УДК 625.235

Оценка смещений рудных контуров после взрыва с применением ВММ-системы

Р.А.РАХМАНОВ¹, Д.ЛОЕБ², Н.И.КОСУХИН²¹ Институт проблем комплексного освоения недр Российской академии наук, Москва, Россия² Blast Movement Technologies PTY Ltd Company AB Hexagon, Самнер, Австралия

Как цитировать эту статью: Рахманов Р.А. Оценка смещений рудных контуров после взрыва с применением ВММ-системы / Р.А.Рахманов, Д.Лоеб, Н.И.Косухин // Записки Горного института. 2020. Т. 245. С. 547-553. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.6

Аннотация. Измерение смещений руды взрывом является одной из ключевых компонент системы контроля качества на любом горнорудном предприятии позволяет получать необходимую для определения местоположения рудных контуров точность. Около 15 лет назад в Австралии была разработана система мониторинга, позволяющая персоналу рудника проводить трехмерные измерения смещений рудных блоков при каждом взрыве. Проведенные исследования показали, что смещение рудных блоков крайне изменчиво и характеризуется полным отсутствием детерминированной составляющей. Следствием этого является то, что моделирование смещений рудных контуров в процессе взрыва будет неточным, а наилучшие результаты для горнодобывающего предприятия могут быть достигнуты лишь путем прямого измерения смещений. Рассмотренная в статье технология измерения смещений рудных контуров основывается на трехмерных векторах смещений, полученных в различных частях взрывааемого блока, характеризующихся отличными смещениями. Очевидно, что точность определения положения рудных контуров после взрыва пропорциональна числу измерений, проведенных на блоке. В настоящее время технология контроля смещений на базе ВММ-системы активно используется мировыми горнодобывающими компаниями, ее применение снижает потери и разубоживание руды. В 2017 г. на Олимпиадинском ГОКе начато опытное внедрение ВММ-системы, система внедряется в нескольких российских горнодобывающих компаниях.

Ключевые слова: датчик; взрыв; смещения; блок; руда; контур добычи; система; технология; добыча; переработка

Введение. ВММ-система мониторинга смещений при взрыве коммерциализована после ее разработки несколькими исследователями в Университете Квисленда (Австралия). Было установлено, что моделирование смещений рудных контуров после взрыва не дает требуемой для контроля качества точности. В работе [8] разработчиками системы отмечается, что моделирование смещений рудных контуров в процессе взрыва потенциально полезно, например, для обучения или решения задач, не требующих высокой точности.

В 2001 г. горнодобывающая компания Placer Dome (в настоящее время Barrick) совместно с учеными-исследователями Университета Квисленда попыталась разработать прогнозную модель для оценки вариативности смещений векторов после проведения взрыва, чтобы использовать вектора для смещений рудных блоков и минимизации потерь руды, разубоживания и ошибочной классификации [9]. Когда было установлено, что используемые модели не способны достичь требуемой для контроля качества точности, ученые приступили к разработке системы мониторинга смещений при взрыве, которая впоследствии была коммерциализована. Как следствие, в 2005 г. была сформирована компания BMT (Blast Movement Technologies Pty Ltd Australia).

ВММ-система получила широкое распространение на золотодобывающих предприятиях и признана всемирным стандартом для отслеживания смещений руды после взрыва [3, 4, 10, 13]. Система используется более чем на 150 предприятиях во всем мире. Шесть из десяти крупнейших производителей золота эффективно используют данную технологию в настоящее время. В России пилотный проект по внедрению ВММ-системы был запущен в 2017 г. на Олимпиадинском ГОКе. В настоящее время технология внедряется и опыт ее применения тиражируется в компании «Полус» на Вернинском, Наталкинском и Куранахском месторождениях. Проводится работа по внедрению системы и на других предприятиях России. Текущее число пользователей по миру и в России увеличивается, что подтверждает актуальность данной технологии для повышения эффективности добычи и переработки рудного сырья.

