

УДК 622.01;681.586.732

DOI: 10.23671/VNC.2016.3.20836

КОНТРОЛЬ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНОГО МАССИВА ЗВУКОМЕТРИЧЕСКИМИ И ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

© 2016 Х.О. Чотчаев

Геофизический институт ВНЦ РАН, Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова,93а, e-mail: cgi_ras@mail.ru

Уровень промышленной безопасности в горнодобывающей отрасли остается одним из низких, что обусловлено, в первую очередь, недостаточной изученностью геотектонических условий разреза, отсутствием инновационных разработок в предупреждении чрезвычайных ситуаций при горнопроходческих и добычных работах, слабой автоматизацией опасных операций производственного цикла. Главной же причиной высокой аварийности в горной отрасли является низкий уровень организации контроля проявления и развития в массиве деформационных процессов, недостаточная разрешающая способность используемых методов контроля, сложность и дороговизна проведения наблюдений, помехонезащищенность используемых радиосхем и электролиний измерительных установок. В работе рассмотрены основные звукометрические и геофизические методы контроля динамики напряженно-деформированного состояния горных пород, физико-механические изменения матрицы горной породы на уровне структурно-текстурной упаковки и кристаллической решетки. Дается обоснование эффективности использования волоконно-оптических материалов, как линий связи и детекторов давления на основе дифракционных решеток Брэгга.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, контроль, поляризационно-оптический метод, акустико-эмиссионное явление, ультразвуковые исследования, электромагнитные импульсы, волоконно-оптические датчики давления, решетки Брэгга.

Актуальность темы. Производство горнодобывающей отрасли ведется во все времена с высокой степенью риска, во-первых, из-за сложности геологической обстановки, как в плане структурно-тектонической раздробленности, так и в многообразии негативно воздействующих факторов на устойчивость массива горных пород, учесть влияние по полному списку которых пока не представляется возможным. Во-вторых, из-за недостаточной изученности геолого-структурных, тектонических и геотехнических условий разреза, как на стадии детальной разведки, так и в процессе промышленного освоения. Под массивом в данной работе понимается объем горной породы, представляющий определенный интерес и подготавливаемый к промышленному освоению, геотектонические условия которого подлежат детальному изучению для безопасного ведения горнопроходческих работ.

Международная сеть компаний, оказывающих услуги в области консалтинга и аудита Deloitte Touche Tohmatsu Limited («Делойт Туш Томацу Лимитед»), анализируя деятельность горнодобывающих предприятий, приходит к выводу о низком организационно-хозяйственном и технологическом уровне производства и рекомендует переходить на инновационные технологии проектирования и планирования работ на рудниках.

Горнодобывающая отрасль России ведет добычу 48 типов минеральных продуктов, являясь лидером среди ведущих стран и обеспечивая до 10% ВВП России,

хотя остается наименее непривлекательной сферой для развития информационных технологий. В общей массе IT-проектов, выполненных в промышленном секторе России, внедрения на горнодобывающих предприятиях составили порядка 1,5% от общего числа проектов, в то время как объемы инновационных технологий, выполненных в ТЭК, – 24,12%, в машиностроении – 24,01%, в нефтегазодобывающей отрасли – порядка 22% от всех IT-проектов в промышленности.

Являясь наиболее сложной, трудоемкой и опасной сферой деятельности в системе недропользования, горнодобывающая отрасль, специализирующаяся на добыче твердых полезных ископаемых способом подземных выработок, больше всего подвержена природным и техногенным воздействиям негативного характера. Они вызваны как эндогенными геодинамическими процессами (сейсмического, тектонического, вулканического, магматического характера и т. д.), так и изменениями физики твердого тела на межмолекулярном уровне, когда нарушается геостатическое равновесие в определенной части среды (подходные штольни, штреки, камеры и т. п.) [Единые правила..., 2003]

Эти воздействия вызывают нарушения производственного цикла в выработке, выход из строя шахтного оборудования, обвалы, горные удары, подтопления, которые в свою очередь приводят к человеческим жертвам из числа находящегося под землей персонала.

