

УДК 622.235:622.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАЗВАЛА ВЗОРВАННОЙ ГОРНОЙ МАССЫ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ СЪЕМКИ



Д. А. ИЛЮХИН¹,
доцент, канд. техн. наук



М. А. МАРИНИН¹,
зав. кафедрой, канд. техн. наук,
Marinin_MA@pers.spmi.ru



Р. А. РАХМАНОВ²,
научный сотрудник, канд. техн. наук

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

² Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН, Москва, Россия

Введение

Экономические показатели горного предприятия во многом определяются оборудованием и технологиями, применяемыми на всех этапах производственной и организационной деятельности [1–3]. Ускоренные темпы развития современных технологий с учетом внедрения систем автоматизации расширяют возможности оптимизации многих процессов на горнодобывающих предприятиях, что формирует новые вызовы перед инженерами для достижения целей повышения эффективности производства. Вектор развития предприятий направлен на цифровизацию и применение комплексных технологических решений получения, передачи, обработки и интерпретации больших объемов данных, на основе которых могут быть улучшены и оптимизированы параметры производства или решена контрольная функция выполнения плановых показателей. Важным звеном в достижении данной цели является работа инженеров-маркшейдеров, обеспечивающих получение и обработку информации о реальном пространственном положении горных работ, объемных и качественных показателях выполненных работ во времени.

Методом автоматизированной фотограмметрии с применением беспилотных летательных аппаратов выполнена оценка геометрических параметров буровзрывных блоков до и после взрыва. Исследования проведены в пределах вскрышных участков золоторудного карьера для 17 взрывных блоков. Установлено наличие зависимости между геометрическими характеристиками взрываемого блока и параметрами развала. Подтверждена возможность применения съемки методом автоматизированной фотограмметрии с наземными опорными точками для оперативного определения геометрических параметров развала без остановки погрузочных работ на время маркшейдерских измерений. Даны рекомендации по выполнению автоматизированной аэрофотосъемки.

Ключевые слова: карьер, открытые горные работы, маркшейдерская съемка, фотограмметрический метод съемки, автоматизированная аэрофотосъемка, взрывной блок, взорванная горная масса

DOI: 10.17580/gzh.2023.09.02

Деятельность горных предприятий, осуществляющих разработку месторождений с применением буровзрывных работ (БВР) для подготовки горных пород к выемке, неразрывно связана с оценкой эффективности их разрушения взрывом для достижения максимальных экономических показателей [4, 5]. Для получения достоверных данных о результатах БВР и последующей их оптимизации необходимо внедрение новых технологий по определению геометрических характеристик самого взрыва (объем взорванной горной массы, геометрия развала и участков отрыва, объем сброса и т. д.), а также качественных показателей БВР (фрагментация, коэффициент разрыхления, параметры смещения, фиксация некачественно взорванных участков и т. д.). Неотъемлемыми частями данного комплекса работ являются маркшейдерские съемки и маркшейдерский учет объемов. Для достижения приемлемого результата работы следует выполнять качественно и оперативно, что диктует определенные требования к оборудованию и методикам.

Многие нормативные документы, регламентирующие конкретные требования к выполнению маркшейдерских работ, на сегодняшний день не являются действующими, однако традиционно требуемая точность определения пространственных координат элементов объекта связана с масштабом съемки. Достижение требуемых параметров обеспечивается за счет выполнения маркшейдерских измерений от пунктов сети, положение которых определено с более высокой точностью [6–8]. Применение стандартной теодолитной (тахеометрической) съемки и съемки спутниковыми методами при

использовании соответствующего оборудования обеспечивает необходимые параметры точности и допускалось инструкцией. При этом интенсификация открытых горных работ и наращивание единичной производительности горнотранспортного оборудования требуют корректировки требований к маркшейдерской съемке и обработке данных. В качестве примера можно привести очевидный недостаток оперативности при использовании тахеометрической съемки в процессе определения характеристик развала взорванной горной массы. Продолжительность полевых измерений при выполнении данных работ исчисляется часами, что в текущих реалиях интенсивности работ высокопроизводительного оборудования, с применением ручной маркшейдерской съемки, зачастую является трудоемким процессом, не отвечающим условиям безопасности работ [9, 10]. Измерения спутниковыми методами позволяют частично устранить данный недостаток, но не во всех случаях обеспечивают требуемую точность и достоверность результатов [11, 12]. На момент создания инструкции по проведению маркшейдерских работ степень внедрения автоматизированной аэрофотограмметрической съемки была сравнительно невысокой, что в дальнейшем приводило к ограниченному применению данного метода [13–15]. Принимая во внимание принципиально новый уровень развития технологий получения и обработки фотограмметрических данных, можно сделать вывод о необходимости детального изучения потенциальных возможностей такой технологии съемки для различных нужд предприятия.

Так, например, для горных инженеров и инженеров-взрывников фотограмметрическая съемка позволяет с высокой точностью определить местоположение устьев скважин относительно проектных положений до взрыва, после взрыва проводить оценку объема взорванной горной массы, высоты, ширины развала и качества линии отрыва, а также при совместном использовании программного обеспечения для анализа фрагментации дает возможность определить гранулометрический состав взорванной горной массы и выход некондиционной фракции как по шапке развала, так и по мере подвигания забоя [11, 16, 17].

Полученные данные позволяют прогнозировать производительность горного оборудования при экскавации блока и при необходимости вносить корректировки в параметры БВР для последующих массовых взрывов. Принятые параметры БВР определяют процесс формирования развала взорванной горной массы и требуемое качество дробления [18–20].

Качество дробления оказывает значительное влияние на эффективность работ по выемке, погрузке и транспортированию взорванной горной массы [21–23]. Важным элементом оценки качества взрывания является определение геометрических характеристик развала с целью выявления их зависимости от параметров БВР и самого взрываемого блока [24–26]. Решение данной задачи позволит повысить точность прогнозирования многих экономических показателей

технологических процессов горного предприятия (в частности, затрат на потери и разубоживание, экскавацию, транспортирование и отвалообразование) [27].