Описание системы мониторинга. ВММ-система (рис.1) состоит из датчиков, которые с помощью специального активатора перед взрывом активизируются и устанавливаются на пло-

Рис. 1. Общий вид детектора GP5200

щади взрываемого блока в заранее забуренные «холостые» скважины. Правильное расположение датчиков на блоке – это важная составляющая успеха получения достоверных данных о смещениях. После действия взрыва они смещаются с развалом взорванного массива. С помощью специального детектора датчики обнаруживаются и определяются их координаты. Собранная информация затем обрабатывается в специализированном программном обеспечении BMM Explorer. Краткое описание компонентов BMM-системы:

- активатор – дистанционный пульт, который включает каждый датчик и программирует его;
- датчики – устанавливаются в специально пробуренные на блоке скважины, местоположение которых фиксируется маркшейдером;
- специальный детектор используется для определения положения BMM-датчика после взрыва;
- разработанное программное обеспечение вычисляет трехмерные векторы измерений до и после взрыва для каждого BMM-датчика, полученные данные обрабатываются и хранятся в базе данных.

Процесс работы с BMM-системой наглядно представлен на рис.2 и состоит из 7 шагов. Следует отметить, что положение границ рудных блоков после проведения взрыва для отражения их смещений и тем самым, сокращения рудных потерь и разубоживания, определяется в течение 1-2 ч после проведения взрыва, что свидетельствует о простоте использования BMM-системы.

Постановка проблемы. Опыт применения BMM-системы на горных предприятиях показывает, что смещения рудных контуров после проведения взрыва в пределах одного блока крайне изменчивы и зависят от многих факторов. Для определения вектора смещения всего рудного контура недостаточно установить датчик в любой точке взрываемого блока (например, в центре

Рис.2. Процесс работы с BMM-системой

одного из участков направленного смещения) и далее его интерпретировать на весь направленно смещаемый участок. Для получения достоверной информации по смещению всего рудного контура этого будет недостаточно, особенно если рудных контуров на блоке несколько. Результаты работы специалистов компании ВМТ и других исследователей демонстрируют [3, 4, 10, 13], что вариативность горизонтальных смещения рудных контуров при проведении любого взрыва может достигать от +50 до –50 % от среднего. Направление перемещений также может быть крайне изменчивым и зависит от схем поверхностного монтажа взрыва.

Дополнительно отметим, что требуемая точность оценки смещений рудных контуров после взрыва не может быть достигнута моделированием, которое на текущем этапе развития программно-технических комплексов получило определенное развитие. Достоверность результатов моделирования не представительна: из-за неточности входных данных, которые невозможно получить по объективным причинам, невозможно предусмотреть все нюансы, влияющие на процесс взрыва (неточности алгоритмов моделирования). Как показывает практика, они зачастую существенно расходятся с инструментальными замерами смещений проведенных, в том числе с применением ВММ-системы.

Очевидно, что для эффективного управления качеством руды рудные контуры, размечаемые на уступе, должны быть настолько точными, насколько это возможно ($\pm 0,2$ м для некоторых рудников). В связи с этим требуется подбор специальных методов применения ВММ-системы. Правильный подход обеспечит требуемую точность оценки смещения рудных контуров в пределах взрываемого блока. Исследования, направленные на изучение и освещение этих вопросов, являются актуальными и обеспечат повышение эффективности добычи.

Методология исследования. На рис.3, а показано распределение горизонтальных смещений, определенных с применением ВММ-системы для взрывов, проведенных на четырех месторождениях, которые отличаются по горно-геологическим условиям отработки золотосодержащих запасов полезного ископаемого (Олимпиадинское, Куранахское, Вернинское и Наталкинское). Для сравнительного анализа результатов применения ВММ-системы принят трехмесячный период. Как видно из рис.3, а, на всех месторождениях наблюдается высокая изменчивость горизонтальных смещений в одном диапазоне удельного расхода взрывчатого вещества.