Внедрение IT-проектов, направленных на совершенствование технологических процессов, предусматривает полную или частичную автоматизацию производства, что значительно повышает не только производительность труда, но и безопасность производства за счет исключения ручного труда в технологических циклах на опасных участках и использования новейших достижений электронно-вычислительной техники и радиоэлектронной промышленности в управлении этими технологическими циклами.

Низкий уровень инновационных технологий в производственном цикле горнопроходческих и добычных работ представляется основной причиной высокого уровня аварийности, экономических потерь на ликвидацию последствий, ущерба жизни и здоровью шахтеров и порче подземного оборудования.

Все без исключения горнодобывающие предприятия, ведущие добычу твердых полезных ископаемых подземным способом, относятся к объектам высокого риска, но к наиболее опасным подземным производствам следует отнести угольные выработки, где к прочим негативным природным и техногенным явлениям добавляются выбросы метана и, как следствие, частые пожары, сопровождающие горные удары. [Федеральные нормы и правила..., 2015]

Системы современных средств контроля и предупреждения состояния элементов локального подземного пространства, безопасного и бесперебойного функционирования транспортных средств и горнопроходческого оборудования, а также позиционирования местонахождения каждого работника в случае чрезвычайного происшествия базируются, в основном, на принципиальных схемах электрической и радиотехнической цепей, которые недостаточно чувствительны и плохо защищены от помех электромагнитного характера. Кроме того, они легко подвержены воздействию человеческого фактора, заключающееся в возможности принудительного отключения сигнальных средств, произвольной интерпретации причин автоматизированных сигнальных предупреждений отдельными работниками или целыми группами работников с якобы ложными срабатываниями контрольной аппаратуры

и, как следствие, игнорирование предупреждений контрольных систем. Поколение ныне действующего шахтного контрольно-предупредительного оборудования уровня безопасности не может блокировать производственные циклы и выполнять программу спасения людей. Инновационные технологии средств контроля и предупреждения должны быть запрограммированы на независимую блокировку производственных процессов, позиционирование местоположения функционирующих в производственном цикле площадок и каждого персонифицированного работника в реальном времени. Инновационные технологии должны содержать не только программы ведения производственного цикла, но и программы автоматизированной ликвидации аварий в горных выработках.

Из множества факторов природного и техногенного характеров, негативно влияющих на безопасность горнодобывающей отрасли в условиях подземных выработок, на наш взгляд, самым распространенным является процесс накопления напряженного состояния элементов горной выработки (боковых стенок и кровли, отдельных рудных и породных массивов), по мере накопления избыточного давления, чреватого катастрофическими последствиями.

Физико-механические предпосылки методических разработок. Звукометрические методы определения напряженного состояния горного массива.

Усиление напряжения происходит за счет перераспределения давления боковых либо вышележащих пород и изменения, скорее всего, текстурных особенностей породы, в последствие и межэлементных связей на уровне структурных изменений. При дальнейшем усилении давления наступает фаза упругих деформаций породы, увеличивающихся к свободной поверхности. Когда давление создает напряжения превышающие предел прочности породы, фаза упругих деформаций сменяется нелинейными изменениями структуры среды (пластические деформации) и разрывами сплошности. Далее следует обрушение горной породы или разрядка в виде горного удара.

Напряженно-деформированное изменение представляется динамическим процессом и проявляется смещениями и сдвигами на межмолекулярном уровне структурно-тектонической упаковки горной породы. Эти деформации порождают высокочастотные упругие продольные и поперечные волны, частотный спектр которых будет смещаться влево по мере подготовки, появления и развития остаточной деформации. Диапазон частот на ранней стадии развития напряженно-деформированного процесса может фиксироваться СВЧ – датчиками, внедрение которых позволит получить графическое изображение состояния рудных массивов и горных пород, а также полный цикл подготовки, развития и протекания напряженно-деформированных процессов на опасных участках горных выработок. Напряжение, соответствующее начальной стадии деформации в виде микротрещины, будет иметь малую длительность (порядка микросекунд или долей микросекунд). Амплитуда и энергия первоначального импульса при этом может меняться в широком диапазоне.

Продольно-сдвиговые смещения при постоянно возрастающем давлении перестают быть упругими, упругая деформация переходит в пластическую и часть энергии начинает расходоваться на диссипативные потери, включая и остаточную деформацию, которая используется на практике поляризационно-оптической регистрации напряжений, испытываемых горным массивом и определяемых по величине соотношения главных оптических осей, для чего используются оптические композиционные материалы.

