

В.И. Ляшенко

РАЗВИТИЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ОСНОВ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ГОРНОГО МАССИВА СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ.

Сообщение 1

Приведены основные научные и практические результаты исследований в области развития научно-технических основ мониторинга состояния горного массива сложноструктурных месторождений. Описан комплексный метод исследований, включающий анализ работ, шахтные и лабораторные экспериментальные исследования, математическое и физическое моделирование, а также теоретический анализ и обобщение результатов исследований по стандартным методикам. Даны краткие сведения о методах диагностики и контроля напряженного состояния горного массива, таких как геофизические, акустические, сейсмические, электрометрические, аналитические, лабораторные исследования, визуальные наблюдения, дискование керна, разгрузки, вдавливанием штампов (пуансонов), определение напряжений по усилию индентора в торец скважины, деформации скважин, электрометрический, геомагнитный, комплексные (комбинированные) и др., предложена их классификация.

Ключевые слова: месторождения сложной структуры, подземная разработка, безопасность, геомеханический мониторинг, приборно-методическое обеспечение.

Введение

Эффективность работы горнодобывающих предприятий во многом определяется стабильностью и безопасностью функционирования подземной геомеханической системы, что достигается информированностью о состоянии производственной среды, контролем и прогнозом этих процессов, определяемых свойствами массива, его взаимодействием с выработками, крепями и охранными конструкциями, начальным состоянием массива и его поведением в процессе подготовки и отработки месторождения, термогазодинамическими явления-

ми и т.д. [1–3]. Особенно остро эти вопросы встают в связи с интенсификацией и концентрацией производства, что требует привлечения новых прогрессивных методов постоянного геомеханического контроля с его трансформацией в системный мониторинг [4–6]. Горнодобывающие предприятия оказывают негативное влияние на промышленные зоны, жилые агломерации, естественные объекты, в том числе и на водные и сельскохозяйственные угодья [7–9]. Подземные горные работы под объектами при небольшой глубине относятся к технологически сложным, опасным и в научно-технической литературе освещены недостаточно. При разработке месторождений необходимо не только сохранить поверхность с сооружениями и зданиями, но и минимизировать возможный выход вредных элементов в окружающую среду и, как следствие, снизить их негативное влияние на население. Поэтому развитие научно-технических основ мониторинга состояния горного массива сложноструктурных месторождений на базе принципиально новых началах для повышения технико-экономических показателей, создания безопасных и комфортных условий труда, представляет важную научную и практическую задачу, требующую неотлагательного решения [10–16].

Метод исследований – комплексный, включающий анализ работ в области геомеханического мониторинга, шахтные и лабораторные экспериментальные исследования, математическое и физическое моделирование, а также теоретический анализ и обобщение результатов исследований по стандартным методам.

Обсуждение и оценка полученных результатов

Геомеханический мониторинг – это комплексная система наблюдений за состоянием массива горных пород, оценки и прогноза техногенных изменений в литосферной среде с целью выявления негативных последствий и разработки рекомендаций по их устранению при разработке месторождений полезных ископаемых. Под контроль, диагностику и прогноз геомеханического состояния подземных геотехнических систем подпадают следующие явления, процессы и характеристики: свойства пород и горного массива, его напряженно-деформированное состояние (НДС); векторно-силовые параметры взаимодействия массива с выработками, креплением и охранными конструкциями; характеристики исходного состояния массива и его поведение в процессе подготовки и разработки месторож-

дения; динамика и газодинамика среды. Достоверность мониторинга определяется количеством и информативностью используемых методов диагностики, а также уровнем приборного обеспечения. Рассмотрим новые элементы геомеханического и сейсмического мониторингов [17–25].

Эффективность разработки сложноструктурных месторождений обеспечивается совокупным влиянием научно-исследовательских работ на основных этапах эксплуатации (разведки, очистной выемки, погашении пустот) и ликвидации рудников. Банк данных формируется на стадии разведки и пополняется по мере освоения месторождений. Данные о массиве получают экспериментально в производственных или лабораторных условиях, используя для этого средства измерений, основанные на физико-механических и иных представлениях. Простые и комплексные исследования являются начальным этапом принятия проектных технологических решений, определяя их компетентность или оптимизируя уже принятые решения. Для исследования применяют методы: измерения деформаций и расчета по ним напряжений с помощью формул теории упругости (разгрузки, измерения деформаций скважин, компенсационной нагрузки), измерения давлений приборами (разности, упругих включений), определения характеристик графическими методами и расчета по ним напряжений с помощью корреляционных зависимостей (акустический, ультразвуковой, электрометрический).

Геофизические методы

Их используют для диагностики, связанной с определением зон повышенной концентрации или неоднородностей горного массива, упруго-пластических свойств горных пород, контроля НДС горного массива в процессе ведения и развития горных работ (геомеханический и как составная часть, сейсмический мониторинг) для обеспечения устойчивости горных выработок, профилактики и предотвращения динамического проявления горного давления, прогноза различных участков массива горных пород и руд по степени удароопасности. Для расширения применения геофизических методов необходимо создание малогабаритных помехоустойчивых средств регистрации параметров измерений, методологии интерпретации результатов натуральных наблюдений, поверки и стандартизации аппаратуры. Наиболее освоены в подземных условиях следующие геофизические методы:

- акустический (метод акустической эмиссии), основанный на регистрации акустических сигналов в массиве горных пород при различных нагрузках в диапазоне частот 10–100 кГц;
- сейсмоакустический, регистрирующий сейсмоакустические процессы в диапазоне частот 100–1000 Гц;
- сейсмический, регистрирующий сейсмические волны, возбуждаемые в массиве горных пород, в диапазоне 30–500 Гц;
- электрометрический, основанный на зависимости электрического сопротивления горных пород от их напряженного состояния.

Применение геофизических методов в таком диапазоне частот позволяет оперативно получать достаточно полную информацию о состоянии массива горных пород как на малых базах в горных выработках, так и на значительных площадях в пределах шахтных полей. Комплексное использование геофизических методов дает возможность проводить оценку напряженного состояния горных пород и изменения их упругих и прочностных свойств. Внедрение геофизических методов существенно повышает оперативность и технологичность прогноза горных ударов, особенно прогноза степени удароопасности отдельных участков рудных залежей. Ведется дальнейшее развитие и совершенствование сейсмических методов прогноза горных ударов в направлении создания экспресс-методов на интегральных схемах портативных мини ЭВМ. В каждом конкретном случае применяется один или комплекс методов в зависимости от целей и задач исследований, наличия аппаратуры и подготовленных специалистов.

Акустический метод

Основан на способности горных пород генерировать упругие звуковые импульсы микронарушений при изменении напряженного состояния. При этом методе критерием является число возникающих в массиве упругих импульсов в единицу времени. Метод эффективен в скальных породах.

Сейсмический метод

Основан на исследовании зависимости скорости распространения упругих волн в горных породах от их уровня напряженности при проведении сейсмоакустического прозвучивания или профилирования. Увеличение скорости продольных волн характеризует увеличение напряженного состояния горного массива. Соответственно изменению скоростей упругих волн

происходит изменение других параметров упруго-пластических свойств горного массива, принятых как критерии его НДС: волнового сопротивления среды, модулей упругости, объемного сжатия, сдвига, коэффициентов Пуассона и поглощения. Регистрация сейсмозрывных волн, позволяет получить характеристику поля динамических напряжений, максимальные амплитуды и скорости смещения горного массива, затухание упругой волны по мере удаления от места взрыва. По параметрам максимальной скорости смещения и затухания упругой волны вычисляют максимальные деформации сжатия и растяжения, а от них переходят к значениям максимальных сжимающих и растягивающих напряжений. Безопасная отработка месторождения в значительной степени зависит от характера и интенсивности сейсмозрывных волн и состояния массива, передающего взрывные сотрясения.

