

УДК 622.235.535.2

**СРАВНЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ
ПРИ ОТРАБОТКЕ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА ДЛИННЫМ ЗАБОЕМ**

Л. Войтецкий¹, И. Голда²

¹Центральный институт горного дела,
Площадь Гварков, 1, 40-166, г. Катовице, Польша

²Силезский технологический университет,
E-mail: lwojtecki@gig.eu, ул. Академика, 2, 44-100, г. Гливице, Польша

Снижение угрозы горных ударов при подземной разработке каменноугольных пластов возможно с помощью стратегии активного предотвращения, которая заключается в снятии избыточного напряжения взрывами длинных скважин. Использован метод оценки сейсмического эффекта взрыва в каменноугольных шахтах на чешской части Верхнесилезского каменноугольного бассейна. Применена классификационная система оценки сейсмического эффекта с помощью статистического анализа, учитывающего энергию вызванных толчков и массу взрывчатых веществ. Выполнен анализ эффективности подобных взрывов при разработке длинным забоем угольного пласта № 408 в шахте на польской части Верхнесилезского каменноугольного бассейна. Подтверждена эффективность взрывов при обрушении кровли. Сейсмический эффект при использовании разгрузочных взрывов заключается в проявлении дополнительных процессов, в результате которых массив горных пород приобретает новое равновесное напряженно-деформированное состояние.

Метод оценки сейсмического эффекта, взрывное обрушение кровли

DOI: 10.15372/FTPRI20200607

Горные удары происходят во многих типах подземных шахт, особенно в каменноугольных. Изучение этого явления на чешской и польской частях Верхнесилезского каменноугольного бассейна (ВКБ) проводится в течение многих лет [1 – 12]. Горный удар — это внезапное высвобождение энергии деформации, накопленной в массиве горных пород [7]. Он связан с высокоэнергетическими колебаниями массива, акустическими эффектами и ударными волнами и становится причиной структурных разрушений угольного пласта, пород кровли или почвы; одновременного смещения породы, подлежащей добыче; повреждения или разрушения крепи, машин и оборудования. Горные удары приводят к остановке горнодобывающих работ в выработке и могут повлечь травмы и смерть шахтеров.

Повышение уровня горных ударов при подземной разработке угольных пластов ВКБ обусловлено увеличением глубины добычи из-за возрастания напряжения; тенденцией угольных пластов к накапливанию энергии; оседанием мощных слоев твердых пород в кровле; наличием дефектов, складок и размытых участков в пластах, а также краев и остатков других пластов.

Для снижения угрозы горных ударов в подземных каменноугольных шахтах применяют активные и пассивные методы предотвращения. Аккумуляированные в породе напряжения могут быть эффективно сняты взрывом, который сопровождается сейсмическим воздействием. В каменноугольных шахтах выделяют два основных вида взрывных работ для предотвращения горных ударов: сотрясательные и разгрузочные с использованием длинных скважин. Взрывы проводят в кровле и почве пластов. Разгрузочные взрывные работы широко применяются в шахтах Чехии и на польской части ВКБ [8, 13–23].

Важна корректная оценка эффективности взрыва. Низкоэнергетическое сейсмическое воздействие взрывчатых веществ (ВВ) возникает в результате неправильного определения параметров взрыва: количества, длины и порядка расположения взрывных скважин, массы ВВ и т. д. Высокоэнергетическое воздействие приводит к высвобождению напряжений и новому равновесному напряженно-деформированному состоянию массива горных пород. Классификация сейсмических эффектов (СЭ) при взрыве может потребоваться при проектировании или модификации активной стратегии предотвращения горных ударов.

С помощью метода оценки СЭ выполнен статистический анализ эффектов взрывов в каменноугольных шахтах и предложена система классификаций. Эффект разгрузочных взрывов нельзя непосредственно отследить при подземной добыче. Снятие напряжений может быть зафиксировано сейсморазведкой или анализом изменения сейсмической активности [7, 24].

В каменноугольных шахтах также используются другие виды взрывных работ: для обрушения кровли, разрушения целиков и т. д. Первый тип применяют при разработке пласта длинными забоями, когда твердая порода кровли подвержена опасности зависания, так как внезапное обрушение кровли позади поверхности забоя приводит к выбросу угля [25]. Необходимо проводить систематическое управляемое обрушение кровли для бесперебойного и безопасного подвигания добычного забоя.

Анализ многолетнего опыта эксплуатации шахт показывает, что горные толчки после эффективных взрывов по обрушению кровли мощнее ожидаемой энергии детонации ВВ. Наличие дополнительных геомеханических процессов, возникающих в результате взрыва, отражается в более высокой энергии регистрируемых горных толчков, что характерно и для разгрузочных взрывов в породе кровли.

В настоящей работе представлены оба типа взрывных работ, использованные при разработке длинного забоя пласта № 408 на одной из шахт, расположенной в польской части ВКБ. Эффекты взрывных работ проанализированы методом оценки СЭ, верификация которого выполнена по результатам локальных взрывов по обрушению кровли.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ГОРНОТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

Обработка пласта № 408 спроектирована длинным забоем с обрушением. Наименьшая мощность пласта (около 1.6 м) наблюдается около квершлага, пройденного сплошным забоем и расположенного на востоке от стороны сброса 50 м, рядом с границей области добычи. По длинной панели забоя максимальная мощность пласта № 408 составляет около 2.6 м. Между пластами присутствует тонкий пропласток сланца 0.05–0.15 м. Угол падения пласта равен 6–16° в основном направлении с северо-востока на юго-запад. Предел прочности пород пласта на одноосное сжатие достигает 16 МПа.

Согласно польским стандартам, угольный пласт № 408 классифицирован следующим образом: угроза горных ударов — 2-я степень; угроза выброса метана — 4-я категория; угроза затопления — 1-я степень; самовозгорание — 2-я группа; угроза взрыва угольной пыли — класс В.

Высота длинного очистного забоя составляет 1.91–2.48 м, ширина панели — 200 м, а средняя длина — около 1340 м (около 1348 м вдоль хвостового штрека и 1332 м вдоль главного штрека). Подвигание забоя происходит с запада на восток. На отметке 840 м расположена конечная часть панели забоя рядом с границей предохранительного целика для стволов. Панель забоя находится южнее выработанного пространства и образована ранней разработкой угольного пласта № 408, которая осуществлялась 5–6 лет назад. Хвостовой штрек отгорожен от старого выработанного пространства угольным целиком шириной около 5 м. Глубина заложения панели длинного забоя 1010–1050 м относительно поверхности, а теоретический уровень напряжений, возникший из-за глубины залегания пород, 25–26 МПа.

Почва пласта № 408 — глинистый и песчаный сланец. Наблюдается тонкая угольная прослойка на восточной и юго-восточной стороне панели забоя. Согласно геологическому профилю, полученному при бурении панели, почва пласта состоит из глинистого сланца (4.47 м), слоя забалансового угля (1.69 м), смеси глинистого и песчаного сланца (5.06 м) и песчаника (1.68 м).

По результатам бурения непосредственная кровля пласта № 408 представляет слой смеси глинистого и песчаного сланца (0.17 м). За ним залегают слои песчаника (3.61 м) и смеси глинистого и песчаного сланца (17.58 м), а затем угольный пласт № 407/3 мощностью около 2.77 м. В некоторых областях панели длинного забоя присутствует песчаник сразу за выработанным пластом, что встречается рядом с хвостовым штреком от середины до конечной части панели.