Объекты и методы исследований

Объектом исследований являлись подготавливаемые к выемке буровзрывным способом вскрышные участки золотодобывного предприятия. Объект исследования характеризуется высокими темпами буровзрывных и выемочно-погрузочных работ, при выполнении которых съемку результатов взрывания необходимо осуществлять без остановки работы карьера. При всех достоинствах и недостатках съемки посредством беспилотной фотограмметрии данное требование фактически определяет рассматриваемую технологию как безальтернативный и наименее затратный метод съемки [28, 29], которую выполняли с применением беспилотного летательного аппарата (БПЛА) модели DJI Mavic 2 Pro. Данное устройство оснащено цифровой фотокамерой с разрешением 20 мегапикселей и матрицей с физическим размером в 1", что позволяет получать фотоснимки высокого качества при благоприятных погодных условиях [6, 16, 17]. При выполнении съемки на высоте 50–100 м (данный диапазон принят исходя из требований законодательства по использованию воздушного пространства, внутренних требований предприятия и соображений безопасности полетов в условиях непосредственной близости вышележащих уступов высотой до 30 м) размер пикселя на местности принимает ожидаемые приближенные значения 1,17–2,34 см/пикс соответственно, что свидетельствует о крайне высокой плотности получаемой информации. Полеты выполняли в автоматическом режиме на основе полетных заданий, сформированных в программном продукте Pix 4D Control.

Технология оценки геометрии блока до и после взрывания методом автоматизированной фотограмметрии предполагает построение триангуляционной поверхности на основе облака точек, полученного путем обработки массивов фотоснимков алгоритмами автоматизированного ориентирования и построения карт глубины [8, 30]. Исходным материалом для решения данной задачи является набор фотоснимков объекта, пригодных для внешнего и внутреннего ориентирования (имеющих необходимое для работы алгоритма число общих комбинаций точек) [31–33]. При обработке программные комплексы подвсвергают каждый снимок анализу на наличие общих с другими снимками сочетаний пикселей (характерных точек ориентирования). Поиск указанных соответствий осуществляли для снимков в исходном разрешении без обрезки. На основе найденных соответствий рассчитывают параметры разворота плоских снимков в пространстве, в результате чего определяют положение камеры в пространстве в момент съемки. В процессе восстановления положения камер элементам внутреннего ориентирования присваивают условные пространственные координаты, которые могут быть визуализированы в формате

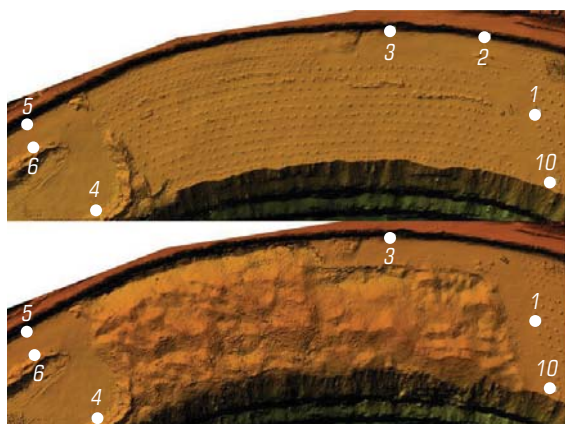


Рис. 1. Пример конфигурации наземных опорных точек

разряженного облака точек с целью предварительной оценки результатов съемки. Пространственное ориентирование разряженного облака точек и положений камер в истинных системах координат необходимо для корректировки результатов работы алгоритма, а также для повышения качества оценки положения поверхности уступа до и после отбойки, и достигается за счет внедрения в алгоритм точек с координатами в целевой системе (точечных объектов с известными координатами, визуально читаемых на снимках и выделяемых на них пользователем вручную). На основе положений камеры в момент съемки выполняют их группировку и построение высокоточных карт глубины каждого снимка, после чего может быть сформировано равномерное плотное облако точек.

Поскольку применяемое оборудование не обладает встроенными средствами получения координат центров снимков с требуемой точностью, для осуществления внешнего ориентирования при выполнении работы формирование наземной координатной основы является обязательным требованием (рис. 1). Опорная точка представляет собой контрастный объект, хорошо читаемый на фотоснимках человеческим глазом. С учетом ожидаемых размеров пикселя при заданных параметрах съемки в качестве данных объектов были применены яркие кресты размером более 1 м, нанесенные на поверхность уступа. Координирование опорных точек осуществляли посредством традиционной спутниковой съемки в режиме быстрой статики. Формирование опорных точек описанным образом позволяет получить их координаты с ошибками, не превышающими первых десятков миллиметров и впоследствии выполнить дешифрование с точностью до 1–2 пикселей, без существенного влияния на оперативность погрузочных работ. Расположение и число опорных точек обусловлено необходимостью наличия не менее четырех, равномерно распределенных в плане и по высоте элементов ориентирования. В данной работе знаки располагали по контуру взрываемого блока в зоне, не подверженной влиянию взрыва.

Недостатком использования наземных контрольных точек как единственного средства пространственно-габаритной привязки итогового облака точек является ограничение

надежности результата съемки, вызванное отсутствием необходимых для взаимного ориентирования данных о положениях центров фотоснимков и увеличенная за пределы объекта интереса площадь съемки, что негативно сказывается на продолжительности процесса фотографирования и последующей обработки данных. Кроме того, непосредственно координирование опорных точек значительно менее трудозатратно в сравнении с традиционной съемкой всей территории объекта, но тем не менее требует оперативного участия маркшейдера и зачастую технически осложнено условиями деятельности предприятия. В данном исследовании первый недостаток был устранен благодаря использованию данных о центрах фотографирования, полученных с применением навигационной системы беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Координирование опорных точек выполнено при помощи быстростатической спутниковой съемки ввиду сравнительно высокой оперативности и надежности данного метода определения координат точек.

Непосредственно аэрофотосъемка может быть запущена параллельно с координированием опорных точек сразу после их формирования. Продольное перекрытие с учетом применения цифровых фотокамер на современном этапе развития технологии достигает 80 %, поперечное перекрытие между маршрутами составило не менее 75 %. Обработку полученных данных выполняли с помощью программных продуктов Agisoft MetaShape без сжатия снимков в местной проецированной системе координат и Autodesk Civil 3d.

Обсуждение результатов исследований

Для решения поставленной задачи была сделана выборка объектов съемки и обработки, представленная набором блоков с различными параметрами БВР и геометрией. Наибольший интерес представляли габариты блока, наличие свободных наклонных поверхностей и зажатость среды [34, 35].

