

ГЕОМЕХАНИКА

УДК 550.34; 622.83

ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ УЧАСТКОВ КОРОБКОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КУРСКОЙ МАГНИТНОЙ АНОМАЛИИ

**В. В. Адушкин¹, С. Б. Кишкина¹, В. И. Куликов¹, Д. Н. Павлов¹,
В. Н. Анисимов¹, Н. В. Салтыков¹, С. В. Сергеев², В. Г. Спунгин¹**

¹Институт динамики геосфер РАН, E-mail: geospheres@idg.chph.ras.ru,
Ленинский проспект, 38, корп. 1, 119334, г. Москва, Россия

²Всероссийский научно-исследовательский институт по осушению месторождений
полезных ископаемых, защите инженерных сооружений от обводнения, специальным
горным работам, геомеханике, геофизике, гидротехнике, геологии и маркшейдерскому делу,
просп. Богдана Хмельницкого, 86, 308007, г. Белгород, Россия

Приведены результаты апробации элементов системы мониторинга потенциально опасных участков Коробковского месторождения Курской магнитной аномалии (КМА). В основу системы положены сейсмические и деформационные измерения, направленные на оценку и контроль сдвиговой жесткости потенциально опасных разломов. Методом оценки жесткости разлома является анализ параметров сейсмических волн в его окрестности. Для диагностики выбранных разломов в качестве источников сейсмических сигналов использовались взрывы на ближайших карьерах или в камерах шахты.

Индукцированная сейсмичность, техногенные землетрясения, жесткость разломов, разломные зоны, геомеханика, массив горных пород, мониторинг

Одной из задач научного сопровождения работ по освоению месторождений полезных ископаемых является контроль безопасности. Система контроля должна предусматривать проведение мониторинга геодинамических и техногенных процессов, сопутствующих добыче, оценке геомеханического состояния массива горных пород, осуществление прогноза удароопасности на основе выполнения комплекса наблюдений [1].

Установлено, что источниками крупных техногенных землетрясений с $M_w > 2.5$, в том числе и событий, связанных с разработкой месторождений, служат подвижки по нарушениям сплошности массива горных пород [2, 3; и др.]. Изучение зон очагов землетрясений в глубоких горизонтальных шахтах [4] показало, что подвижки происходят исключительно в узкой зоне магистрального сместителя [5]. Закономерности распределения таких сейсмических событий во времени и пространстве до конца не ясны, хотя они, по всей видимости, связаны с общим

изменением поля напряжений в пределах района добычи. Области высокого риска возникновения динамического события большой энергии приурочены именно к зонам крупных разломов. Часто эти зоны являются естественными границами разрабатываемых месторождений или шахтных полей. Участки разломных зон нередко пересекаются горными выработками. Учитывая, что в процессе горных работ они подвергаются периодическому сейсмозрывному воздействию значительной амплитуды и длительности, необходимо оценивать возможность возникновения крупного сейсмического события даже в тектонически спокойных районах. Для этого требуются достаточно чувствительные системы мониторинга большого района массива горных пород [6].

В мировой практике в качестве одного из основных методов контроля используют сейсмические наблюдения, позволяющие проводить исследование пространственно-временного распределения очагов сейсмических событий и оценку их энергии на большой площади. Опираясь на результаты геодинамического мониторинга, предоставляющего на основе анализа геологических, геоморфологических, геофизических, геохимических и других материалов данные о структуре массива и его напряженном состоянии, сейсмологический мониторинг выявляет наиболее активные и потенциально опасные структуры.

Существующие на многих горных предприятиях системы контроля способны регистрировать и с высокой точностью определять местоположение источников слабых сейсмических событий с отрицательными магнитудами. Такие системы устанавливаются обычно на нескольких горизонтах непосредственно вокруг участка [2, 7; и др.], что позволяет следить за активностью разломов непосредственно в районе работ. Часто локальные системы дополняются и наземной сейсмической сетью, контролирующей весь район ведения горных работ, поскольку известно, что в отличие от слабой сейсмичности, приуроченной непосредственно к горным выработкам, источники сильных событий ($E_s > 10^9$ Дж) могут располагаться на значительном удалении от выработок. Причем такие события обычно происходят с временной задержкой по отношению к активно проводящимся работам [8].

Система мониторинга горных работ, учитывающая данные геодинамического контроля, прежде всего должна обеспечить контроль характеристик разломных зон, пересекающих или расположенных в окрестности района разработки месторождения.

Согласно предложенной в [9] концепции, при создании системы мониторинга в первую очередь следует построить структурную модель участка ведения работ, включающую сведения о местоположении крупных разломов и тектонических трещин. На основе такой структурной модели нужно выбрать разломы, по которым с наибольшей вероятностью может произойти динамическая подвижка, и организовать сейсмический контроль механических свойств выбранных зон. Необходимо постоянно повышать степень изученности вмещающего массива, оценивая имеющиеся и вновь поступающие данные о смещении бортов разломов или локализации источников слабой сейсмичности; должна модернизироваться конфигурация и чувствительность системы сейсмических и деформационных наблюдений, выполняться численное моделирование напряженно-деформированного состояния массива [10].