Мощный угольный пласт № 405/2, залегающий на 106 м выше пласта № 408, разрабатывался путем разделения на два слоя (около 7.4 м). Верхний слой пласта № 405/2 (№ 405/2tl) отработан примерно 17–19 лет назад. Край пласта № 405/2tl присутствовал только в начале и в конце панели длинного забоя. Большая часть панели пласта № 408 расположена под выработанным пластом № 405/2tl. Нижний слой угольного пласта № 405/2 (№ 405/2bl) отработан примерно 4–11 лет назад. Его край находился за панелью забоя. Хвостовой штрек располагался в области полной выработки пласта № 405/2.

Выше пласта № 408 на расстоянии 325, 343, 380 и 424 м находятся полностью невыработанные пласты № 364/3; 364/1; 361/1 и 358/1. Они разработаны 13 лет назад. Мощность пласта № 364/3 составляет 2.25 м, его край располагается на середине панели пласта № 408; мощность пласта № 364/1 — 1.6 м, его край находится в начале панели пласта № 408. Мощность пласта № 361/1 — 1 м, но через 20-сантиметровую прослойку сланца к нему примыкают угольные пласты мощностью 0.2 и 0.45 м. Край этого пласта размещается за пределами панели пласта № 408 с южной стороны. Мощность пласта № 358/1 — 2.1 м, его край зафиксирован в начале панели пласта № 408.

Кластер краев угольных пластов № 358/1; 364/1; 364/3 расположен на восточной стороне от панели пласта № 408 и связан с границей предохранительного целика ствола на уровне 840 м. В этой части массива распределение напряжений неравномерно.

Край пласта представляет границу между угольной и пустой породой. Рядом с ним уровень напряжений в массиве увеличивается. Из-за разработки пласта № 408 высвободились накопленные напряжения в близости налегающих угольных пластов. Это явление зафиксировано при регистрации сейсмической активности. Сильные сейсмические толчки связаны с угрозой горных ударов.

СЕЙСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И УГРОЗА ГОРНЫХ УДАРОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ДЛИННОГО ЗАБОЯ

Мониторинг панели пласта № 408 осуществлялся горной шахтной сейсмической сетью, которая включает 14 сейсмостанций, расположенных в выработках на глубине 640 – 1050 м. Для сейсмического мониторинга использовались сейсмометры и зонды-геофоны, измеряющие вертикальную составляющую скорости перемещения массива. Местоположение толчков определено методом регистрации первого прибытия P -волны. Ошибка установления местоположения эпицентра изменялась от 30 до 130 м. Неточность определения вертикальной координаты — $Z = 60 - 200$ м, времени первого прибытия P -волны — 10 мс, скорости — 20 м/с. Наименьшие погрешности местоположения эпицентра и вертикальной координаты Z получены на востоке, где осуществлено распределение сейсмических датчиков.

Сейсмическая энергия толчков E_{ICM} рассчитана методом численного интегрирования сейсмограмм, на i -й сейсмостанции вычислена с учетом: квадрата амплитуды A_i в следующих n -регистрациях между маркерами начала и конца; частоты регистрации $f = 500$ Гц; плотности массива горной породы $\rho = 2600$ кг/м³; качественного коэффициента затухания в массиве (30), обратная величина которого представлена b ; коэффициента калибровки k_i , рассчитанного для каждой станции; расстояния между фокусом и сейсмостанцией r_i (параметр включен в коэффициент глубины d_i) и скорости направленной сейсмической волны v_i (3800 – 4100 м/с).

Упрощенная форма использованной формулы расчета сейсмической энергии на i -й сейсмостанции выглядит следующим образом [26]:

$$E_{ICM} = 2\pi_i^2 \rho v_i \frac{1}{k_i^2} f e^b d_i \sum_n A_{i,n}^2.$$

Маркеры установлены для каждой сейсмограммы индивидуально. Интервал времени между ними находился в диапазоне 500 – 200 мс. Сейсмическая энергия любого толчка E_{ICM} получена как среднее арифметическое энергий со всех сейсмостанций [26]. Сейсмическая энергия горных толчков рассчитана подобным образом в ходе разработки пласта № 408 длинным забоем.

Сейсмоактивность в области рассматриваемого забоя в пласте № 408 оценивалась как высокая из-за угрозы горных ударов. Всего произошло 1152 горных толчка. Их локальная магнитуда M_L вычислена исходя из зарегистрированной сейсмической энергии E_{ICM} по формуле $\log E_{ICM} = 1.8 + 1.9M_L$ [27]. Общая энергия этих толчков $2.43 \cdot 10^8$ Дж.

По данным низко- и среднеэнергетических горных толчков, 614 из них обладали энергией 10^2 Дж ($0.11 \leq M_L < 0.63$), 229 — 10^3 Дж ($0.63 \leq M_L < 1.16$) и 199 — 10^4 Дж ($1.16 \leq M_L < 1.68$); 101 среднеэнергетический толчок вызван разгрузочными взрывами, являющимися частью стратегии предотвращения горных ударов и взрывов по обрушению кровли.

Энергией 10^5 Дж ($1.68 \leq M_L < 2.21$) обладали 78 высокоэнергетических толчков, а 10^6 Дж ($2.21 \leq M_L < 2.74$) — 31. Наиболее мощный толчок имел сейсмическую энергию $1 \cdot 10^8$ Дж ($M_L = 3.26$). Эпицентры большинства толчков с энергией 10^5 Дж и около половины толчков с энергией 10^6 Дж располагались в южной части панели. Эпицентры других мощных толчков распределены по панели. Мощные горные толчки произошли рядом с краями налегающих угольных пластов № 364/3; 364/1; 361/1; 358/1; 405/2tl и 405/2bl. Эпицентр самого мощного толчка размещался за пределами панели забоя, на границе целика ствола на уровне 840 м, где находится кластер краев угольных пластов № 358/1; 364/1 и 364/3. Из-за сейсмической активности и высокого уровня угрозы горных ударов применялись активные и пассивные формы предотвращения горных ударов.

РАЗГРУЗОЧНЫЕ ВЗРЫВЫ И ВЗРЫВЫ ПО ОБРУШЕНИЮ КРОВЛИ

Предотвращение горных ударов проводилось с помощью разгрузочных взрывов в породе кровли, так как основная угроза связана с напряженным состоянием массива вблизи краев налегающих угольных пластов. Цель таких взрывов — уменьшение концентрации напряжений в массиве и разрушение слоев породы кровли для предотвращения или минимизации воздействия высокоэнергетических толчков на процесс добычи. Необходимо достичь нового равновесного напряжено-деформированного состояния массива. Параметры разгрузочных взрывных работ установлены с учетом геологических и горнотехнических особенностей и технологических возможностей. Большая часть взрывных скважин пробурена со стороны главного штрека, а некоторые — со стороны хвостового штрека и галереи в пласте № 405/2т1, который расположен вблизи границы целика ствола на уровне 840 м и в конечной части панели забоя.