Электрометрический метод

Основан на зависимости между удельным электрометрическим сопротивлением и электропроводностью горных пород и действующими в них напряжениями. Метод эффективен в полускальных и скальных породах с высокой микропористостью, так как он заключается в определении полной проводимости поровых вод в горных породах. Абсолютное значение напряженного состояния массива можно определить только разгрузкой. Акустические, сейсмоакустические, сейсмические методы, аппаратура, методика наблюдений и интерпретация их результатов применены для оценки НДС горного массива и определения степени динамического проявления горного давления на рудных месторождениях Украины, Российской Федерации, Казахстана и др. [8–16].

Аналитические методы

Методы оценки напряженного состояния горного массива, базирующиеся на теориях упругости и пластичности, гипотезах горного давления, являются основополагающими при проведении натуральных и лабораторных исследований, т.к. используются закономерности распределения напряжений до начала и в процессе ведения горных работ, определяются концентрации напряжений, склонность горных массивов к динамическому проявлению горного давления. Теория упругости используется для определения напряженного состояния и деформаций в хрупких и упруго-пластических породах при кратковременном

существовании выработок, а теория пластичности в сочетании с теорией упругости – при упруго-пластических породах и длительном существовании выработок, а также – при пластических породах, независимо от срока существования выработок. Во многих случаях массив горных пород, непосредственно окружающий горную выработку, после истечения некоторого времени нарушается трещинами и теряет свою сплошность, однако сохраняет связь и взаимодействие нарушенных частей и может рассматриваться как псевдо-пластическая среда, обладающая упругими и пластическими свойствами. Массив сплошных ненарушенных пород, прилегающий непосредственно к выработке или к зоне нарушенных пород, сохраняет свои упругие свойства.

Таким образом, при изучении напряженного состояния массива горных пород, окружающих выработку, встречаются следующие основные случаи:

- упругая или упруго-пластическая среда с упругими деформациями, а также с незначительными пластическими деформациями, возрастающими при длительном существовании выработок;
- нарушенная зона пород, обладающая псевдопластическими свойствами, и далее зона сплошных пород преимущественно с упругими свойствами;
- массив пластических пород.

Аналитическую связь между деформациями и напряжениями удастся установить методами теории упругости, а в отдельных случаях – при помощи методов теории пластичности. Основные понятия в теории упругости – напряжения и деформации. Напряжение определяет интенсивность внутренних сил, действующих на любую элементарную площадку в одной из рассматриваемых точек тела. Деформация определяет упругое перемещение любой точки тела под влиянием внутренних сил. Существуют следующие типы напряженного состояния тел: одноосное (линейное), двухосное (плоское) и трехосное (объемное). При одноосном напряженном состоянии два главных напряжения равны нулю ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0$); при двухосном – одно из трех главных напряжений равно нулю ($\sigma_3 = 0$); при трехосном – все три главных напряжения отличны от нуля ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3 \neq 0$). Аналитические зависимости между напряжениями в данной точке определяются типом напряженного состояния приводятся в соответствующих разделах учебников по теории упругости.

Для графического определения величины напряжений в изучаемой точке при различных типах напряженного состояния тела вычерчивается круговая диаграмма напряжений, которая строится по известным главным напряжениям на трех взаимно перпендикулярных площадках рассматриваемой точки тела. Усилия, приложенные к телу в любой элементарной площадке, вызовут кроме напряжений также смещения и деформации, которые тоже характеризуют напряженное состояние тела. Различают деформации растяжения, сжатия, вызываемые нормальными составляющими напряжений, и деформации сдвига, вызываемые касательными составляющими напряжений.

При исследовании напряженного состояния горных пород возникают некоторые трудности, вызванные анизотропией горных пород, наличием трещин пород в породе, различием физико-механических свойств пород, составляющих горных массив, зависимостью упругих постоянных пород от давления, а также большим числом других переменных параметров, не поддающихся точной аналитической оценке. В связи с этим применение теории упругости к задачам изучения напряженного состояния массива горных пород ограничивается только частными случаями, действительными для конкретных горно-геологических условий. Это необходимо учитывать в дальнейшем. До настоящего времени единой теории о напряженного состояния горных пород нет. Имеется лишь несколько гипотез, которые могут удовлетворить только некоторым частным случаям. По данным С.Г. Авершина, значения главных напряжений в нетронутом массиве можно определить, используя зависимости вида

$$\sigma_1 = \gamma H; \sigma_2 = \sigma_3 = \frac{\mu}{1 - \mu} \gamma H$$

или

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \gamma H, \quad (1)$$

где γ – плотность породы, слагающей массив, кг/м^3 ; H – высота налегающих пород до исследуемой точки массива, м.

При этом последняя зависимость учитывает влияние ползучести и релаксационных процессов в массиве пород под влиянием длительного воздействия нагрузки. Срезающие напряжения описываются уравнениями

$$\tau_{\text{макс}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}. \quad (2)$$

Если учитывать длительность воздействия нагрузки, то главные напряжения будут выравниваться, т.е. $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ (для

больших глубин). Важный фактор на данном этапе изучения напряженного состояния – накопление данных о напряжениях и деформациях в массивах горных пород, полученных непосредственно в натуральных условиях. Проведение горных выработок в массиве горных пород сопровождается сложными изменениями в распределении напряжений. Горная выработка в этом случае окружена зоной разрушенных и плотных пород, поэтому при изучении напряженного состояния горных пород, окружающих горные выработки, могут быть привлечены методы теории упругости и методы механики сплошной среды. Различные натурные методы исследования напряженного состояния, применяемые в настоящее время на достижимых глубинах разработки и рассмотренные ниже, в большинстве случаев используют методы теории упругости.

Большое значение имеет изучение упруго-пластического состояния пород и упругих коэффициентов горных пород в различных горно-геологических условиях при различных давлениях. Эти работы проводятся в различных странах в возрастающих масштабах. Напряженное состояние горных пород, окружающих выработки, рассматривается в настоящее время с привлечением ряда гипотез: свода давления, консольной плиты, теории предельного равновесия, пластического дна мульды сдвижения.

Использование различных гипотез ограничивается конкретными горно-геологическими условиями. Широкая постановка натурных исследований за напряженным состоянием горных пород и накопление результатов наблюдений позволит более глубоко изучать природу горного давления и его динамического проявления различных форм (горные удары, микроудары, толчки, стрельяние, интенсивное заколообразование, шелушение). Предрасположенность массива горных пород к динамическому проявлению горного давления геофизическими методами определялось на рудных месторождениях Украины, РФ, Казахстана и других развитых горнодобывающих стран. По результатам исследований проведена оценка физико-механических свойств, упруго-пластических параметров массива горных пород, предрасположенности горных пород к хрупкому, квазихрупкому, квазипластическому разрушению. Использование аналитических методов исследований при проведении шахтных наблюдений позволило определить различные зоны динамического проявления горного давления с низкой вероятностью горных ударов и неударопасные.