В общей сложности указанным методом было снято 17 блоков БВР, которые для удобства анализа были разделены на три группы на основе геометрических факторов. Необходимость деления блоков в большей степени обусловлена особенностью ведения взрывных работ на вскрышных участках карьера. Карьер отработан до гор. +70 м, а в рамках развития следующей очереди взрывные работы на период исследования проводили на горизонтах +380 ... +350 м. Поэтому

Характеристики взрывааемых блоков по данным аэрофотосъемки

Номер блока	Объем блока, тыс. м ³	Схема инициирования	Число открытых поверхностей	Ширина блока / развала, м	Высота шапки развала, м
<i>Блоки, имеющие свободную вертикальную/наклонную поверхность только в сторону выработанного карьерного поля</i>					
1	501	Траншейно-врубовая (НСИ)	1	Не определяли	5–10
2	548	Диагональная (НСИ)	1	То же	5–7
3	93	То же	1	– » –	0–7
<i>Блоки, имеющие свободную вертикальную/наклонную поверхность в сторону горизонтальной площадки уступа</i>					
4	279	Диагональная (НСИ)	2	Не определяли	5–7
5	266	Диагональная (ЭСИ)	3	13	2–4
6	454	Поперечно-врубовая (НСИ)	2	72 / 89	5–10
7	603	Диагональная (НСИ)	3	19	5–12
8	336	Диагональная / врубовая (ЭСИ)	2	50–100 / 115	2–5
9	113	Диагональная / врубовая (НСИ)	2	20 / 54	(–3)–5
10	40	Диагональная (НСИ)	2	20–40 / 60	3–5
11	148	Порядная (ЭСИ)	1 (2)	110 / 120	2–3
<i>Приконтурные блоки, не имеющие обнаженной поверхности в сторону выработанного карьерного поля</i>					
12	330	Диагональная (НСИ)	1	76 / 104	4–6
13	250	Поперечно-врубовая (НСИ)	1	130 / 155	2–5
14	160	Траншейно-врубовая (НСИ)	1	30 / 61	0–8
15	38	Поперечно-врубовая (НСИ)	1	73 / 114	5
16	83	Диагональная (НСИ)	3	62 / 73	2–8
17	43	То же	0	–	3–8

Примечание. Для блоков 5 и 7 ввиду сложной геометрии блока вместо ширины развала определена величина вывала породы по отношению к открытой поверхности уступа до взрывания; для блока 11 значение величины развала является заниженным ввиду наличия целика со стороны развала шириной 10 м; в блоке 17 взрывание осуществлено в зажатой среде. НСИ – неэлектрическая система инициирования; ЭСИ – электронная система инициирования.

при выполнении БВР с блоков, имеющих открытую поверхность на отработанное карьерное поле, часть взорванной горной массы по первым рядам скважин смещается в карьерное пространство.

Форма карьерного пространства ниже рассматриваемого горизонта отработки практически не препятствует обрушению смещенной породы вплоть до дна карьера (рис. 2). В подобных случаях применение БПЛА для определения объема сброшенной породы теоретически возможно, но малоэффективно ввиду значительной площади объекта съемки и большого расстояния от фотокамеры до фотографируемой поверхности. Ввиду указанных факторов, съемку и определение плановой составляющей развала для блоков данного типа не выполняли. При этом сохраняется возможность фиксирования остальных геометрических параметров результата взрывания, к которым можно отнести высоту шапки развала, вывалы породы на ближайшие целики и необрунную горную массу.

К первой группе были отнесены блоки, имеющие обнаженную наклонную поверхность только в сторону отработанного карьерного поля (см. таблицу). Объем горной массы для данных блоков за взрыв составляет от 300 до 500 тыс. м³, блоки ограничены целиками ненарушенного массива с трех сторон. В данных условиях определение параметров развала в плане

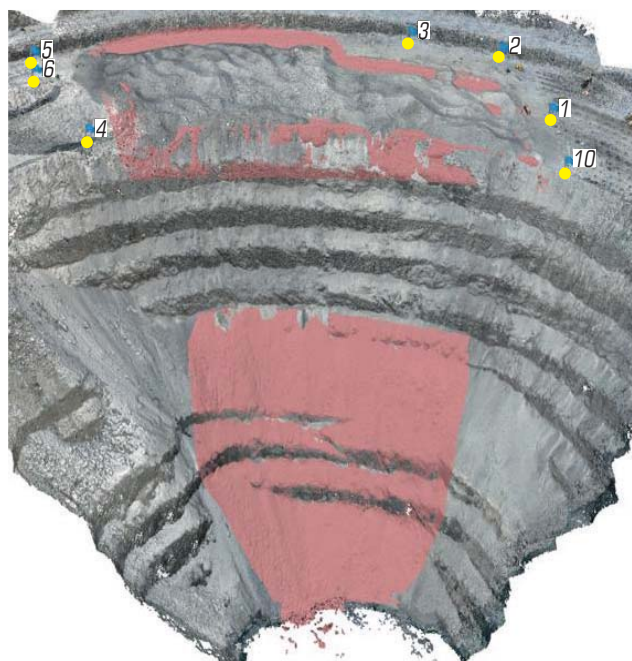


Рис. 2. Пример обрушения взорванной горной массы на нижележащие горизонты:
Цифры – наземные опорные точки

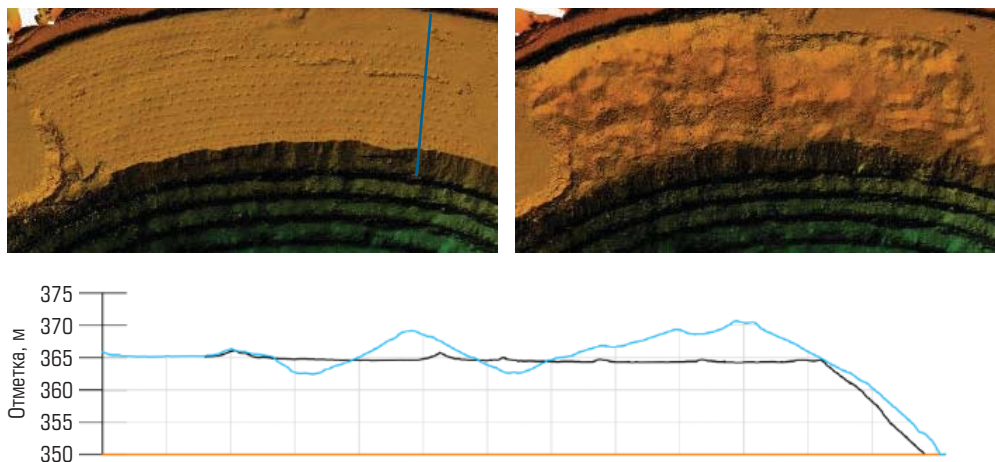


Рис. 3. Параметры блока № 2 до и после взрывания (разрез в сторону выработанного пространства, одно деление по горизонтальной оси равно 10 м)