Диаметр каждой скважины 76 мм. Они заряжены пневматически ВВ Emulinit РМ. Все патроны ВВ загружались в донной части скважины с помощью специального рукава. Диаметр патрона составлял 32 мм при массе 300 г [28]. Плотность ВВ равнялась 1.15–1.30 г/см³. Emulinit РМ обладает следующими характеристиками: средняя скорость детонации 4500 м/с; удельная энергия взрыва 522 кДж/кг; тепловая энергия взрыва 2278 кДж/кг. Пневматическим способом загружается 5–6 кг ВВ на 1 м скважины диаметром 76 мм. Остальная часть скважины заполнялась забоечным материалом, в качестве которого использовались цилиндрические бумажные пакеты с глиной и песком. Проведено 34 разгрузочных взрыва, из которых 28 — со стороны главного штрека, 2 — со стороны хвостового штрека и 4 — из галереи, пробуренной в пласте № 405/2т1.

Скважины пробурены парами со стороны главного штрека, выше панели длинного забоя и за ее пределами, достигали 100 м в длину и имели угол наклона относительно горизонтали 60°. В каждой паре одна скважина перпендикулярна главному штреку, а вторая отклонена на 45° в северо-западном или юго-западном направлении (рис. 1). В конечной части панели длинного забоя пробурены дополнительные скважины перпендикулярно главному штреку с углом наклона около 70° относительно горизонтали. Пробурено 29 скважин над панелью забоя в северном или северо-западном направлении и 16 скважин за пределами панели в южном или юго-западном направлении. В каждую скважину поместили 144 кг ВВ, которое занимало около 29 м ее длины. При 17 взрывах детонация осуществлялась по две скважины, а при 11 — по одной. Сейсмическая энергия непосредственно вызванных колебаний находилась в диапазоне от $8 \cdot 10^3$ Дж ($M_L = 1.11$) до $9 \cdot 10^4$ Дж ($M_L = 1.66$). Во время ожидания после разгрузочных взрывов со стороны главного штрека произошел один повторный сейсмический толчок с энергией $8 \cdot 10^3$ Дж ($M_L = 1.11$).

Со стороны хвостового штрека проведено только два разгрузочных взрыва рядом с краем пласта № 405/2т1. При взрывах детонация скважин осуществлялась отдельно. Скважины пробурены перпендикулярно хвостовому штреку в южном направлении, достигали 100 м в длину и имели наклон около 70° относительно горизонтали, в каждую скважину помещали 144 кг ВВ (рис. 1). Сейсмическая энергия непосредственно вызванных колебаний составила $2 \cdot 10^4$ Дж ($M_L = 1.32$) и $6 \cdot 10^4$ Дж ($M_L = 1.57$).

Из галереи, пробуренной в пласте № 405/2т1 и расположенной на востоке конечной части панели пласта № 408 вблизи границы предохранительного целика ствола на уровне 840 м, проведено четыре взрыва. Взрывные скважины с длиной около 60 м пробурены перпендикулярно галереи в западном направлении в породе кровли угольного пласта № 405/2т1 с углом наклона –45° относительно горизонтали (рис. 1). Каждый раз осуществлялась детонация одной скважины, содержащей 48 кг ВВ. Сейсмическая энергия непосредственно вызванных колебаний со-

ставила $2 \cdot 10^3$ Дж ($M_L = 0.79$), $5 \cdot 10^3$ Дж ($M_L = 1.0$), $6 \cdot 10^3$ Дж ($M_L = 1.04$) и $1 \cdot 10^4$ Дж ($M_L = 1.16$). После разгрузочных взрывов со стороны галереи пласта № 405/2т1 произошел один повторный сейсмический толчок с энергией $4 \cdot 10^2$ Дж ($M_L = 0.42$).

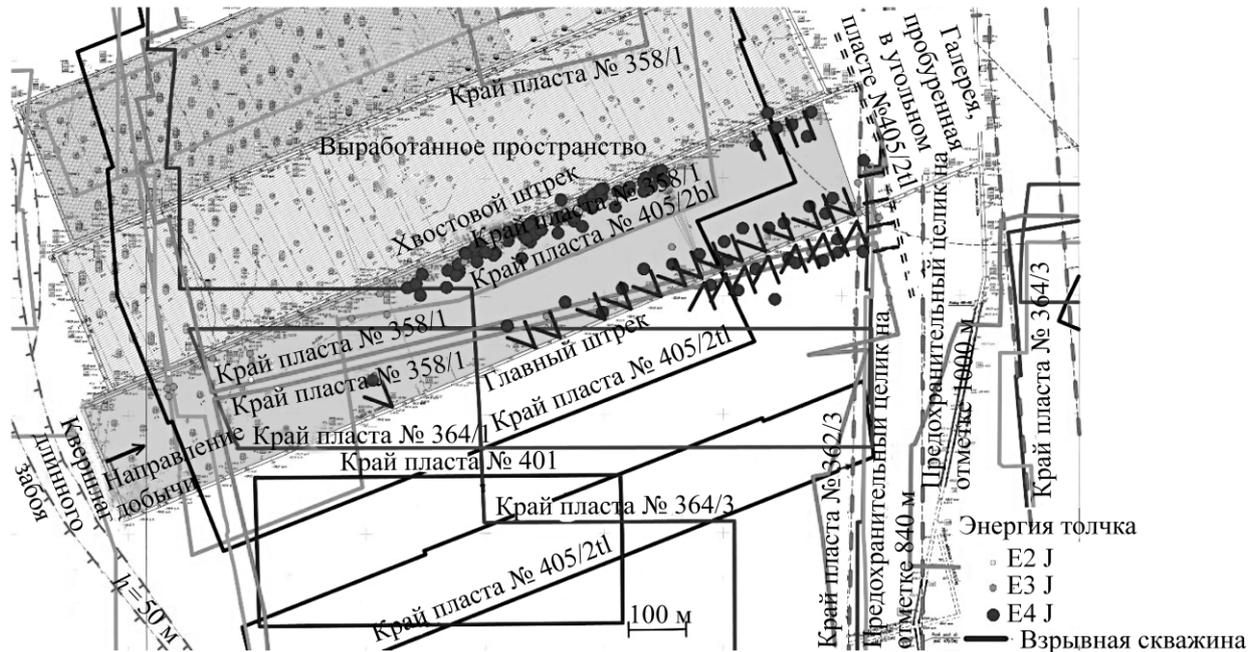


Рис. 1. Карта пласта № 408 с указанием взорванных скважин при разгрузочных взрывах и эпицентров вызванных толчков

Кроме разгрузочных взрывов, выполнены взрывы по обрушению кровли из-за наличия твердых пород в непосредственной кровле угольного пласта № 408. Для обрушения кровли проведено 94 взрыва со стороны хвостового штрека. Взрывные скважины, длина которых не достигает очистного забоя на несколько метров, пробурены от подземных буровых площадок, расположенных в хвостовом штреке. Большая часть взрывов по обрушению кровли выполнена в области, где оба слоя угольного пласта № 405/2 извлечены. Несколько одиночных взрывов осуществлено рядом с квершлагом и конечной частью панели забоя.

Диаметр скважин 76 мм, ВВ загружались в скважину на длину около 10 м пневматическим способом. Скважины имели наклон около 15° относительно горизонтали. Количество детонируемых скважин за взрыв изменялось от 2 до 5. Скважины пробурены на северо-запад, запад и юго-запад. В них загружали ВВ массой 5–32 кг. Наименьшая масса ВВ одного взрыва по обрушению кровли составляла 10 кг, наибольшая — 96 кг. Энергия толчков изменялась от $8 \cdot 10^2$ Дж ($M_L = 0.58$) до $6 \cdot 10^4$ Дж ($M_L = 1.57$). Эпицентры всех толчков, включая вызванные взрывами по обрушению кровли, представлены на рис. 1. Из-за большого количества взрывов по обрушению кровли и малого расстояния между ними скважины этих взрывов не показаны.

