

УДК 550.348; 504.058

ВОЗМОЖНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕХНОГЕННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ НА ГЕОЛОГИЧЕСКУЮ СРЕДУ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЫ ПО ДАННЫМ МАЛОАПЕРТУРНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ГРУППЫ «МИХНЕВО»

Наталия Львовна Константиновская^{1✉}, Андрей Георгиевич Гоев²,
Татьяна Валерьевна Данилова³

¹ Институт динамики геосфер имени М.А. Садовского РАН, Москва, Россия; konstnat@list.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9701-5641>

² Институт динамики геосфер имени М.А. Садовского РАН, Москва, Россия; andr.goev@gmail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9477-5963>

³ Институт динамики геосфер имени М.А. Садовского РАН, Москва, Россия; danilova.tv@bk.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5260-8294>

Аннотация. Обобщены результаты многолетних наблюдений за природной и техногенной сейсмичностью на Восточно-Европейской платформе (ВЕП) по данным малоапертурной сейсмической группы (MSG) «Михнево» ИДГ РАН. Показано, что на этой территории доминирует техногенная сейсмичность. Приведены описания волновых форм от взрывов на крупнейших карьерах Белгородской и Курской областей. Особое внимание уделено оценке энергии от взрывов, производимых на многочисленных сравнительно небольших карьерах, расположенных в центральной части ВЕП. Дана энергетическая оценка суммарного техногенного воздействия на среду. Показаны результаты регистрации и локации природно-тектонических событий, произошедших на территории центральной части ВЕП, ранее считавшейся асейсмичной. Отмечено отрицательное воздействие на территории, расположенные вблизи действующих карьеров, от образующихся пылегазовых выбросов при проведении буровзрывных и иных работ по добыче полезных ископаемых.

Ключевые слова: карьерные взрывы, техногенное воздействие, экологические последствия, волновые формы, распознавание событий

Для цитирования: Константиновская Н.Л., Гоев А.Г., Данилова Т.В. Возможные последствия техногенных сейсмических событий на геологическую среду центральной части Восточно-Европейской платформы по данным малоапертурной сейсмической группы «Михнево» // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022. № 6. С. 95–109.

POSSIBLE CONSEQUENCES OF THE TECHNOGENIC SEISMIC IMPACT ON GEOLOGICAL ENVIRONMENT OF THE CENTRAL PART OF EAST EUROPEAN CRATON FROM THE SMALL-APERTURE SEISMIC GROUP «MIKHNEVO»

Natalia L. Konstantinovskaya^{1✉}, Andrey G. Goev², Tatiana V. Danilova³

¹ Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of RAS, Moscow, Russia; konstnat@list.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9701-5641>

² Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of RAS, Moscow, Russia; andr.goev@gmail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9477-5963>

³ Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of RAS, Moscow, Russia; danilova.tv@bk.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5260-8294>

Abstract. The results of natural and man-made seismicity long-term observations on the Eastern European Platform (EEP) according to the data of the small-aperture seismic group (MSG) “Mikhnevo” IDG RAS are summarized. It is shown that technogenic seismicity is dominant in this area. Descriptions of wave forms from blasts at the largest quarries of the Belgorod and Kursk regions are given. Special attention to the assessment of energy from explosions produced at numerous relatively small quarries located in the central part of the EEP is paid. The energy assessment of the total technogenic impact on the environment is given. The results of registration and location of natural-tectonic events that occurred on the territory of the central part of the EEP, previously considered aseismic, are shown. The negative impact on the territories located near the existing quarries from the resulting dust and gas emissions during drilling and blasting and other mining operations was noted.

Key words: quarry blast, technogenic impact, environmental consequences, wave forms, event recognition

For citation: Konstantinovskaya N.L., Goev A.G., Danilova T.V. Possible consequences of the technogenic seismic impact on geological environment of the central part of East European craton from the small-aperture seismic group «Mikhnevo». *Moscow University Geol. Bull.* 2022; 6: 95–109. (In Russ.).

Введение. Традиционно Восточно-Европейская платформа (ВЕП) считалась асейсмичной зоной, поэтому целенаправленные исследования, позволя-

ющие выявлять слабую тектоническую активность, не проводились. Но возрастающий темп мирового экономического роста привел к качественным из-



Рис. 1. Массовый взрыв на карьере Лебединского ГОКа

менениям баланса взаимоотношений человека и природы в глобальном масштабе.

На ВЕП расположено множество объектов, весьма чувствительных к тектоническим движениям земной коры. Это действующие и строящиеся атомные электростанции, горнодобывающие комплексы, предприятия нефтегазовой промышленности, высотные здания, туннельные и высотные сооружения различного назначения и т. д.

Малоапертурная сейсмическая группа (МСГ) «Михнево» была установлена Институтом динамики геосфер РАН в 2004 г. для непрерывного мониторинга геодинамической активности ВЕП. Основной задачей группы были регистрация и локация слабых сейсмических событий с магнитудой $M_L \geq 1,5$ для оценки природной и техногенной тектонической активности [Санина и др., 2008, 2009].

Более чем за 17 лет наблюдений собрана уникальная база волновых форм (так называемые портреты типовых записей взрывов от известных карьеров), что позволяет точно определить координаты событий и идентифицировать их, а также связать волновую форму с технологией взрывных работ.

Материалы и методы исследования. МСГ «Михнево» за год регистрирует около 1000 взрывов, производимых на более чем 40 промышленных карьерах, расположенных на расстоянии от 60 до 500 км. Многолетний опыт работы группы свидетельствует о том, что сейсмические сигналы от взрывных работ на карьерах регистрируются намного чаще, чем сигналы от природных землетрясений, произошедших в пределах центральной части ВЕП [Алешина и др., 2018].

Помимо многочисленных относительно небольших карьеров по добыче известняка, доломитов и

других полезных ископаемых, регистрируемых только МСГ, в центральной части ВЕП сосредоточены крупнейшие в Европе карьеры, взрывы от которых также регистрируются и другими сейсмическими станциями.

Особое место среди них занимают предприятия, занимающиеся разработкой Курской магнитной аномалии (КМА). К ее железорудному бассейну относятся центральные части Курской, Белгородской, частично Орловской, Брянской и Воронежской областей. Месторождения, участки и залежи железных руд (железистых кварцитов) сосредоточены на площади около 70 тыс. км². Разведанные запасы руды оцениваются в 30 млрд т. Железная руда в этом районе разрабатывается различными способами, в том числе открытым на месторождениях Лебединское, Стойленское и Михайловское. МСГ «Михнево» регулярно регистрирует взрывы, производимые на этих карьерах.

Рассмотрим самые крупные предприятия, производящие наиболее мощные взрывные работы и, как следствие, оказывающие наибольшее отрицательное воздействие на окружающую среду и в целом на экологию региона.

Карьер Лебединского горно-обогатительного комбината (ГОКа). Лебединский ГОК — крупнейшее в СНГ предприятие по добыче и обогащению железной руды, производству высококачественного железорудного сырья и металлоресурсов (рис. 1).