На Олимпиадинском месторождении было использовано 84 ВММ-датчика. Горизонтальные смещения зафиксированы от 0,8 до 17,3 м, среднее значение составило 7 м. На Куранахском месторождении было использовано 58 ВММ-датчиков. Горизонтальные смещения рудных блоков, зафиксированные датчиками ВММ, изменялись от 1,4 до 11 м. При этом среднее значение составило 5,1 м. На Вернинском месторождении применено 25 ВММ-датчиков, зафиксированные горизонтальные смещения взорванной рудной массы изменялись в пределах от 1,7 до 20,9 м, среднее значение составило 10 м. На Наталкинском месторождении применено 132 ВММ-датчика. Смещения рудных блоков изменялись от 0,1 до 6,2 м, среднее значение 2,2 м.

Стандартное отклонение горизонтальных смещений рудных контуров от среднего для Олимпиадинского месторождения составило 3,1 м, Куранахского – 2,3 м, Вернинского – 5,7 м, Наталкинское – 1,1 м.

Рис.3. Диапазон горизонтальных (а) и вертикальных смещений (б)
1 – Куранахское месторождение; 2 – Вернинское;
3 – Наталкинское; 4 – Олимпиадинское; 5 – усредненные данные ВМТ за последние 10 лет

На рис.3, б представлено распределение вертикальных смещений, полученных с помощью датчиков ВММ на рассматриваемых объектах за аналогичный период. Отметим, что вертикальные смещения наравне с горизонтальными так же характеризуются значительной изменчивостью. Отрицательные вертикальные смещения характерны для областей, находящихся в непосредственной близости от так называемой «линии отрыва» блока и в непосредственной близости от свободной поверхности. Учет вертикальных смещений рудных контуров, наравне с горизонтальными, безусловно окажет положительное влияние на качество добываемой руды.

Обсуждение. Анализ полученных данных позволяет заключить, что и горизонтальные и вертикальные смещения имеют значительный разброс значений не только между месторождениями, но и в рамках одного месторождения. Независимо от амплитуды смещения рудных контуров такой разброс значений является типичным для данных условий, согласно имеющейся у компании ВМТ статистике. Объяснением этому является ряд факторов, оказывающих влияние на величину и направление смещения рудных контуров в процессе проведения взрыва. Среди них наиболее значимыми являются:

- проектные параметры буровзрывных работ (тип и удельный расход взрывчатого вещества, глубина скважины и высота заряда, наличие и тип забойки, схема инициирования и интервалы замедлений, расстояние между рядами и скважинами и т.д.);
- свойства массива горных пород (физико-механические свойства, крепость, трещиноватость, обводненность, наличие нарушенных зоны и т.д.);
- граничные условия (проведение взрыва в зажатой среде или на свободную поверхность, ширина и длина блока и т.д.).

Следует отметить и возможные факторы, которые могут влиять на происходящие при взрыве процессы и направления смещений контуров взорванной горной массы (изменчивые качественные показатели ВВ, точность срабатывания средств инициирования, точность выполнения проектных параметров взрыва и т.д.). Рассмотрим только самые значимые факторы.

Проектные параметры буровзрывных работ – проект взрыва управляет распределением энергии от взрыва заряда по блоку в пространстве и времени. Высота уступа, расстояние между рядами скважин, между скважинами, длина заряда, длина забойки и ее материал, длина скважины и ее диаметр контролируют первое, а замедление между каждым отдельными взрывающимися скважинами – второе. Все это является примером комплексного взаимодействия, когда объем горной породы, подвергнутый действию взрывной энергии, динамически изменяется в процессе взрыва, так как горные породы смещаются из-за действия на них сил взрыва [8].

Наибольшее влияние на вариативность перемещений оказывают *свойства горных пород*, являясь вместе с тем и наиболее сложным для измерения параметром. Свойства массива горных пород определяются их структурным строением (например, размерами блоков, характеристиками швов тектонических нарушений, их заполнением) и механическими характеристиками (например, предел прочности на сжатие, разрыв, модуль Юнга и коэффициент Пуассона). Из-за случайности указанных величин в любом рудном теле, они никогда не могут быть измерены точно, а лишь статистически оценены на основе ограниченного числа проведенных опытов. Возможность проведения широкого диапазона измерений ограничена в любом блоке из-за доступности для измерений лишь небольшой его части. Например, в очистном блоке размером $200 \times 100 \times 10$ м при наличии свободной поверхности, площадь доступной поверхности составляет всего $22\,000\text{ м}^2$ для объема блока, составляющего $200\,000\text{ м}^3$. Если объем блока, на котором проводились измерения его прочностных характеристик составлял $0,5\text{ м}^3$, а его габариты соответственно $0,8 \times 0,8 \times 0,8$ м, только 9 % от всего объема взрываемого блока были доступны для проведения подобных измерений [8].

