

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ НА ЭЛЬГИНСКОМ КАМЕННОУГОЛЬНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ

Ю. А. Малинин¹, Н. Н. Гриб¹

¹ Технический институт (ф) Северо-Восточного федерального университета в г. Нерюнгри, Россия, e-mail: grib-n-n@yandex.ru

Аннотация: Целью исследования было проведение сравнительного анализа уровня воздействия технологических взрывов на промышленные здания и сооружения и повышения качества дробления горной массы при использовании неэлектрической системы и электронной системы инициирования. Исследование сейсмического эффекта проводилось на территории Эльгинского горно-обогатительного комплекса. Контроль воздействия взрывов осуществляется с помощью программно-аппаратного комплекса, созданного на основе геофизического оборудования. Комплекс регистрировал параметры сейсмических волн, далее производилась их интерпретация и цифровая обработка. Представлены экспериментальные результаты, полученные при регистрации сейсмического эффекта от технологических взрывов, с применением электронной и неэлектрической системы инициирования. Приведены расчетные значения и сравнения их с действующими допусками. Сделаны выводы о количественных размерах воздействия на исследуемые объекты. Описана методика проведения сейсмических измерений и последующая обработка полученных данных. Приведены аналитические данные сейсмического действия массового взрыва. Также был выполнен регрессионный анализ зависимости скорости смещений под защищаемыми объектами от приведенного расстояния. на промышленные объекты Эльгинского комплекса. Снижение воздействия при проведении взрывных работ является важным аспектом при разработке полезных ископаемых. Одним из методов достижения этой цели является короткозамедленное поочередное взрывание скважин с применением электронных детонаторов. Этот метод позволяет гибко и точно программировать время замедления взрывной реакции, что в свою очередь снижает сейсмическое воздействие на окружающую среду. Одним из ключевых преимуществ этого подхода является возможность минимизировать показатели сейсмического воздействия, повысить качество дробления горной массы.

Ключевые слова: Буровзрывные работы, трещиноватость, физические свойства горных пород, многолетнемерзлые породы, электронная система инициирования, сейсмический эффект, короткозамедленное многорядное взрывание, электронный детонатор.

Для цитирования: Малинин Ю. А., Гриб Н. Н. Повышение эффективности и безопасности буровзрывных работ на эльгинском каменноугольном месторождении // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 12-2. — С. 100–115. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_122_0_100.

Improving the efficiency and safety of drilling and blasting operations at the elga coal deposit

Yu. A. Malinin¹, N. N. Grib¹

¹ Nerungri Technical Institute (branch) of M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Nerungri, 678960, Russia, e-mail: grib-n-n@yandex.ru

Abstract: The purpose of the study was to conduct a comparative analysis of the level of impact of technological explosions on industrial buildings and structures and to improve the quality of crushing rock mass, when using a non-electrical system and an electronic initiation system. The study of the seismic effect was carried out on the territory of mining and processing complex named “Elginsky”. The control of the explosions impact is carried out with the help of a software and hardware complex created on the basis of geophysical equipment. The complex recorded the parameters of seismic waves, then their interpretation and digital processing were carried out. Experimental results obtained during registering the seismic effect of technological explosions using an electronic and non-electrical initiation system are also presented. The calculated values and their comparison with the current tolerances are given. Conclusions about the quantitative dimensions of the impact on the studied objects are drawn. The technique of seismic measurements and subsequent processing of the data obtained is described. Analytical data of the seismic action of a mass explosion are presented. A regression analysis of the dependence of the displacement velocities under the protected objects on the reduced distance to the industrial facilities of the “Elginsky” complex was also performed. Reducing the impact of blasting is an important aspect in minerals development. One of the methods to achieve this goal is short-term alternate blasting of wells, with the use of electronic detonators. This method allows flexible and precise programming of the deceleration time of the explosive reaction, which in its turn reduces the seismic impact on the environment. One of the key advantages of this approach is the ability to minimize seismic impact indicators, improve the quality of crushing rock mass.

Key words: Drilling and blasting, fracturing, physical properties of rocks, permafrost, electronic initiation system, seismic effect, short-delayed multi-row detonation, electronic detonator.

For citation: Malinin Yu. A., Grib N. N. Improving the efficiency and safety of drilling and blasting operations at the elga coal deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(12-1):100–115. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_122_0_100.

Введение

Буровзрывные работы (БВР) являются неотъемлемой частью народного хозяйства, особенно в контексте обеспечения целостности и сохранности инженерных сооружений, находящихся в зоне сейсмического воздействия. С ростом населенных территорий, увеличением добычи полезных ископаемых и приближением горных работ к охраняемым зданиям и сооружениям возникает необходимость более активного решения проблемы безопасности

сейсмических воздействий взрывов на горнодобывающих предприятиях.

Также инициируемые БВР техногенные землетрясения оказывают существенное влияние на безопасность ведения горных работ при строительстве и эксплуатации объектов горных предприятий [1]. Это имеет прямое влияние на эффективность проводимых работ и, конечно же, на себестоимость выпускаемой продукции.

Одним из ключевых аспектов обеспечения безопасности является пра-

вильное планирование и проведение БВР. Во время взрывных работ должна быть рассмотрена и внедрена надлежащая схема прогнозирования и мониторинга. [2]. Компании, занимающиеся горнодобывающей деятельностью, должны учитывать сейсмическую активность в регионе, где они работают, и принимать соответствующие меры для минимизации рисков. Это включает в себя выбор оптимальных мест для проведения взрывов, использование специальных технологий и материалов, а также разработку детальных планов предотвращения возможных повреждений с учетом класса сейсмостойкости, зависящей от расчетного сейсмического воздействия [3]. На основе анализа физических и механических характеристик вскрышных пород в угольных разрезах, их трещиноватости и исследования зависимости между удельным расходом взрывчатого вещества и структурно-прочностной характеристикой пород была разработана система классификации взрывае-мости вскрышных пород на угледобы-вающих предприятиях. Кроме свойств породы и массива, каждая категория также характеризовалась коэффициентом анизотропии, что важно для выбора сетки взрывных скважин. Для эффективного производства буровзрыв-ных работ в карьере необходимо учи-тывать категорию трещиноватости мас-сива и коэффициент крепости горных пород [4].