В настоящей статье описаны первые результаты апробации представленных в [9] подходов. Эксперименты проводились в горных выработках Коробковского железорудного месторождения, разрабатываемого ОАО «Комбинат КМАруда» (г. Губкин Белгородской области).

ГЕОЛОГИЯ И БЛОКОВАЯ СТРУКТУРА КОРОБКОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Коробковское железорудное месторождение входит в состав железорудных месторождений Курской магнитной аномалии, сложено породами нижнего протерозоя и с 1952 г. разрабатывается подземным способом. В строении месторождения выделено 8 крутопадающих залежей

железистых кварцитов длиной 380–3500 м и горизонтальной мощностью 50–1050 м. Общая площадь месторождения $\sim 5 \text{ км}^2$. С поверхности залежи перекрыты осадочными образованиями девонской, юрской, меловой и четвертичной систем общей мощностью 65–178 м. Добыча руды ведется этажно-камерной системой разработки под защитой предохранительной рудной потолочины, опирающейся на систему междукамерных целиков.

Месторождение обрабатывается без осушения надрудной толщи пород, а для предотвращения прорывов в горные выработки шахты подземных вод и пльвунных пород оставлен предохранительный потолочный целик мощностью около 100 м, опирающийся на систему междукамерных целиков.

Рудное поле месторождения ограничивается двумя глубинными неотектоническими разломами северо-западного простирания протяженностью в сотни километров (рис. 1). От этих глубинных разломов территория месторождения находится на удалении более 20 км.

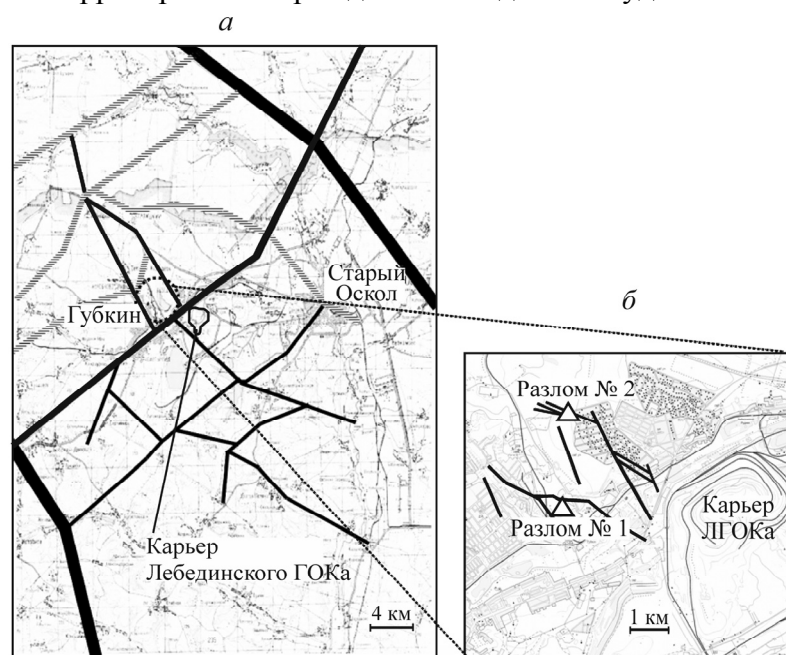


Рис. 1. Схема основных разрывных нарушений области проведения работ (а): самая широкая линия — неотектонически активные разломы; окружность — рудное поле Коробковского месторождения; схема основных тектонических нарушений (б): Δ — места проведения измерений

По геометрическим параметрам плоскости трещин массива горных пород Коробковского месторождения можно условно разделить на четыре уровня [11]. Первый — это заполненные дайковыми породами тектонические разрывы, мощностью от 0.6 до 10 м и протяженностью свыше 500 м. Трещины первого уровня развиты по напластованию кварцитов, они расчленяют массив многочисленными вертикальными плоскостями с углом падения $81-86^\circ$. Второй уровень — тектонические, литогенетические и экзогенные трещины мощностью от 0.2 до 60 см, протяженностью от 0.5 до 500 м, заполненные кварцем, кальцитом, халькопиритом или без заполнителя. Поверхность трещин ровная, бывает гладкой или шероховатой. Расстояние между трещинами 50–60 см. Плоскость трещин строго выдержана на больших площадях.