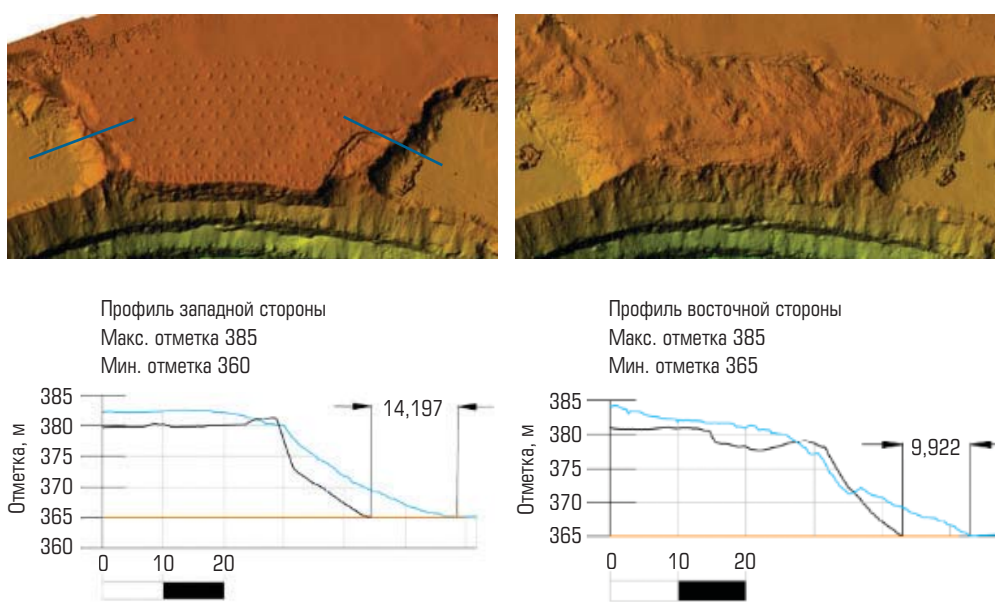


Рис. 4. Параметры блока № 5 до и после взрывания (разрез в сторону горизонтальных площадок, одно деление по горизонтальной оси равно 10 м)

крайне затруднительно, даже с применением предложенного метода, ввиду значительной площади смещения горной массы по первому ряду скважин относительно открытой поверхности (отдельные куски породы достигают донной части карьера, преодолев расстояние в 300 м).

На **рис. 3** контуром черного цвета отмечено положение поверхности целика до взрывания, синим – геометрия развала после взрыва. По данному разрезу очевидно, что развал в сторону обнажения не попадает в область маркшейдерской съемки, при этом вертикальная составляющая развала, представленная шапкой, оценима с высокой избыточностью данных и достоверностью. Важно отметить, что применение БПЛА с бортовым спутниковым приемником, обеспечивающим возможность определения положения центров фотоснимков с геодезической точностью, теоретически позволит сформировать точную геометрию развала даже в условиях больших площадей разлета ввиду отсутствия необходимости расположения наземных опорных точек в опасных зонах. При этом данная работа

потребуется дополнительной подготовки объекта к съемке (приостановки работ по взрыванию других блоков с целью недопущения формирования повторного развала) и значительных временных затрат на обработку данных, вследствие чего целесообразность применения указанного метода сомнительна. Например, в работе [36] для условий объекта исследования приведены результаты опытно-промышленных взрывов, направленных на минимизацию сброса взорванной горной массы в выработанное пространство карьера, что подтверждает актуальность оценки потенциальных объемов сброса.

Ко второй группе отнесены блоки преимущественно с более сложной конфигурацией и имеющие наклонные обнаженные поверхности как в сторону выработанного карьерного поля, так и в направлении горизонтальной площадки на горизонте блока, позволяющей в большинстве случаев оценить составляющую геометрии развала в плане (см. таблицу).

Как и в предыдущих примерах, определение плановых характеристик развала в сторону выработанного

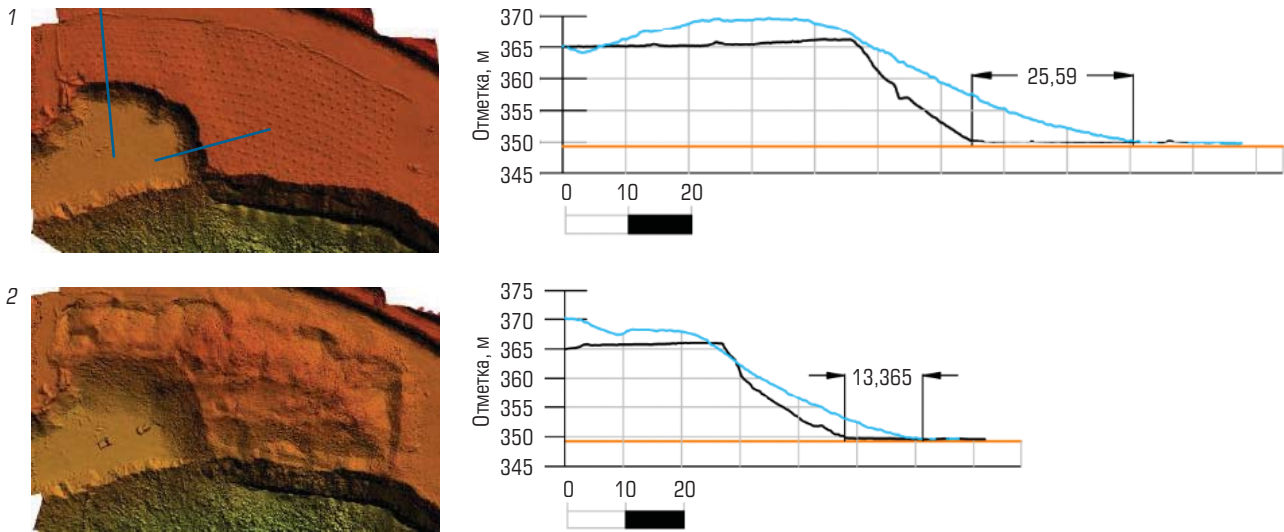


Рис. 5. Параметры блока № 6 до и после взрыва:

