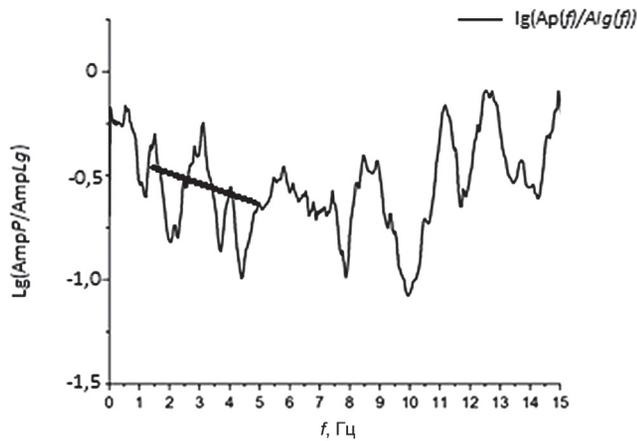


Рис. 10. Логарифм отношения амплитудных спектров $\lg(A_p(f)/A_lg(f))$ от промышленного взрыва на карьере Михайловского ГОКа, расположенного в Курской области (14.03.2018), зарегистрированные станцией «Александровка»: $T_0=09:25:55$ (GMT), $R=290$ км, $m_l=2,8$. Черной жирной линией показан отрицательный тренд на участке 1,5–5,5 Гц

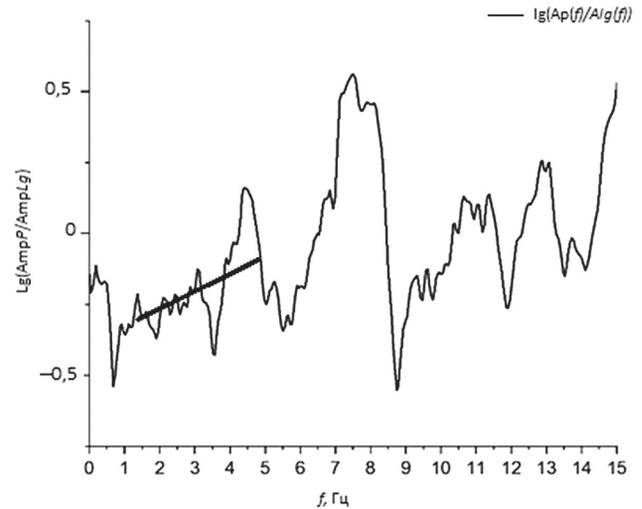


Рис. 11. Логарифм отношения амплитудных спектров $\lg(A_p(f)/A_lg(f))$ от промышленного взрыва на карьере Бронцы (19.02.2018), который расположен в Тульской области, зарегистрированные станцией «Александровка»: $T_0=10:16:54$ (GMT), $R=125$ км, $m_l=1,5$. Черной жирной линией показан положительный тренд на участке 1,5–5 Гц

Результаты исследований и их обсуждение.

Один из возможных факторов, влияющих на то, что рассматриваемый критерий не всегда проявлен при анализе данных на станции «Александровка», — место ее установки. Несмотря на хорошие условия (специально подготовленный постамент, удаленность от жилых объектов), станция расположена на поверхности земли. В то же время на МСГ «Михнево» расчеты проводились для трехкомпонентного датчика ВВ(E, N, Z), расположенного в шахте на глубине 20 м.

В качестве примера рассмотрим записи карьерных взрывов, зарегистрированные малоапертурной группой «Михнево». Для сравнения регистрационных возможностей станции ALX, расположенной на поверхности земли, мы взяли записи трехкомпонентных датчиков, расположенных также на поверхности 3S(E, N, Z) в составе группы.

На рис. 12 продемонстрировано, насколько записи трехкомпонентных датчиков, входящих в группу