Эти две основные системы трещин пересекают массив перпендикулярными друг к другу плоскостями падения, близкими к вертикальным. В одной из плоскостей трещины простираются по напластованию пород, в другой — поперек. Они прослеживаются в горных выработках по многочисленным дайкам диорит-порфиритов субширотного простирания и крутопадающим

до $70-90^\circ$. Количество даек диорит-порфиритов по скважинам составляет 2.2 % от общей мощности продуктивной толщи. Встречаются зоны брекчирования и милонитизации, а также отполированные зеркала скольжения со штриховкой и царапинами на плоскостях скольжения. Третий и четвертый масштабный уровень трещин массива горных пород Коробковского месторождения — это литологические или тектонические трещины протяженностью 10–80 см и мощностью до 0.2 мм, имеющие относительно небольшие углы падения плоскостей ($20-35^\circ$ для III и $0-15^\circ$ для IV уровня) и часто различимые только в шлифах под микроскопом.

Система трещин разбивает массив горных пород на структурные блоки, размер и количество которых характеризует его раздробленность. При этом установлено, что интенсивность трещиноватости с глубиной уменьшается, а размер структурного блока, соответственно, увеличивается [11]. По выделенным разломам не наблюдается смещений в подошве меловых отложений, что свидетельствует о низкой их активности на современном этапе. Предполагается, что такие разломы проявляются в осадочном чехле в виде зон повышенной трещиноватости.

Наиболее опасными при отработке Коробковского месторождения представляются места пересечения разломов северо-западного и северо-восточного простирания; именно на таких участках наиболее вероятны подвижки, спровоцированные горными работами. Одним из подобных участков является зона смыкания Главной и Стретенской залежей [12], которая характеризуется как зона тектонических нарушений общей мощностью около 100 м. В горной выработке здесь вскрыто несколько крутопадающих зон дробления. Мощность зон меняется по простиранию и падению от единиц до 20–30 м. Между зонами дробления массив интенсивно расчленен прослоями сланцев, диорит-порфиритовыми и гнейсовыми дайками. Прочность образцов пород на одноосное сжатие на данном участке составляет 12.0–28.1 МПа и в среднем равна 17 МПа; коэффициент прочности пород участка по шкале Протодяконова $f \leq 2$.

Получены следующие характеристики образцов неокисленных железистых кварцитов: предел прочности на одноосное сжатие $R_c = 70-450$ МПа; предел прочности при растяжении $R_p = 3.5-15$ МПа; временное сопротивление изгибу $R_{\text{рн}} = 11.9-48$ МПа; модуль упругости $E = 70-156$ ГПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0.1-0.4$; для всех образцов характерна анизотропия деформационно-прочностных характеристик ($R'_c / R''_c = 1.33$, $R'_p / R''_p = 1.56$, $E'' / E' = 1.18$).

Начиная с 2014 г. силами ОАО «Комбинат КМАруда» совместно с ОАО «ВИОГЕМ» проводится оценка склонности массива пород к горным ударам. С учетом анализа структур массива Коробковского месторождения, а также данных исследований деформационно-прочностных характеристик пород и результатов изучения раздробленности массива проведена оценка параметров поля напряжений методом полной разгрузки и методом контроля высотных отметок настенных и глубинных реперов. Естественные напряжения в массиве в пределах рабочего этажа шахты (гор. –71 м ÷ гор. –125 м) находятся в диапазоне от $\sigma_v = 7-9$ МПа (вертикальные) до $\sigma_r = 10-17$ МПа (горизонтальные). В срединной части междукамерных и межэтажных целиков вертикальные напряжения $\sigma_v = 10-12$ и $\sigma_v = 16-18$ МПа соответственно; в местах сопряжения $\sigma_v = 20-25$ МПа. На глубине 503 м горизонтальное напряжение на участке конвейерного штрека скипового ствола составило 24.3 МПа.

На рис. 2 показано изменение напряжений по глубине на шахте им. Губкина. Видно, что сохраняется тенденция увеличения напряжений с глубиной отработки [13].

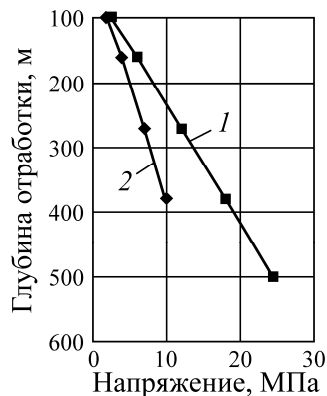


Рис. 2. Изменение напряжений по глубине на шахте им. Губкина: 1 — вертикальные напряжения; 2 — горизонтальные [13]

На основе имеющейся информации о строении массива, а также с учетом тестовых измерений в шахте на двух разломах разного масштаба выбраны участки, пригодные для проведения деформографических и сейсмических наблюдений (см. рис. 1). Все измерения выполнены на горизонте – 125 м (глубина ~ 300 м от поверхности).

Первый участок (Т1) расположен в 1-м Южном разведочном орте и находится в зоне разлома № 1. Трещина близширотного простирания, на которой велись наблюдения, выделяется зоной дробления в кварцитах и отчетливо прослеживается на стенках и в кровле выработки. В месте пересечения с ортом видимая мощность зоны дробления 30–50 см. Плоскость трещины полого склоняется на север под углом ~ 15°.