Методы лабораторных исследований

Лабораторные исследования являются одним из основных этапов научно-исследовательских работ определения напряженного состояния горного массива. Проведение лабораторных исследований на моделях является наименее трудозатратной частью в определении свойств и характеристик объекта, которые дают предварительные представления об объекте исследования с некоторым приближением к натурным образцам. Для определения напряженного состояния горного массива применяются следующие методы лабораторных исследований: метод моделирования на оптически активных материалах; метод электрического моделирования; центробежное моделирование. Они основаны на законах кинематического и динамического подобия процессов, происходящих в массиве горных пород и модели и позволяют воспроизводить многообразие натуральных условий. На моделях так же, как и в шахте, измеряют деформации, которые затем расчетным путем по формулам теории упругости переводятся в напряжения. Точность результатов измерений напряженного состояния при лабораторных исследованиях зависит в основном от соблюдения условий подобия природы и модели. Исследования центробежного моделирования с использованием эквивалентных материалов широко используются в ИГД НАН Казахстана при изучении устойчивости кровли камер и опорных целиков. В качестве измерительной и регистрирующей аппаратуры используются датчики и осциллографы, разработанные ОАО «ВНИМИ», г. Санкт-Петербург, РФ, которые в последствии использовались при исследовательских работах в Кривбассе (Украина).

Институтом физики Земли РАН и институтом горного дела им. А.А. Сковинского созданы ряд ультразвуковых сейсмокопов, которые можно применять как в лабораторных условиях, так и непосредственно в горных выработках. Упругая волна, прошедшая сквозь толщу пород, трансформируется в электрический импульс и направляется в электронный осциллограф. Данный электронный метод исследований применяется на многих зарубежных горных предприятиях США, Германии и Чехии, Словении и др.

Оценке напряженного состояния массива горных пород по дисконированию керна с использованием оптически активных материалов большое внимание уделено в ИГД СО РАН. Исследования проводятся на плоских и объемных моделях из оптически чувствительных материалов при упругом и упруго-пластиче-

ском деформировании методами фотомеханики. Фотомеханические модели позволили исследовать как общее поле распределения напряжений вблизи торца скважины с керном, так и области наибольших концентраций, трещинообразования и разрушения керна. В качестве измерительной аппаратуры данного метода используются динамометры конструкции Санкт-Петербургского горного университета с датчиками индикаторного типа, которые служат для контроля пригрузки и измерения величины опорного давления.

Определенный интерес представляют работы института физики Земли РАН по исследованию физико-механических свойств горных пород в мощных СВЧ-полях. В ее основе лежит ультразвуковой метод прозвучивания образцов горных пород при одновременном воздействии на них мощных СВЧ-полей. По сравнению с другими методами он имеет ряд преимуществ, основными из которых являются возможность выполнения исследований без разрушения, полнота получаемой информации, безинерционность, безопасность для человека.

В Северокавказском техническом университете (СКТТУ), а также в институте геотехнической механики Украины (ИГТМ НАНУ) при лабораторных исследованиях напряженного состояния массивов практическое значение имеют методы оптико-поляризационного моделирования и моделирование на эквивалентных материалах. Среди лабораторных методов наиболее известен метод ОАО «ВНИМИ», заключающийся в определении физико-механических свойств горных пород путем оценки напряженного состояния массива нагружением керна на прессе. Проведенный анализ методов и средств мониторинга состояния горного массива при подземной разработке рудных месторождений предопределяет возможность использования механического и геофизических методов, визуальных и маркшейдерских наблюдений, как наиболее освоенных, при оценке влияния отработанных камер при ведении горных работ.

При разработке рудных сложноструктурных месторождений Украины для мониторинга диагностики и контроля напряженно-деформированного состояния горного массива рекомендуются ранее применяемый метод акустической эмиссии и сейсмоакустического профилирования, не требующие бурения скважин. Не исключено применение и других методов, для чего необходим анализ системы наблюдений за напряженным состоянием горного массива в зоне отработанных камер ретроспективно сначала отработки месторождений и существующих на шахтах.

Визуальные наблюдения

Расположение участков разрушений на контуре выработок предопределяется напряжениями, действующими в массиве пород. Это позволяет по данным визуальных наблюдений в выработках и скважинах приближенно оценить величины и направления действия главных напряжений, а также изменчивость поля напряжений в пределах изучаемого участка. Отличительной особенностью этого метода является то, что он не требует специальной аппаратуры, и позволяет в короткий срок оценить напряженное состояние пород на большой площади, в пределах которой имеются выработки. Приближенно величины напряжений оценивается по известным значениям предела прочности пород на одноосное сжатие. Метод позволяет получать достаточно удовлетворительные результаты для пород, отвечающих преимущественно упругому закону деформирования.

Данным методом можно решать следующие задачи:

- оценивать структуру поля напряжений массива пород, вскрытого выработками;
- ориентировочно определять величину и направление действия наибольших напряжений в нетронутым массиве пород;
- качественно сравнивать степень напряженности отдельных конструктивных элементов системы разработки.

Визуальную оценку напряжений выполняют следующим образом. Вначале проводят визуальные обследования всех доступных выработок, расположенных в пределах массива, в котором выполняется оценка напряжений. Обследуют незакрепленные горизонтальные, вертикальные и наклонные выработки, различно ориентированные в пространстве. Отмеченные места разрушений наносят на планы горных работ. Данные классифицируют с учетом интенсивности разрушений и положения участков разрушений на контуре выработок.

Направление действия наибольшего главного напряжения в массиве пород определяют на основании положения о том, что разрушение пород на контуре выработки в поле сжимающих напряжений происходит лишь в тех частях контура, где действуют наибольшие сжимающие напряжения, достигающие предельных значений. Известно, что участки разрушения пород на контуре выработки параллельны направлению действия наибольших сжимающих напряжений. С учетом этого факта статистически анализируется пространственная ориентировка участков разрушения пород на контуре выработки и устанавливается направление действия наибольшего главного сжимающего напряжения.

По разрушению пород на контуре выработок можно приближенно оценивать величины напряжений, действующих и на контуре выработок, и в массиве пород. Напряжения на контуре выработок.

$$\sigma = \sigma_{сж}. \quad (3)$$

Для определенных напряжений в массиве пород необходимо в величины напряжений, найденные на контуре выработки, ввести коэффициенты, учитывающие их концентрацию. Многочисленные натурные измерения показывают, что значения максимальных напряжений в массиве в рассматриваемом случае

$$\sigma = 0,5\sigma_{сж}. \quad (4)$$

По визуальным наблюдениям можно сравнивать степень напряженности отдельных конструктивных элементов системы разработки и определять величину и направление действия наибольших напряжений в нетронutom массиве пород. Визуальную оценку напряжений выполняет геолого-маркшейдерская служба шахты. Обследуют все забои и действующие выработки, различно ориентированные в пространстве. При этом фиксируют места разрушений на контуре выработок согласно Форме (таблица).