Цель разгрузочных взрывов — разрушение слоев песчаника, залегающих над угольным пластом № 408 на расстоянии 70 и 90 м, и высвобождение энергии деформации, накопленной из-за влияния краев налегающих пластов (рис. 2а). Мощность слоев песчаника, залегающих под пластом № 405/2, составляла около 6 м. В случае взрывов по обрушению кровли ВВ помещалось в слой песчаника, залегающего в непосредственной кровле пласта № 408 (рис. 2б). Такие взрывы вызывали разрушение песчаника, и их воздействие наблюдалось на пересечении очистного забоя и хвостового штрека. В результате подвигание забоя происходило без осложнений.

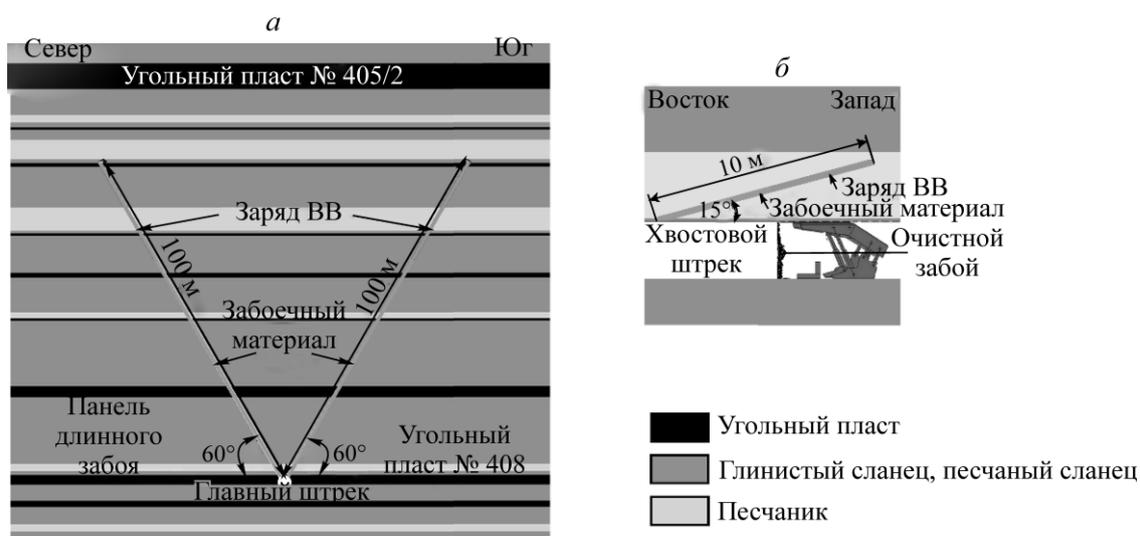


Рис. 2. Конфигурация взрывных скважин при разгрузочных взрывах со стороны главного штрека (а) и взрывах по обрушению кровли со стороны хвостового штрека (б)

МЕТОД ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Главный эффект разгрузочных взрывов основан на разрушении породы, которая теряет способность аккумулировать энергию упругой деформации. Если энергия уже накопилась, ее необходимо высвободить из массива. Разгрузочные взрывы вызывают дополнительные геомеханические процессы в массиве, что отражается в сейсмической энергии вызываемых толчков, которая больше ожидаемой энергии от детонации ВВ. В результате таких процессов достигается равновесное напряженно-деформированное состояние массива. Механизм действия взрывов по обрушению кровли аналогичен. Если вызвать принудительное обрушение кровли за забоем, то сейсмическая энергия вызванного толчка больше ожидаемой энергии от детонации ВВ.

Параметр SE , определяющий сейсмический эффект, устанавливается исходя из сейсмической энергии вызванных толчков и массы детонируемого ВВ и используется для определения эффективности разгрузочных взрывов [29–31]. Данная методология применяется в чешской части ВКБ.

SE представляет собой отношение высвобожденной в массиве сейсмической энергии к энергии взрыва заряда и рассчитывается следующим образом:

$$SE = \frac{E_{ICM}}{K_{ICM} Q},$$

где E_{ICM} — сейсмическая энергия, вычисленная по сети сейсмостанций в каменноугольной шахте методом численного интегрирования, Дж; Q — масса вещества, взрываемого в скважине, кг; K_{ICM} — коэффициент, характеризующий особые условия в шахте, при которых осуществляется мониторинг, Дж/кг. Сейсмическая энергия горных толчков должна быть рассчитана с учетом коэффициента K_{ICM} [30].

Для определения K_{ICM} рассматриваемой выработки учтены наборы данных, полученных по девяти забоям. Проанализированы результаты 256 взрывов в длинных скважинах ВВ [31]. На основе линейной регрессии показано, что эти показатели подчиняются закону нормального распределения [21, 29–31]. Цель статистического анализа — выявление характеристик распределения данных, оценка ошибок и корреляционный анализ для подтверждения зависимости между величинами [31]. Также выполнен анализ дисперсии.

На основе аналитической процедуры определена линейная зависимость между преобразованными по логарифмическому закону данными сейсмической энергии ($\ln E_{ICM}$) и массой ВВ Q , выраженная линией регрессии: $\ln E_{ICM} = 9.7925 + 0.0022Q$ [26] (рис. 3). Среднеквадратичное отклонение сейсмической энергии в этом уравнении составляет 0,633 [31]. Затем отобраны данные, расположенные под прямой линией, параллельной линии регрессии и сдвинутой на среднеквадратичное отклонение преобразованной сейсмической энергии. Среднее значение нового набора данных использовано для определения коэффициента $K_{ICM} = 59.23$ Дж/кг.

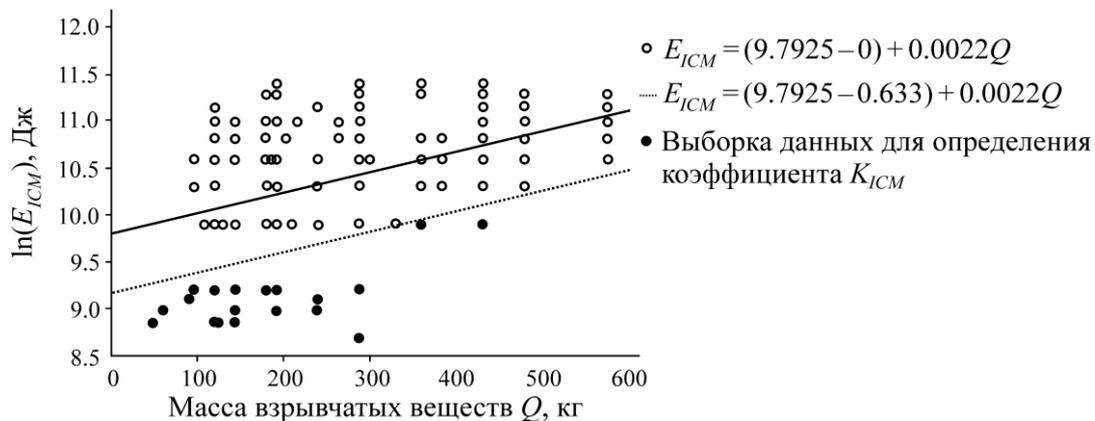


Рис. 3. Логарифм сейсмической энергии как функция массы заряда [31]

Степень корреляции между описанными переменными оценена с помощью коэффициента Пирсона, который является численным показателем линейной корреляции между двумя величинами и изменяется от полностью отрицательной линейной корреляции -1 до полностью положительной $+1$. Если коэффициент Пирсона равен 0 , то линейная зависимость между двумя величинами отсутствует. Рассчитанный коэффициент Пирсона составил 0.46 (граница между средней и высокой корреляцией -0.5), а квадрат коэффициента корреляции Пирсона — 0.21 [21], так как исследуемые данные получены не лабораторными измерениями, а при ведении взрывных работ в различных геологических и горнотехнических условиях.