Второй участок наблюдений (Т2) находится в пределах 61-го стретенского откаточного орта, в зоне смыкания Главной и Стретенской залежей: зона является одной из наиболее опасных мест отработки месторождения (разлом № 2). В районе измерений разлом имеет среднюю мощность ~ 100 м, и в его строении выделяются четыре зоны дробления с видимой мощностью 13, 34, 3 и 4 м.

ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

В основу полевых экспериментальных работ положен разработанный в ИДГ РАН метод исследования жесткости разлома, который основывается на анализе изменения динамических характеристик сейсмических волн при их взаимодействии с нарушениями сплошности массива горных пород [14–16]. Чем ближе жесткость межблокового контакта (сдвиговая жесткость разгрузки разломной зоны) к жесткости массива, тем больше энергии при сдвиге по разлому диссипируется в очаге и тем меньше излучается в упругую область [16].

Метод подробно описан в [14, 15, 17]. Ниже приведены основные положения, необходимые для дальнейшего изложения материала.

Массив горных пород имеет вид блочной структуры, основные закономерности деформирования которой определяются свойствами межблоковых границ (разломов, трещин, и т. п.); контакт между блоками представляется как структурный элемент, обладающий собственными интегральными деформационными параметрами.

Межблоковые границы (далее — разломы или трещины) имеют толщину много меньшую, чем протяженность, что позволяет рассматривать разлом в виде плоскости и характеризовать его деформационные свойства не модулем деформации заполняющей разлом породы, а нормальной и сдвиговой жесткостью разлома, т. е. производной нормального σ_n и сдвигового τ напряжения, которое действует по относительному нормальному W_n и сдвиговому W_s перемещению берегов разлома соответственно:

$$k_n = \frac{d\sigma_n}{dW_n}, \quad k_s = \frac{d\tau}{dW_s}. \quad (1)$$

Эти параметры более чувствительны к деформации, чем скорости распространения сейсмических колебаний. Кроме того, соотношение между жесткостью разлома и жесткостью вмещающего массива $K = G/L$ определяет режим скольжения по разлому (G — модуль сдвига вмещающего массива, L — длина разлома).

Для оценки нормальной и сдвиговой жесткости разлома достаточно измерить динамические характеристики продольных и поперечных сейсмических волн в его окрестности. В случае, когда угол падения фронта волны на плоскость нарушения отличается от нормального ($\alpha = 0$), обработка заметно усложняется: необходимо в каждый момент времени вычислять деформации структурного нарушения и напряжения в его окрестности. Расчеты коэффициента ослабления скорости волны при ее прохождении через разлом показали [5], что при угле падения менее 45° он практически неизменен, так что могут использоваться соотношения, полученные для случая нормального падения волны на разлом [15]. Если угол падения волны становится больше 45° , коэффициент ослабления начинает меняться, а если угол превышает $60-70^\circ$, то упрощенные соотношения могут привести к заметным ошибкам (рис. 3).

Поскольку диаграмма “напряжение – деформация” нелинейна, при проведении предварительных оценок деформационных характеристик нарушений сплошности, пренебрегая зависимостью жесткости от амплитуды волны, линеаризуем ветви нагружения зависимостей $\sigma - W_n$, $\tau - W_n$ и введем понятие “средней жесткости”:

$$\bar{k}_n = \frac{\sigma(t_m)}{W_n(t_m)}, \quad \bar{k}_s = \frac{\tau(t_m)}{W_s(t_m)}, \quad (2)$$

где t_m — момент времени, в который напряжение достигает максимума.

Для вычисления “средних” жесткостей не обязательно строить диаграммы нагружения, достаточно определить максимум напряжения и соответствующее ему значение деформации. Пример диаграммы “напряжение – деформация” для природного контакта скальных поверхностей длиной ~ 10 м и мощностью ~ 2 мм приведен на рис. 4.

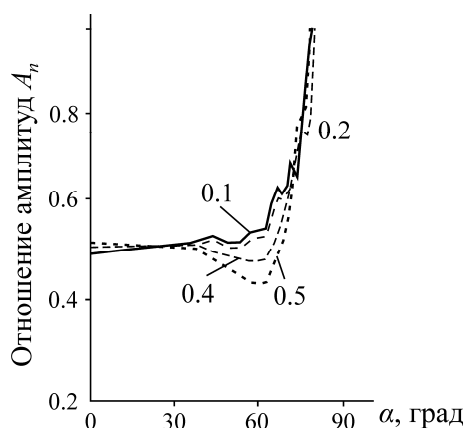


Рис. 3. Зависимость коэффициента ослабления нормальной к разлому составляющей скорости $A_n = (V_{2m})_n / (V_{0m})_n$ от угла падения волны на разлом α для коэффициентов Пуассона $\nu = 0.1-0.5$ [5]