Однако на практике эта система классификации показала, что каждый из принятых в ней классов включает горные породы с довольно широким спектром свойств, что порой вызывает сложности при определении параметров взрывных работ в определенных условиях. Более того, опыт показал, что нормализованный в этой класси-фикации удельный расход взрывчатых

веществ нельзя определять строго, он должен устанавливаться в зависимости от технологии горных работ, характе-ристик горнотранспортного оборудова-ния и необходимого уровня дробления пород. Коэффициент удельного расхода варьируется в широком диапазоне, его значение зависит от квалификации спе-циалистов, выполняющих такие рас-четы [5].

Более глубокое исследование техно-логических свойств вскрышных пород на угольных разрезах, их связи с гео-лого-генетическими особенностями и петрографическими характеристи-ками с учетом вышеприведенных фак-торов позволило создать более пол-ную классификацию пород по степени блочности. В настоящее время эта классификация служит основой для руководящих технических докумен-тов по планированию взрывных работ на угольных разрезах [6].

На многих угольных разрезах Сибири и Востока России больше половины объема добычи происходит открытым способом. Однако на этих разрезах сталкиваются с серьезными проблемами, связанными с суровыми климатическими условиями и наличием многолетнемерзлых пород. При проек-тировании буровзрывных работ следует учитывать в комплексе такие природные факторы, как вечная и сезонная мерз-лота и обводненность горных пород [7]. Эти факторы значительно затрудняют проведение буровзрывных работ.

Многолетнемерзлое состояние горных пород определяет основные трудности ведения взрывных работ, обусловленные наличием развитой системы трещин, заполненных льдом, которые расчленяют массив на отдель-ности и являются главной причиной выхода негабарита.

Одним из основных недостатков технологий с применением буровзрыв-

ных работ является генерация сейсмических волн, которые будут распространяться после детонации зарядов [8].

Способы взрывания, применяемые при взрывных работах на разрезе «Эльгинский»

Эльгинское каменноугольное месторождение имеет весьма сложноструктурное строение, включающее 13 пластов и пропластков с мощностью от 1,3 до 15 м, расчлененных междупластьями мощностью от 3 до 45 м, следствием чего стали сложные организация работ и система разработки [9]. На территории района широко развиты многолетнемерзлые породы, которые на Эльгинском месторождении встречаются повсеместно [10].

На разрезе взрывные работы производятся способом короткозамедленного многорядного взрывания с применением: детонирующего шнура, неэлектрических систем инициирования, устройств с замедлением скважинных неэлектрических систем инициирования и детонирующего шнура.

Для монтажа внутрискважинной и поверхностной сети используется детонирующий шнур и системы неэлектрического инициирования. Работа с детонирующим шнуром (резка, соединение отрезков друг с другом, с пиротехническим реле, неэлектрическими системами инициирования, изготовление промежуточных детонаторов) выполняется способами, указанными в соответствующих инструкциях (руководствах).

Неэлектрическая система инициирования

Немаловажным аспектом уменьшения сейсмического воздействия взрыва является корректное применение интервалов замедлений [11]. Метод короткозамедленного взрывания с применением неэлектрических систем инициирования, который используется

на разрезе «Эльгинский» в течение последних нескольких лет, имеет некоторые недостатки. Один из них — это расхождение фактического времени замедления детонаторов с номинальным (среднеквадратичное относительное отклонение времени замедления, согласно инструкции по установке и эксплуатации невзрывных систем инициирования российского производства, может достигать 12% от номинальной величины). Указываемые в инструкциях допуски по замедлению могут не соответствовать реальности. Если интервал замедления между взрывами зарядов меньше, чем отклонения во времени срабатывания замедлителей, то возможно увеличение сейсмического эффекта массового взрыва вследствие наложения сейсмических волн от взрывов большего числа зарядов (одновременные взрывы) по сравнению с расчетным количеством в группе замедления. В реальности при использовании неэлектрических систем инициирования фактическое время замедления сети взрывания неизвестно, что ведет к погрешностям в расчетах схем взрыва и, следовательно, к увеличению сейсмического эффекта массового взрыва и снижению качества подготовки горной породы к выемке. В работе [12] сформулированы основные принципы управления сейсмическим воздействием взрыва скважинных зарядов при массовых взрывах на угольных разрезах путем выбора рациональных интервалов замедлений поверхностной и скважинной сетей.

Для устранения перечисленных выше факторов предлагается рассмотреть использование электронных систем взрывания, которые широко применяются в ряде зарубежных стран, а также на угольных и рудных предприятиях Кемеровской области. Данная система дает возможность контролиро-

вать техногенное воздействие взрывов и позволяет получить информацию для его уменьшения за счет исправления ошибок в схемах взрывания.

При ведении БВР необходимо также учитывать опыт и рекомендации по ограничению массы взрывчатого вещества на этапе замедления на уровне минимально опасных значений для технологических взрывов [13], анализировать безопасные расстояния и модельные зоны безопасности при взрывных работах [14, с. 1–13]. Достоверное различие взрывов в настоящее время становится серьезной проблемой при сейсмических наблюдениях как местными, так и региональными сейсмическими сетями. Различение событий малой магнитуды остается сложной задачей [15].

В настоящее время в Кузбассе при подготовке блоков к массовым взрывам применяются различные технологии формирования скважинных зарядов [16], что позволяет уменьшить магнитуду взрывов и использовать меньшее количество взрывчатых веществ. В процессе проведения взрывных работ возникают гидродинамические и газовые ударные волны, которые могут вызывать вибрацию конструкций. Эта вибрация может повредить стены, перекрытия и механическое оборудование внутри здания. Поэтому необходимо проводить предварительные исследования и оценку возможного воздействия вибрации на существующие сооружения. Необходимо непрерывно и постоянно проводить мониторинг взрывных работ, учитывая ненадежность стандартных процедур оценки сейсмического воздействия [17].