Разработка месторождения ведется открытым способом. Только в 2020 г. предприятие произвело более 750 млн т железорудного концентрата. Лебединский ГОК включает три обогатительные фабрики. Глубина карьера составляет около 600 м,

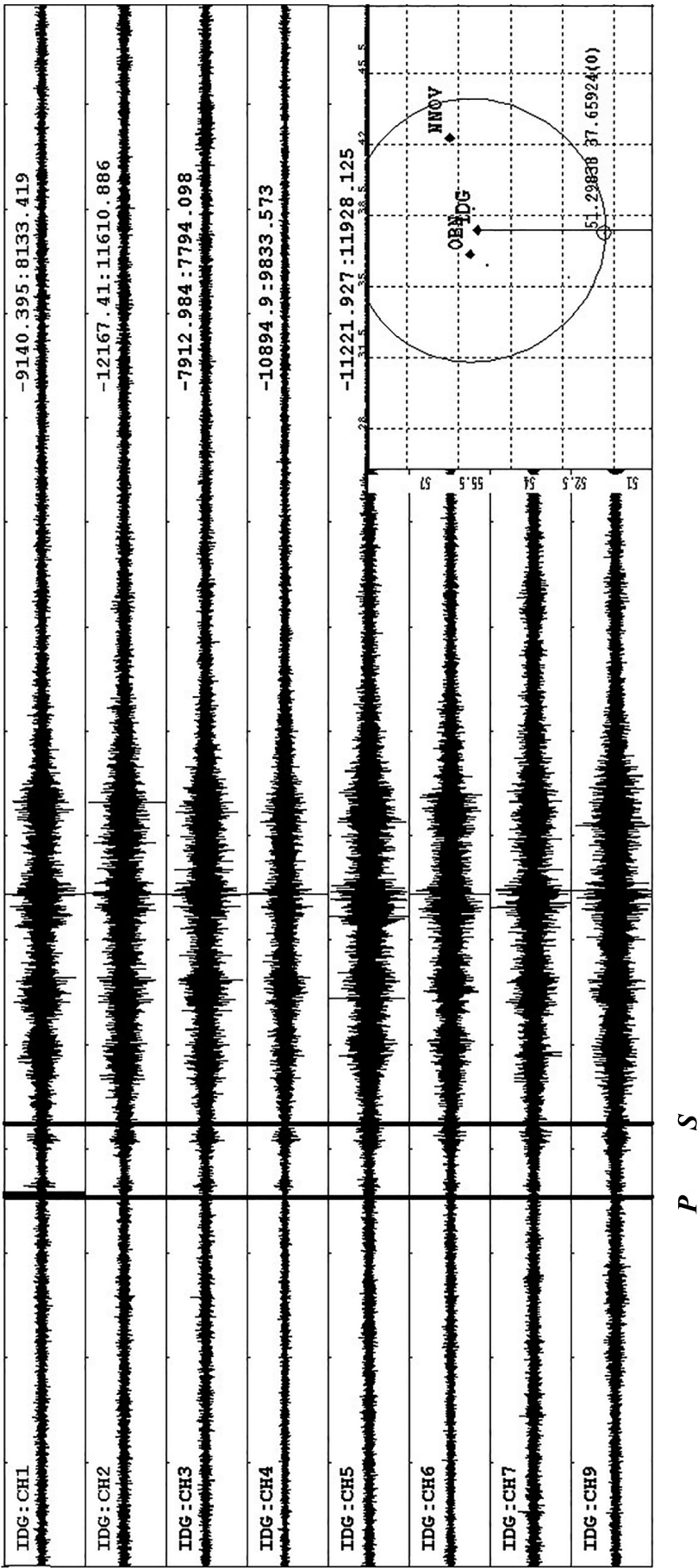
Рис. 2. Типичный пример записи волновых форм от взрыва 22.03.2012 на карьере Лебединского ГОКа и результат локации МСГ «Михнево» (на врезке). Показаны времена вступления волн P и S, эпицентральное расстояние 415 км. Записи фильтрованы в диапазоне 1–10 Гц

максимальная ширина — 5 км, он дважды внесен в книгу рекордов Гиннеса.

Взрывная подготовка, проводимая с целью разрыхления массива горных пород, заключается в бурении взрывных скважин специальными буровыми станками. Скважины заполняют зарядом и по цепочке взрывают. Выбор типа взрывчатого вещества (ВВ) и технологии проведения взрыва зависят от цели, задачи и конкретной обстановки на объекте, а также от крепости пород в массиве. Взрывы выполняют различными ВВ, как штатными тротилосодержащими, гранулированными, так и изготавливаемыми на месте бестротилowymi эмульсионными ВВ — гранэмитами [Адушкин и др., 2013]. За 1–2 с поочередно взрывают несколько десятков скважин. В среднем количество ВВ, применяемых во время буровзрывных работ, составляет от 1000 до 2500 т [Адушкин и др., 2013].

МСГ «Михнево» ежегодно регистрирует около 20 взрывов, произведенных на этом карьере. Типичный пример записи волновых форм от взрывов приведен на рис. 2. Форма сейсмического сигнала представляет собой последовательное вступление четырех групп волн, соответствующих последовательности подрывов отдельных блоков. Определение координат этого события затруднено, так как вступление поперечной волны от взрыва первого блока накладывается на вступление продольной волны от взрыва второго блока и т. д. Эта волновая форма позволяет идентифицировать достаточно точно взрыв на карьере.

Карьер Стойленского горно-обогатительного комбината (ГОКа). Стойленский ГОК, как и Лебединский, — одно из ведущих предприятий России по объему производства сырья для черной



$T_0=13.04.2019$ 9.01:39.9

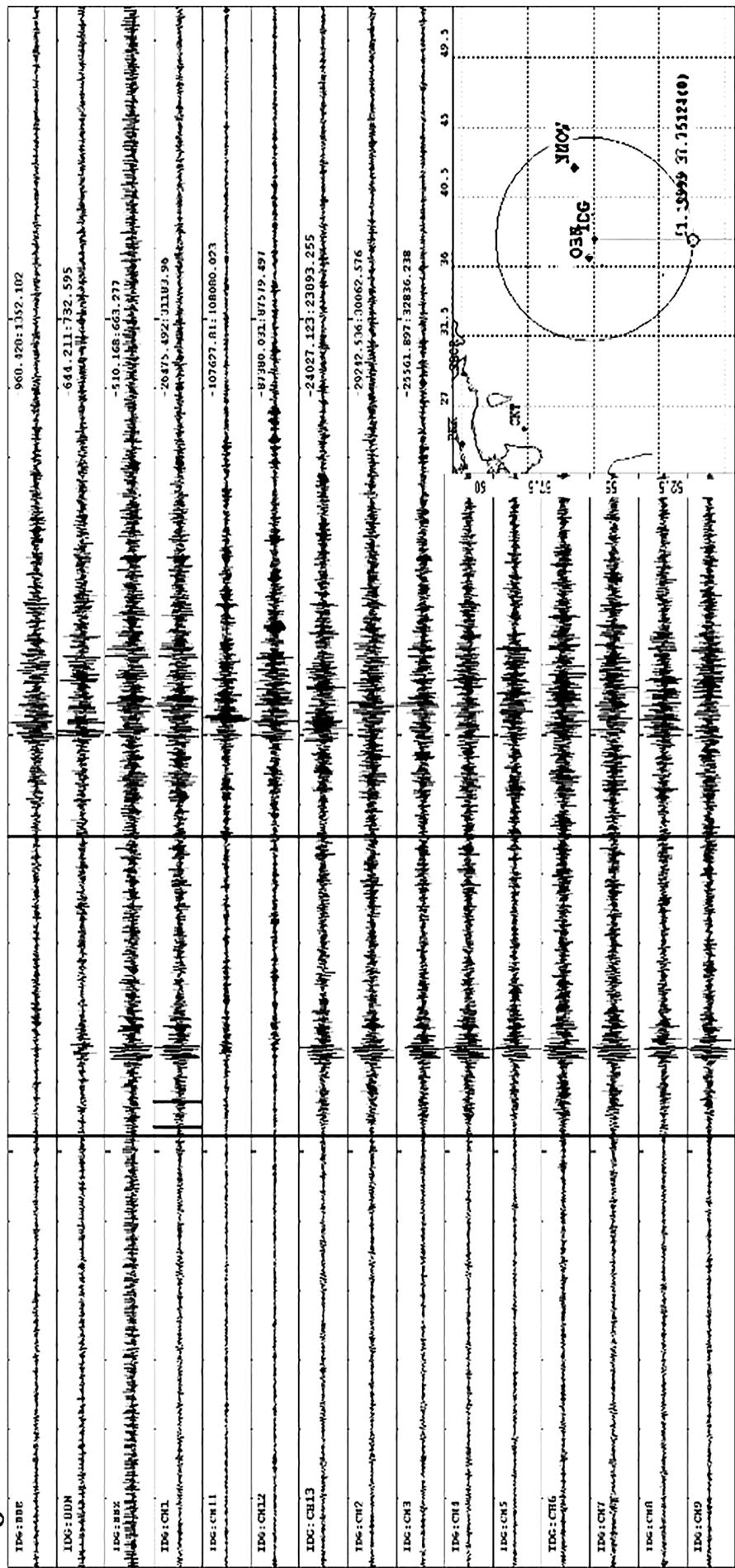


Рис. 3. Типичный пример записи волновых форм от взрыва 13.04.2019 на карьере Стойленского ГОКа и результат локализации МСГ «Михнево» (на врезке). Показаны времена вступления волн P и S, эпицентральное расстояние 420 км. Записи фильтрованы в диапазоне 1–10 Гц