Характер разрушения пород на контуре, насколько параллельны отслаиваемые плитки контуру выработки и как согласуются поверхности отслоений с естественными поверхностями

Книга визуальных наблюдений за выработками

Дата наблюдений, число, месяц, год, смена	Наименование выработки	Координаты места (расстояние от маркшейдерской точки или пикета)	Форма проявлений горного давления (вывалы по естественным трещинам, шелушение, динамическое заколообразование, стрельяние, горный удар)	Размеры и форма разрушений пород в местах проявления	Зарисовка места проявления (эскиз или фото) с привязкой к горно-технической обстановке и геологическая характеристика участка (литологический состав, параметры трещиноватости, тектонические нарушения)	Подписи наблюдателей
1	2	3	4	5	6	7

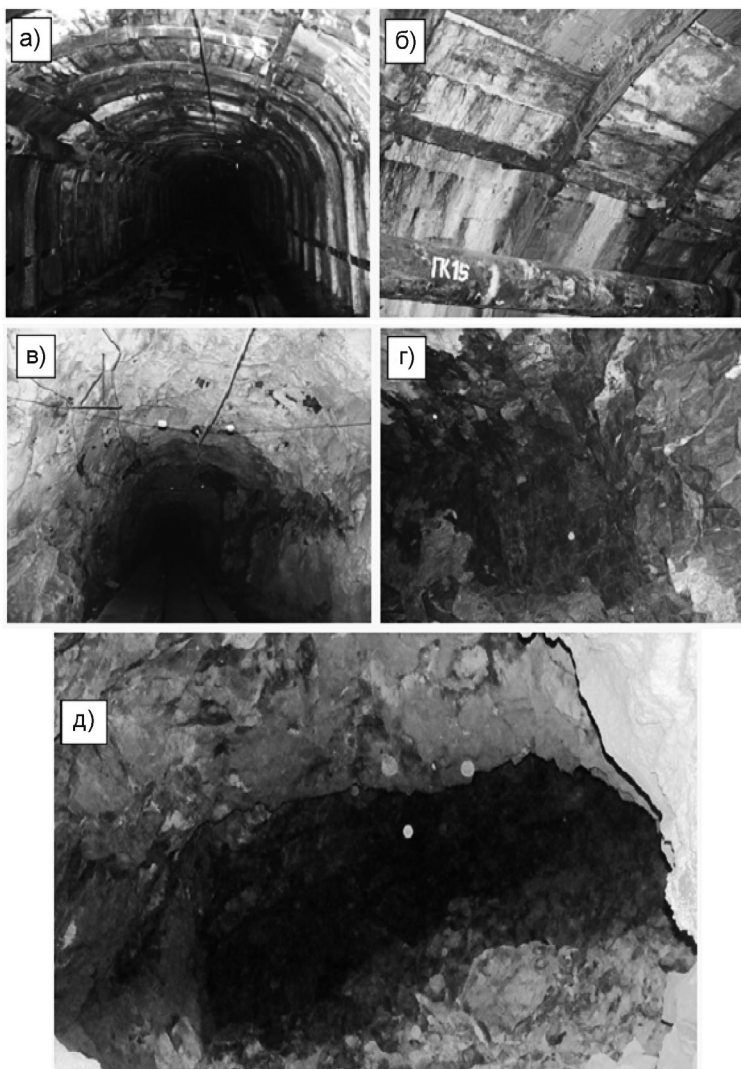


Рис. 1. Визуальные признаки интенсивности и механизмов проявления горного давления: главный квершлаг горизонта 210 м и узел податливости рамной металлической крепи (деформации элементов крепи и срабатывание узлов податливости отсутствуют, $\eta < 0,3$) (а, б); восточный штрек гор. 210 м и район орта 59 закрепленный анкерами и набрызг-бетоном (имеет место нарушения набрызг-бетона, обнажение представлено трещинами расслоения и кливажа, $0,2 < \eta < 0,3$) (в, г); кровля камеры 10–92 гор. 184 м (обнажения представлены блоками средне- и крупноблочной отдельности, $\eta < 0,3$) (д)

ослаблений (трещинами, слоистостью и т.п.). Места разрушений наносят на планы горных работ. Если в нетронутым массиве наибольшее главное напряжение направлено вертикально и по величине достаточно для разрушения пород на контуре выработки, то наибольшие разрушения будут происходить в стенках горизонтальных выработок любого направления, возможны интенсивные разрушения в стенках наклонных выработок и отсутствие разрушений – в вертикальных. При горизонтальных наибольших сжимающих напряжениях разрушения будут происходить в кровле и почве горизонтальных, а также в стенках вертикальных выработок – в плоскости, перпендикулярной направлению главных максимальных напряжений. Интенсивность и механизм проявления горного давления для участка Мичуринского сложноструктурного месторождения (Украина) по визуальным признакам, исследована поверхность контура выработки, которая представлена чередованием зеркал скольжения с трещинами блочной отдельности. Шелушение в вершинах углов отсутствует. Интенсивность напряженного состояния горного массива $\eta < 0,12$. На контуре выработки, где местами представлены поверхности разрушения по «живому» с обособлением линзообразных пластин независимо от сланцеватости и блочности, интенсивность напряженного состояния массива $0,2 < \eta < 0,3$. В станке очистной камеры поверхность обнажения представлена чередованием зеркал скольжения с трещинами блочной отдельности. Шелушение в вершинах углов отсутствует. Интенсивность напряженного состояния горного массива $\eta < 0,12$. Участок квершлага «Южный» гор. -210 м закреплен набрызг-бетоном, трещины в набрызг-бетоне отсутствуют, интенсивность напряженного состояния горного массива $\eta < 0,2$ (рис. 1).

Дискование керна

Определение напряжений по толщине дисков керна. При выбуривании в напряженном массиве хрупких пород керна последний разрушается на диски выпукло-вогнутой формы различной толщины. Толщина дисков зависит от прочности пород, диаметра керна и величины напряжений в массиве. По толщине дисков керна можно определить значения величин максимальных сжимающих напряжений с массиве пород. Для условий Таштагольского железорудного месторождения Горной Шории (РФ) установлена экспериментально зависимость между максимальными сжимающими напряжениями и толщиной дисков

керна t (мм) для пород с пределом прочности на одноосное сжатие 80–120 МПа, которая имеет вид

$$\sigma_t = 185t^{-1} \text{ при } 12 \leq t \leq 60. \quad (5)$$

Корреляционное отношение равно 0,9. Зависимость толщины дисков керна t (мм) от их диаметра d при одинаковом уровне напряжений выражается в виде

$$t_d = 1,6d - 8. \quad (6)$$

Коэффициент корреляции равен 0,7. Зависимость (24) получена для условий неравномерного напряженного состояния пород, когда $\sigma_1 \rangle \sigma_2 \rangle \sigma_3$ где σ_i ($i = 1, 2, 3$) – главные сжимающие напряжения, при этом σ_1 – максимальное горизонтальное напряжение.

Для условий месторождений Талнаха зависимость между напряжениями и толщиной диска t (для руд с пределом прочности на одноосное сжатие имеет вид

$$\sigma_t = k\sigma_{сж} t^{-1}, \quad (7)$$

где $k = 0,14 d^2 d_{21}^{-1}$; d – диаметр керна; d_{21} – тарировочный диаметр керна, равный 21 см.

При напряженном состоянии пород типа

$$\sigma_1 \rangle \sigma_2 = \sigma_3 = (0,1 \div 0,3)\sigma_1$$

зависимость величины максимального сжимающего напряжения σ_t от толщины дисков керна t , его диаметра d и предела прочности пород на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$ выражается в виде

$$\sigma_t = \sqrt{d / t\sigma_{сж}} \left[(0,54 + 0,1d) + (0,78 + 0,165\sqrt{d}) \right]^{-1}. \quad (8)$$

Оценка хрупкости пород по способности деления керна на диски. Разработка месторождений Горной Шории, Талнаха, Хибин, Средней Азии и ряда других показала, что склонность пород к хрупкому разрушению и накоплению потенциальной энергии можно определить по изучению керна породы. Если при обследовании кернового материала установлено, что керна отдельных пород разделен на диски толщиной менее диаметра, то эта порода склонна к хрупкому разрушению. Поэтому для оценки хрупкости пород бурят специальные скважины с отбором керна, анализ которых позволяет выявить породы, склонные к хрупкому разрушению, при этом скважины необходимо бурить со скоростью, не превышающей 50 мм/мин, для исклю-

чения влияния режима бурения на эффект дискообразования керна. Этот метод позволяет оценивать хрупкость пород на стадии бурения разведочных скважин.