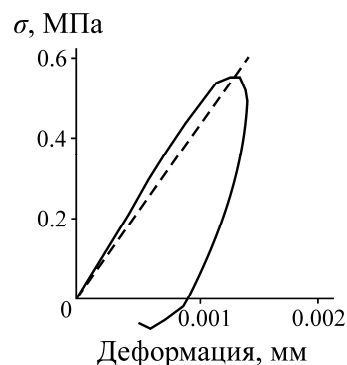


Рис. 4. Зависимость “напряжение – деформация” для контакта скальных поверхностей длиной ~ 10 м и мощностью ~ 2 мм [15]

При измерениях на шахте “КМАруда” выполнялись условия применимости квазистатического приближения. В качестве источников сейсмических сигналов использовались колебания от взрывов в камерах шахты и массовых взрывов на карьере Лебединского ГОКа, расположенного на удалении нескольких километров от места регистрации (см. рис. 1). Для регистрации колебаний выбраны трехкомпонентные акселерометры А1638 (ЗАО “Геоакустика”, Россия) с рабочей полосой частот 0.2–400 Гц и геофоны GS-20DX (ООО “Геоспейс Интернэйшенал”, Уфа) с рабочей полосой 10–400 Гц. Сейсмические измерения проводились по трем ортогональным компонентам, фиксируя вертикальные, нормальные к стенке выработки и горизонтальные вдоль стенки выработки колебания. Одновременно с сейсмической регистрацией велись деформометрические измерения относительного смещения бортов разлома с помощью лазерного датчика перемещения ILD2300-100 (Micro-Epsilon, Германия) в полосе частот 0–5 кГц с точностью 1 мкм (рис. 5).

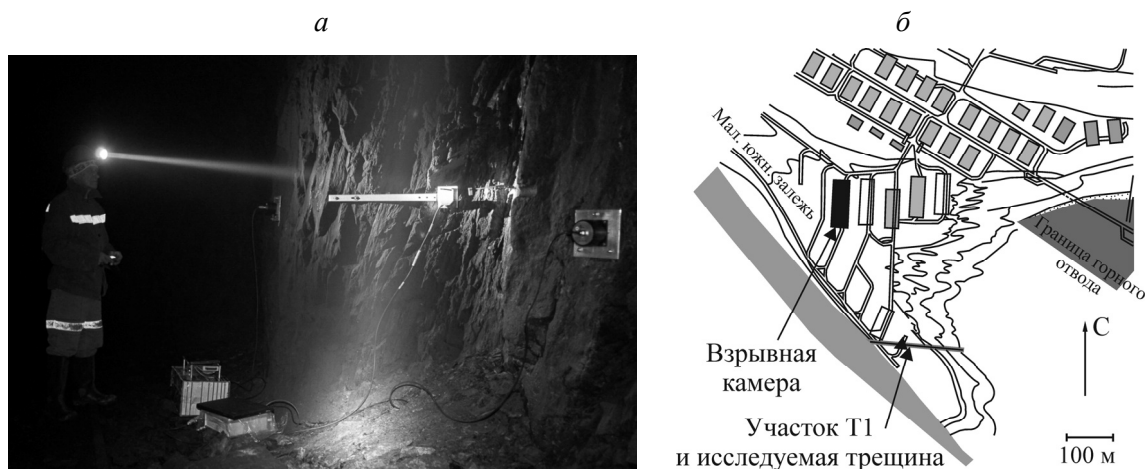


Рис. 5. Расположение аппаратуры в выработке на участке Т1: а — общий вид измерительной точки; б — схема проведения одного из экспериментов

Лазерный датчик устанавливался на дюралевой штанге длиной 70 см на вертикальной стенке поперек разлома для измерения его нормальной деформации. К одному берегу разлома двумя анкерными болтами крепился конец штанги, на другом его конце располагался датчик. На противоположном берегу разлома также с помощью анкерного болта крепилась мишень, от которой отражался лазерный луч. В серии лабораторных опытов определялась собственная частота изгибных колебаний дюралевой штанги с установленным датчиком в направлении, перпендикулярном стенке. Она составила 25 Гц.

Акселерометры также размещались на вертикальной стенке выработки: на противоположных берегах разлома, примерно в 3 м от его плоскости, оборудовались специальные площадки. Вертикальную ось датчика ориентировали перпендикулярно стенке выработки, ось X — вертикально вверх, а ось Y — перпендикулярно плоскости разлома так, чтобы оси Z и X образовывали правую тройку. Все датчики находились примерно на одной высоте 1.5 м от почвы выработки.

На основе результатов измерений параметров колебаний сейсмическими датчиками, установленными на разных берегах трещины, и записи лазерного датчика перемещения рассчитана средняя нормальная жесткость трещины Т1: $k_n = 7.7$ МПа/мм.

На участке Т2 (см. рис. 1б), на одном из фрагментов разлома № 2, установлен профиль из пяти датчиков GS-20DX с общей базой измерений около 20 м. Запись вертикальных компонентов сейсмических колебаний от взрыва, осуществленного на расстоянии примерно 140–160 м от профиля, приведена на рис. 6. Отмечено изменение волновой формы сигнала от точки 3 к точке 4, между которыми проходило тектоническое нарушение. В результате оценок получены значения нормальной жесткости нарушения $k_n = 0.43$ МПа/мм [18].