металлургии. В среднем количество ВВ, применяемых при проведении массовых взрывов, составляет от 300 до 700 т. Комбинат расположен около г. Старый Оскол в Белгородской области и занимается разработкой Стойленского месторождения КМА. Основная продукция комбината — железорудный концентрат и железная агломерационная руда. Сегодня глубина карьера достигает 370 м. Скальная вскрыша, богатая руда и железистые кварциты добываются экскаваторами циклического действия с предварительным рыхлением взрывным способом. МСГ «Михнево» ежегодно регистрирует около 15–20 взрывов на этом карьере. Типичный пример записи волновых форм от взрывов приведен на рис. 3. Хорошо видно, что представленная на рис. 3 запись отличается от типичных волновых форм записей взрывов, произведенных на карьерах Лебединского ГОКа (рис. 2).

Использование новых технологий подрыва на карьерах с целью снижения неблагоприятного воздействия на экологию района приводит к тому, что в последнее время волновые формы часто становятся нетипичными, что приводит к затруднениям в идентификации взрыва на конкретном карьере. Несмотря на это, многолетний опыт регистрации и локации взрывов на карьерах Лебединского и Стойленского ГОКов, расположенных на расстоянии около 7 км между ними, позволяет достаточно точно их распознавать благодаря наличию банка типичных волновых форм.

Карьер Михайловского горно-обогатительно-го комбината имени А.В. Варичева. Следующий по объему добываемого железорудного сырья — карьер Михайловского ГОКа, расположенный в Курской области в районе г. Железногорск, для которого это предприятие имеет большое значение как градообразующее.

Объем разведанных запасов железистых кварцитов месторождения составляет более 11 млрд т. Добыча руд Михайловского месторождения происходит в трех связанных между собой карьерах (Южном, Центральном и Северном), имеющих общую протяженность около 6 км и ширину около 4 км. Технология проведения буровзрывных работ та же, что и на карьерах, описанных выше. В среднем количество ВВ, применяемых при проведении массовых взрывов, составляет от 500 до 1800 т [Адушкин и др., 2013]. Как правило, массив имеет неодинаковые физико-технические свойства в разных направлениях. Как показано в работе [Адушкин, Анисимов, 2017], при ведении взрывных работ на карьерах КМА наибольшая амплитуда сейсмического сигнала наблюдается на северо-западе, наименьшая — на севере. Это связано с разным заполнением рыхлым материалом трещин, разломов. В направлении максимальной нарушенности массива интенсивность сейсмических волн снижается.

МСГ «Михнево» ежегодно регистрирует около 18 взрывов на этом карьере. Пример типичной за-

писи волновых форм от взрыва на Михайловском ГОКе представлен на рис. 4.

Отличительная особенность записи этого взрыва от волновых картин на Лебединском и Стойленском ГОКах заключается в четких вступлениях волн Р и S, что хорошо видно на рис. 4.

Сейсмические события, связанные с взрывами на этих карьерах, характеризуются значениями магнитуды от 2,9 до 3,2. Когда в непосредственной близости от карьера находятся различные здания и сооружения, необходимо использовать рекомендации по снижению сейсмического воздействия, т. е. изменить последовательность короткозамедленных взрывов групп зарядов ВВ, перейти на другой тип ВВ (с меньшей скоростью детонации), уменьшить диаметр скважин и т. д. В результате можно снизить негативное воздействие производственных работ на окружающую среду [Тюпин, 2021].

Необходимо также обратить внимание на основную массу менее крупных действующих карьеров, расположенных в Липецкой, Тульской и Владимирской областях. Сейсмические сигналы от них регистрируются в основном на МСГ «Михнево».

Результаты исследований и их обсуждение.
Энергетическая оценка промышленных взрывов на территории центральной части Восточно-Европейской платформы. Распределение взрывных работ на территории ВЕП крайне неравномерное, так как оно естественным образом зависит от размещения полезных ископаемых. Одна из важнейших характеристик техногенной сейсмичности территории — оценка потока сейсмической энергии, создаваемой взрывными работами.

Для оценки пространственного распределения сейсмического воздействия от взрывных работ действующие карьеры были объединены в группы по территориальному принципу, а также в соответствии со средними значениями мощности взрывов (количества ВВ) и средней магнитуды, которая оценивалась нами как среднее арифметическое магнитуды за год. Всего выделено 10 групп [Нестеркина и др., 2018]. Схема их расположения приведена на рис. 5. Основная масса действующих карьеров расположена в Липецкой, Тульской и Владимирской областях (табл. 1). В табл. 1 приведены данные о карьерах, сейсмические события от взрывов на которых имеют магнитуду более 1,5. Общее число карьеров, идентифицируемых по данным МСГ «Михнево», превышает 40. Распределение карьеров на группы позволило оценить, какому сейсмическому воздействию подвергаются отдельные участки территории центральной части ВЕП.

Значения магнитуды взрывов позволяют оценить «сверху» возможный сейсмический эффект в предельном экстремальном случае одновременного производства взрывных работ во всех выделенных зонах (рис. 5) [Нестеркина и др., 2018]. Так как значения магнитуды промышленных взрывов определяются по формулам для локальных магнитуд,