При отработке Эльгинского месторождения стоит учитывать опыт создания и научную пользу от внедрения на предприятии автоматической системы сейсмического мониторинга

[18], которая позволит учитывать степень влияния природных землетрясений и промышленных взрывов [19].

В настоящее время вопросам снижения сейсмического воздействия взрывов уделяется большое внимание, предлагаются различные варианты решения, чтобы в конечном счете снизить сейсмический эффект [20]. Разработаны и применяются практические методологии оценки повреждения горных пород в результате взрывных работ с использованием анализа генерируемых уровней пиковой скорости частиц в зависимости от расстояния до производственного объекта [21]. Но тем не менее они носят региональный характер и не могут учитывать всех особенностей конкретных месторождений.

Объект испытаний

Объектом испытаний является электронная система инициирования.

Электронная система инициирования (ESI) — инновационное решение в области взрывных работ, которое обеспечивает повышенную безопасность, эффективность и контроль над процессом взрыва. Эта современная технология позволяет управлять каждым этапом взрыва, начиная от инициирования и заканчивая контролем различных параметров, таких как время задержки и последовательность взрывания зарядов.

Одним из ключевых преимуществ ESI является улучшенная безопасность. Благодаря использованию электронных детонаторов исключается риск преждевременного взрыва или перекрестного инициирования зарядов, что может привести к серьезным последствиям. Кроме того, ESI позволяет осуществлять мониторинг и контроль процесса взрыва в режиме реального времени, что обеспечивает дополни-

тельную безопасность и позволяет быстро реагировать на любые непредвиденные ситуации.

Эффективность ESI также не вызывает сомнений. С помощью этой системы можно точно контролировать параметры взрыва, такие как мощность заряда, время задержки и направление взрыва, что позволяет оптимизировать процесс и добиться максимального результата. Также благодаря ESI становится возможным проведение сложных взрывов, которые ранее были невозможны или требовали значительных затрат ресурсов.

В целом, электронная система инициирования представляет собой значительный шаг вперед в развитии технологий взрывных работ. Она обеспечивает повышенную безопасность и эффективность, а также гибкость и контроль на всех этапах взрыва. В ходе эксперимента на разрезе «Эльгинский» была оценена возможность использования электронных детонаторов с длиной проводника 15 и 20 метров, магистральных кабелей, соединительных элементов и другого оборудования.

Детонатор является программируемым и перепрограммируемым индивидуально, в пределах 0–14000 мс с интервалом в 1 мс. Электронные детонаторы (ЭД) не подвержены влиянию магнитных полей до 30 В/м, которые редко встречаются, поскольку они значительно сильнее, чем поля, создаваемые стандартными передатчиками (телефоны, сотовые телефоны, радио и т. д.) или даже высоковольтными линиями электропередачи.

ЭД могут выдерживать напряжение до 30 кВ / 3500 пФ в случае соединения «контакт-контакт» и «контакт-корпус». Импульс такого уровня может привести к повреждению электронной цепи, не вызывая взрыва детонатора.

ЭД обладают высокой устойчивостью к ударным воздействиям, как и обычные детонаторы — электрические или механические. В стандартном режиме ЭД подает энергию для инициации менее чем за одну секунду. Однако, в случае несрабатывания электрической цепи система безопасности разряжает эту энергию в течение пяти минут. Это означает, что максимальное время полного разряда энергии составляет пять минут.

Испытание электронной системы инициирования состоит из следующих этапов: обучение персонала правилам работы с системой по утвержденной программе; проведение входного контроля; испытание системы в условиях разреза «Эльгинский», которое проводится на любом взрываемом блоке с количеством скважин определенным проектом БВР; обработка, анализ и оценка результатов испытаний после отработки блока в группе подготовки БВР по результатам маркшейдерских съемок.

Целью проведения экспериментов было: проверить соответствие электронной системы инициирования требованиям нормативно-технической документации и её пригодность для дальнейшего использования в условиях разреза «Эльгинский»; провести оценку сейсмического воздействия и ударной воздушной волны от массовых взрывов на охраняемые объекты (обоганительную фабрику, далее ОФ, установку дробления рядовых углей, далее УДРУ и административно-бытовой комплекс, далее АБК); проанализировать изменения сейсмического воздействия на охраняемых объектах, определить эффективность дробления горных пород при изменении параметров буровзрывных работ и определить эффективность применения электронной системы инициирования по срав-

нению с неэлектрическими системами инициирования.

Испытания проводились в соответствии с разработанным и утвержденным проектом производства массового взрыва и Руководством по эксплуатации электронной системы инициирования на экспериментальных блоках: №1 горизонт +1030, №2 горизонт +1050, №3 горизонт +1075, №4 горизонт +1095, №5 горизонт +990.

На блоке № 1 (горизонт +1030) было пробурено 176 скважин диаметром $\varnothing=269$ мм. Объем подготовленной к взрыву горной массы составил $V=187$ тыс. м³, сетка скважин: 10×9 м. Задача состояла в оценке производительности измельчения горных пород при использовании электронной системы инициирования, в сопоставлении с неэлектрическими методами инициирования, без изменения показателей БВР (вес заряда, конфигурация скважин, размер забойки) и в определении оптимальных интервалов замедления для улучшения степени измельчения горных пород.

На блоке № 2 (горизонт +1050) было пробурено 179 скважин диаметром $\varnothing=269$ мм. Объем подготовленной к взрыву горной массы составил $V=48$ тыс. м³. Блок был обурен сеткой скважин: 6×6 м и 7×7 м. Основная задача состояла в оценке сейсмического воздействия и влияния ударных воздушных волн от массовых взрывов в границах горного отвода на охраняемые объекты (обогадительную фабрику, установку дробления рядовых углей и административно-бытовой комплекс); подборе интервалов замедления с целью уменьшения сейсмического воздействия на охраняемые объекты без изменения параметров буровзрывных работ (масса заряда, схема расположения скважин, величина забутовки).