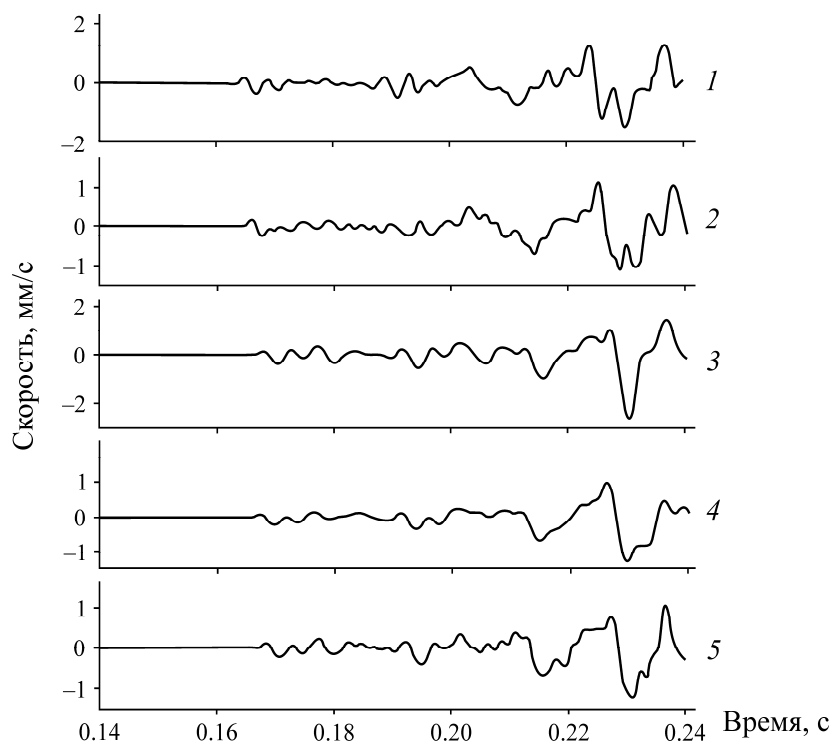


Рис. 6. Вертикальные компоненты сейсмических колебаний от взрыва в камере шахты; запись профилем геофонов; 1–5 — точки наблюдения. Расстояние до источника ~ 140 м

Несмотря на то, что амплитуда сейсмических колебаний при воздействии на зону разлома составляла несколько миллиметров в секунду, датчик перемещения фиксировал возникновение остаточных перемещений берегов трещины, значения которых при разных взрывах варьировали от 1 до 4 мкм. На рис. 7 показан пример записи лазерного датчика перемещения, установленного на участке Т1. Отчетливо видна остаточная деформация $W_r \sim 4$ мкм, которая формируется в течение нескольких секунд после прохождения цуга волн от взрыва последнего блока. В данном случае взрыв проводился на карьере ЛГОКа, примерно в 5 км от пункта регистрации Т1.

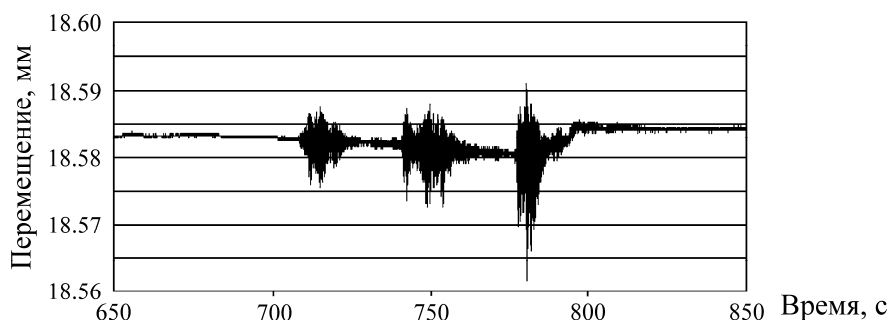


Рис. 7. Запись лазерного датчика перемещения при регистрации взрывов на карьере Лебединского ГОКа

Отсутствие постоянного сейсмологического мониторинга в шахте не позволяет подтвердить выбор наиболее опасных участков разломов сведениями о локализации очагов мелкой сейсмичности, поэтому наряду с выбором характеристик аппаратуры, мест ее установки и оценкой жесткости разломов в ходе инструментальных наблюдений стояла задача регистрации местных сейсмических сигналов. Их наличие отмечается практически во всех работах, описывающих сейсмологический мониторинг района горных работ [19–21]. Эти события имеют небольшую энергию ($E_s < 10^5 - 10^6$ Дж), а вызванные ими сигналы характеризуются высокими частотами от сотен до тысяч герц. Характерные размеры подобных слабых источников оцениваются как единицы метров для $M_w \sim -1$ и около 10 м для $M_w \sim 0$ [22]. Такие источники располагаются в основном непосредственно в районе ведения горных работ и характеризуются возникновением в результате взрывов трещин и микротрещин, подвижек по существующим трещинам, обрушениями кровли подземных выработок и т. д. [8].