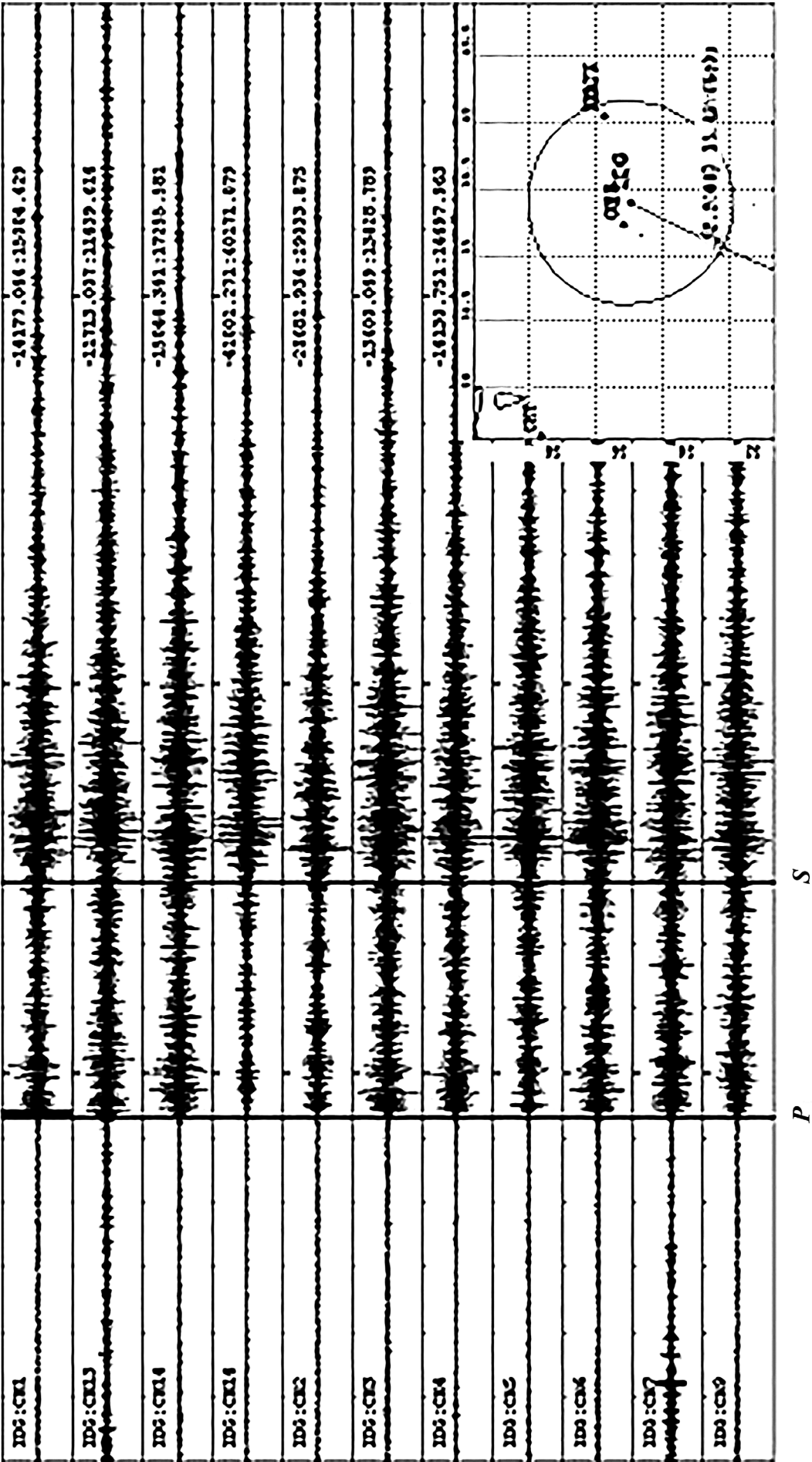


Рис. 4. Типичный пример записи волновых форм от взрыва 13.04.2019 на карьере Михайловского ГОКа и результат локации МСГ «Михнево» (на врезке). Показаны времена вступления волн Р и S, эпицентральное расстояние 330 км. Записи фильтрованы в диапазоне 1–10 Гц

Таблица 1

Группы действующих карьеров, взрывы от которых регистрирует МСГ «Михнево», объединенные по территориальному принципу и в соответствии со средней магнитудой

Группа	Область	Карьер или ГОК	Удаление от МСГ «Михнево», R, км	Среднее значение магнитуды, ML
1	Тульская	Машково	50	1,7
		Новогуровский	59	
		Парсуковский	62	
2	Московская	Щуровской, Голутвинский	75	1,5
		Афанасьевский, Паньшинский	67	
3	Калужская	Пятовский	111	1,7
4	Владимирская	Добрытинский	233	2,4
		Ковровский	266	
5	Липецкая	Елецкий, Ольшанский	266	2,4
6	Липецкая	Данковский	208	2,0
7	Рязанская	Михайлов-цемент	110	1,9
8	Белгородская	Лебединский ГОК	414	2,9
		Стойленский ГОК	420	
9	Курская	Михайловский ГОК	330	3,0
10	Рязанская	Погореловский	162	2,0
		Кораблинский	196	

принятых в сейсмологии, то для оценки величины взрыва используется амплитуда скорости смещения в первой продольной волне (P). Методика оценки выделившейся энергии следующая. Для каждой группы карьеров подсчитывалось число промышленных взрывов. Для примера рассмотрим данные за 2019 и 2020 гг. Была использована формула Гутенберга–Рихтера [Касахара, 1985], она выбрана для расчетов, так как наиболее часто используется при подсчете энергии сейсмических источников, хотя очевидно, что ее использование для оценки энергии, выделяемой при короткозамедленных взрывах, не полностью корректно. Эта же формула была использована для создания схемы районирования территории европейской части России по потокам сейсмической энергии на основе данных о потребляемом количестве ВВ [Адушкин и др., 2013].

Наблюдения на МСГ «Михнево» позволяют говорить о том, что наибольшее число взрывов производится в Тульской (1), Липецкой (4) и Владимирской (5) областях. Средняя магнитуда промышленных взрывов невелика, однако, суммарная сейсмическая энергия, излучаемая при взрывах в группах 4 и 5, сопоставима с энергией, излучаемой на карьерах Белгородской и Курской областей (8-я и 9-я группа соответственно).

Сопоставление числа промышленных взрывов, производимых в сумме на группах карьеров, и выделившаяся энергия для каждой группы представлено на рис. 6, где видно, что число взрывов в группах 4 и 5 осталось примерно на том же уровне, что и в 2019 г., однако суммарная выделившаяся энергия уменьшилась почти в 2 раза.

При этом отметим возрастание выделившейся энергии для карьеров Лебединского и Стойленского ГОКов — в каждой группе она может варьировать от года к году, но в целом картина сохраняется за период наших наблюдений. Таким образом, максимально возможная выделившаяся энергия на центральную часть ВЕП в среднем составляет $8,2\text{--}8,5 \cdot 10^{11}$ Дж/год. Может показаться, что эта величина сильно завышена, но наши наблюдения свидетельствуют о том, что подобная ситуация возможна.

Несмотря на имеющийся на каждом горнодобывающем предприятии определенный регламент по проведению буровзрывных работ, включающий в себя день, время подрыва и количество ВВ, как показывает практика многолетних наблюдений, МСГ «Михнево» часто регистрирует двойные взрывы либо взрывы с минимальной задержкой (около минуты), либо взрывы большей мощности, что отражается при подсчете магнитуды.

Так, в декабре 2018 г. на центральном датчике STS-2 МСГ «Михнево» были зарегистрированы два мощных взрыва на карьерах из 8-й и 9-й групп (в Белгородской и Курской областях). Запись этих взрывов приведена на рис. 7. Для Михайловского ГОКа магнитуда составила 3,1, для Лебединского ГОКа — 3,2. Сочетание таких массовых взрывов, производимых на небольшом удалении один от другого в течении малого промежутка времени, не исключает создания критической нагрузки на геологическую среду, в том числе, создает опасность для устойчивости зданий и сооружений, находящихся в непосредственной близости от зон проведения работ.

Также было зарегистрировано несколько взрывов, произошедших с минимальным временным интервалом, на карьерах, расположенных в Липецкой и Тульской областях (группы 1 и 5). На рис. 8 в качестве примера приведены волновые формы двух взрывов, произведенных практически один за другим в пределах минуты.

В конце 2021 г. на МСГ «Михнево» было зарегистрировано два взрыва, произведенных с разницей в час на карьере Михайловского ГОКа. Волновые формы взрывов, записанные центральным датчиком, стоящим в шахте (STS-2), и на поверхности (СМ-3), приведены на рис. 9. Время первого взрыва $T_0=09:00:08$, второго — $T_0=10:00:22$.

По предварительным оценкам магнитуда первого взрыва составила 3,0, второго — 3,1. Такое интенсивное воздействие на среду может привести к обрушениям части бортов карьера, оползневым явлениям, активизировать процесс развития медленных деформаций, проявляющийся в относительных