На блоке № 3 (горизонт +1075) было пробурено 298 скважин диа-

метром $\varnothing=251$ мм. Объем подготовленной к взрыву горной массы составил $V=185$ тыс. м³. Блок был обурен сеткой скважин: 7×7 м. Задача состояла в оценке сейсмического влияния массового взрыва с использованием электронной системы инициирования и сравнение с неэлектрической системой инициирования, без изменений параметров буровзрывных работ (масса заряда, расположение скважин, величина забивки).

На блоке № 4 (горизонт +1095) было пробурено 293 скважины диаметром $\varnothing=269$ мм. Объем подготовленной к взрыву горной массы составил $V=380$ тыс. м³. Блок был обурен сеткой скважин 10×9 м. Задача состояла в оценке сейсмического воздействия массового взрыва на охраняемые объекты (южная часть блока — 150 скважин) и определении эффективности дробления горных пород (северная часть блока — 143 скважины) при использовании электронной системы инициирования с подбором различных интервалов замедлений на разных частях блока, без изменения параметров БВР (масса заряда, сетка скважин, величина забойки).

На блоке № 5 (горизонт +990) было пробурено 300 скважин диаметром $\varnothing=269$ мм. Объем подготовленной к взрыву горной массы составил $V=370$ тыс. м³. Блок был обурен сеткой скважин: 11×9 м. Задача состояла в оценке уровня сейсмического воздействия при проведении массового взрыва с использованием электронной системы инициирования по сравнению с неэлектрическими методами инициирования, с измененными параметрами БВР (сетка скважин); оценке эффективности процесса дробления горных пород при использовании электронной системы детонации в сравнении с неэлектрическими методами иници-

ирования; определение оптимальных интервалов замедления для повышения степени измельчения горных пород.

Электронная система для инициирования взрывов была проверена в процессе осуществления массовых взрывов на соответствие стандартам и техническим требованиям. Оценка влияния массовых взрывов на охраняемые объекты, проводимую в границах горного отвода, осуществляли на основе показаний измерительных приборов. В ходе опытных взрывов с последующей обработкой блока экскаватором была проведена оценка эффективности электронной системы инициации в сравнении с неэлектрическими системами инициации. Были исследованы возможности применения электронной системы инициации на разрезе «Эльгинский».

Проведение эксперимента

Регистрация сейсмического действия массовых взрывов при проведении испытаний производилась с помощью цифровых мини-сейсмографов MS-2G½ Ми, MS-8G½ М производства White Industrial Seismology (США).

Мини-сейсмограф предназначен для мониторинга взрывной вибрации поверхности земли при ведении взрывных работ. Сейсмограф включает в себя один акустический и три сейсмических канала. Частотная характеристика: от 2 до 500 Гц при частоте дискретизации 2048 Гц/сек. Микрофон: ceramic element, 160 дБ.

Устройство запоминает всю необходимую информацию даже при его выключении. На дисплее устройства всегда отображается актуальная информация о текущем времени и дате. Дисплей оборудован жидкокристаллическим экраном, способным отображать два ряда буквенно-цифровой информации. Для всех экспериментальных блоков были проведены массовые взрывы с использованием неэлектриче-

ской системы инициирования (в первой части блока) и электронной системы взрывания (во второй части блока). С целью предотвращения повреждения устройств неэлектрического инициирования инициация обеих частей блока осуществлялась одновременно, в противоположных направлениях от точки их соединения в центре блока.

Сетка скважин части блока, инициируемая системой электронного взрывания, была увеличена на 1 метр между скважинами в ряду и 1 метр между рядами скважин.

Целью проведенных экспериментального массового взрыва являлась оценка сейсмического воздействия взрыва, инициируемого с помощью неэлектрической системы инициирования, на охраняемые объекты.

Для экспериментального блока №4 (инициируемого с помощью системы электронного взрывания) целью было:

- добиться максимально высокого качества взорванной породы;
- уменьшить ширину развала взорванной породы и минимизировать ее сброс на нижний горизонт;
- сократить переброску взорванной породы за пределы блока.

Результаты проведенного экспериментального массового взрыва

На основе проведенного анализа качества взорванной горной породы (гранулометрический состав взорванной породы, анализ производительности горного оборудования, разработка подошвы уступа и т.д.) можно сделать вывод о некотором улучшении качества взорванной горной породы в данном блоке по сравнению с аналогами, взорванными с применением неэлектрической системы взрывания.

Ширина разброса взорванной горной породы позволила избежать сброса породы на нижележащий горизонт;

Переброса взорванной породы за пределы блока не произошло.

Сравнение влияния массовых взрывов на окружающую среду при использовании электронных систем взрывания и неэлектрических систем инициирования

Одним из методов оценки сейсмостойкости является анализ параметров сейсмического воздействия. Максимальные ускорения, скорость колебаний основания и максимальное смещение основания под охраняемыми объектами являются основными параметрами, используемыми для нормирования сейсмических воздействий. В горнодобывающей промышленности из-за ряда факторов предельные значения скорости смещения грунта устанавливаются в качестве стандарта. Традиционно выбор скорости смещения грунта в качестве основного параметра объясняется тем, что скорость колебаний лучше всего коррелирует с повреждениями охраняемых зданий и сооружений. Кроме того, использование скорости колебаний в качестве параметра позволяет ввести понятие поверхностной плотности энергии продольной сейсмической волны, которая является общей (интегральной) характеристикой сейсмического воздействия и связывает энергию взрыва с кинетической энергией движения частиц грунта. Подобие критериев, введенное в 1940-х гг. профессором М. А. Садовским, связывает максимально допустимую скорость колебаний грунта с дистанцией до точки взрыва и мощностью (массой) заряда взрывчатого вещества (ВВ). Также стоит учитывать магнитуды общего заряда взрыва и максимального заряда ступени [22].