Метод разгрузки

Метод разгрузки основан на использовании характеристик упругого восстановления элемента горного массива при искусственном нарушении его связи с окружающим массивом. Сущность его заключается в замере деформаций упругого восстановления этого элемента и последующем вычислении напряжений по формулам теории упругости. По техническому исполнению и приемам пересчета измеренных деформаций в напряжения применяются три схемы метода разгрузки:

- измерение деформаций торца выбуриваемого керна (схема ОАО «ВНИМИ»);
- измерение деформаций стенок центральной скважины (схема Лимана);
- измерение радиальных перемещений стенок центральной скважины (схема Хаста).

Наиболее широко применяется метод разгрузки по схеме ОАО «ВНИМИ», так как две другие схемы по своему исполнению более трудоемки. Технические средства метода разгрузки включают следующие элементы:

- буровые станки и буровое приспособление, с помощью которых проводятся бурение измерительной скважины и придание забоя скважины определенной формы и чистоты;
- измерительную аппаратуру, состоящую из приборов для регистрации деформаций;
- досылочно ориентирующее устройство и приспособление установки деформометров, сушка забоев и стенок скважины, а также другие вспомогательные устройства.

Регистрирующая аппаратура представляет собой тензометрические приборы мостовых схем. ОАО «ВНИМИ» разработана тензометрическая станция СБ-8. Прибор изготовлен во взрывобезопасном исполнении. Выбор места и направления бурения скважины определяется задачей исследования.

Вдавливанием штампов (пуансонов)

Опасность динамического разрушения пород в виде горного удара зависит от хрупкости и напряженного состояния массива, окружающего выработку. Поэтому при определении удароопасности пород непосредственно на отдельных участках гор-

ных выработок целесообразно использовать метод, позволяющий одновременно оценивать оба фактора. Таким является метод статического вдавливания штампов (пуансонов) в забой скважины посредством скважинных гидравлических приборов БП18, позволяющих развивать на штамп усилия, достаточные для разрушения пород любой прочности. Оценка хрупкости и напряженного состояния пород в массиве основан на том, что породы с разными механическими свойствами и степенью напряженности оказывают различное сопротивление внедрению жесткого штампа. Если в массиве пробурить скважину и через определенные интервалы вдавливать в забой штамп до момента разрушения породы, то по изменению некоторых регистрируемых величин можно судить о степени хрупкости и относительном уровне напряжений, характеризующих участок массива с точки зрения удароопасности.

Определение напряжений по усилию индентора в торце скважины

Метод основан на измерении усилий вдавливания индентора в забой скважины, величины которых изменяются в зависимости от напряженности массива горных пород. Зависимость, связывающая усилие вдавливания индентора со средним напряжением пород, действующим в плоскости забоя скважины, имеет вид

$$\sigma_{cp} = (P_1 - P_o)k^{-1}, \quad (9)$$

где σ_{cp} – среднее значение; P_o – усилие вдавливания в ненапряженную породу; P_1 – усилие вдавливания в напряженную породу; k – коэффициент, характеризующий увеличение усилия вдавливания при возрастании напряжений в массиве пород.

Значения P_o и k определяются в лабораторных условиях на образцах пород или в шахте. Значение P_1 фиксируется поинтервально по мере бурения скважины. В прочных хрупких породах индентор вдавливается до первого хрупкого выкола. Определение напряжений по вдавливанию индентора в стенку скважины. Метод базируется на установлении зависимости контактной прочности пород от величины вертикальных напряжений. Под контактной прочностью принимается сопротивление вдавливанию в момент первого разрушения породы под индентором. Зависимость напряжений от контактной прочности породы в общем вид

$$\sigma_z = 0,125(P_o - P_k), \quad (10)$$

где σ_z – вертикальное напряжение; P_o – контактная прочность ненапряженной породы; P_k – контактная прочность напряженной породы. Для определения P_k используется многоточечный гидравлический датчик с самописцем (МГД).

Метод деформации скважин

Для оценки абсолютных напряжений, действующих в массиве горных пород пробуривается скважина, где устанавливаются деформометры для измерения радиальных смещений в двух и более направлениях, по которым и фиксируются начальные отсчеты. Затем производится полная разгрузка того участка породы, где установлены деформометры. Разгрузка может осуществляться путем выбуривания прямолинейной или кольцевой разгружающей среды или обуриванием кольцевой коронкой большого диаметра. После осуществления разгрузки производится измерение радиальных деформаций скважины. Для определения прочностных и упругих характеристик исследуемой породы отбираются обычные образцы – керн от бурения измерительной скважины. Для исследования деформаций скважины под нагрузкой отбираются крупногабаритные образцы. В этих образцах в нужных направлениях пробуриваются скважины, в которых устанавливаются деформометры. Образцы цементируются или запрессовываются в специальную матрицу. Матрица с образцом устанавливается под прессом, с помощью которого осуществляется ступенчатое нагружение и разгрузка образца.

Геомагнитный метод

В процессе механического воздействия на горные породы в них происходит преобразование указанного типа энергии в электрическую, накопление последней и последующее выделение ее в виде импульсного электромагнитного излучения (ИЭИ) в радиоволновом диапазоне. Причем процесс преобразования энергии в горных породах тесно связан с процессом разрушения, интенсивность и величина которых связаны с действующими механическими напряжениями. Следовательно, посредством регистрации естественного ИЭИ в массиве горных пород можно выявить участки концентрации напряжений. С увеличением напряжений интенсивность импульсного электромагнитного излучения возрастает. Рассматриваемые результаты получены при искусственном механическом нагружении рудного массива с помощью давяльной установки.

Метод относительной оценки напряженного состояния пород по интенсивности естественного импульсного электромагнитного излучения является одним из перспективных, так как относится к бесконтактным простым и мобильным методам, не требующим бурения шпуров и скважин. В объеме рассматриваемого раздела не представляется возможным рассмотреть многообразие геофизических методов (радиоволновой), радиометрический, метод вызванной поляризации и др.) предназначенных для решения различных задач при разработке сложноструктурных месторождений. Для диагностики и контроля напряженного состояния горного массива при проведении наблюдений в шахтных условиях наиболее апробированными являются геофизические методы – акустический, сейсмический, электрометрический.

Химико-физические, комбинированные методы для определения напряженно-деформированного состояния горного массива находятся в стадии экспериментальных исследований и в практике натуральных наблюдений широко не применяются. В качестве примера химико-физических методов наблюдений приведена косвенная оценка напряженного состояния горного массива по изменению минерализации шахтных вод.