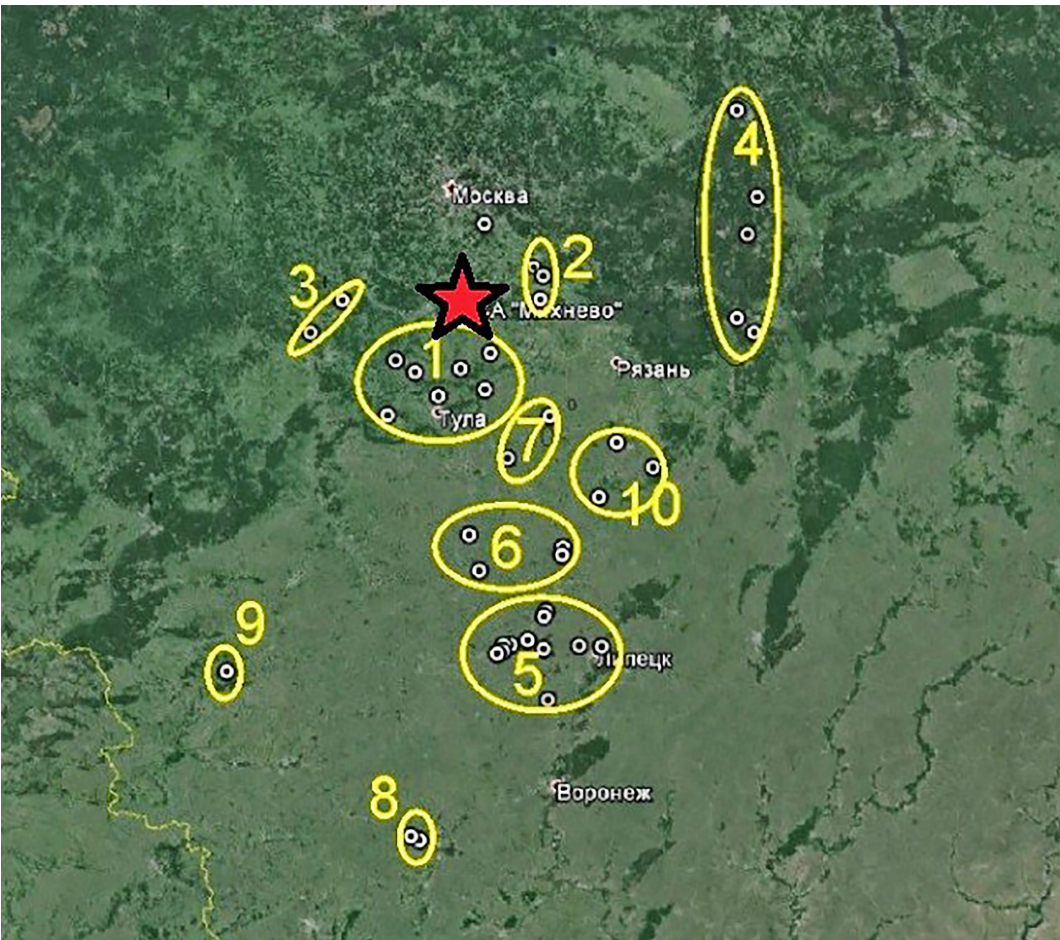


Рис. 5. Схема расположения МСГ «Михнево» (звездочка) и групп действующих карьеров

смещениях по ослабленным зонам и межблоковым контактам. Также отметим интенсивное воздействие в виде пылегазовых выбросов на г. Железнодорожск.

Известно, что на карьерах Лебединского, Стойленского и Михайловского ГОКов заряды ВВ составляют от 300 до 2500 т [Адушкин и др., 2013]. Взрывные работы в карьерах вызывают весьма

высокое загрязнение близлежащей территории и окружающей среды пылегазовыми выбросами и создают ощутимые отрицательные эффекты в связи с осадением пассивной пыли в жилых районах и на сельскохозяйственных угодьях даже на расстоянии около 2 км от эпицентра взрыва при объеме массового взрыва в 1000 т ВВ [Адушкин и др. 2020],

ЧИСЛО ВЗРЫВОВ И ВЫДЕЛИВШЕЙСЯ ЭНЕРГИИ

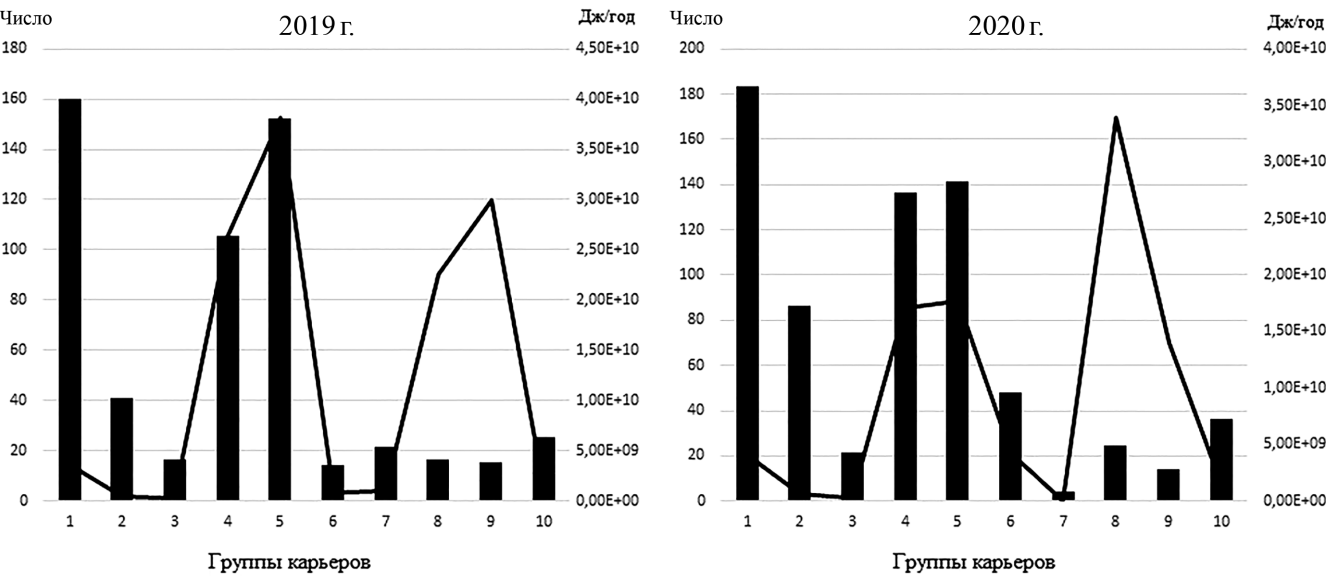


Рис. 6. Число взрывов (столбики) и количество выделившейся энергии (сплошная линия) по группам карьеров за 2019–2020 гг.

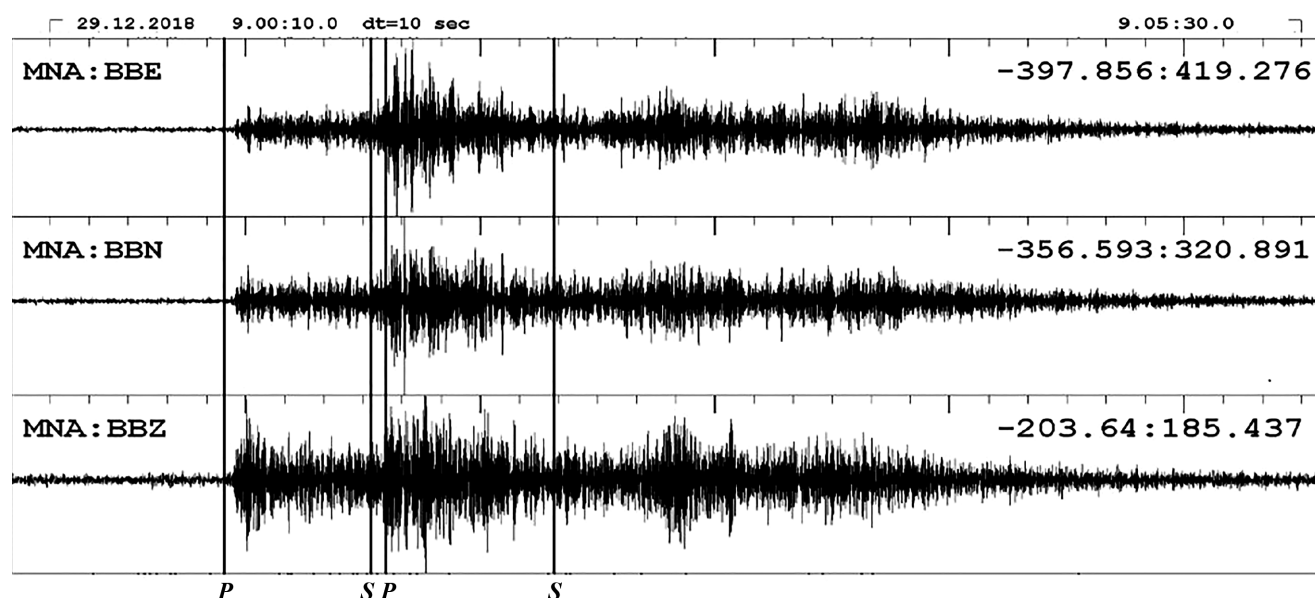


Рис. 7. Запись двух взрывов 29.12.2018, произведенных практически одновременно на карьерах Михайловского и Лебединского ГОКов. Отмечены вступления волн *P* и *S*. Записи фильтрованы в диапазоне 1–10 Гц

а на расстоянии около 5 км от эпицентра взрыва при увеличении количества ВВ в 5 раз нагрузка на атмосферу по степени выброса пылегазового облака возрастает в 12 раз [Шевкун, Лещинский, 2005].