разрез 1 – западный край блока в районе наиболее зажатой среды от целика, разрез 2 – центральный край блока в районе наименее зажатой среды от целика; одно деление по горизонтальной оси равно 10 м

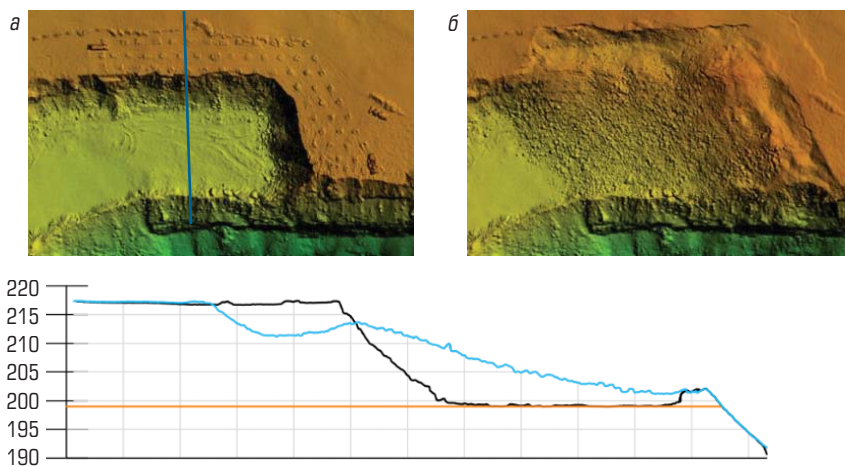


Рис. 6. Параметры блока № 9 до (а) и после взрыва (б) (разрез в сторону горизонтальных площадок, одно деление по горизонтальной оси равно 10 м)

Черная линия – профиль до взрыва; синяя линия – профиль после взрыва; оранжевая линия – фактический профиль рабочего горизонта

карьерного поля не представляется возможным. При этом развал в направлении горизонтальных площадок однозначно попадает в область съемки, что позволяет оперативно определить его параметры (рис. 4). Сравнительно небольшая ширина развала взорванной горной массы (пример блока № 5, см. таблицу), обусловлена применением диагональной схемы инициирования электронных программируемых детонаторов (эшелон инициирования по ширине блока).

На примере блока № 6 (см. таблицу) наблюдается участок, зажатый массивом с двух сторон, и с третьей стороны – необрушенной горной массой (рис. 5).

Данный блок интересен тем, что позволяет оценить влияние геометрических характеристик блока и его расположения относительно целика на параметры развала на одном примере.

Пример блока № 9 (см. таблицу) представляет особый интерес ввиду того, что демонстрирует блок, имеющий две перпендикулярные боковые свободные поверхности на малом расстоянии от неразрушенного массива (менее 20 м). Исходя из небольших размеров блоков данного вида, их маркшейдерская съемка и обработка полученных данных занимает непродолжительное время, что открывает возможности для набора статистических данных при увеличении числа блоков со схожими характеристиками (рис. 6).

В этом случае в результате фотограмметрической съемки были получены величины развала, достигающие 40 м. Имея в виду малые габариты блока, можно сделать вывод о вертикальной составляющей развала, принимающей по большей части площади блока отрицательные значения, что подтверждается результатами съемки.