Определение *граничных условий* для взрываемого блока является конечной стадией определения входных данных. Они оказывают значительное влияние на смещение горной массы вблизи границ блока, а также влияют на форму развала породы на его поверхности. Для взрывов со свободной поверхностью и соответствующим замедлением смещения будут преимущественно горизонтальными. В случае, если свободная поверхность взрываемого блока ограничена, например, в нижней его части, ранее взорванным материалом, горная масса с верхней части взрываемого блока будет стремиться заполнить пространство над оставленной горной массой, смещаясь в горизонтальном направлении [8].

На большинстве предприятий только некоторые из представленных выше характеристик являются заранее известными величинами, другие же, например, характеристики массива горных пород, могут варьировать даже в пределах одного взрываемого блока. В качестве примера рассмотрим блок, на котором проводилось измерение смещений рудных блоков с использованием ВММ-системы на Вернинском месторождении. На блоке применялась диагональная схема инициирования (рис.4). Было установлено 6 датчиков ВММ, из которых только 5 было обнаружено после проведения взрыва. Горизонтальные и вертикальные смещения, зафиксированные ВММ-датчиками после проведения взрыва, приведены в таблице. Отметим, что в пределах только данного взрыва горизонтальные смещения, измеренные датчиками, варьировали от 11,8 до 24,8 м, при этом среднее смещение составило 17,8 м. Очевидно, что применение в данном случае систем, позволяющих моделировать смещения рудных блоков после проведения взрыва, привело бы к значительным потерям руды, разубоживанию, а также ошибочной ее классификации, что, в конечном счете, отрицательно отразилось бы на экономических показателях предприятия. Именно поэтому горнодобывающие предприятия внедряют ВММ-систему отслеживания смещения рудных блоков, являющуюся эффективным инструментом рудоконтроля. Моделирование развала развивается и на некоторых предприятиях является дополнением к получению информации по смещениям [1, 2, 6, 7].

Аналогичная изменчивость смещений рудных блоков характерна для всех без исключения горнодобывающих предприятий [5, 11, 12]. Например, в работе [5] сравнивались средние смещения рудных контуров (5,3 м) с измеренными на трех взрывах. На основе полученных результатов (рис.5) показано, что используемый шаблон действительно отображает близкие к средним смещения, но он не соответствует ни одним имеющимся эмпирически полученным данным.

Рис.4. Схема инициирования блока с установленными датчиками ВММ, смещенными после взрыва

1 – линии инициирования (отбойники); 2 – точка инициирования; 3 – смещенный датчик ВММ и его номер на плане

Смещения, измеренные датчиками ВММ после проведения взрыва

ВММ	Глубина установки, м	Горизонтальные смещения, м	Вертикальные смещения, м
1-О	5,0	Датчик не был обнаружен	
2-О	5,0	15,3	11,7
3-О	5,0	19,0	-1,6
4-О	5,2	18,0	10,1
5-О	5,1	11,8	1,3
6-О	5,5	24,8	3,5

В исследовании [5] были проанализированы три взрыва. Три взрывааемых блока, на которых проводились исследования, располагались на одном уступе, на одном карьере, в схожих геологических условиях. Для каждого из взрывааемых блоков применялись аналогичные схемы инициирования, удельный расход взрывчатого вещества был одинаковым. Несмотря на это, смещения измеренные ВММ-датчиками для каждого взрыва, отличны друг от друга. Несмотря на то, что общее среднее измеренное смещение рудных контуров составило приблизительно 5,5 м, что яв-

Рис.5. Шаблон средних смещений в сравнении с измеренными в трех взрывах смещениями