Примеры природно-тектонических событий, зарегистрированных МСГ «Михнево». Непрерывные наблюдения на МСГ «Михнево» позволяют с высокой долей точности устанавливать природу сейсмического события, определять значения относительной магнитуды взрывов, а значит, и степень их воздействия на земную кору, здания и сооружения.

Как уже отмечено, основная масса регистрируемых региональных землетрясений приурочена к сейсмически активным регионам, таким как Кавказ, Средиземное море, Румыния (зона Вранча), Урал, расположенным на окраинах ВЕП. Эпицентры землетрясений находятся на расстоянии от 500 до 1500 км и характеризуются магнитудой от 3 до 7 (по данным ФИЦ ЕГС РАН). В то же время в течение года регистрируются единичные тектонические события на акватории Балтийского моря, территории Украины, Краснодарского края, Архангельской области и других регионов ВЕП, признанных асейсмичными, как считалось на протяжении многих лет [Санина и др., 2019].

Группой «Михнево» 18.11.2011 было зарегистрировано событие, произошедшее в Белоруссии (рис. 10). В непосредственной близости больших работающих карьеров нет, в то же время известно несколько крупных предприятий по добыче каменной соли («Беларуськалий»), доломитов (ОАО «Доломит»), гранитов (карьер «Микашевичи»), на которых ведется интенсивная разработка месторождений полезных ископаемых. Промышленные взрывы, производимые на этих предприятиях, периодически регистрируются МСГ «Михнево», несмотря на то что

расстояние от центрального прибора до эпицентров составляет от 480 до 770 км. Поэтому нами сделано предположение о том, что это сейсмическое событие может иметь природно-тектонический генезис, вызванный интенсивной буровзрывной деятельностью на белорусских комбинатах. Событие удалось зарегистрировать только МСГ «Михнево», в каталогах ФИЦ ЕГС РАН и международном ISC его нет.

В Нижегородской области было зарегистрировано несколько событий. Одно из них, подтвержденное каталогом ISC, произошло 03.07.2015 (рис. 11). С некоторой долей вероятности оно отнесено к зоне коллизии архейских протократонов Фенноскандия и Волго-Уралья [Минц и др., 2010].

В Костромской области 23.06.2016 МСГ «Михнево» было зарегистрировано неизвестное событие, подтвержденное международным каталогом ISC и станцией «Киров» ФИЦ ЕГС РАН. Ближайший действующий карьер по добыче известняка открытым способом расположен на расстоянии около 25 км от эпицентра в районе г. Солигалич. Возможно, это событие имеет природно-тектонический генезис, вызванный интенсивной деятельностью на карьере.

МСГ «Михнево», помимо событий, описанных выше, зарегистрирован ряд событий на Украине и в Белоруссии в крупных промышленных регионах, некоторые из которых представлены в табл. 2 и могут быть квалифицированы как природно-тектонические.

Отметим известное землетрясение, произошедшее в районе г. Мариуполь 07.08.2016, эпицентр которого также находился в районе интенсивной техногенной нагрузки, помимо первого основного толчка, зарегистрировано несколько афтершоков.

Таким образом, воздействие на среду, производимое сотнями взрывов различной мощности в

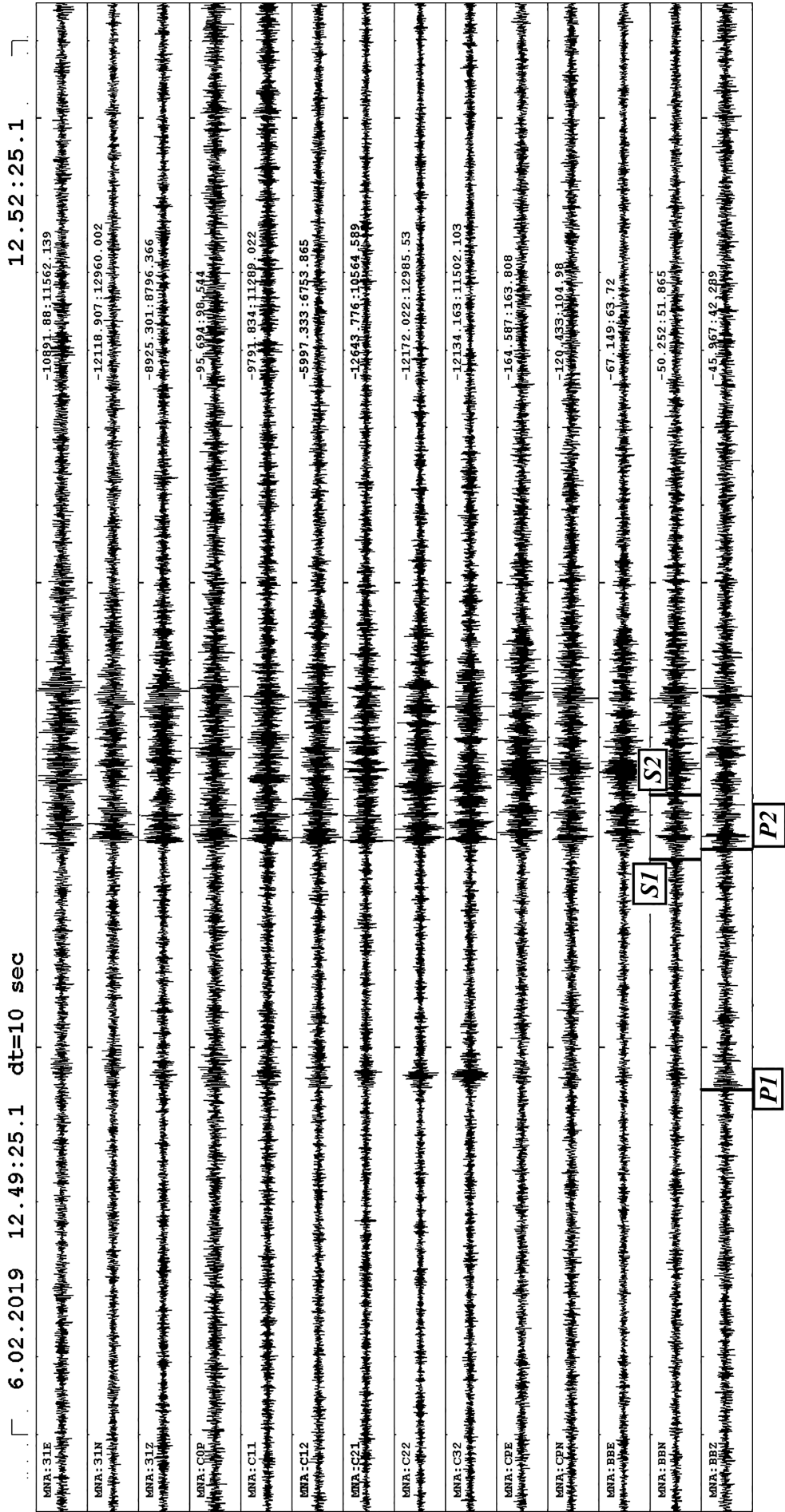


Рис. 8. Волновые формы двух взрывов, произошедших в пределах минуты на карьерах в Липецкой (1) и Тульской (2) областях. Показаны вступления волн P и S для разных взрывов. Записи фильтрованы в диапазоне 1–10 Гц