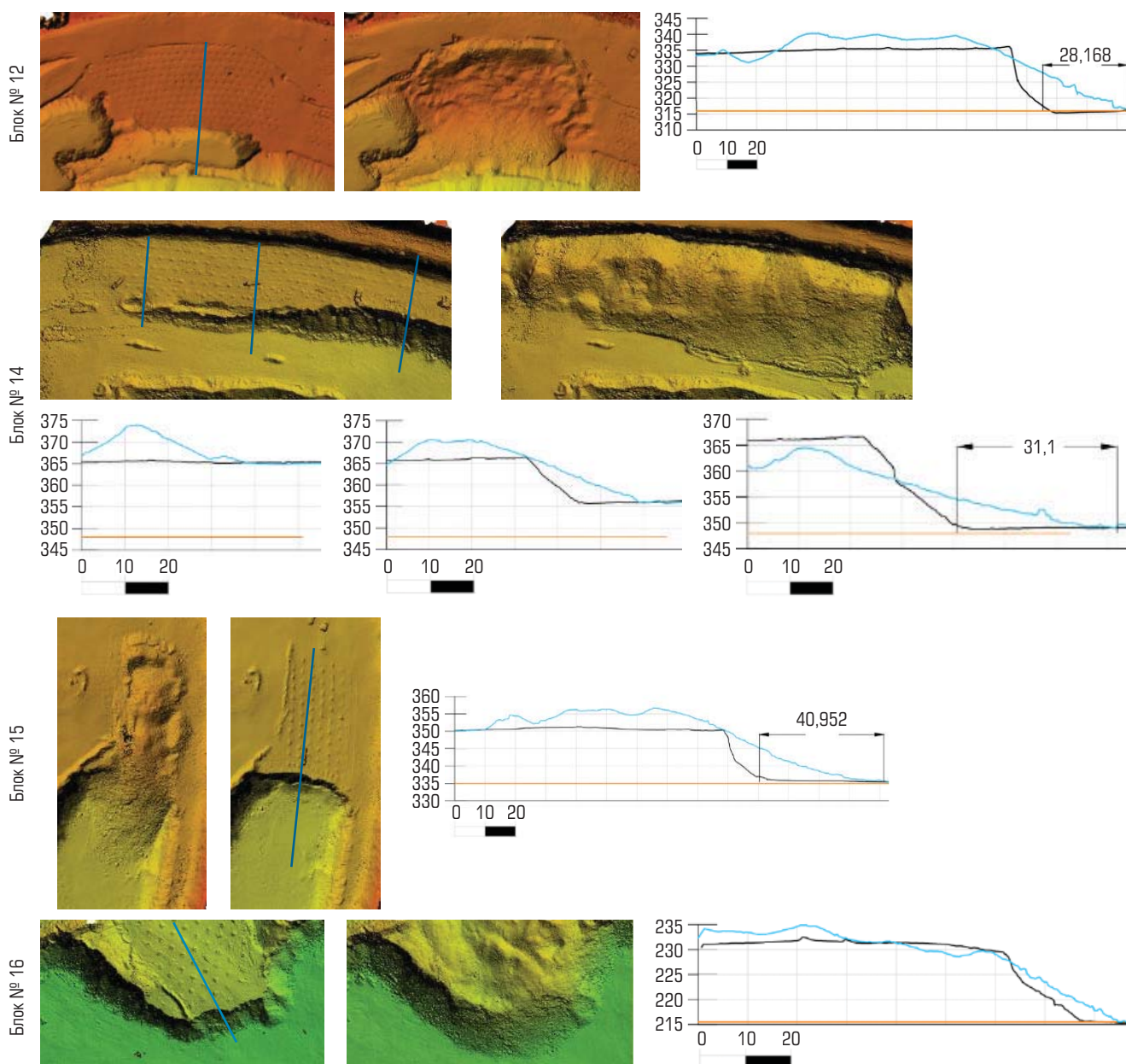


Рис. 7. Параметры блоков № 12, 14–16 до и после взрывания (разрезы ряда блоков третьей группы, одно деление по горизонтальной оси равно 10 м)

Цветные линии – то же, что на рис. 6

Третья группа представлена блоками, полностью лишенными открытых поверхностей в направлении выработанного карьерного поля (рис. 7). Для этих блоков характерно полное попадание всей площади развала в область съемки, что позволяет в будущем делать более однозначные и комплексные выводы о результатах взрывания.

Блок № 14 (см. таблицу) характеризуется неоднородностью среды взрывания. В западной части ввиду полной зажатости развал представлен только шапкой высотой до 10 м. В восточной части геометрия блока схожа с блоком № 9, что также

приводит к формированию развала шириной более 30 м. Блок № 15 взорван в среде с подпорными стенками целика с трех сторон и одной сравнительно небольшой наклонной обнаженной поверхностью в сторону горизонтальной площадки (47 м по обнаженной поверхности при 73 м блока в глубину целика), что позволило выявить наибольшую в данном исследовании ширину развала. Это косвенно подтверждает связь геометрии блока и среды взрывания с параметрами развала. Блок № 16, напротив, имеет только одну подпорную стенку и, как и в случае с блоком № 5, характеризуется наименьшими габаритами развала.

Заключение

На основе данных таблицы и их последующего анализа можно сделать выводы о наличии прямой связи между геометрическими характеристиками взрывающего блока и параметрами развала. Так, отмечается непосредственное влияние степени зажатости среды и расстояния от обнаженной поверхности до неразрушенного массива на плановую составляющую смещения горной массы. Оценка степени такого влияния является предметом дальнейших исследований, выполнение которых возможно исключительно при наличии внушительной подборки статистической информации, представленной геометрическими характеристиками взрывающих блоков до и после взрывания [34]. При использовании традиционных методов съемки получение результата осложняется необходимостью остановки погрузочных работ. Исходя из опыта авторов статьи, продолжительность сбора детальной геометрической информации для объекта сложной формы с применением спутникового оборудования, даже при благоприятных условиях съемки с учетом временных затрат на визуальную рекогносцировку формы развала, определение большого числа характерных точек, перемещение людей и оборудования, исчисляется первыми часами [12, 15].

Важная для оценки геометрии развала степень избыточности получаемой информации прямо пропорциональна временным затратам на выполнение съемки, что вводит дополнительные ограничения для маркшейдерской службы. Организация детальной оценки геометрии развала при условии минимизации экономических потерь предприятия возможна только для специально подготовленных для научных исследований блоков и не может гарантировать достаточного объема натурных данных. Применение рассмотренного метода позволяет частично минимизировать влияние указанных недостатков традиционных съемок [37]. С учетом того, что большинство подготовительных операций (к которым прежде всего относится координирование опорных знаков) выполняются в процессе съемки блока до взрывания, реальная продолжительность съемки развала не превышает первых десятков минут без учета времени обработки данных.

Применение БПЛА исключает появление людей в опасных зонах и позволяет осуществить автоматизированную аэрофотосъемку непосредственно после оседания продуктов взрывания и до начала отгрузки. При этом возможность запуска БПЛА из-за границ опасной зоны массового взрыва позволяет не дожидаться ее снятия. Избыточность получаемых данных определяется характеристиками камеры, высотой полета, программными ограничениями при обработке и в данном случае позволяет уверенно достичь плотности информации в одну пространственную точку на каждые 5–10 см объекта по всей его площади. В ходе выполнения данной работы были реализованы полные циклы детальной съемки до и после взрывания для 17 блоков без остановки погрузочных работ на время маркшейдерских измерений, что свидетельствует об эффективности предложенного метода.

По результатам исследования сформулированы следующие выводы и рекомендации.

1. При выполнении съемки рекомендуется использование БПЛА с бортовым приемником, позволяющим определять координаты центров фотоснимков в связке с наземной базовой станцией. Данные устройства позволяют минимизировать временные затраты на установку большого числа наземных опорных знаков, снизить нагрузку на маркшейдерскую службу предприятия и, как следствие, дополнительно повысить оперативность съемочного процесса.


2. Качественная съемка результата взрывания может быть осуществлена для блоков БВР с горизонтальными площадками вдоль вертикальных и наклонных открытых поверхностей с габаритами не менее ожидаемой ширины развала. В противном случае не исключен выброс горной массы на отработанное карьерное поле либо нижележащие уступы, находящиеся за пределами площади съемки, что приведет к заведомо неверной оценке геометрии развала.

3. Установлена прямая связь между геометрическими характеристиками взрывающего блока и параметрами развала, отмечается непосредственное влияние степени зажатости среды и расстояния от обнаженной поверхности до неразрушенного массива на плановые объемы смещения горной массы. В процессе проведения исследования на примере 17 блоков БВР подтверждена техническая возможность реализации оперативной детальной съемки массива до и после взрывания с применением автоматизированной аэрофотограмметрической технологии получения пространственных данных. С учетом этого и ввиду высокой степени детализации полученных моделей для горных инженеров открывается возможность получения полной геометрической характеристики каждого взрывающего блока без снижения темпов обработки.

4. Внедрение регулярной фотограмметрической съемки позволяет оперативно и с высокой точностью оценивать местоположение устьев скважин относительно проектных положений, объем взорванной горной массы, высоту, ширину развала и качество линии отрыва. При использовании программного обеспечения можно оценить гранулометрический состав взорванной горной массы и выход некондиционной фракции как по шапке развала, так и по мере подвигания забоя и соотнести полученные результаты с принятыми параметрами БВР.