Строго говоря, любой материал – оптический или светонепроницаемый (горные породы, металлы, конструкционные и композиционные слоистые и сплошные пластмассы), обладающий свойством пластической деформации, после снятия нагрузки сохраняет в себе все изменения, протекавшие в его структуре в процессе силового нагружения, т.е. материал обладает «эффектом памяти». При последующем повторении силового нагружения однажды уже нагруженного материала дополнительные пластические деформации в материале будут наблюдаться начиная с того момента, когда сжимающее напряжение превысит максимальное усилие при первом нагружении. Можно выделить две стадии процесса разрушения отдельно взятого блока горных пород: стадию накопления дефектов в объеме нагруженного тела до определенной концентрации и стадию появления и развития самого очага разрушения. Макроскопическое разрушение «целого» блока может произойти не только при нагружении материала до уровня предела прочности, но и при более низких нагрузках, важно, чтобы нагружение было длительное, а материал обладал свойством пластической деформации.

Пластические деформации, связанные с появлением и развитием дефектов на уровне структурно-текстурных особенностей материала в виде микро- и макротрещин и аллотропических изменений кристаллической решетки, проявляются в виде отдельных акустических импульсов, служащих универсальным признаком обнаружения разномасштабных трещин по частотному спектру излучения. Такие импульсы проявляются в кристаллической решетке даже в области упругости, а возникают от того, что среда неоднородна на уровне текстурно-структурной упаковки, нагружена неравномерно и в отдельных областях происходит пластическая деформация, хотя в целом процесс остается упругим.

Кривая цикла акустической эмиссии породы от начала нагружения до полного разрушения будет дифференцироваться характерными амплитудно-частотными спектрами, отражающими стадии деформаций на уровнях кристаллической решетки, структурно-текстурного и литологического строения среды.

На данном этапе валидность метода ограничивается единичными работами, однако при создании банка данных и наработанного опыта анализа амплитудно-частотных спектров акустико-эмиссионных процессов, метод может позволить оценивать литологические и петрофизические особенности массива горных пород.

В нагруженном состоянии горной породы или наращивании усилия на пласт за счет образования пустотного пространства под землей в определенный момент, когда достигается напряжение усилия равное пределу упругости, происходит явление лавиноподобного образования микротрещин, названное эффектом акустической эмиссии за счет сопровождения остаточной деформации излучением упругих волн звукового диапазона частот [Леонтьев, 2013]. По частотному спектру можно качественно судить о размерах трещин, об уровне силового напряжения на локальный блок пород и в целом о стадии напряженного состояния массива или его части.

Акустическая эмиссия отличается от большинства методов неразрушающего контроля тем, что источником сигнала служит сама исследуемая среда и дополнительных внешних источников для генерации импульса не требуется. Другим важным отличием метода является возможность обнаружения динамики дефекта, а не статического состояния деформированной среды. Метод позволяет в реальном времени по сигналам эмиссии непрерывно наблюдать за поведением материала при нагружении. Поскольку интенсивность акустической эмиссии зависит от структуры

материала и режима деформирования в разных средах при различных способах нагружения по-разному протекают акустико-эмиссионные процессы [Pollock, 1989].

Акустико-эмиссионный метод, как средство неразрушающего контроля, позволяет проводить интегральный контроль и обнаруживать только дефекты, представляющие опасность. Напряжения, испытываемые массивом при отсутствии дефектов, не вызывают акустико-эмиссионный процесс.

Звукометрические определения напряженного состояния горного массива можно выполнять по методу оценки на основе акустико-эмиссионного эффекта памяти в образцах горных пород, извлеченных из массива, методом оценки напряженного состояния массива на основе акустико-эмиссионного эффекта памяти горных пород околоскважинного пространства и на основе эффектов памяти в композиционных материалах.