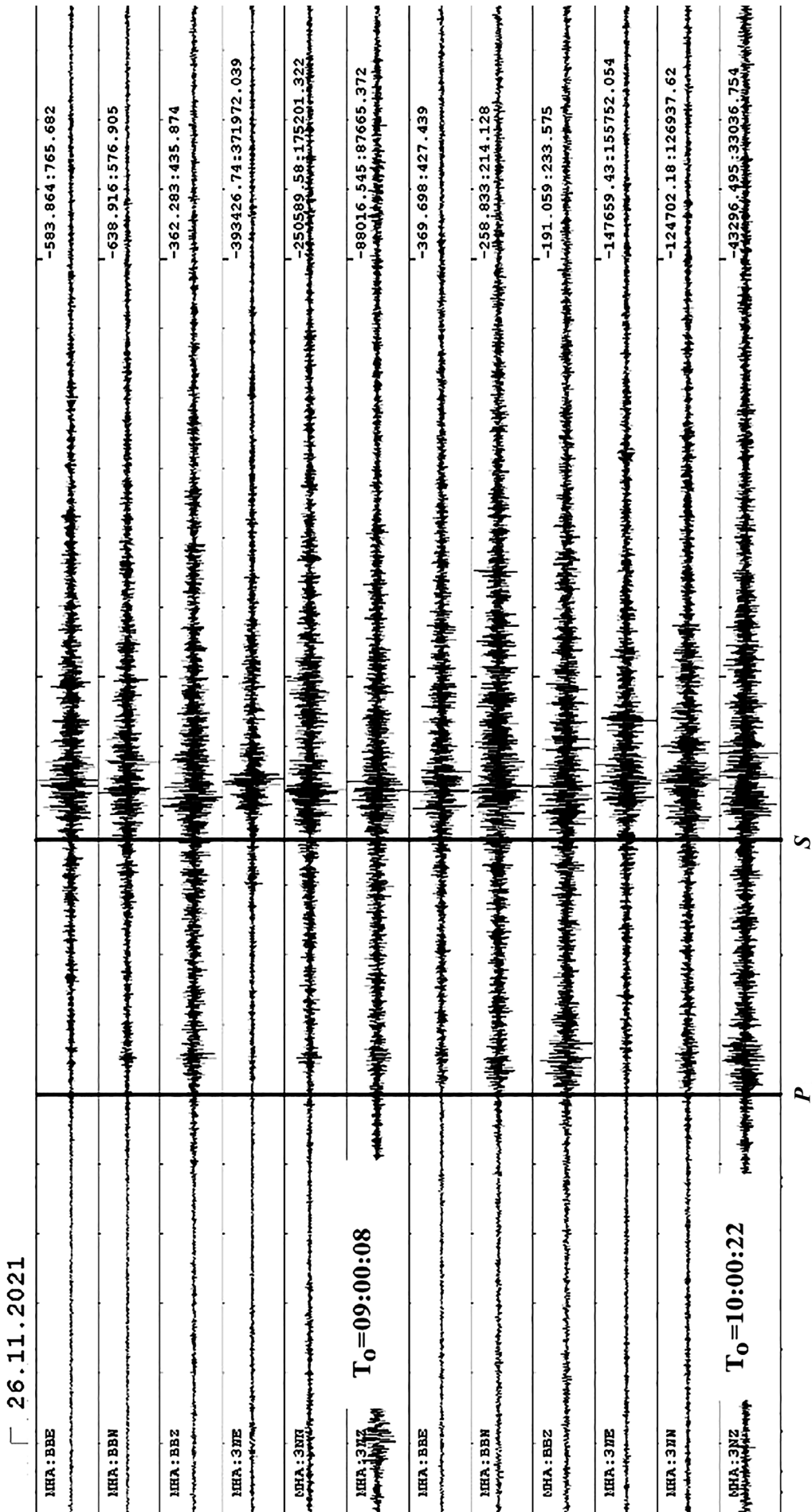


Рис. 9. Записи взрывов 26.11.2021, произведенных на карьере Михайловского ГОКа с разницей в час. Показаны времена в очаге, вступления волн Р и S. Записи фильтрованы в диапазоне 1–10 Гц

$T_0=18.11.2011$ $12.56:38.1(0.22)$ $A4=170$ $V=8.4746$ $E=0.97$

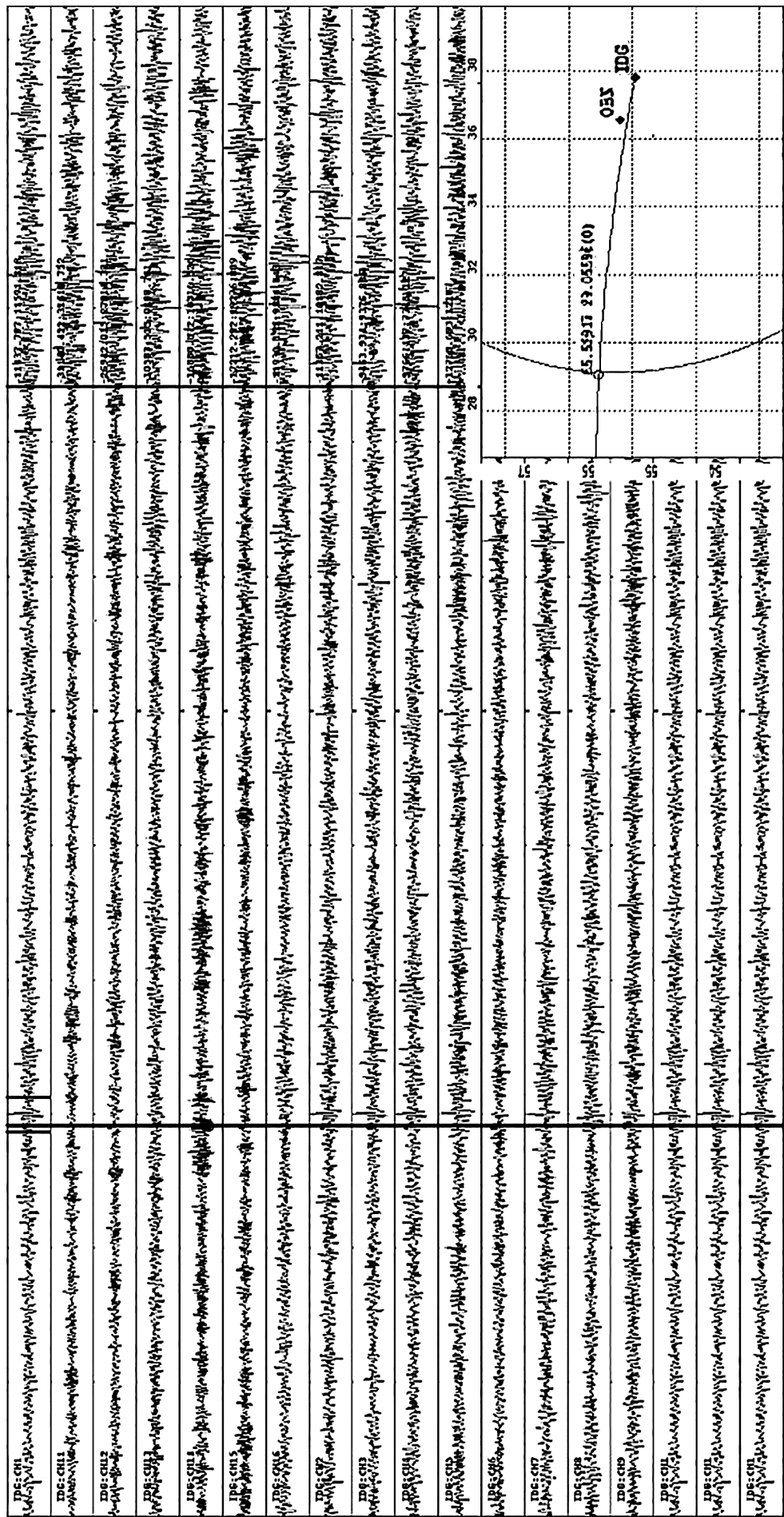


Рис. 10. Неизвестное событие в Белоруссии: $T_0=12.56:37$, координаты: 54.48° с. ш., 29.06° в. д. Расстояние от центрального прибора группы 554 км, $ML=3.7$. На врезке показана локация, отмечены вступления волн P и S . Все каналы фильтрованы в диапазоне 1–10 Гц