5. Полученные данные могут быть использованы при калибровке современных программных комплексов моделирования развала, технико-экономической оценке деятельности карьера, для прогноза динамики отдельных производственных параметров и анализа других факторов в зависимости от нужд горного предприятия.

Библиографический список

См. англ. блок. 

Analysis of broken-rock disintegration using photogrammetric method

Information about authors

D. A. Ilyukhin¹, Associate Professor at Surveying Department, Candidate of Engineering Sciences

M. A. Marinin¹, Head of Blasting Department, Candidate of Engineering Sciences, Marinin_MA@pers.spmi.ru

R. A. Rakhmanov², Researcher, Candidate of Engineering Sciences

¹Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

²Academician Melnikov Research Institute for Comprehensive Exploitation of Mineral Resources—IPKON, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract

The objective of the study is the improvement of the efficiency of open-pit mines. The main direction of the study is the operational provision of mining industry workers with detailed data on the geometric parameters of rock masses. The geometry of blocks before and after blasting was evaluated by automated photogrammetry using unmanned aerial vehicles. The studies were carried out in the stripping blocks of a gold ore quarry with regard to three conditional groups of these blocks based on the direction of blasting: towards the mined-out void, towards the free bench area and towards a muck pile, at the adopted drilling-and-blasting design in the quarry. Full cycles of detailed surveys were accomplished in 17 blast blocks before and after blasting. The studies discover a correlation between the geometric characteristics of a blast block and the fragmentation parameters. Using modern software systems, various geometric characteristics were determined for the survey blocks, including spatial position of a block, as well as the cap height and the linear width of the broken-rock disintegration. The possibility of surveying by the method of automated photogrammetry with ground control points for the real-time determination of geometric parameters of the broken-rock disintegration, without stopping loading operations during mine surveying is confirmed. The recommendations on automated aerial photography of broken-rock disintegration in quarries are given.

Keywords: quarry, open pit mining, mine surveying, photogrammetric survey method, automated aerial photography, blast block, broken rocks.

References

1. Marinina O., Kirsanova N., Nevskaya M. Circular economy models in industry: Developing a conceptual framework. *Energies*. 2022. Vol. 15. 9376. DOI: 10.3390/en15249376
2. Fomin S. I., Ivanov V. V., Semenov A. S., Ovsyannikov M. P. Incremental open-pit mining of steeply dipping ore deposits. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020. Vol. 15, No. 11. pp. 1306–1311.
3. Yakovlev V. L., Glebov A. V., Bersenyov V. A., Kulniyaz S. S., Ligotskiy D. N. Influence of an installation angle of the conveyor lift on the volumes of mining and preparing work at quarries at the cyclic-flow technology of ore mining. *Izvestiya Natsionalnoy akademii nauk Respubliki Kazakhstan*. 2020. Vol. 4, No. 442. pp. 127–137. DOI: 10.32014/2020.2518-170X.93
4. Khokhlov S. V., Vinogradov Yu. I., Noskov A. P., Bazhenova A. V. Predicting displacements of ore body boundaries in generation of blasted rock pile. *GIAB*. 2023. No. 3. pp. 40–56. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_40
5. Yanitskii E. B., Kabelko S. G., Dunaev V. A., Rakhmanov R. A. Computer simulation of displacement of rock mass and estimation of ore dilution as a result of massive explosion in the open mining. *Vzryvnoe delo*. 2018. No. 120/77. pp. 94–108.
6. Sukhov A. K., Danko A. V., Vystrchil M. G. Experience of using unmanned aerial vehicles with surveying placer gold deposits. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2019. No. 7(133). pp. 85–89.
7. Vystrchil M. G., Sukhov A. K., Novozhenin S. U., Popov A. V., Guba S. A. Quality analysis of digital photogrammetric models obtained in low light conditions. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1661. 012089. DOI: 10.1088/1742-6596/1661/1/012089
8. Blishchenko A. A., Sannikova A. P. Analysis of the possibility of surveying the forest fund using UAVs. *Vestnik SGUGIT*. 2022. Vol. 27, No. 1. pp. 42–51.
9. Blishchenko A. A., Sannikova A. P. Formation of a methodology for the use of a geodesic quadcopter in quarries. *Marksheyderskiy vestnik*. 2022. No. 3(148). pp. 33–38.