В первом случае образец нагружается в лабораторных условиях в направлении главного вектора приложения деформирующей силы в естественных условиях до проявления эффекта памяти первой стадии развития напряжения и начала роста напряжения второй стадии. Второй случай сочетает в себе элементы методов разгрузки и акустико-эмиссионной памяти. Проводится локальная разгрузка горных пород в массиве посредством бурения скважины, а затем восстановление исходного напряженного состояния пород околоскважинного пространства с помощью прессиометра или гидродомкрата, в которые под давлением закачивают рабочую жидкость. Измерение производится в процессе восстановления активности или суммарного счета акустической эмиссии, по скачкообразному увеличению которых судят о действующих напряжениях [Ямщиков и др., 1991; Deutsch et al., 1989].

В третьем случае образец композиционного материала с деформированной структурой в напряженном поле естественного массива выбуривается и просматривается в поляризованном свете. Используется известное свойство изотропных оптически активных прозрачных материалов при нагружении проявлять оптическую анизотропию – двойное лучепреломление, величина которого может быть измерена по интерференции поляризованного света. Оптические свойства в каждой точке анизотропной среды выражаются эллипсоидом показателей преломления с полуосями, равными главным показателям преломления исследуемого материала – n_1, n_2, n_3 , которые являются величинами обратно пропорциональными скорости распространения света (т. е. исследуются свойства оптической индикатрисы). Установлено, что в каждой точке напряженной модели направления главных напряжений – $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, вызванных деформацией, совпадают с главными осями симметрии оптической индикатрисы и выражаются величиной оптической разности хода (Γ), т. е. величиной двойного лучепреломления.

Главными недостатками звукометрических методов определения напряженного состояния горного массива являются: трудоемкость, ограниченный предел прочности композиционных оптических материалов при производстве работ в магматических и метаморфических породах, дорогостоящее оборудование, низкий уровень оперативности, ограниченная возможность дистанционного контроля, обнуление информации о напряжениях в массиве ниже достигнутого предела эффекта памяти.

Геофизические методы контроля напряжений в массиве горных пород основаны на взаимосвязи параметров различных искусственно или естественно наводимых физических полей с напряженным состоянием массива. К таким полям относятся упругие волны, радиационные, электрические, магнитные, электромагнит-

ные, гравитационные. Из перечисленного комплекса физических полей наиболее полно разработан ультразвуковой (импульсный сейсмический) метод определения напряжений, основанный на взаимосвязи с напряженным состоянием горных пород таких сейсмических характеристик как скорость и затухание упругих волн, возбуждаемых в массиве. Для количественной оценки напряжений в массиве используют эффект скоростной анизотропии пород при нагружении. Сущность данного метода заключается в том, что в пробуренные параллельно друг к другу на некотором расстоянии скважины вставляются ультразвуковые преобразователи: излучатель и приемник. На этой базе измерения определяется скорость прохождения ультразвукового импульса. Переместив ультразвуковые датчики по глубине скважин, можно получить картину изменения скорости распространения упругих волн в окрестности выработки. Для пересчета скорости распространения ультразвука в напряжения необходимо произвести соответствующую тарировку, например, с помощью метода разгрузки, определив одновременно величины напряжений и соответствующие им скорости упругих волн. [Гребёнкин и др., 2010].

Мониторинг этим же методом фронтальной зоны вероятного направления горного удара позволяет контролировать характер изменения напряжения в массиве, определить временной интервал достижения предела прочности горных пород и последующего возможного обрушения или горного удара, своевременно предупредить персонал о выходе из опасной зоны.

Если в основе акустико-эмиссионных способов контроля напряженно-деформированного состояния горного массива лежат следственные факторы деформации, то в ультразвуковом сейсмическом способе исследуются причинные факторы возникновения деформаций, каковыми могут быть пустотные пространства техногенного и природного характера, участки разуплотненных тектонических зон, фронты распространяющихся упругих волн землетрясений и искусственных взрывов, сейсмические сдвиги и т. д.

Известно, что чем плотнее среда, тем выше скорость упругих волн, а деформационные изменения ведут к лавинообразному проявлению микротрещин, как правило, заполненных флюидами, либо воздухом, скорость распространения упругих волн в которых значительно меньше, чем в массиве горной породы, не подверженном деформационным изменениям. При увеличении объема трещин (потенциальных пустот) в породе, скорость распространения упругих волн будет падать, что является признаком ослабления прочности массива и индикатором состояния элементов горной выработки.