Коэффициент K_{ICM} используется для установления системы классификации оценки SE , которая получена согласно распределению вероятности рассчитанных сейсмических эффектов [31]. Для SE определены: первая квартиль — 1.4 ; медиана — 2.3 ; третья квартиль — 3.5 ; максимальное значение — 5.9 . На основе данных статистических параметров найдены степени снятия напряжений разгрузочными взрывами. Система классификации, разработанная для оценки SE на основе критериев, полученных от распределения вероятностей, представлена в табл. 1.

Если SE меньше, чем значение первой квартили, т. е. сейсмическая энергия вызванных толчков в 1.4 раза меньше энергии, ожидаемой от детонации ВВ, то эффект взрывных работ незначительный [31]. Если SE больше или равен значению первой квартили и меньше медианы, то эффект взрывных работ хороший. В этом случае энергия вызванных толчков выше ожидаемой энергии от детонации ВВ в 1.4 раза, но меньше, чем в 2.3 раза. Результат аналогичен для хорошего и отличного эффекта взрывов. Значение SE , превышающее максимальное, считается отличным, зарегистрированная высвобожденная энергия при взрывах выше энергии детонации в 5.9 раз.

ТАБЛИЦА 1. Система классификации для оценки SE в каменноугольной шахте, %

SE	Оценка SE	Доля от массива данных
$SE < 1.4$	Незначительный	20.7
$1.4 \leq SE < 2.3$	Хороший	29.1
$2.3 \leq SE < 3.5$	Очень хороший	25.1
$3.5 \leq SE < 5.9$	Крайне хороший	19.5
$SE \geq 5.9$	Отличный	5.6

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Эффективность каждого разгрузочного и обрушающего кровлю взрыва определена методом оценки СЭ исходя из сейсмической энергии вызванных толчков. Параметры и сейсмические эффекты разгрузочных взрывов, проведенных со стороны главного штрека, хвостового штрека и галереи, пробуренной в пласте № 405/2т1, представлены в табл. 2–4 соответственно.

Большая часть сейсмических эффектов разгрузочных взрывов со стороны главного штрека считается очень хорошей (42.9 %) (табл. 2). Доля крайне хороших SE составила 32.1 %, незначительных — 21.4 % и отличных — 3.6 %. Взрывы проведены в области расположения краев налегающих угольных пластов, поэтому уровень напряжений в породе кровли пласта № 408 высокий. В некоторых случаях наблюдалась лишь сейсмическая энергия взрыва.

ТАБЛИЦА 2. Параметры и оценка SE разгрузочных взрывов, проведенных со стороны главного штрека

Количество скважин	Q , кг	E_{ICM} , Дж	SE	Оценка SE	Количество скважин	Q , кг	E_{ICM} , Дж	SE	Оценка SE
2	288	2.00E+04	1.2	Незначительный	2	288	5.00E+04	2.9	Очень хороший
1	144	9.00E+03	1.1	Незначительный	2	288	5.00E+04	2.9	Очень хороший
1	144	1.00E+04	1.2	Незначительный	1	144	4.00E+04	4.7	Крайне хороший
2	288	5.00E+04	2.9	Очень хороший	1	144	3.00E+04	3.5	Крайне хороший
2	288	4.00E+04	2.3	Очень хороший	1	144	7.00E+04	8.2	Отличный
2	288	7.00E+04	4.1	Крайне хороший	1	144	3.00E+04	3.5	Крайне хороший
2	288	8.00E+04	4.7	Крайне хороший	2	288	5.00E+04	2.9	Очень хороший
2	288	9.00E+04	5.3	Крайне хороший	2	288	2.00E+04	1.2	Незначительный
2	288	4.00E+04	2.3	Очень хороший	2	288	4.00E+04	2.3	Очень хороший
2	288	7.00E+04	4.1	Крайне хороший	1	144	2.00E+04	2.3	Очень хороший
2	288	6.00E+04	3.5	Крайне хороший	1	144	1.00E+04	1.2	Незначительный
2	288	5.00E+04	2.9	Очень хороший	1	144	2.00E+04	2.3	Очень хороший
2	288	5.00E+04	2.9	Очень хороший	1	144	8.00E+03	0.9	Незначительный
2	288	5.00E+04	2.9	Очень хороший	1	96	2.00E+04	3.5	Крайне хороший

Эффект первого взрыва, выполненного со стороны хвостового штрека, оказался незначительным, второго взрыва — крайне хорошим (табл. 3). Взрывы проведены рядом с краем угольного пласта № 405/2т1, но в условиях различных напряжений. Один взрыв осуществлен в выработанной части пласта № 405/2т1, другой — в неразрабатываемой.

ТАБЛИЦА 3. Параметры и оценка *SE* разгрузочных взрывов, проведенных со стороны хвостового штрека

Количество скважин	Q , кг	E_{ICM} , Дж	<i>SE</i>	Оценка <i>SE</i>
2	288	2.00E+04	1.2	Незначительный
2	288	6.00E+04	3.5	Крайне хороший

Только один взрыв из штольни, проведенной в пласте № 405/2tl и расположенной на конечной части панели пласта № 408, показал незначительный эффект; *SE* других взрывов определен как хороший или очень хороший (табл. 4). Взрывы выполнены в области кластера краев налегающих пластов.

ТАБЛИЦА 4. Параметры и оценка *SE* разгрузочных взрывов, проведенных со стороны галереи, пробуренной в пласте № 405/2tl

Количество скважин	Q , кг	E_{ICM} , Дж	<i>SE</i>	Оценка <i>SE</i>
1	48	6.00E+03	2.1	Хороший
1	48	5.00E+03	1.8	Хороший
1	48	2.00E+03	0.7	Незначительный
1	48	1.00E+04	3.5	Крайне хороший

В табл. 5 представлены эффекты взрывов по обрушению кровли. Большинство из них оказались крайне хорошими (43.6 %) и отличными (34 %). Доли остальных эффектов распределились следующим образом: незначительные — 10.7 %; очень хорошие — 6.4 % и хорошие — 5.3 %. После большинства взрывов произошло локально подтвержденное управляемое обрушение кровли. Наиболее эффективный взрыв ($SE = 50.7$), проведенный с массой ВВ 10 кг, вызвал толчок с энергией $3 \cdot 10^4$ Дж ($M_L = 1.41$).