Для определения влияния массовых взрывов на инженерные сооружения необходимо установить взаимосвязь между интенсивностью колебаний

массива горных пород, параметрами взрыва и расстоянием от места взрыва до охраняемого объекта. Исследования показывают, что использование короткозамедленного взрывания уменьшает сейсмическое воздействие [23].

В ходе экспериментального исследования, направленного на сравнительный анализ сейсмического воздействия массовых взрывов с использованием электронных систем взрывания и неэлектрических систем инициирования, был проведен регрессионный анализ зависимости скорости смещений под охраняемыми объектами от приведенного расстояния. В анализ были включены данные о скорости смещения грунта в основаниях охраняемых объектов, полученные при использовании неэлектрических систем инициирования для каждого из исследованных блоков: № 6 (дата массового взрыва — 06.07.2019 г.), № 7 (дата массового взрыва — 19.07.2019 г.), № 73 (дата массового взрыва 27.07.2019 г.). При использовании системы электронного взрывания: блок № 2 (дата массового взрыва — 21.07.2019 г.). Количество принятых к анализу сейсмограмм составило 19 штук.

Связь между скоростью смещения грунта (суммарная векторная скорость), количеством взрывчатого вещества в скважине (выраженное в тротиловом эквиваленте, в связи с использованием разных типов взрывчатых веществ с различными характеристиками) и расстоянием до охраняемого объекта (место установки сейсмографа) можно описать как:

$$V = K - \alpha \cdot V = K - \alpha \cdot R_{\text{прив}},$$

где $R_{\text{прив}}$ — приведенное расстояние от места взрыва до защищаемого объекта (места установки сейсмографа); R — фактическое расстояние от места взрыва до защищаемого объекта (места

установки сейсмографа), м; Q – масса взрывчатого вещества в скважине (в тротиловом эквиваленте), кг; K и α – постоянные расчетные величины.

В табл. 1 приведены аналитические данные сейсмического действия массового взрыва (экспериментальный блок № 6).

В табл. 2 приведены аналитические данные сейсмического действия массового взрыва (экспериментальный блок № 7).

В табл. 3 приведены аналитические данные сейсмического действия массового взрыва (экспериментальный блок № 1).

В табл. №4 приведены аналитические данные сейсмического действия массового взрыва (экспериментальный блок № 8).

На рис. 1 представлена план-схема расположения объектов Эльгинского

горно-обогатительного комплекса (ЭГОК), с нанесением местоположения экспериментальных взрывных блоков.

Сопоставление скоростей смещения горных пород при взрывах на равных приведенных расстояниях с использованием электронных детонаторов и неэлектрических систем инициирования показано на рис. 2.

Выводы

1. Из анализа экспериментальных данных векторных скоростей смещения горных пород при производстве взрывных работ, выполненных с 6 мая по 27 июля 2019 года на исследуемых блоках разреза «Эльгинский», следует, что применение электронных детонаторов на экспериментальном блоке №8 с замедлением в скважинах 35 мс позволило снизить сейсмический эффект от взрыва по сравнению



Рис. 1. Схема размещения экспериментальных блоков на ЭГОК: 1 – обогатительная фабрика, 2 – АБК, 3 – УДРУ (установка дробления рядовых уелей); красные окружности – места проведения экспериментальных взрывов

Fig. 1. Layout of experimental blocks at the “Elginsky” mining and processing plant: 1 – processing plant, 2 – administrative and household building, 3 – crushing plant for ordinary coals; red circles are the locations of experimental explosions

Таблица 1

Аналитические данные сейсмического действия массового взрыва
Analytical data on the seismic effect of a mass explosion

№ пп	№ сейсмо- графа	V, мм/с	R, м	R/√Q	Lg(R/√Q)	Lg(V)
1	5214	1,4256	1075	38,97	1,591	0,154
2	5213	0,5572	1500	54,37	1,735	-0,254
3	5210	2,3962	675	24,47	1,389	0,380
4	5208	0,6876	1650	59,81	1,777	-0,163

Коэффициент корреляции = 0,97

Таблица 2

Аналитические данные сейсмического действия массового взрыва
Analytical data on the seismic effect of a mass explosion

№ пп	№ сейсмо- графа	V, мм/с	R, м	R/√Q	Lg(R/√Q)	Lg(V)
1	5214	0,6476	1350	62,74	1,798	-0,189
2	5213	2,1487	700	32,53	1,512	0,332
3	5210	0,6599	1000	46,47	1,667	-0,181
4	5211	0,3111	1975	91,79	1,963	-0,507
5	5208	0,2333	1850	85,98	1,934	-0,632

Коэффициент корреляции = 0,95

Таблица 3

Аналитические данные сейсмического действия массового взрыва
Analytical data on the seismic effect of a mass explosion

№ пп	№ сейсмо- графа	V, мм/с	R, м	R/√Q	Lg(R/√Q)	Lg(V)
1	5214	0,4752	1925	65,64	1,817	-0,323
2	5213	0,26	2550	86,95	1,939	-0,585
3	5210	1,023	1575	53,71	1,730	0,010
4	5211	1,2247	1500	51,15	1,709	0,088
5	5208	0,2267	2625	89,51	1,952	-0,645

Коэффициент корреляции = 0,97

Таблица 4

Аналитические данные сейсмического действия массового взрыва
Analytical data on the seismic effect of a mass explosion

№ пп	№ сейсмо- графа	V, мм/с	R, м	R/√Q	Lg(R/√Q)	Lg(V)
1	5214	1,4865	600	29,67	1,472	0,172
2	5213	0,4016	1100	54,39	1,736	-0,396
3	5210	0,9333	600	29,67	1,472	-0,030
4	5211	1,2313	650	32,14	1,507	0,090
5	5208	0,3927	875	43,27	1,636	-0,406