Вторым важным физическим параметром наряду с упругими характеристиками среды является электрическая проводимость и магнитная восприимчивость, определяющие трансформирующие и генерирующие свойства геологической среды во взаимодействии с электромагнитными полями естественной и искусственной природы.

Генерация электромагнитных импульсов (ЭМИ) представляется следствием динамических процессов в земной коре, сопровождающихся перемещением относительно друг друга структурных блоков, восходящим движением магматических расплавов, дислокационными изменениями в процессе горообразования, прочими сеймотектоническими подвижками. Следовательно, перед горными ударами или в момент подготовки землетрясения участки горного массива или поверхностные слои Земли испытывают усиленные деформации. Возникновение сигналов ЭМИ происходит, как правило, в диапазоне 1 кГц – 50 МГц.

Использование метода ЭМИ в решении задач обнаружения, мониторинга развития события в виде напряженного деформирования среды, предупреждения катастрофических последствий и прогноза таких крупных геодинамических событий как горные удары на рудниках и шахтах пройденных на больших глубинах, а также землетрясений представляет огромный интерес с точки зрения обеспечения безопасности подземных горнопроходческих работ.

Применение метода ЭМИ для решения комплекса обозначенных задач обосновывается зависимостью возникающих аномальных электромагнитных полей от механики приложенных сил природно-техногенного характера, являющейся первопричиной возникновения напряженно-деформированного состояния блока, массива, геологического участка или целой территории. Для программирования и организации безаварийной работы необходимо иметь представление об изменениях напряженно-деформированного состояния опасных подземных участков и технологических линий на всем временном интервале появления и развития напряженно-деформированного состояния среды, для принятия адекватных мер инженерной защиты, обеспечения сохранности машин и оборудования, своевременного вывода персонала в безопасное место. Аппаратурно-методический комплекс мониторинга напряженно-деформированного состояния исследуемой среды должна обеспечивать обнаружение деформационных изменений уже на уровне не более 20% от разрушающего напряжения.

Плотность и точность наблюдений должны отражать полный цикл нагружения с учетом петрофизических, литологических, тектонических особенностей исследуемого геологического объекта, а также вариационные отклонения от среднего значения кривой нагружения. 1. Критерием оценки состояния среды и соответствующих мер инженерных и организационных мер защиты и предупреждения следует выбирать границу вариационного отклонения. 2. Установить количественные взаимосвязи вариаций электромагнитного излучения и напряженно-деформированного состояния при изменениях напряжений 5–20% от разрушающих. 3. Оценить возможность прогноза местоположения и момента сдвижения (отрыва) тела оползня, а также контроля процесса деформации вмещающего массива в местах деятельности суффозионных процессов при регистрации электромагнитного излучения по профилям на припортальных склонах. 4. Разработать количественные критерии для оперативной оценки геодинамической активности массива и эффективность методики оперативной идентификации и прогнозирования геомеханических процессов в массивах горных пород на основе инструментальных данных электромагнитного излучения, многократно проверяются и подтверждаются лабораторными испытаниями и такими методами контроля, как поляризационно-оптический, акустико-эмиссионный, сейсмоакустический или разгрузки керна, щелевой разгрузки, гидро-разрыва и т. д. [Методическое руководство..., 2009; Власов и др., 2000; Шамелис, 1956; Теличенко и др., 2010].

Основным недостатком контроля механического состояния подземных горных объектов электромагнитным методом является многообразие электромагнитных полей, точная идентификация природы которых представляет собой не простую задачу. Решению этой проблемы может способствовать использование нескольких дополнительных широкополосных детекторов для регистрации электромагнитных импульсов вне зоны исследуемого объекта. В предположении, что частотная характеристика излучаемых массивом электромагнитных импульсов за счет изменяюще-

гося напряженного состояния будет более высокочастотный и всеобъемлемый.

Отличие от фоновой частоты ЭМИ за счет взаимодействия региональных геологических сред с магнитным и электрическим полями Земли, а также геологических сред и внешних факторов атмосферного, ионосферного характера и околосолнечного космического пространства, такая методика может позволить локализовать аномальное поведения участков геологического разреза или инженерного сооружения.