ляется близким значением к результатам исследований, проведенных в 2009 г. (5,4 м), смещения рудных контуров в каждом взрыве значительно отличаются от среднего. Основной вывод исследований заключается в том, что смещение рудных контуров посредством взрыва не может оцениваться шаблоном по среднему значению даже в том случае, если все контролируемые входные параметры остаются постоянными и известными. Если общее смещение рудных контуров в взрываемом блоке соответствует шаблону, возможно случайное отклонение смещений в пределах одного взрыва. В случае, если вместо непрерывного мониторинга на практике будет применяться шаблон или модель движения, следует изучить и оценить риски, связанные с их применением. Выгода от прямого мониторинга намного превышала затраты. Рентабельность инвестиций (ROI) только для двух взрывов (9480-47 и 9480-52) составила 14,5 в реальной ситуации и 20,4 в представленном сценарии. Таким образом, выгода от использования системы ВММ в сравнении с моделированием только в этих двух взрывах составила приблизительно 42000 \$. Это означает, что система ВММ полностью окупит себя за шесть взрывов, после чего будет приносить предприятию только чистую прибыль [5].

Можно сделать вывод, что измерения смещений рудных контуров в процессе проведения взрывных работ следует признать эффективным элементом системы управления качеством на горнорудном предприятии. Амплитуда и направление смещений, измеренных датчиками ВММ, обусловлены исходными данными, которые учтены в полном объеме; свойственная изменчивость смещений рудных контуров измерена. Отметим, что до сих пор не существует точных формул для подсчета смещений, обеспечивающих требуемую для управления качеством точность.

Измерение смещений руды взрывом является одной из ключевых компонент системы контроля качества для любого горнорудного предприятия, так как позволяет получать необходимую для определения местоположения рудных контуров точность и тем самым повышать эффективность добычи и переработки.

Заключение. В данной статье рассмотрено применение ВММ-системы для мониторинга смещений рудных контуров на примере золотодобывающих предприятий, которые внедрили и применяют эту систему. Основная цель статьи заключалась в доказательстве того факта, что для решения задач управления качеством руды необходим обязательный учет смещений рудных контуров, характеризующихся значительной вариативностью во взрываемых блоках. ВММ-система позволяет это производить эффективно и с необходимой точностью.

Смещение рудных контуров на рассмотренных месторождениях изменчиво и зависит от множества исходных данных, учет которых зачастую невозможен или малоэффективен. Смещение рудных контуров на текущем этапе не может быть смоделировано с необходимой для контроля качества точностью. Полученные в рамках проведенного исследования данные о смещениях не являются типичными для предприятий даже в схожих горно-геологических условиях.

Прямое измерение смещения рудных контуров на сегодняшний день является единственным точным методом. Из-за присущей изменчивости смещений большее количество мест установки датчиков приведет к более точному очерчиванию границ рудных контуров. Выбор таких мест мониторинга должен приниматься на предприятиях, исходя из их горно-геологических условий по результатам анализа статистики смещений на проведенных взрывах.

Проведенные замеры смещений от взрыва на нескольких золотодобывающих карьерах показали, что горизонтальные смещения составили от 0,1 до 20,9 м. Для некоторых карьеров в сопоставимых условиях параметров буровзрывных работ такие смещения в пределах одного блока могут изменяться на 15-18 м. Вариативность горизонтальных смещений рудных контуров при проведении взрывов достигает $\pm 50\%$ от среднего. Достоверная оценка смещений рудных контуров в таких условиях возможна только с достаточным и правильно подобранным количеством точек измерения смещений рудных контуров. Если на взрывном блоке устанавливать недостаточное количество датчиков, смещение рудных контуров в выбранных позициях может отличаться от фактического смещения всего рудного контура.

Приведенные результаты исследования доказывают что при определенных обстоятельствах могут возникать ситуации, когда карьер фактически потеряет больше руды, добывая ее без учета фактора смещения из смещенных взрывом контуров. Инструментальный замер смещений контуров руды взрывом – важная составляющая процесса добычи, минимизирующая такие потери.