Коэффициент корреляции = 0,91

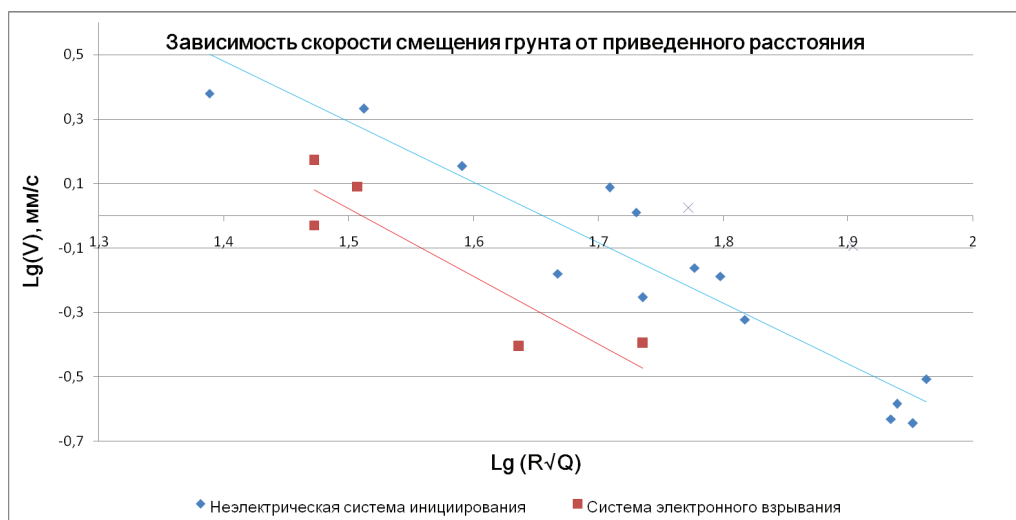


Рис. 2. Зависимость скорости смещения грунта от приведенного расстояния
 Pic. 2. Dependence of the displacement rate of the soil on the given distance

с сейсмическим эффектом от взрыва блока с применением неэлектрических систем инициирования.

2. Использование электронных систем взрыва при проведении массовых взрывов на опытных блоках позволило добиться определенных успехов в регулировании характеристик образованного горной массой отвала.

3. Применение подходящих замедлителей в скважинном взрывании с использованием электронной системы взрыва на взрываемых блоках помогло минимизировать риск повреждения скважин на смежных блоках на том же горизонте.

Технология взрывных работ с применением миллисекундного замедления была признана эффективным способом улучшения дробления горных пород и снижения уровня вибрации в горнодобывающей промышленности, разработке карьеров, а также в гражданском строительстве. Наложение волн, создаваемое соответствующим временем задержки, подтверждено как многообещающая стратегия дальнейшего снижения уровня вибрации [24].

Заключение

Анализ результатов экспериментов с использованием электронных систем взрыва показал увеличение эффективности взрывных работ и уменьшение негативного воздействия сейсмического эффекта на охраняемые объекты. Это не является руководством к действию, т.к. при научном подходе к применению систем неэлектрического взывания также возможно получить хорошие результаты. При этом стоит учитывать физико-механические свойства пород, обводненность, вечную мерзлоту, трещиноватость, условия внешней среды и другие факторы, влияющие на качественные показатели взрыва. Обеспечение безопасности сейсмического воздействия взрывов на здания и сооружения, несомненно, является сложной задачей, требующей комплексного подхода и непрерывного внимания. Однако, правильное решение этой проблемы позволит повысить эффективность горных работ и снизить риски для персонала и окружающей среды. Внедрение технологий электронного взрыва, доработка методов неэлектрического

взрывания на разрезе «Эльгинский» и разработка специализированных методов контроля могут стать ключевыми факторами в улучшении этой области и обеспечении устойчивого развития Эльгинского ГОК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин В. В. Развитие техногенно-тектонической сейсмичности в Кузбассе // Геология и геофизика. — 2018. — Т. 59, № 5. — С. 709–724.

2. Gui Y. L., Zhao Z. Y., Jayasinghe L. B., Zhou H. Blast wave induced spatial variation of ground vibration considering field geological conditions // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2018. Vol. 101. P. 63–68. DOI: 10.1016/j.ijrmmms.2017.11.016.

3. Гурьев В. В., Дорофеев В. М., Акбиев Р. Т., Булыкин В. И. О критериях дефицита сейсмостойкости при эксплуатации объектов жилищного фонда на сейсмически активных территориях // Жилищное строительство. 2023. № 3. С. 50–61. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-3-50-61>.

4. Комащенко В. И., Воробьев Е. Д., Лукьянов В. Г. Разработка технологии взрывных работ, уменьшающей вредное воздействие на окружающую среду // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2017. — Т. 328. — No 8. С. 33–40.

5. Vokhmin S. A., Kurchin G. S., Kirsanov A. K., Shigin A. O., Shigina A. A. Destruction of rock upon blasting of explosive agent // ARP Journal of Engineering and Applied Sciences, 2017, vol. 12 (no. 13), pp. 3978–3986.

6. Малинин Ю. А., Гриб Н. Н. Проблемы геологии и освоения недр: труды XXI Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 130-летию со дня рождения профессора М. И. Кучина. Том II // Томский политехнический университет. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2017. — с. 576–578.

7. Гриб Н. Н., Терещенко М. В., Гриб Г. В., Пазынич А. Ю. Прогноз сейсмического воздействия взрывных работ на горную инфраструктуру. // Горные науки и технологии. — 2017. — (1):12–22. DOI: <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2017-1-12-20>.

8. Attila Kovacs, Bogdan Garaliu-Busoi, Daniela Carmen Rus, Claudia Miron, and Olga Miclea / Methodology for measuring the seismic effects generated by quarry blasting works / MATEC Web of Conferences 373, 00060 (2022)/ <https://doi.org/10.1051/mateconf/202237300060>.

9. Заровняев Б. Н., Ильин А. А., Шубин Г. В. Интегрированная геотехнология разработки угольного месторождения // Успехи современного естествознания. — 2021. — № 12. — С. 114–119.