Комплексные (комбинированные) методы

На горнодобывающих предприятиях при оценке напряженно-деформированного состояния горного массива, как правило, используется не один из методов мониторинга горного массива, а в комплексе с другими. Для оперативного контроля состояния горного массива, обнажений отработанных камер применяется метод акустической эмиссии в сочетании с визуальными и маркшейдерскими наблюдениями. Процесс деформирования массива горных пород, закладочного массива, определение границ зоны влияния отработанных камер производятся струнными тензометрами и глубинными реперами. Измерение смещения массива горных пород глубинными реперами дополняются непосредственными наблюдениями по скважинам, пробуренным к обнажениям действующих или отработанных камер. Контроль нарушенности горных массивов электрическими цепями может сочетаться с контролем за расслоением кровли выработок оптическими приборами.

Комплексное использование геофизических методов дает возможность проводить оценку напряженного состояния горных массивов, изменение их упругих и прочностных свойств и

получать достаточно полную информацию о состоянии массива горных пород как на малых базах в горных выработках, так и в пределах рудных залежей. Разработаны схемы и методики измерений напряженного состояния массива горных пород с использованием низкочастотных модификаций сейсмического и электрометрического методов. Комплекс геофизических методов позволяет не только определять зону влияния отработанных камер на напряженно-деформированное состояние горных массивов, но и осуществлять прогноз возможности динамического проявления горного давления. В этом случае он используется при региональном и локальном прогнозах степени удароопасности участков рудных залежей и оценке эффективности применения локальных и региональных мер борьбы с горными ударами.

Геофизические методы универсальны и могут применяться в комплексе с любым другим методом мониторинга горного массива. Возможные сочетания отдельных методов в комплексе наблюдений инвариантны и в практике отработки рудных месторождений используются в зависимости от наличия технических средств, аппаратуры и подготовленных специалистов. Достаточно отметить, что при разработке Мичуринского месторождения Украины для обеспечения сохранности подречного целика использовались струнные тензометры и глубинные репера, методы акустической эмиссии и сейсмоакустического прозвучивания, маркшейдерские наблюдения по реперам за сдвижением поверхности и деформациями горных выработок, косвенные методы. Состояние обнажений камер и их влияние на горный массив контролировалось методами акустической эмиссии, оптическими приборами по деформациям скважин, струнными тензометрами и глубинными реперами, маркшейдерскими наблюдениями по реперам за деформациями в горных выработках.

Классификация методов и технических средств для геомеханического мониторинга

Обеспечение безопасности ведения горных работ при подземной добыче руд в скальных породах связано с оценкой НДС горного массива, обоснованием устойчивых параметров и порядка отработки рудных залежей. Для диагностики и контроля состояния и свойств массива горных пород используются различные методы наблюдений и на их базе разработаны нормативные документы, регламентирующие порядок ведения гор-

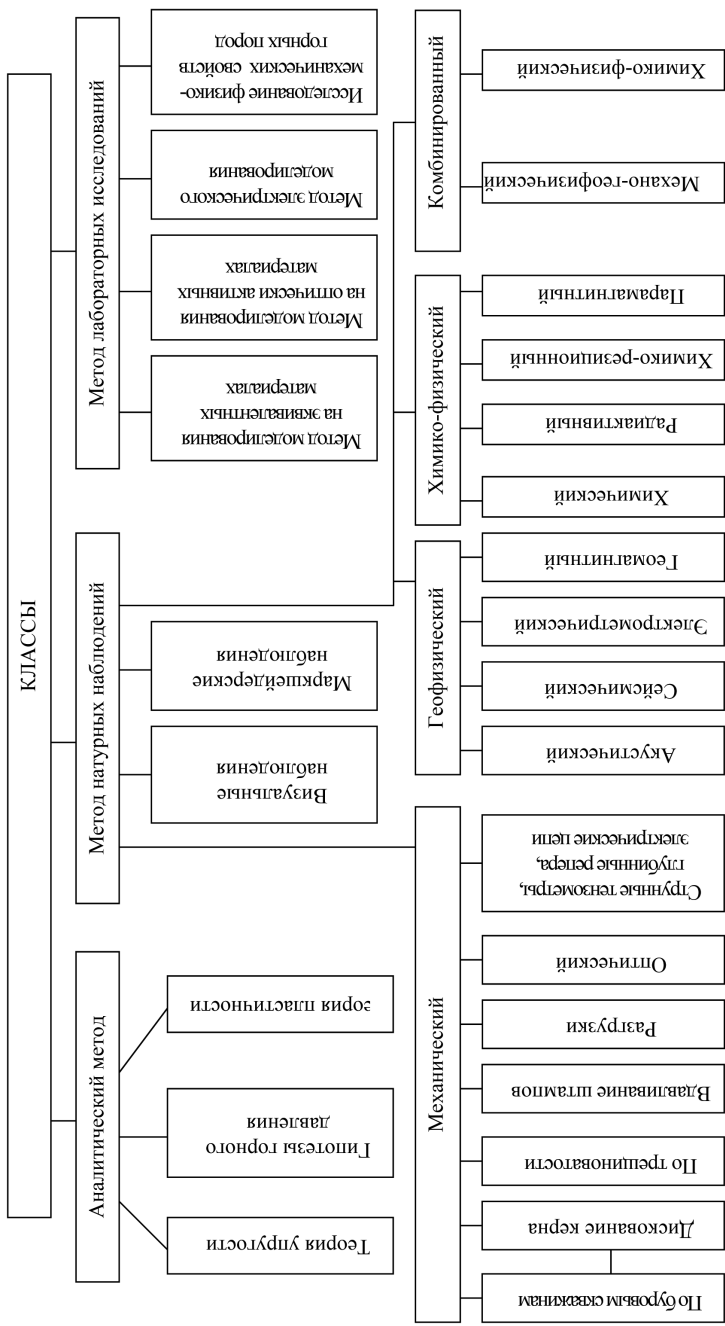


Рис. 2. Классификация методов диагностики и контроля напряженного состояния горного массива

ных работ и их безопасность. В основу применяемых методов исследований положен принцип зависимостей свойств горных пород, их НДС под воздействием силовых естественных и искусственных полей, возникающих в горном массиве. Поэтому значительная часть исследований направлена на оценку прочностных, упругих, реологических, акустических, электромагнитных и других физико-механических свойств горных пород и их НДС. Несмотря на многообразие применяемых методов и средств диагностики и контроля НДС массива горных пород, по функциональному назначению их классифицируют на: аналитические методы, методы натуральных наблюдений, методы моделирования. Натурные наблюдения включают визуальные, маркшейдерские измерения, механические, геофизические, химико-физические и комбинированные методы (рис. 2).

Организация мониторинга с целью обеспечения безопасной технологии добычи руд должна быть подчинена решению следующих основных задач:

- определению условий обеспечения необходимой устойчивости элементов горного массива, подготовительных и очистных выработок, подземных и наземных сооружений и других объектов;
- эффективной организации горных работ, прогнозирования и своевременного применения мер предотвращения динамических проявлений горного давления;
- установлению закономерностей и параметров рационального взаимодействия элементов горного массива между собой, а также с закладкой выработанного пространства и с элементами инженерных сооружений при ведении горных работ.

Успешное решение поставленных задач связано не только с проведением исследований, но и с пересмотром системы организации и планирования горных работ на подземных рудниках, где назрела необходимость создания геотехнических систем контроля и служб прогноза и профилактики динамических проявлений горного давления, влияющих на сохранность горных выработок и устойчивость обнажений камер. Проведенный анализ методов и средств мониторинга состояния горного массива при подземной разработке рудных месторождений предопределяет возможность использования механического и геофизических методов, визуальных и маркшейдерских наблюдений, как наиболее освоенных, при оценке влияния отработанных камер.