ЛИТЕРАТУРА

1. Капутин Ю.Е. Горные компьютерные технологии и геостатистика. СПб.: Недра, 2002. 424 с.
2. Компьютерное моделирование смещения горной массы и оценка разубоживания руды в результате массового взрыва при открытой разработке месторождений / С.Г.Кабелко, В.А.Дунаев, Е.Б.Яницкий, Р.А.Рахманов // Взрывное дело. 2018. № 120-77. С. 94-108.
3. A new 3D simulation framework to model blast induced rock mass displacement using physics engines / A.Tordoir, D.Weatherley, I.Onederra, A.Bye // Proceedings Ninth International Symposium On Rock Fragmentation By Blasting – Fragblast, Granada, Spain, 13-17 September 2009. 2009. Vol. 9. P. 381-388.
4. Blast Monitoring and Blast Translation – Case Study of a Grade Improvement Project at the Fimiston Pit, Kalgoorlie, Western Australia / M.Fitzgerald, S.York, D.Cooke, D.Thornton // Eighth International Mining Geology Conference, Queenstown, New Zealand, 22-24 August 2011. 2011. P. 285-297.
5. Hunt T.W. Modeling vs Monitoring Blast Movement: The cost of Variation / T.W.Hunt, D.M.Thornton // Proc. 40th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique, Denver, Colorado, USA, 9-12 February 2014. ISEE 2014.
6. Isaaks E. Modelling blast movement for grade control / E. Isaaks, R. Barr, O. Handayani // Proceedings Ninth International Mining Geology Conference, Adelaide, Australia, 18-20 August 2014. 2014. P. 433-440.
7. Kabelko S.G. Computer modeling of explosive destruction of rocks on the quarries / S.G.Kabelko, V.A.Dunaev, A.V.Gerasimov // 7-th World Conference On Explosives & Blasting, Moscow, Russia, 15-17 September 2013. 2013. P.140-143.
8. La Rosa D. Blast Movement Modelling and Measurement / D.La Rosa, D.Thornton // Proceedings of the 35th APCOM Symposium, Wollongong, Australia, 24-30 September 2011. 2011. P. 297-310.
9. Thornton D. Measuring blast movement to reduce ore loss and dilution / D.Thornton, D.Sprott, I.Brunton // Proceedings 31st Annual Conference on Explosives and Blasting Technique, Orlando, Florida, 6-9 February 2005. ISEE, 2005. P. 1-11.
10. Thornton D. The application of electronic monitors to understand blast movement dynamics and improve blast designs // Proceedings Ninth International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting – Fragblast, Granada, Spain, 13-17 September 2009. 2009. Vol. 9. P. 287-300.
11. Thornton D. The application of electronic monitors to understand blast movement dynamics and improve blast designs // Proceedings Ninth International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting – Fragblast, Granada, Spain, 13-17 September 2009. 2009. Vol. 9. P. 287-399.
12. Thornton D. The Implications of Blast-Induced Movement to Grade Control // Proceedings Seventh International Mining Geology Conference, Perth, Australia, 17-19 August 2009. 2009. P. 147-154.
13. Yang R.L. A three dimensional model of muckpile formation and grade boundary movement in open pit blasting / R.L. Yang, A. P. Kavetsky // International Journal of Mining and Geological Engineering. 1990. Vol. 8. P. 13-34.

Авторы: Р.А.Рахманов, канд. техн. наук, научный сотрудник, Ruslan1250@mail.ru (Институт проблем комплексного освоения недр Российской академии наук, Москва, Россия), Д.Лоеб, глобальный менеджер-консультант, Jeff@bmt.com.au (Blast Movement Technologies PTY Ltd Company AB Hexagon, Самнер, Австралия), Н.И.Косухин, канд. техн. наук, технический консультант по России и СНГ, Nikolay.kosukhin@bmt.com.au (Blast Movement Technologies PTY Ltd Company AB Hexagon, Самнер, Австралия).

Статья поступила в редакцию 24.05.2020.

Статья принята к публикации 21.07.2020.