Контроль напряжено-деформированного состояния массива на основе волоконно-оптических датчиков. Круг решаемых задач с использованием волоконно-оптических технологий настолько широк и всеобъемлющий, что перечислять их нет возможности. Отметим, однако, что весь комплекс физико-механических проявлений нестабильного состояния элементов горной выработки и отдельного массива или блока горных пород в полной мере решается с помощью волоконно-оптических линий связи с нанесенными дифракционными решетками Брэгга, либо датчиков на волоконно-оптической основе. Для использования линии оптического волокна в качестве детектора деформации, температуры, наклона, ускорения, вибрации, давления, перемещения и т. д. необходимо записать в оптоволокне решетки Брэгга, которые наносятся при помощи ультрафиолетового лазера большой мощности, каждая из которых отражает свет определенной длины волны при ширине спектра порядка 1 нм.

Изменение регистрируемого физического или механического параметра среды ведет к деформации оптоволокна, изменению в нем длины волны и величины выходного сигнала.

Использование волоконно-оптической технологий для контроля безопасности подземных выработок продиктовано их высокой чувствительностью (1 нм по смещению), широкополосностью, обусловленной чрезвычайно высокой частотой несущей ($F_0 = 10^{14}$ Гц), малым затуханием, устойчивостью к электромагнитным и радиоволновым помехам. Чувствительный элемент волоконных датчиков не содержит электронных компонент и поэтому они являются полностью пассивными, что означает возможность использовать их в зоне повышенной взрывоопасности, агрессивности, сильных электромагнитных помех.

К сожалению, невысокая стоимость оптического волокна, пока не компенсирует значительную дороговизну активных элементов, преобразующих электрические сигналы в свет, для передачи сигнала, и, наоборот, для преобразования оптического сигнала в электрические импульсы, но высокая эффективность использования инновационной технологии оправдывает расходы на комплектующие.

В качестве источника света используется полупроводниковый лазер или светодиод, генерирующие несколько десятков близких по частоте спектральных линий с определенным распределением энергии по спектру излучения.

В зависимости от решаемых задач и требуемой точности, передача света по любому световоду может осуществляться в одномодовом и многомодовом режимах, когда распространяется по световоду только одна или несколько мод (независимых частотных импульсов, т. е. спектральных линий). Диаметр сердцевины многомодовых волокон обычно составляет 50...100 микрон. По такому волокну одновременно распространяется большое количество типов волн (мод) с различными геометрическими параметрами. Эти лучи испытывают множественные отражения от границы между сердцевиной и оболочкой, что приводит к заметному затуханию сигналов.

Диаметр сердцевины одномодовых световодов составляет не более 10 микрон. В таком световоде может распространяться только один тип волны (мода) и затухание света здесь существенно меньше, чем в многомодовых световодах.

В том и другом случаях удержание светового импульса в оптоволокне происходит вследствие того, что коэффициент преломления материала сердцевины больше чем у оболочки. Таким образом, при оптимально подобранном соотношении коэффициентов преломления материалов происходит полное отражение светового луча внутрь сердцевины.

На практике широко используется способ распространения оптического луча в волноводе на принципе двухлучевой интерферометрии, когда луч лазера расщепляется на два и направляется в два идентичных одномодовых оптических волокна. На приемном конце оба луча образуют интерференционную картину. Механические воздействия на чувствительный кабель приводят к изменениям интерференционной картины, которые и регистрируются фотоприемником. Еще большее применение имеет способ последовательной интерференции оптического луча между двумя ближайшими волоконными решетками Брэгга показатель преломления (ПП) периодически изменяется в продольном направлении волновода. Для излучения с длиной волны в два раза большей, чем период решетки, отраженные лучи последовательно складываются по фазе и в результате появляется отраженный световой сигнал с интенсивностью 1...99% от интенсивности падающей волны и очень узкой спектральной полосой. Условия усиления отраженного света на определенной длине волны называются брэгговскими условиями, а длина волны, на которой это происходит, называется брэгговской длиной волны. Для всех остальных длин волн брэгговская решетка практически прозрачна. Брэгговская длина волны и коэффициент отражения решетки могут быть заданы с большой точностью в процессе изготовления решетки. Эти параметры должны оставаться постоянными на протяжении всего срока эксплуатации решетки. Брэгговская длина волны зависит от температуры и натяжения волокна, что нашло применение в пассивных волоконно-оптических датчиках, где по изменению длины волны отраженного сигнала можно судить о температуре или величине приложенной нагрузки.