Незначительный эффект взрывов по обрушению кровли связан с массами ВВ 12, 18 и 30 кг и наблюдался в начале панели забоя, где в кровле пласта № 408 преобладали ослабленные породы. При взрыве 48 кг ВВ горный толчок не произошел. Зарегистрирована только сейсмическая энергия взрыва 96 кг ВВ, и *SE* классифицирован как незначительный.

Сейсмическая энергия горных толчков, вызванных разгрузочными и обрушающими кровлю взрывами, находится на аналогичном уровне (рис. 4а). Средняя сейсмическая энергия составила $2.2 \cdot 10^4$ и $3.7 \cdot 10^4$ Дж соответственно. Проведено 94 взрыва по обрушению кровли и 34 разгрузочных. Общая сейсмическая энергия толчков, спровоцированных взрывами по обрушению кровли, достигла $2.04 \cdot 10^6$ Дж, разгрузочными взрывами — $1.25 \cdot 10^6$ Дж.

Во время разгрузочных взрывов взорвана большая масса ВВ, по сравнению со взрывами по обрушению кровли (рис. 4б). Около 212 кг ВВ применяется для одного разгрузочного взрыва и 64 кг ВВ — для одного взрыва по обрушению кровли. Общая масса израсходованных ВВ для разгрузочных и обрушающих кровлю взрывов составила 7200 и 5977 кг соответственно.

Эффекты *SE* взрывов по обрушению кровли равны *SE* разгрузочных взрывов или превышают их. Средний *SE* взрывов по обрушению кровли составил около 6.3 (отличный результат), а разгрузочных — около 2.9 (очень хороший результат). Средняя сейсмическая энергия, высвобожденная при взрывах по обрушению кровли, в 6 раз выше ожидаемой от детонации ВВ, а при разгрузочных — в 3 раза. Наиболее эффективный взрыв произошел в составе взрывов по обрушению кровли ($SE = 50.7$) (рис. 4в). Небольшой заряд смог вызвать крупномасштабные изменения в распределении напряжений в массиве горной породы. В результате самого эффективного разгрузочного взрыва высвободилось в 8 раз больше энергии, чем ожидалось от детонации ВВ (отличный результат).

ТАБЛИЦА 5. Параметры и оценка SE взрывов по обрушению кровли, проведенных со стороны хвостового штрека

Количество скважин	Q , кг	E_{ICM} , Дж	SE	Оценка SE	Количество скважин	Q , кг	E_{ICM} , Дж	SE	Оценка SE
5	30	8.00E+02	0.5	Незначительный	4	72	2.00E+04	4.7	Крайне хороший
2	12	8.00E+02	1.1	Незначительный	4	72	2.00E+04	4.7	Крайне хороший
5	30	8.00E+02	0.5	Незначительный	4	72	1.00E+04	2.3	Очень хороший
5	30	8.00E+02	0.5	Незначительный	4	72	2.00E+04	4.7	Крайне хороший
5	30	2.00E+03	1.1	Незначительный	4	72	2.00E+04	4.7	Крайне хороший
5	30	8.00E+02	0.5	Незначительный	4	72	8.00E+03	1.9	Хороший
5	30	7.00E+03	3.9	Крайне хороший	4	72	2.00E+04	4.7	Крайне хороший
5	30	8.00E+03	4.5	Крайне хороший	4	96	3.00E+04	5.3	Крайне хороший
5	30	4.00E+03	2.3	Очень хороший	4	96	7.00E+03	1.2	Незначительный
5	30	2.00E+03	1.1	Незначительный	4	75	5.00E+04	11.3	Отличный
3	18	4.00E+03	3.8	Крайне хороший	4	96	6.00E+04	10.6	Отличный
5	30	4.00E+03	2.3	Очень хороший	4	96	5.00E+04	8.8	Отличный
5	30	8.00E+03	4.5	Крайне хороший	4	96	4.00E+04	7.0	Отличный
5	30	7.00E+03	3.9	Крайне хороший	4	96	6.00E+04	10.6	Отличный
5	30	2.00E+04	11.3	Отличный	4	96	4.00E+04	7.0	Отличный
5	30	2.00E+04	11.3	Отличный	4	96	4.00E+04	7.0	Отличный
5	45	2.00E+04	7.5	Отличный	4	96	3.00E+04	5.3	Крайне хороший
5	45	1.00E+04	3.8	Крайне хороший	4	96	4.00E+04	7.0	Отличный
5	45	6.00E+04	22.5	Отличный	4	96	2.00E+04	3.5	Крайне хороший
5	45	4.00E+04	15.0	Отличный	4	96	3.00E+04	5.3	Крайне хороший
4	36	2.00E+04	9.4	Отличный	4	96	4.00E+04	7.0	Отличный
4	36	3.00E+04	14.1	Отличный	4	96	3.00E+04	5.3	Крайне хороший
4	36	3.00E+04	14.1	Отличный	4	96	3.00E+04	5.3	Крайне хороший
4	36	4.00E+04	18.8	Отличный	4	96	3.00E+04	5.3	Крайне хороший
4	36	4.00E+04	18.8	Отличный	4	96	2.00E+04	3.5	Крайне хороший
3	72	2.00E+04	4.7	Крайне хороший	2	48	2.00E+04	7.0	Отличный
3	72	2.00E+04	4.7	Крайне хороший	3	72	1.00E+04	2.3	Очень хороший
3	72	3.00E+04	7.0	Отличный	3	96	2.00E+04	3.5	Крайне хороший
3	72	2.00E+04	4.7	Крайне хороший	4	96	2.00E+04	3.5	Крайне хороший
2	48	2.00E+04	7.0	Отличный	4	96	2.00E+04	3.5	Крайне хороший
3	72	7.00E+03	1.6	Хороший	2	48	9.00E+03	3.2	Очень хороший
3	72	3.00E+04	7.0	Отличный	3	72	2.00E+04	4.7	Крайне хороший
3	72	2.00E+04	4.7	Крайне хороший	3	72	2.00E+04	4.7	Крайне хороший
3	72	2.00E+04	4.7	Крайне хороший	3	72	2.00E+04	4.7	Крайне хороший
3	72	2.00E+04	4.7	Крайне хороший	3	72	2.00E+04	4.7	Крайне хороший
3	72	5.00E+04	11.7	Отличный	3	72	2.00E+04	4.7	Крайне хороший
3	72	2.00E+04	4.7	Крайне хороший	3	72	3.00E+04	7.0	Отличный
2	48	1.00E+04	3.5	Крайне хороший	3	72	2.00E+04	4.7	Крайне хороший
3	72	1.00E+04	2.3	Очень хороший	3	72	3.00E+04	7.0	Отличный
3	72	2.00E+04	4.7	Крайне хороший	3	72	3.00E+04	7.0	Отличный
3	72	2.00E+04	4.7	Крайне хороший	3	72	3.00E+04	7.0	Отличный
3	72	8.00E+03	1.9	Хороший	3	72	3.00E+04	7.0	Отличный
3	72	6.00E+03	1.4	Хороший	2	10	3.00E+04	50.7	Отличный
3	72	2.00E+04	4.7	Крайне хороший	2	48	3.00E+04	10.6	Отличный
3	72	9.00E+03	2.1	Хороший	2	48	0.00E+00	0.0	Незначительный
3	72	2.00E+04	4.7	Крайне хороший	2	18	8.00E+02	0.8	Незначительный
4	72	2.00E+04	4.7	Крайне хороший	2	48	5.00E+04	17.6	Отличный

Согласно подобранным функциям описания зависимости сейсмической энергии вызванных толчков от массы использованных ВВ, сейсмическая энергия толчков от взрывов по обрушению кровли в 2 раза превышает сейсмическую энергию толчков от разгрузочных взрывов при одинаковой массе ВВ (рис. 4з).