На участке Т1 после проведения взрывных работ также регистрировались слабые сейсмические сигналы. Зависимость кумулятивного количества регистрируемых сигналов от времени приведена на рис. 8а: до взрыва, выполненного на расстоянии 360 м от точки регистрации, сигналы отсутствуют, тогда как после взрыва слабые сигналы фиксируются и их количество в течение 40 мин, пока велась регистрация, возрастает. При этом скорость появления событий постепенно затухает.

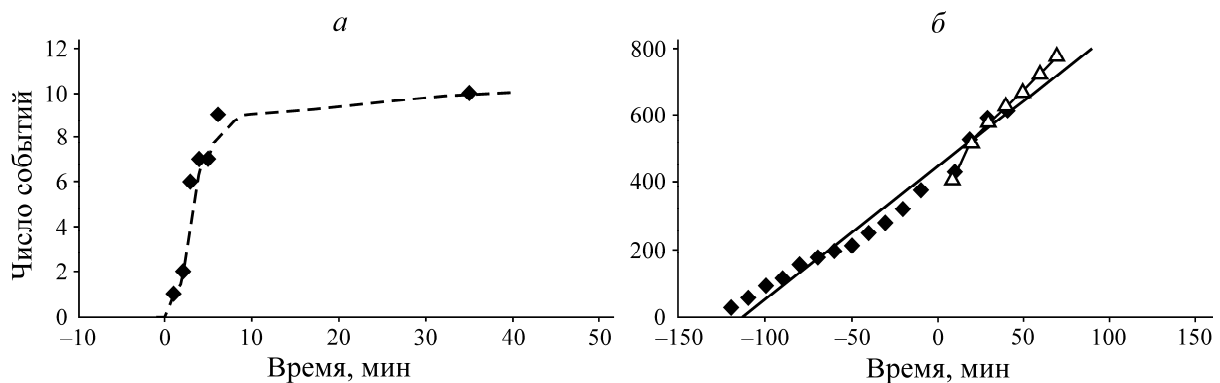


Рис. 8. Зависимость кумулятивного количества сигналов, зарегистрированных на участке Т1 (а) и Т2 (б) после взрыва в камере шахты, от времени. Время взрыва соответствует нулевой временной отметке

На участке Т2, расположенном в одном из наиболее опасных мест отработки месторождения — в зоне разлома № 2, слабые сейсмические сигналы фиксируются постоянно. На рис. 8б показано кумулятивное количество сигналов, зарегистрированных на участке Т2 до и после проведения взрывных работ в шахте. Выполнено три короткозамедленных взрыва в трех камерах, которые располагаются на расстоянии 250, 2200 и 3200 м от точки регистрации. Общее время детонации составило около 11 с, а количество регистрируемых сейсмических сигналов нормировалось на 10 мин. Отмечено, что в течение 20 мин после проведения взрывов скорость появления сейсмических событий заметно возрастает, постепенно приближаясь к фоновому значению.

ВЫВОДЫ

Технологические процессы при разработке месторождений полезных ископаемых могут являться причиной или способствовать возникновению динамических событий разной магнитуды: от слабых тресков непосредственно в районе ведения работ до землетрясений большой магнитуды.

Приведены результаты апробации элементов системы мониторинга потенциально опасных участков Коробковского месторождения КМА. В основу системы положены сейсмические и деформационные измерения, направленные на оценку и контроль сдвиговой жесткости потенциально опасных разломов.

Участки для измерений выбирались на основе имеющихся данных о структурно-геологической обстановке места проведения работ. Одним из наиболее потенциально опасных определен разлом в зоне смыкания Главной и Стретенской залежей Коробковского месторождения КМА: именно здесь с большой вероятностью может произойти динамическая подвижка.

Доступным методом оценки жесткости разлома является анализ параметров сейсмических волн в его окрестности. Для диагностики выбранных разломов в качестве источников сейсмических сигналов использовались взрывы на ближайших карьерах или взрывы в камерах шахты. Для двух участков Т1 и Т2, расположенных в зоне влияния разных разломов, получены значения нормальной жесткости нарушения $k_n = 7.7$ и $k_n = 0.43$ МПа/мм соответственно.

Рассматривается возможность использования результатов регистрации колебаний от слабых индуцированных землетрясений: такие события возникают в массиве горных пород во время взрывных работ. Показано, что скорость появления сейсмических событий заметно возрастает после проведения взрывов.