10. Малинин Ю. А. Геологические особенности разработки первой очереди Эльгинского месторождения: Строение литосферы и геодинамика: Материалы XXVII Всероссийской молодежной конференции с участием исследователей из других стран (Иркутск, 22–28 мая 2017 г.). — Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2017. — 294 с. (с. 142–143).

11. Эквист Б. В., Горбонос М. Г. Повышение безопасности сейсмического проявления короткозамедленного взрывания на горных предприятиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 10. — С. 34–36. DOI: [10.17580/gzh.2016.10.06](https://doi.org/10.17580/gzh.2016.10.06).

12. Сысоев А. А. Сравнительная оценка пиротехнических и электронных капсулей-детонаторов на основе вероятностной модели инициирования системы скважинных зарядов / А. А. Сысоев, С. А. Кондратьев, И. Б. Катанов // Взрывное дело. Выпуск

№ 126/83. – М.: ИПКОН РАН. – 2020. – С. 85–99. DOI: 10.26730/1999–4125–2021–5–102–107.

13. Кутуев В. А., Меньшиков П., Жариков С. Н. Анализ взрывного сейсмического воздействия на подземные горные выработки в условиях шахты Магнетитовая // VIII Международная научная конференция «Проблемы комплексного освоения георесурсов». E3S Web of Conferences 192, 01029 (2020). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019201029>

14. Malbasic V., Stojanovic L. Determination of seismic safety zones during the surface mining operation development in the case of the “Buvac” open pit // Minerals. – 2018. – vol. 8, No 2. – 71 p.

15. Korrat I. M., Lethy A., ElGabry M. N. Discrimination Between Small Earthquakes and Quarry Blasts in Egypt Using Spectral Source Characteristics // Pure and Applied Geophysics. 2022. Vol. 179. P. 599–618. <https://doi.org/10.1007/s00024–022–02953-w>.

16. Кокин С. В., Пархоменко Д. М., Бервин А. В. Опыт ООО «Кузбассразрезуголь-Взрывпром» по снижению воздействия массовых взрывов в Кузбассе на охраняемые объекты и окружающую среду // Горная Промышленность. – 2019. – № 5 (147). – С. 72–75. DOI 10.30686/1609–9192–2019–5–72–75.

17. Верхованцев А. В., Дягилев Р. А., Шулаков Д. Ю., Шкурко А. В. Мониторинг сейсмических нагрузок при взрывных работах на Шахтаумском карьере // Горный научный журнал. – 2019. – Том 55. – No 2. – с. 229–238.

18. Асминг В. Э., Федоров А. В., Федоров И. С., Онуприенко В. С., Стрешнев А. А. Автоматизированная система сейсмического мониторинга Восточного рудника КФ АО «Апатит»: программно-аппаратные решения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 8. – С. 45–62. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_8_0_45.

19. Добрынина А. А., Герман В. И., Саньков В. А. Распознавание промышленных взрывов и слабых природных землетрясений // Уголь. – 2022. – № S12. – С. 23–29. <http://dx.doi.org/10.18796/0041–5790–2022–S12–23–29>.

20. Кокин С. В., Пархоменко Д. М., Бервин А. В. Управление параметрами массового взрыва // Взрывное дело. – 2019. – № 125/8. – С. 39–52.

21. Jhon Silva, Tristan Worsey, Braden Lusk. Practical assessment of rock damage due to blasting // International Journal of Mining Science and Technology. Volume 29, Issue 3, May 2019, p. 379–385. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.11.003.

22. Еманов А. Ф., Еманов А. А., Фатеев А. В., Шевкунова Е. В., Ворона У. Ю., Сержеников Н. А. Сейсмический эффект промышленных взрывов в Западной Сибири и наведенная сейсмичность // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2018. – Т. 45, – № 4. – С. 5–24. DOI: 10.21455/VIS2018.4–1.

23. Зуева И. А., Лебедев А. А. Сейсмический эффект промышленных взрывов Костомукшского ГОК // Вестник МГТУ. 2020. – Т. 23, – № 1. – С. 22–28. DOI: 10.21443/1560–9278–2020–23–1–22–28.

24. Gou Yonggang, Shi Xiuzhi, Qiu Xianyang, Huo Xiaofeng, Yu Zhi. Assessment of induced vibrations derived from the wave superposition in time-delay blasts // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2021. Vol. 144. 104814. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104814>

REFERENCES

1. Adushkin V. V. Development of technogenic-tectonic seismicity in Kuzbass. Geology and Geophysics, 2018, vol. 59, no. 5, pp. 709–724. [In Russ].

2. Gui Y. L., Zhao Z. Y., Jayasinghe L. B., Zhou H. Blast wave induced spatial variation of ground vibration considering field geological conditions. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2018. Vol. 101. P. 63–68. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2017.11.016.

3. Gur'ev V. V., Dorofeev V. M., Akbiev R. T., Bulykin V. I. On the criteria for the lack of seismic resistance in the operation of housing facilities in seismically active territories. *Housing construction*, 2023, no. 3 pp. 50–61. [In Russ].

4. Komashchenko V. I., Vorob'ev E. D., Luk'yanov V. G. Development of blasting technology that reduces the harmful impact on the environment / *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 8, pp. 33–40. [In Russ].

5. Vokhmin S. A., Kurchin G. S., Kirsanov A. K., Shigin A. O., Shigina A. A. Destruction of rock upon blasting of explosive agent. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2017, vol. 12 (no. 13), pp. 3978–3986.

6. Malinin Yu. A., Grib N. N. Problems of geology and subsoil development: proceedings of the XXI International Symposium named after Academician M. A. Usov of students and young scientists dedicated to the 130th anniversary of the birth of Professor M. I. Kuchin. Volume II / Tomsk Polytechnic University, Tomsk Polytechnic University Publ, Tomsk, 2017, 1074 p. (pp. 576–578). [In Russ].

7. Grib N. N., Tereshchenko M. V., Grib G. V., Pazynich A. Yu. Forecast of seismic impact of blasting operations on mining infrastructure. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2017. (1):12–22. [In Russ]. DOI: <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2017-1-12-20>.