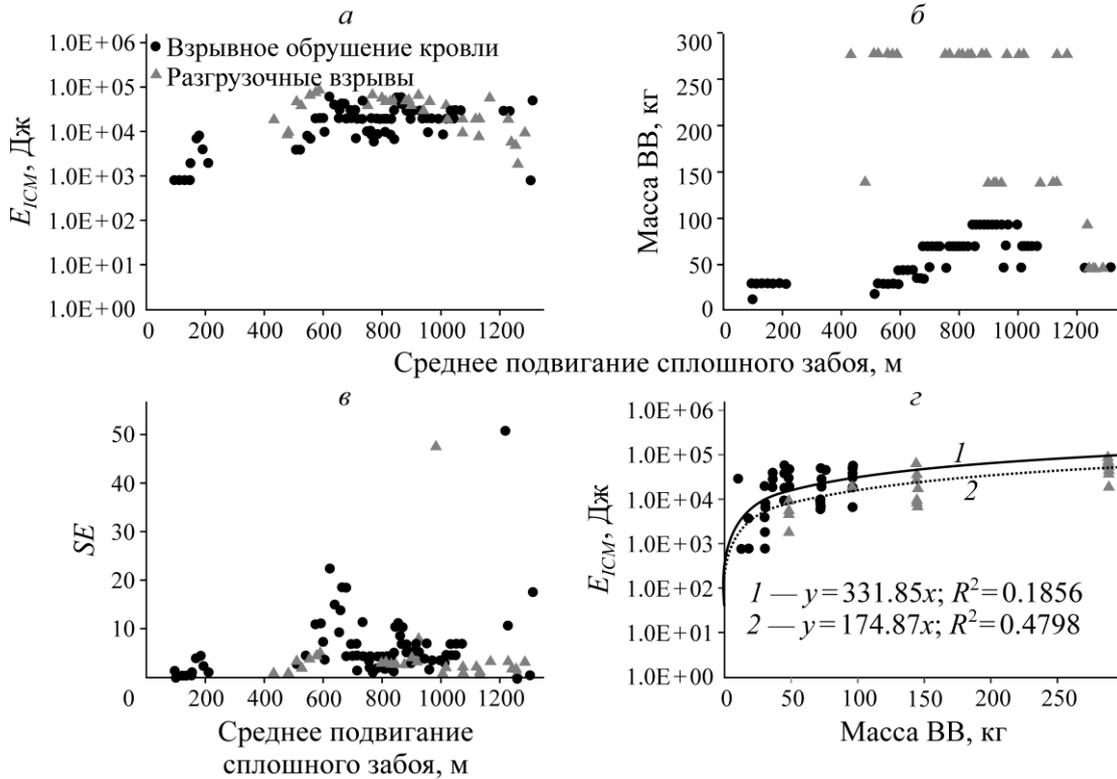


Рис. 4. Зависимость сейсмической энергии вызванных толчков (а), массы взорванного ВВ (б), SE взрывов (в) от расстояния подвигания забоя и массы взорванного ВВ (г) при разгрузочных и обрушающих кровлю взрывах

Результаты оценки СЭ всех взрывов, проведенных при отработке длинным забоем угольного пласта № 408 в шахте польской части ВКБ, показаны на рис. 5. Согласно методу оценки СЭ, взрывы по обрушению кровли оказались эффективнее разгрузочных.

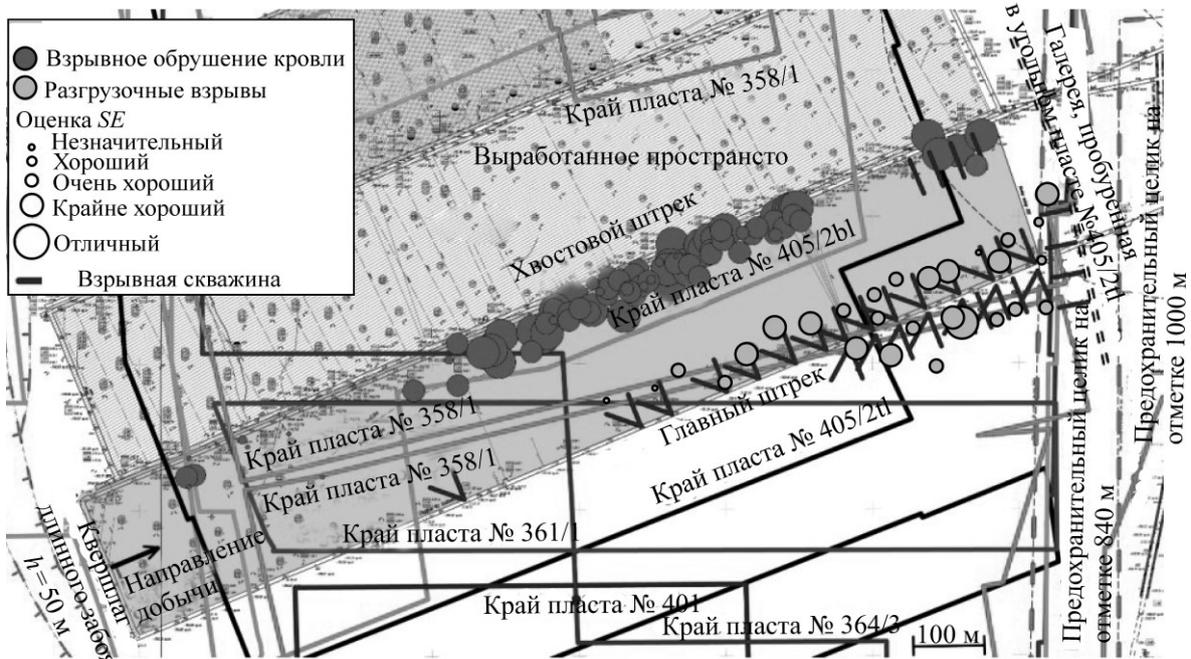


Рис. 5. Карта угольного пласта № 408 с указанием SE взрывов

ВЫВОДЫ

Для определения эффективности разгрузочных взрывных работ в условиях чешской части ВКБ разработан метод оценки сейсмического воздействия с использованием массы ВВ и сейсмической энергии толчков, вызванных взрывами. При отработке длинным забоем угольного пласта № 408 в шахте польской части ВКБ выполнены взрывные работы для снятия напряжений и обрушения кровли. Оба типа разрушающих взрывных работ оценены методом СЭ, но дополнительно эффективность взрывов по обрушению кровли подтверждена в подземной выработке. Разрушающие кровлю разгрузочные взрывы направлены на инициирование определенных геомеханических процессов, в результате которых формируется новое равновесное напряженно-деформированное состояние в массиве горной породы.