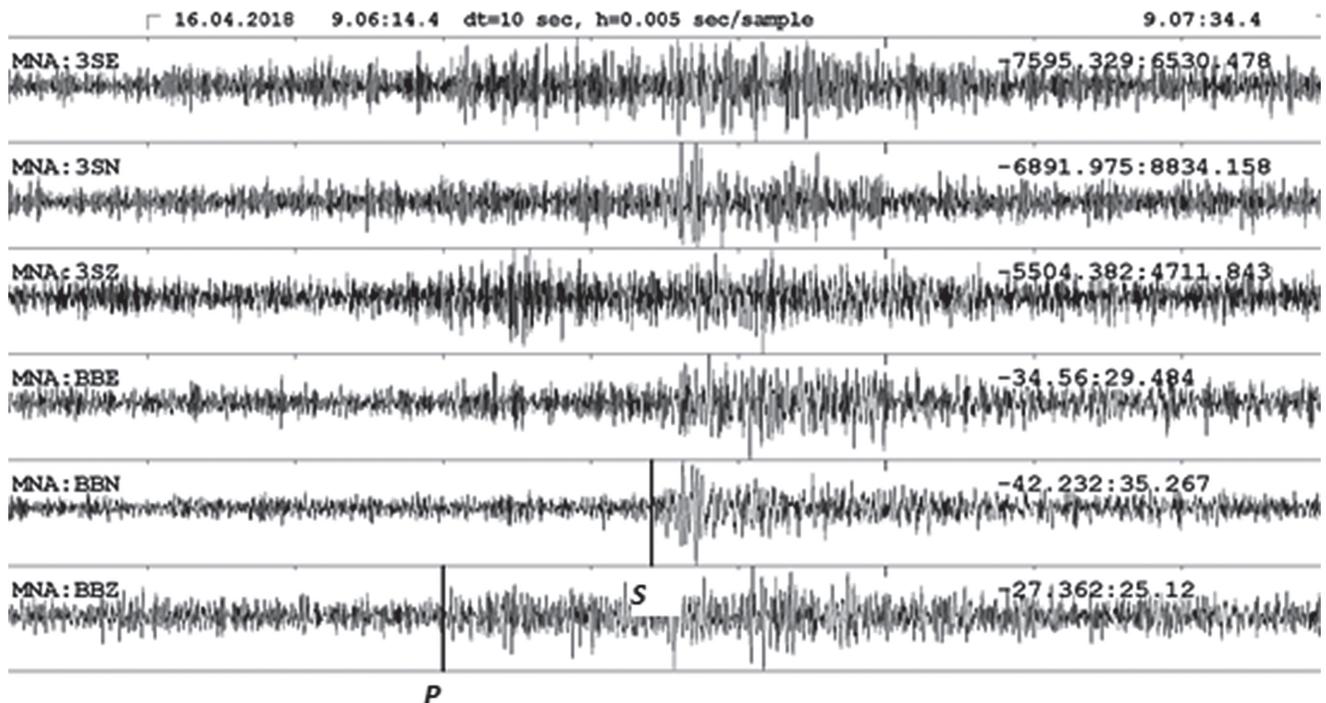


Рис. 12. Пример записи взрыва на карьере «Пятковский» (16.04.2018) в Калужской области, зарегистрированного группой «Михнево»: $T_0=09:06:16$ (GMT), $R=109$ км, $m_l=1,3$. Верхние три трассы — запись трехкомпонентным прибором, расположенным на поверхности земли, три нижние — запись прибором, расположенным в шахте. Отмечены вступления волн P и S, записи фильтрованы в диапазоне 1–10 Гц

«Михнево» на поверхности, отличаются по информативности от записей, полученных на центральном приборе ВВ(Е, N, Z).

Как хорошо видно на рис. 12, на записях трехкомпонентной станции 3S(Е, N, Z), расположенной на поверхности и входящей в малоапертурную группу «Михнево», с большим трудом, а иногда и просто невозможно, определить вступления волн P и S , и тем самым произвести локацию события. В то же время записи, полученные на станции ALX, при регистрации локальных событий по степени зашумленности аналогичны записям на МСГ «Михнево», а в некоторых случаях даже более информативны

и используются для уточнения локации некоторых событий [Санина и др., 2020].

Заключение. Несмотря на то что установка станции «Александровка» предполагала ее использование для исследования телесеismicких записей, ее регистрационные возможности позволяют проводить мониторинг части ВЕП с целью распознавания событий небольшой магнитуды и уточнения координат лоцируемых событий совместно с МСГ «Михнево».

Финансирование. Работа выполнена по теме НИР (АААА-А19-11022090015-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Адушкин В.В. Сейсмичность взрывных работ на территории европейской части России // Физика Земли. 2013. № 2. С. 110–130.

Взрывы и землетрясения на территории европейской части России / Под ред. В.В. Адушкина, А.А. Маловичко. М.: ГЕОС, 2013. С. 287–342.

Геологический атлас Калужской области / Сост. В.С. Бобров. Калуга, 2007. 70 с.

Петров В.Г. Геологическое строение и полезные ископаемые Калужской области. Калуга: ИД «Эйдос», 2003. 440 с.

Санина И.А., Волосов С.Г., Гоев А.Г и др. Точность локации и эпицентров seismicких событий по данным малоапертурной seismicкой группы «Михнево»: нужны ли дополнительные seismicкие станции? // Геофизические исследования. 2020. Т. 21, № 2. С. 48–60.

Санина И.А., Нестеркина М.А., Константиновская Н.Л., Габсатарова И.П. Распознавание природы seismicких источников на Восточно-Европейской платформе, регистрируемых малоапертурной seismicкой группой «Михнево» на региональных расстояниях // Seismicкие приборы. 2020. Т. 56, № 2. С. 56–76.

Bogdanova S.V., Gorbatshev, R., Garetsky, R.G. EUROPE East European Craton // Reference Module in Earth Systems and Environ. Scie. Elsevier, 2016.

Claesson S., Bogdanova S.V., Bibikova E.V., Gorbatshev R. Isotopic evidence of Paleoproterozoic accretion in the basement of the East European Craton // Tectonophysics. 2001. Vol. 339, N 1–2. P. 1–18.

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

Поступила в редакцию 24.06.2021

Поступила после доработки 30.06.2021

Принята к публикации 13.12.2021