10. Blischenko A. A., Gusev V. N. Anovar of errors in surveying photogrammetric measurements of mountain objects with the help of unmanned aerial vehicles. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 720. 012103. DOI: 10.1088/1755-1315/720/1/012103
11. Makarov V. A., Bondarenko D. A., Makarov I. V., Shrainer K. A. Experience of applying aerial photography technology from unmanned aerial vehicles in mining. 2017. Available at: <https://russiandrone.ru/publications/opyt-primeneniya-tehnologii-aerofotosyemochnykh-rabot-s-bespiilotnykh-letatelnykh-apparatov-v-gornom/> (accessed: 20.02.2023).
12. Blishchenko A. A., Gusev V. V. The cooperative usage of electronic tachometers and GNSS-receivers for surveying surveys of quarries. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2019. No. 4(130). pp. 79–81.
13. Blishchenko A. Modern mine survey techniques in the process of mining operations in open pit mines (quarries). *Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues: Proceedings of the Russian—German Raw Materials Dialogue: a Collection of Young Scientists Papers and Discussion*. Leiden: CRC Press/Balkema, 2020. pp. 58–62.
14. Blishchenko A. A., Lobyntsev A. K., Sukhov A. K. Evaluation of the accuracy of measuring volume of warehouse in mining objects using unmanned technology. *Marksheyderskiy vestnik*. 2020. No. 4(137). pp. 23–27.
15. Blishchenko A. A. Use of geodetic instruments in open-pit mining, the trend of using unmanned technologies. *Colloquium Journal*. 2020. No. 14-2(66). pp. 4–5.
16. Samoylovskiy A. Application of unmanned aerial vehicles in mines. *Gornaya promyshlennost*. 2018. No. 6. pp. 60–61.
17. Klimov S. S., Bessarab A. A., Nabiulin M. F. Use of unmanned aerial vehicles in drilling-and-blasting. *Globus: geologiya i biznes*. 2022. No. 3(72).
18. Afanasev P. I., Menzhulin M. G. Change in the average lump size in the crushing zone based on the calculation of energy dissipation. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2022. No. 4. pp. 408–419.
19. Mysin A. V., Kovalevsky V. N., Dolzhikov V. V. Experimental studies on the performance parameters of elongated shaped charges of different configurations. *GIAB*. 2022. No. 10. pp. 125–140. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_10_0_125
20. Saadoun A., Fredj M., Boukarm R., Hadji R. Fragmentation analysis using digital image processing and empirical model (KuzRam): A comparative study. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 257. pp. 822–832.
21. Makharatkin P. N., Abdulaev E. K., Vishnyakov G. Yu., Botyan E. Yu., Pushkarev A. E. Increase of efficiency of dump trucks functioning on the basis of justification of their rational speed by means of simulation modeling. *GIAB*. 2022. No. 6-2. pp. 237–250. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_2_237
22. Kurganov V. M., Gryaznov M. V., Kolobanov S. V. Assessment of operational reliability of quarry excavator-dump truck complexes. *Journal of Mining Institute*. 2020. Vol. 241. pp. 10–21.
23. Ivanov S. L., Ivanova P. V., Kuvshinkin S. Yu. Promising model range career excavators operating time assessment in real operating conditions. *Journal of Mining Institute*. 2020. Vol. 242. pp. 228–233.
24. Afanasev P. I., Makhmudov K. F. Assessment of the parameters of a shock wave on the wall of an explosion cavity with the refraction of a detonation wave of emulsion explosives. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, Iss. 9. 3976. DOI: 10.3390/app11093976
25. Moldovan D. V., Chernobay V. I., Sokolov S. T., Bazhenova A. V. Design concepts for explosion products locking in chamber. *GIAB*. 2022. No. 6-2. pp. 5–17. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_2_0_5
26. Isheyskiy V. A., Vasilyev A. S. Processing, analysis and interpretation of blasthole drilling data – Peculiarities and problems. *GIAB*. 2022. No. 3. pp. 16–33. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_3_0_16
27. Khokhlov S. V., Rakhmanov R. A., Alenichev I. A., Bazhenova A. V., Makkoev V. A. Investigation of the issue of management and control over the displacement of ore contours after the blast. *Vzryvnoe delo*. 2021. No. 132/89. C. 59–76.
28. Movchan I. B., Shaygallyamova Z. I., Yakovleva A. A. Identification of structural control factors of primary gold ore occurrences by method of unmanned aeromagnetic survey by the example of the Neryungriskiy district of Yakutia. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 254. pp. 217–233.
29. Mustafin M. G., Valkova E. O., Valkov V. A. Development paths for surveying geodetic

- observations of the stability of quarry sides. *Marksheyderskiy vestnik*. 2022. No. 3(148). pp. 13–18.
30. Gaich A., Pötsch M. 3D models for 3D fragmentation analysis from drone imagery : Short Webinar. 2021. Available at: https://www.researchgate.net/publication/353945899_3GSM_Webinar_3D_models_for_3D_fragmentation_analysis_from_drone_imagery (accessed: 25.06.2023).
31. Gusev V. N., Blishchenko A. A., Sannikova A. P. Study of a set of factors influencing the error of surveying mine facilities using a geodesic quadcopter. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 254. pp. 173–179.
32. Zatsik A. A., Bogolyubova A. A., Romanchikov A. Yu. Application of the photogrammetric method for obtaining data on full-scale measurements during measurements of non-residential premises. *Engineering Systems and Municipal Facilities : Collection of Scientific Papers. Series : Engineering Systems and Municipal Facilities*. Saint-Petersburg : Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2020. pp. 160–169.
33. Valkov V. A., Vinogradov K. P., Valkova E. O., Mustafin M. G. Creating highly informative rasters based on laser scanning and aerial photography data. *Geodeziya i kartografiya*. 2022. No. 11. pp. 40–49.
34. Gaich A., Pötsch M. Blast optimization including automatic borehole placement and automatic rock mass characterization. *Bergdagarna 2020 : Proceedings*. Stockholm, 2020.
35. Abhishek Sharma, Arvind Kumar Mishra, Bhanwar Singh Choudhary. Impact of Blast Design Parameters on Blasted Muckpile Profile in Building Stone Quarries. *Annales de Chimie: Science des Matériaux*. 2019. Vol. 43, No. 1. pp. 29–36.
36. Alenichev I. A., Rakhmanov R. A. Empirical regularities investigation of rock mass discharge by explosion on the free surface of a pit bench. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 249. pp. 334–341.
37. Bamford T., Medinac F., Esmaeili K. Continuous monitoring and improvement of the blasting process in open pit mines using unmanned aerial vehicle techniques. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, Iss. 17. 2801. DOI: 10.3390/rs12172801

УДК 622.235

О НЕКОТОРЫХ ПОДХОДАХ К ЧИСЛЕННОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ВЕДЕНИИ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ



М. А. ЗАЦЕПИН,
доцент, канд. физ.-мат. наук,
zatsin_ma@pers.spmi.ru



А. П. ГОСПОДАРИКОВ,
зав. кафедрой, проф., д-р техн. наук

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

Введение

При решении задач динамического разрушения массива горных пород используют современные расчетные методы [1–3]. В настоящее время получены интересные результаты в области геодинамического моделирования массива горных пород, вмещающего подземное сооружение [4–9]. Как правило, решение таких задач сопряжено со значительными

Представлены результаты исследований по разработке математических моделей сейсмического воздействия буровзрывных работ на подземные сооружения (газо- и нефтепроводы, горные выработки). По результатам численного моделирования сделан вывод о надежности прогнозирования напряженного состояния породного массива, вмещающего подземные сооружения, на основе взаимосвязанных программных комплексов.

Ключевые слова: математическая модель, горная выработка, трубопровод, динамическое разрушение породного массива, буровзрывные работы, сейсмозрывная волна, вычислительная программа, язык программирования

DOI: 10.17580/gzh.2023.09.03

математическими трудностями. Так, при определении напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород при воздействии на него динамических нагрузок приходится учитывать множество различных особенностей, значительно затрудняющих применение известных программных продуктов. Поэтому исследователю приходится не только разрабатывать математические модели и использовать известные вычислительные комплексы для решения таких задач, но и создавать или модифицировать их. Применение разработанных прикладных вычислительных программ и комплексов, полученных для конкретных