Таким образом, при разработке рудных месторождений сложной структуры для мониторинга диагностики и контроля

НДС горного массива рекомендуется ранее применяемый метод акустической эмиссии и сейсмоакустического профилирования, не требующие бурения скважин. Возможно применение и других методов, для чего необходим анализ системы наблюдений за напряженным состоянием горного массива в зоне отработанных камер.

Выводы

1. Даны краткие сведения о методах диагностики и контроля напряженного состояния горного массива, таких как геофизические, акустические, сейсмические, электрометрические, аналитические, лабораторные исследования, визуальные наблюдения, дискование керна, разгрузки, вдавливанием штампов (пуансонов), определение напряжений по усилию индентора в торец скважины, деформации скважин, электрометрический, геомагнитный, комплексные (комбинированные) и др., предложена их классификация.

2. Установлены интенсивность и механизм проявления горного давления по визуальным признакам для Мичуринского сложноструктурного месторождения поверхность контура выработки, которая представлена чередованием зеркал скольжения с трещинами блочной отдельности и отсутствием шелушения в вершинах углов, интенсивность напряженного состояния горного массива составила $\eta < 0,12$. В частности, на контуре выработки, где местами представлены поверхности разрушения по «живому» с обособлением линзообразных пластин независимо от сланцеватости и блочности, интенсивность напряженного состояния массива — $0,2 < \eta < 0,3$. В станке очистной камеры эксплуатационного блока поверхности обнажения с чередованием зеркал скольжения с трещинами блочной отдельности и отсутствием шелушения в вершинах углов, интенсивность напряженного состояния горного массива — $\eta < 0,12$. Для участка квершлага «Южный» гор. -210 м закрепленного набрызг-бетоном и отсутствием трещин в нем, интенсивность напряженного состояния горного массива — $\eta < 0,2$.

3. Обоснована функциональная взаимосвязь между величиной напряжений горного массива (y) и количеством импульсов (звуков разрушения) в минуту (x), характеризующих его структурные (a) и прочностные (b) свойства, описывается криволинейной зависимостью вида $y = axb$, позволяющей с вероятностью 0,8 оперативно устанавливать оптимальные безопасные параметры обнажений.

В проведении экспериментальных исследований принимали участие Ю.Я. Савельев, А.Х. Дудченко, А.А. Ткаченко, А.Г. Скотаренко, А.И. Подопригра (ГП «УкрНИПИИПромтехнологии»), С.И. Скипочка, А.А. Яланский, Т.А. Паламарчук, В.Н. Сергиенко (Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины) и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Борисов А. А.* Механика горных пород. – М.: Недра, 1980. – 359 с.
2. *Фисенко Г. Л.* Предельное состояние горных пород вокруг выработок. – М.: Недра, 1976. – 272 с.
3. *Слепцов М. Н., Азимов Р. Ш., Мосинец В. Н.* Подземная разработка месторождений цветных и редких металлов. – М.: Недра, 1986. – 206 с.
4. *Глушко В. Т., Ямщиков В. С., Яланский А. А.* Геофизический контроль в шахтах и тоннелях. – М.: Недра, 1987. – 278 с.
5. *Скипочка С. И.* Механоэлектрические эффекты в породах и их использование в горной геофизике. – Днепропетровск: НГАУ, 2002. – 178 с.
6. *Паламарчук Т. А., Кириченко В. Я., Усаченко Б. М.* Элементы механосинергетики породного массива. – Днепропетровск: Лира ЛТД, 2006. – 307 с.
7. *Анциферов А. В., Скипочка С. И., Яланский А. О. та ін.* Геомеханічний моніторинг підземних геотехнічних систем. – Донецьк: Ноулідж, 2010. – 253 с.
8. *Ляшенко В. И., Голик В. И.* Геомеханический мониторинг горного массива и целиков при подземной разработке урановых месторождений // Цветная металлургия. – 2003. – № 10. – С. 2–7.
9. *Ляшенко В. И., Голик В. И.* Средства геомеханического мониторинга породного массива при подземной разработке рудных месторождений // Горный журнал. – 2004. – № 5. – С. 47–50.
10. *Ляшенко В. И., Колоколов О. В., Разумов А. Н.* Создание и внедрение природо- и ресурсосберегающих технологий подземной разработки месторождений сложной структуры // Цветная металлургия. – 2004. – № 9. – С. 7–14.
11. *Ляшенко В. И., Голик В. И.* Научные основы геомеханического мониторинга горного массива при подземной разработке месторождений сложной структуры // Цветная металлургия. – 2004. – № 10. – С. 2–10.
12. *Яланский А. А., Паламарчук Т. А., Скипочка С. И. и др.* Временные методические указания по экспресс-определению упругих свойств горных пород ультразвуковым методом на необработанных образцах керна геологоразведочных скважин. – Л.: ВНИМИ, 1987. – 40 с.
13. *Глушко В. Т., Бульчев Н. С., Стрельцов Е. В. и др.* Методические указания по составу механических испытаний горных пород и методам обработки горногеологических данных при разведке и вскрытии месторождений полезных ископаемых для проектирования и расчета крепи капитальных горных выработок. – Харьков: ВНИИОМШС, 1979. – 116 с.
14. *Временные правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок месторождений*

руд цветных металлов с неизученным процессом сдвижения горных пород. – Л., 1986. – 74 с.

15. *Инструкция* по безопасному ведению горных работ на рудных и нерудных месторождениях (объектах строительства подземных сооружений), склонных к горным ударам. – Л.: ВНИМИ, 1989. – 58 с.

16. *Ляшенко В. И., Дядечкин Н. И.* Определение параметров технологии подземной разработки урановых месторождений // Горный журнал. – 2009. – № 10. – С. 55–58.

17. *Бабак М. И., Кошик Ю. И., Пухальский В. Н. и др.* Добыча и переработка урановых руд в Украине / Под общ. ред. А. П. Чернова. – Киев: АДЕФ-Украина, 2001. – 238 с.

18. *Ляшенко В. И., Скипочка С. И., Яланский А. А. и др.* Геомеханический мониторинг массива горных пород при подземной разработке месторождений сложной структуры // Цветная металлургия. – 2011. – № 9. – С. 3–15.

19. *Ляшенко В. И., Скипочка С. И., Яланский А. А. и др.* Эффективное приборно-методическое обеспечение геомеханической безопасности горных работ // Черная металлургия. – 2012. – № 5. – С. 23–31.

20. *Ляшенко В. И., Скипочка С. И., Яланский А. А. и др.* Геомеханический мониторинг при подземной разработке месторождений сложной структуры // Известия вузов. Горный журнал. – 2012. – № 4. – С. 109–119.

21. *Ляшенко В. И., Скипочка С. И., Яланский А. А. и др.* Безопасности горных работ – надежное геомеханическое и приборное обеспечение // Безопасность труда в промышленности. – 2012. – № 9. – С. 68–77.

22. *Ляшенко В. И., Пухальский В. Н.* Обоснование безопасных параметров камер при подземной разработке приповерхностных запасов месторождения под охраняемыми объектами // Известия вузов. Горный журнал. – 2015. – № 3 – С. 37–49.

23. *Ляшенко В. И.* Повышение сейсмической безопасности при подземной разработке приповерхностных запасов месторождения под городской застройкой // Безопасность труда в промышленности. – 2015. – № 9. – С. 38–42.

24. *Ляшенко В. И.* Развитие геомеханического мониторинга свойств и состояния массива горных пород при подземной разработке месторождений сложной структуры // Маркшейдерский вестник. – 2016. – № 1. – С. 35–43.