Построение систем мониторинга, ведущих оценку воздействия на массив сейсмических волн от близких и удаленных массовых взрывов, позволит продвинуться в выявлении факторов и механизмов, провоцирующих возникновение крупных сейсмических событий в тектонически малоактивных районах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Опарин В. Н.** О проблеме трансформации упругой энергии очаговых зон катастрофических событий в кинетическую энергию движения их структурных элементов // Вестн. инж. шк. ДВФУ. — 2014. — № 4 (21). — С. 54–71.
2. **Stec K.** Characteristics of seismic activity of the Upper Silesian Coal Basin in Poland, *Geophys. J. Int.*, 2007, Vol. 168. — P. 757–768.
3. **Gibowicz S. J., Kijko A.** An introduction to mining seismology. San Diego, Academic Press Inc., 1994. — 622 p.
4. **Heesakkers V., Murphy S., Reches Z.** Earthquake rupture at focal depth, Part I: Structure and Rupture of the Pretorius Fault, TauTona Mine, South Africa *Pure Appl. Geophysics*, 2011, Vol. 168. — P. 2395–2425.
5. **Кочарян Г. Г.** Геомеханика разломов. — М.: ГЕОС, 2016. — 424 с.
6. **Опарин В. Н., Еманов А. Ф., Востриков В. И., Цибизов Л. В.** О кинетических особенностях развития сейсмоэмиссионных процессов при отработке угольных месторождений Кузбасса // ФТПРПИ. — 2013. — № 4. — С. 3–22.
7. **Рассказов И. Ю., Саксин Б. Г., Петров В. А., Просекин Б. А.** Геомеханические условия и особенности динамических проявлений горного давления на месторождении Антей // ФТПРПИ. — 2012. — № 3. — С. 3–13.
8. **Richardson E., Jordan T. H.** Seismicity in deep gold mines of South Africa: Implications for Tectonic Earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2002, Vol. 92, Issue 5. — P. 1766–1782.
9. **Адушкин В. В., Кишкина С. Б., Кочарян Г. Г.** Новый подход к мониторингу техногенно-тектонических землетрясений // ФТПРПИ. — 2017. — № 1. — С. 3–14.
10. **Назаров Л. А., Назарова Л. А., Ярославцев А. Ф., Мирошниченко Н. А., Васильева Е. В.** Эволюция полей напряжений и техногенная сейсмичность при отработке месторождений полезных ископаемых // ФТПРПИ. — 2011. — № 6. — С. 6–14.

11. **Бабаянц Г. М., Вертлейб Л. К., Журин Н. Я., Казикаев Д. М. и др.** Подземная разработка железистых кварцитов. — М.: Недра, 1988. — 168 с.
12. **Двойнин В. В., Мерзликин В. К., Извеков Э. П., Белых В. И. и др.** Геологический отчет о детальной разведке железистых кварцитов Стретенского участка Коробковского месторождения по состоянию на 01.01.1985 г. (Губкинский район, Белгородская область). Т. 1. Кн. 1. Геологическое строение, подсчет запасов. — Белгород, 1985. — 277 с.
13. **Казикаев Д. М.** Геомеханика подземной разработки руд. — М.: МГГУ, 2009. — 542 с.
14. **Костюченко В. Н.** О прохождении сейсмических волн через массив трещиноватых горных пород // ДАН СССР. — 1985. — Т. 285. — № 2. — С. 45–48.
15. **Костюченко В. Н., Кочарян Г. Г., Павлов Д. В.** Деформационные характеристики межблоковых промежутков различного масштаба // Физ. мезомеханика. — 2002. — Т. 5. — № 5. — С. 23–42.
16. **Кочарян Г. Г.** Жесткость разломной зоны как геомеханический фактор, контролирующей излучательную эффективность землетрясений в континентальной коре // ДАН. — 2013. — Т. 452. — № 1. — С. 87–91.
17. **Кочарян Г. Г., Спивак А. А.** Динамика деформирования блочных массивов горных пород. — М.: ИКЦ “Академкнига”, 2003. — 423 с.
18. **Gibowicz S., Young R., Talebi S., Rawlence D.** Source parameters of seismic events at the Underground Research Laboratory in Manitoba, Canada: Scaling relations for events with moment magnitude smaller than 2, BSSA, 1991. — Vol. 81. — P. 1157–1182.
19. **Куликов В. И., Павлов Д. В.** Оценка характеристик разлома на основе сейсмических и деформационных измерений // Динамические процессы в геосферах. Вып. 8: сб. науч. тр. ИДГ РАН. — М.: ГЕОС, 2016. — С. 69–76.
20. **Oye V., Bungum H., Roth M.** Source parameters and scaling relations for mining-related seismicity within the Pyhäsalmi ore mine, Finland, BSSA, 2005, Vol. 95, No. 3. — P. 1011–1026.
21. **Domański B., Gibowicz S.** Comparison of source parameters estimated in the frequency and time domains for seismic events at the Rudna copper mine, Poland, Acta Geophys, 2008, Vol. 56. — P. 324–343.
22. **Беседина А. Н., Кабыченко Н. В., Кочарян Г. Г.** Особенности сейсмического мониторинга слабых динамических событий в массиве горных пород // ФТПРПИ. — 2013. — № 5. — С. 20–36.

Поступила в редакцию 18/V 2017