Согласно методу оценки СЭ, оба типа взрывных работ оказались эффективными, но взрывы по обрушению кровли были более результативными. Однако для некоторого числа взрывов сейсмический эффект незначительный, зарегистрирован лишь результат детонация ВВ. Метод оценки сейсмических эффектов показал, что оба типа взрывных работ инициировали дополнительные геомеханические процессы, приведшие к достижению нового равновесного напряженно-деформированного состояния массива. Выполненный анализ продемонстрировал практическую значимость метода оценки СЭ для определения эффективности взрывных работ в подземных каменноугольных шахтах и возможность применения его в шахтах с высоким уровнем угрозы горных ударов, где основная форма их предотвращения — разгрузочные взрывные работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Budryk W.** Rockburst phenomena and prevention of their effects, *Przegląd Górnictwo-Hutniczy*, 1938, 12 [in Polish].
2. **Pelnar A.** Rockbursts in Ostrava-Karvina coalfield, *Hornický věstník, hornické a hutnické listy*, 1938. — P. 25 – 58 [in Czech].
3. **Parysiewicz W.** Rockbursts in mines, “Śląsk”, Katowice, 1966 [in Polish].
4. **Straube R., Brothnek J., Harasek V., Kostal Z., Kovacs Z., Mikeska J., Padara Z., Rozehnal V., and Vavro M.** Rockbursts in carboniferous rock mass, *SNTL*, 1972 [in Czech].
5. **Kidybiński A.** Bursting liability indices of coal, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 1981, Vol. 18, No. 4. — P. 295 – 304.
6. **Jaworski A.** Relationship between rock mass deformation and energy release of interdependent mining tremors in the area of Bytom Basin, *Acta Montana*, 1996, No. 9.
7. **Dubiński J. and Konopko W.** Rockbursts: Assessment, forecasting and combating, *Central Min. Inst., Katowice*, 2000 [in Polish].
8. **Dvorsky P., Golasowski J., Konicek P., and Kubica M.** Geomechanical experience with coal working in the 4th block in the coal seam 37 at CSA Colliery in Karvina, *Proc. 11th Int. Sci. Tech. Conf. Rockbursts*, Poland, Ustroń, *Central Min. Inst., Katowice*, 2004.
9. **Takla G., Ptacek J., Holeccko J., and Konicek P.** Stress state determination and prediction in rock mass with rockburst risk in Ostrava-Karvina coal basin, *Proc. Int. Soc. Rock Mech. Symp., EUROCK 2005*:

- Impact of Human Activity on the Geological Environment, Czech Republic, Brno, A. A. Balkema. — P. 625–628.
10. **Drzwiecki J. and Kabiesz J.** Dynamic events in roof strata — occurrence and prevention, *Coal Sci. Technol. Mag.*, 2008, Vol. 235. — P. 55–57.
 11. **Dubiński J., Kabiesz J., and Lurka A.** Review of present-day methods of rockburst hazard prevention in Polish mining industry, *Proc. World Min. Congress, Istanbul*, 2011.
 12. **Mutke G., Dubiński J., and Lurka A.** New criteria to assess seismic and rock burst hazard in coal mines, *Arch. Min. Sci.*, 2015, Vol. 60, No. 3. — P. 743–760.
 13. **Dvorsky P. and Konicek P.** Systems of rock blasting as a rock burst measure in the Czech part of Upper Silesian Coal Basin, *Proc. 6th Int. Symp. Rockburst Seismicity Mines, Western Australia, Perth, Aust. Centre Geomech.*, 2005.
 14. **Konicek P.** Large scale destress blasting in roof rocks for rockburst control in hard coal longwall mining, *Proc. Int. Conf. Rock Dyn. Appl. (RocDyn-3), Norway, Trondheim*, 2018. — P. 291–297.
 15. **Konicek P., Ptacek J., and Mazaira A.** Destress blasting on the border of safety pillars, *Proc. 3rd Int. Symp. Mine Safety Sci. Eng.*, Canada, Montreal, 2016. — P. 45–53.
 16. **Konicek P. and Schreiber J.** Heavy rockburst due to longwall mining near protective pillar: A case study, *J. Min. Sci. Technol.*, 2018, Vol. 28, Issue 5. — P. 799–805.
 17. **Konicek P. and Schreiber J.** Rockburst prevention via destress blasting of competent roof rocks in hard coal longwall mining, *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.*, 2018, Vol. 118. — P. 235–242.
 18. **Konicek P., Schreiber J., and Nazarova L.** Volumetric changes in focal areas of seismic events correspond to destress blasting, *J. Min. Sci. Technol.*, 2019, Vol. 29, Issue 4. — P. 541–547.
 19. **Schreiber J., Konicek P., and Stonis M.** Seismological activity during room and pillar hard coal extraction at great depth, *Proc. Eng.*, 2017, Vol. 191. — P. 67–73.
 20. **Wojtecki Ł., Konicek P., Mendecki M. J., and Zuberek W. M.** Application of seismic parameters for estimation of destress blasting effectiveness, *Procedia Eng.*, 2017, 191. — P. 750–760.
 21. **Wojtecki Ł., Konicek P. and Schreiber J.** Effects of torpedo blasting on rockburst prevention during deep coal seam mining in the Upper Silesian Coal Basin, *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, 2017.
 22. **Wojtecki Ł., Mendecki M. J., Talaga A., and Zuberek W. M.** The estimation of the effectiveness of torpedo blasting based on an analysis of focal mechanisms of induced mining tremors in the Bielszowice coal mine, eds. Kwasniewski, M., and Łydzba, D. *Rock Mech. Res. Energy Env.*, 2013, London, Taylor and Francis Group. — P. 769–773.
 23. **Wojtecki Ł., Mendecki M. J., and Zuberek W. M.** Determination of destress blasting effectiveness using seismic source parameters, *Rock Mech. Rock Eng.*, 2017, Vol. 50, No. 12. — P. 3233–3244.
 24. **Dubiński J.** A seismic method for ex ante threat assessment of mining tremors in hard coal mines, *Sci. Works Central Min. Inst., Katowice*, 1989 [in Polish].
 25. **Wojtecki Ł., Konicek P., Mendecki M. J., Gólda I., and Zuberek W. M.** Geophysical evaluation of effectiveness of blasting for roof caving during longwall mining of coal seam, *Pure Appl. Geophys.*, 2019. — P. 1–13.
 26. **Wojtecki Ł. and Gólda I.** Analysis of stress level during longwall mining of a coal seam with the use of seismic effect method, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2019, Vol. 261, No. 012057.

27. **Dubiński J. and Wierzchowska Z.** Methods for the calculation of tremors seismic energy in the Upper Silesia, Sci. Works Central Min. Inst., Katowice, Statement, 1973, No. 591. — P. 3–23 [in Polish].
28. <https://www.nitroerg.pl>.
29. **Knotek S., Matusek Z., Skrabis A., Janas P., Zamarski B., and Stas B.** Research of geomechanics evaluation of rock mass due to geophysical method, VVUU, Ostrava, 1985 [in Czech].
30. **Konicek P., Soucek K., Stas L., and Singh R.** Long-hole destress blasting for rockburst control during deep underground coal mining, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2013, Vol. 61. — P. 141–153.
31. **Wojtecki Ł. and Konicek P.** Estimation of active rockburst prevention effectiveness during longwall mining under disadvantageous geological and mining conditions, J. Sustainable Min., 2016, Vol. 15, Issue 1. — P. 1–7.

*Поступила в редакцию 29/I 2020
После доработки 02/X 2020
Принята к публикации 03/XI 2020*