25. *Ляшенко В. И., Пухальский В. Н.* Повышение безопасности подземной разработки приповерхностных запасов месторождений сложной структуры // Безопасность труда в промышленности. – 2016. – № 2. – С. 36–41. **ПІАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Ляшенко Василий Иванович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, член-корреспондент Украинской экологической Академии наук, начальник научно-исследовательского отдела, ГП «УкрНИПИИпромтехнологии», e-mail: ipt@iptzw.dp.ua, e-mail: vi_lyashenko@mail.ru.

V.I. Lyashenko

**DEVELOPMENT OF SCIENCE
AND TECHNOLOGY BASIS
FOR COMPLEX-STRUCTURE
ROCK MASS MONITORING.
Report 1**

The main scientific and practical results of the research in the field of scientific and technical bases for monitoring the condition of the rock mass slozhnostrukturnykh fields. An integrated research method, including analysis of the works, mine and laboratory experimental studies, mathematical and physical modeling, and theoretical analysis and generalization of research results according to standard procedures. Following data about the methods of diagnosis and control of the stress state of the rock mass, such as geophysical, acoustic, seismic, electrometric, analytical, laboratory tests, visual observations, disk core, unloading indentation punches (punches), the determination of the stress on the force of the indenter into the hole butt, well deformation, electrometer, geomagnetic, integrated (combined) et al., proposed their classification.

Key words: complex structure of deposits, underground mining, safety, geomechanical monitoring, instrumentation and methodological support.

AUTHOR

Lyashenko V.I., Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Corresponding Member of Ukrainian Ecological Academy of Sciences, Head of Department, Ukrainian Scientific-Research and Design Institute of Industrial Technology, 52204, Zheltye Vody, Ukraine, e-mail: ipt@iptzw.dp.ua, e-mail: vi_lyashenko@mail.ru.

REFERENCES

1. Borisov A. A. *Mekhanika gornyykh porod* (Rock mechanics), Moscow, Nedra, 1980, 359 p.
2. Fisenko G. L. *Predel'noe sostoyanie gornyykh porod vokrug vyrabotok* (Limit state of rock mass surrounding an excavation), Moscow, Nedra, 1976, 272 p.
3. Sleptsov M. N., Azimov R. Sh., Mosinets V. N. *Podzemnaya razrabotka mestorozhdeniy tsvetnykh i redkikh metallov* (Underground mining of nonferrous and rare metals), Moscow, Nedra, 1986, 206 p.
4. Glushko V. T., Yamshchikov V. S., Yalanskiy A. A. *Geofizicheskiy kontrol' v shakhtakh i tonnelyakh* (Geophysical control in mines and tunnels), Moscow, Nedra, 1987, 278 p.
5. Skipochka S. I. *Mekhanoelektricheskie efekty v porodakh i ikh ispol'zovanie v gornoy geofizike* (Mechano-electrical phenomena in rocks and their use in geophysics), Dnepropetrovsk, NGAU, 2002, 178 p.
6. Palamarchuk T. A., Kirichenko V. Ya., Usachenko B. M. *Elementy mekhanosinergetiki porodnogo massiva* (Elements of mechanical synergetics in rock mass), Dnepropetrovsk, Lira LTD, 2006, 307 p.
7. Antsiferov A. V., Skipochka S. I., Yalanskiy A. O. *Geomekhanichniy monitoring pidzemnykh geotekhnichnykh sistem* (Геомеханічний моніторинг підземних геотехнічних систем), Donetsk, Noulidzh, 2010, 253 p.

8. Lyashenko V.I., Golik V.I. *Tsvetnaya metallurgiya*. 2003, no 10, pp. 2–7.
9. Lyashenko V.I., Golik V.I. *Gornyy zhurnal*. 2004, no 5, pp. 47–50.
10. Lyashenko V.I., Kolokolov O.V., Razumov A.N. *Tsvetnaya metallurgiya*. 2004, no 9, pp. 7–14.
11. Lyashenko V.I., Golik V.I. *Tsvetnaya metallurgiya*. 2004, no 10, pp. 2–10.
12. Yalanskiy A. A., Palamarchuk T.A., Skipochnka S. I. *Vremennye metodicheskie ukazaniya po ekspress-opredeleniyu uprugikh svoystv gornyykh porod ul'trazvukovym metodom na neobrabotannykh obraztsakh kerna geologorazvedochnyykh skvazhin* (Temporal instructional guidelines on express-estimation of elasticity characteristics of rocks by ultrasonic method using core samples taken from exploration wells), Leningrad, VNIMI, 1987, 40 p.
13. Glushko V.T., Bulychev N.S., Strel'tsov E.V. *Metodicheskie ukazaniya po sostavu mekhanicheskikh ispytaniy gornyykh porod i metodam obrabotki gornogeologicheskikh dan-nykh pri razvedke i vskrytii mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh dlya proektirovaniya i rascheta krepki kapital'nykh gornyykh vyrabotok* (Instructional guidelines on scope of mechanical testing of rocks and method of geological data processing in exploration and opening-up of mineral deposits to design support for permanent openings), Khar'kov, VNIIOmShS, 1979, 116 p.
14. *Vremennye pravila okhrany sooruzheniy i prirodnyykh ob"ektov ot vrednogo vliyaniya podzemnykh gornyykh razrabotok mestorozhdeniy rud tsvetnykh metallov s neizuchennym protsessom sdvizheniya gornyykh porod* (Provisional regulations for protection of structures and natural objects from hazardous influence of nonferrous metal mining in the areas of un-studied strata movement), Leningrad, 1986, 74 p.
15. *Instruktsiya po bezopasnomu vedeniyu gornyykh rabot na rudnykh i nerudnykh mestorozhdeniyakh (ob"yektakh stroitel'stva podzemnykh sooruzheniy), sklonnykh k gornym udaram* (Guidelines on safe mining at rockburst-hazardous metallic and nonmetallic deposits (in underground construction), Leningrad, VNIMI, 1989, 58 p.
16. Lyashenko V.I., Dyadechkin N. I. *Gornyy zhurnal*. 2009, no 10, pp. 55–58.
17. Babak M. I., Koshik Yu. I., Pukhal'skiy V.N. *Dobycha i pererabotka uranovykh rud v Ukraine*. Pod red. A. P. Chernova (Uranium production and processing in Ukraine. Chernov A. P. (Ed.)), Kiev, ADEF-Ukraine, 2001, 238 p.
18. Lyashenko V.I., Skipochnka S. I., Yalanskiy A. A. *Tsvetnaya metallurgiya*. 2011, no 9, pp. 3–15.
19. Lyashenko V.I., Skipochnka S. I., Yalanskiy A. A. *Chernaya metallurgiya*. 2012, no 5, pp. 23–31.
20. Lyashenko V.I., Skipochnka S. I., Yalanskiy A. A. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 2012, no 4, pp. 109–119.
21. Lyashenko V.I., Skipochnka S. I., Yalanskiy A. A. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2012, no 9, pp. 68–77.
22. Lyashenko V.I., Pukhal'skiy V.N. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 2015, no 3, pp. 37–49.
23. Lyashenko V.I. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2015, no 9, pp. 38–42.
24. Lyashenko V.I. *Marksheyderskiy vestnik*. 2016, no 1, pp. 35–43.
25. Lyashenko V.I., Pukhal'skiy V.N. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2016, no 2, pp. 36–41.