8. Attila Kovacs, Bogdan Garaliu-Busoi, Daniela Carmen Rus, Claudia Miron, and Olga Miclea / *Methodology for measuring the seismic effects generated by quarry blasting works / MATEC Web of Conferences 373, 00060 (2022)/* <https://doi.org/10.1051/mateconf/202237300060>.

9. Zarovnyaev B. N., Il'in A. A., Shubin G. V. Integrated geotechnology of coal field development / *Successes of modern natural science*, 2021, no. 12, pp. 114–119. [In Russ].

10. Malinin Yu. A. Geological features of the development of the first stage of the Elginsky deposit: The structure of the lithosphere and geodynamics: Materials of the XXVII All-Russian Youth Conference with the participation of researchers from other countries (Irkutsk, May 22–28, 2017). Irkutsk: Institute of the Earth's Crust SB RAS, 2017. 294 p. (pp. 142–143). [In Russ].

11. Ekvist B. V., Gorbonos M. G. Improving the safety of seismic manifestations of short-delayed blasting at mining enterprises. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2016, no. 10, pp. 34–36. [In Russ].

12. Sysoev A. A., Kondrat'ev S. A., Katanov I. B. Comparative evaluation of pyrotechnic and electronic detonator caps based on a probabilistic model of initiation of a borehole charge system. *Demolition*, 126/83, Moscow, IPKON RAN, 2020, pp. 85–99. [In Russ].

13. Kutuev V. A., Menshikov P., Zharikov S. N. Analysis of blasting seismic impact on underground mining workings under the conditions of the Magnezitovaya mine/ *E3S Web of Conferences 192, 01029 (2020)*. VIII International Scientific Conference “Problems of Complex Development of Georesources”. [In Russ]. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019201029>.

14. Malbasic V., Stojanovic L. Determination of seismic safety zones during the surface mining operation development in the case of the “Buvac” open pit. *Minerals*. 2018. vol. 8, No 2. 71 p.

15. Korrat I. M., Lethy A., ElGabry M. N. Discrimination Between Small Earthquakes and Quarry Blasts in Egypt Using Spectral Source Characteristics. *Pure and Applied Geophysics*. 2022. Vol. 179. P. 599–618. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-02953-w>.

16. Kokin S. V., Parkhomenko D. M., Bervin A. V. The experience of LTD “Kuzbassrazrezugol-Explosion” in reducing the impact of mass explosions in Kuzbass on protected objects and the environment. *Russian Mining Industry*, no. 5 (147), 2019, p. 72. [In Russ]. DOI 10.30686/1609-9192-2019-5-72-75.

17. Verkholantsev A. V., Dyagilev R. A., Shulakov D. Y., Shkurko A. V. Monitoring of Earthquake Loads from Blasting in the Shakhtau Open Pit Mine. *Journal of Mining Science*. 2019. Vol. 55. N2. pp. 229–238. [In Russ].

18. Asming V. E., Fedorov A. V., Fedorov I. S., Onupriyenko V. S., Streshnev A. A. Automated seismic monitoring in Vostochny Mine of Apatit's Kola Branch: Hardware/software solutions. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(8):45–62. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_8_0_45.

19. Dobrynina A. A., German V. I., San'kov V. A. Recognition of industrial explosions and weak natural earthquakes / *Ugol*, 2022, no. S12, pp. 23–29. [In Russ]. <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-S12-23-29>.

20. Kokin S. V., Parkhomenko D. M., Bervin A. V. Control of mass explosion parameters. *Demolition*, 2019, no. 125/8, pp. 39–52. [In Russ].

21. Jhon Silva, Tristan Worsey, Braden Lusk. Practical assessment of rock damage due to blasting. *International Journal of Mining Science and Technology*. Volume 29, Issue 3, May 2019, p. 379–385. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.11.003.

22. Emanov A. F., Emanov A. A., Fateev A. V., Shevkunova E. V., Vorona U. Yu., Serezhnikov N. A. Seismic effect of industrial explosions in Western Siberia and induced seismicity. *Problems of Engineering Seismology*, 2018, vol. 45, no. 4, pp. 5–24. [In Russ]. DOI: 10.21455/VIS2018.4-1.

23. Zueva I. A., Lebedev A. A. Seismic effect of industrial explosions of the Kostomukhsky mining and Processing Plant / *Herald of the Bauman Moscow State Technical University*, 2020, vol. 23, no.1, pp. 22–28. [In Russ]. DOI: 10.21443/1560-9278-2020-23-1-22-28.

24. Gou Yonggang, Shi Xiuzhi, Qiu Xianyang, Huo Xiaofeng, Yu Zhi. Assessment of induced vibrations derived from the wave superposition in time-delay blasts. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021. Vol. 144. 104814.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Малинин Юрий Анатольевич – старший преподаватель, Технический институт (ф) Северо-Восточного федерального университета в г. Нерюнгри, г. Нерюнгри, 678960, Россия, e-mail: alkor.05@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7473-2808>;

Гриб Николай Николаевич – докт. техн. наук, профессор, зам. директора по научной работе, Технический институт (ф) Северо-Восточного федерального университета в г. Нерюнгри, г. Нерюнгри, 678960, Россия, e-mail: grib-n-n@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-3818-9473.

Для контактов: *Малинин Юрий*, alkor.05@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Malinin Yu. A., senior lecturer, Nerungri Technical Institute (branch) of M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Nerungri, 678960, Russia, e-mail: alkor.05@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7473-2808>;

Grib N. N., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Deputy. director of scientific work, Nerungri Technical Institute (branch) of M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Nerungri, 678960, Russia, e-mail: grib-n-n@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-3818-9473.

Получена редакцией 05.10.2023; получена после рецензии 26.10.2023; принята к печати 10.11.2023.

Received by the editors 05.10.2023; received after the review 26.10.2023; accepted for printing 10.11.2023.