Таблица 2

Природно-тектонические события, зарегистрированные МСГ «Михнево», на территории Украины и Белоруссии

Район	Дата	Время, T ₀	Координаты		Магнитуда, mb
			широта	долгота	
КривойРог	13.06.2010	03:58:04	47.84	33.53	3,5
КривойРог	17.06.2012	04:03:11	47.99	32.78	3,7
КривойРог	29.09.2012	04:36:54	48.02	32.49	3,3
КривойРог	29.07.2017	03:30:56	47.80	33.51	3,3
Бердянск	31.07.2006	09:04:23	47.16	37.22	4,2
Купянск	22.11.2009	20:42:08	49.79	36.99	3,4
Кременчуг	07.05.2010	16:22:48	48.95	33.03	3,3
Полтава	03.02.2015	05:56:28	50.56	34.17	4,4
Полтава	14.05.2010	23:16:54	49.48	34.73	3,9
Полтава	11.09.2015	06:42:40	50.37	34.11	3,4
Белоруссия	15.08.2013	20:59:50	53.22	26.65	4,1
Белоруссия	30.08.2018	11:38:52	54.86	29.93	2,9

течение многих лет, приводит к накоплению остаточных деформаций и повышению напряженного состояния, что в определенный момент может найти выход в виде природно-тектонических событий. Наиболее активно такие процессы развиваются по тектоническим разломам, на контактах блоковых структур и в зонах трещиноватости. Выброс столь мощной энергии, связанный со взрывными работами, провоцирует развитие медленных деформаций, что в отдельных случаях служит своеобразным триггером для возникновения событий, имеющих природно-тектонический генезис.

Заключение. Результаты исследований свидетельствуют о том, что техногенная сейсмичность, связанная с проведением буровзрывных работ, доминирует в центральной части ВЕП и может провоцировать тектоническую активность на этой территории, прежде считавшейся асейсмичной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Адушкин В.В., Анисимов В.Н. Геодинамическая и геоэкологическая безопасность и пути ее реализации в регионе КМА // Проблемы природопользования и экологическая ситуация в Европейской России и на сопредельных территориях // Мат-лы VII Междунар. науч. конф. памяти проф. А.Н. Петина. Белгород: Политерра, 2017. С. 13–20.

Адушкин В.В., Асминг В.Э., Ассиновская Б.А. и др. Взрывы и землетрясения на территории европейской части России. М.: ГЕОС, 2013. 360 с.

Адушкин В.В., Соловьев С.П. Микрочастицы в атмосфере от литосферных источников техногенного происхождения // ИКЦ «Академкнига». 2021. № 5. С. 120–132.

Адушкин В.В., Соловьев С.П., Хазинс В.М. Геоэкологические последствия проведения горных работ на карьерах с применением взрывных технологий. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых //

Отмечено не только опасное воздействие взрывных работ, проводимых крупными градообразующими предприятиями по разработке месторождений полезных ископаемых на здания и сооружения, находящиеся в непосредственной близости от карьеров, но и распространение газопылевых облаков на десятки километров.

Многолетний опыт сейсмических наблюдений подтверждает возможность одновременного наложения сигналов от нескольких сейсмических источников техногенного типа. Возникающее комбинированное сейсмическое воздействие не исключает возможность появления наложенного эффекта, связанного с нарушением сплошности среды в локальной области, что необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации особо опасных и технически сложных объектов, к которым относятся, например, гидротехнические сооружения, линии электропередач, объекты использования атомной энергии, объекты инфраструктуры воздушного транспорта и пр.

Изменение технологии подрыва и строгое следование регламенту при проведении буровзрывных работ способны уменьшить негативное воздействие на экологию района.

Наши наблюдения подтверждают вероятность возникновения природно-тектонических событий в зонах, приуроченных как к межблоковым границам, так и к раздробленным областям земной коры, что вызвано активной техногенной деятельностью на карьерах.

В настоящее время МСГ «Михнево» — единственная МСГ в центральной части ВЕП, контролирующая сейсмологическую обстановку в непосредственной близости от Москвы. Непрерывные наблюдения позволяют с высокой долей точности устанавливать природу сейсмических сигналов с порогом $M_L \geq 1,5$, определять магнитуду взрывов, оценивая степень их воздействия на экологическую обстановку в целом.

Финансирование. Работа по теме 122040400015-5 выполнена за счет средств федерального бюджета.

Тр. Ин-та горного дела имени Н.А. Чинакала СО РАН, Сибирское отделение РАН. 2020. № 2. С. 164–178.

Алешина Е.И., Асминг В.Э., Баранов С.В. и др. Сведения о наиболее крупных промышленных взрывах // Землетрясения России в 2016 году. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. С. 183–194.

Викторов С.Д. Взрывное разрушение массивов горных пород — основа прогресса в горном деле // ГИАБ. 2015. № S1. С. 63–75.

Гарнов В.В., Горюнов Б.Г., Адушкин А.В. Вопросы экологической безопасности при сильном механическом воздействии на земную поверхность // Горный информ. анализ. бюлл. (науч.-техн. журн.). М.: Горная книга, 2011. № 6. С. 171–175.

Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир, 1985. 264 с.

Минц М.В., Сулейманов А.К., Бабаянц П.С. и др. Глубинное строение, эволюция и полезные ископаемые раннедокембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы: Интерпретация материалов по опорному профилю 1-ЕВ, профилям 4В и ТАТСЕЙС: В 2 т. М.: Геокарт, ГЕОС, 2010.

Назаренко Н.В., Петин А.Н., Фурманова Т.Н. Воздействие разработки месторождений по добыче общераспространенных полезных ископаемых на окружающую природную среду // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 6. Сетевое издание. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=7401> (дата обращения: 17.04.2022).

Нестеркина М.А., Куликов В.И., Константиновская Н.Л. и др. Оценка уровня сейсмического воздействия промышленных взрывов в центральной части Восточно-Европейской платформы // Сейсмические приборы. 2018. Т. 54, № 2. С. 49–65. DOI: 10.21455/si2018.2-4.

Санина И.А., Волосов С.Г., Черных О.А. и др. Синтез и опыт экспериментального применения двухмерной

малоапертурной сейсмической антенны «Михнево» // Сейсмические приборы. М., 2008. Т. 44, № 1. С. 3–18.

Санина И.А., Волосов С.Г., Черных О.А., Ризниченко О.Ю. Малоапертурная сейсмическая антенна «Михнево»: новые возможности изучения сейсмичности Восточно-Европейской платформы // Докл. РАН. 2009. Т. 428, № 4. С. 536–541.

Санина И.А., Ризниченко О.Ю., Волосов С.Г. и др. Уникальная научная установка «Михнево» ИДГ РАН-15 // Сб. ИДГ РАН. 2019. С. 48–56. DOI: 10.26006/IDG.2019.11.38623.

Тюпин В.Н. Параметры сейсмического действия массовых взрывов в изотропном и сложноструктурном горных массивах карьеров // ГИАБ. 2021. № 12. С. 47–57. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_12_0_47.

Шевкун Е.Б., Леицинский Ф.В. Пути снижения вредного воздействия взрывных работ на окружающую среду // ГИАБ. 2005. № 11. С. 190–194.

Статья поступила в редакцию 31.05.2022,
одобрена после рецензирования 02.11.2022,
принята к публикации 26.01.2023