По топологии расположения волоконно-оптические датчики подразделяются на три типа: точечные, распределенные и квазираспределенные. Точечные, как следует из названия, позволяют проводить измерения и контролировать параметры в определенной точке объекта, они обладают малым размером и высокой точностью измерения. Их используют в качестве локальных термометров, тензодатчиков, датчиков давления, акселерометров и т. п. В зависимости от типа сенсорного элемента локализация датчиков может достигать 0,1 см², как в случае брэгговского чувствительного элемента, когда датчиками служат решетки Брэгга. Сенсорные массивы позволяют проводить мониторинг подземных естественных и искусственных хранилищ, горных выработок, инженерных сооружений, мостов, тоннелей и т. п., анализировать градиент распределения температуры, нагрузок, давления, контролировать до 100 и более точечных объектов. Причем, для этого используется только один волоконный световод и анализатор.

Распределенные сенсорные системы могут быть использованы для контроля больших территорий в качестве датчиков радиации, эманации газа, естественных электрических полей, температурного распределения по площади и т. п. [Гармаш и др., 2005].

Бесспорным преимуществом распределенных датчиков является возможность осуществления непрерывного контроля параметров по длине (объему) объекта в любой его точке, где установлен сенсорный световод, хотя невысокая точность определения локализации возмущения (несколько метров по длине) и относительно невысокая точность измерения величины являются недостатком распределения измеряемого параметра по длине.

Система на квазираспределенных датчиках объединяет преимущества первых двух схем. Квазираспределенный датчик представляет собой массив точечных сенсорных элементов, как правило, на основе внутриволоконных решеток Брэгга, объединенных одним общим световодом. Каждый элемент обладает своими уникальными характеристиками, что позволяет проанализировать его состояние независимо от других сенсорных элементов. Точность таких систем определяется точностью отдельных датчиков, а массив может объединять до 100 и более элементов.

Использование длины волны света в качестве информационного параметра делает волоконный датчик нечувствительным к долговременным дрейфам параметров источника и приёмника излучения, а также случайным затуханиям оптической мощности в волокне.

Установку волоконно-оптических кабелей с решетками Брегга или тензометров напряжений, давлений и т. д., а также выбор оптимальной топологии распределения датчиков в пространстве массива или на его поверхностях следует проводить с учетом удароопасности, обрушения кровли выработок и камер, тектонических и обводненных зон, опасные зоны, выявленные в результате регионального прогноза, рудные, безрудные целики и выступающие части массива, приконтактные зоны литологических разновидностей пород [РД 06–329–99..., 1999].

Все функциональные блоки мониторинга должны быть недоступны посторонним лицам и персоналу подземных работников, объединены и выведены на верхний уровень в систему, подобную классической автоматизированной системе управления технологическими процессами (АСУ ТП), при необходимости для начала оперативных действий по предотвращению катастрофических последствий.

Выводы

Использование инновационных производственных технологий в горнодобывающей промышленности для прорыва технологического отставания в отрасли необходимо сочетать с внедрением достижений в области контроля безопасности труда.

Индикатором состояния окружающей подземной среды, элементов технологических выработок, угрозы горного удара и выброса метана, обвалов и обрушений и продолжительных сейсмологических воздействий является напряженно-деформированное состояние среды.

Основной причиной высокой аварийности в горной отрасли является низкий уровень организации контроля проявления и развития в массиве деформационных процессов, недостаточная разрешающая способность используемых методов контроля, сложность и дороговизна проведения наблюдений, помехонезащищенность используемых радиосхем и электролиний измерительных установок.

Для резкого снижения аварийности в подземных выработках горнодобывающей отрасли следует вести постоянный мониторинг в автоматическом режиме закрытыми измерительными системами, без возможности доступа к управлению постороннего персонала. Функциональные блоки мониторинга должны быть объединены и

выведены на верхний уровень в систему, подобную классической автоматизированной системе управления технологическими процессами (АСУ ТП), при необходимости для начала оперативных действий по предотвращению катастрофических последствий.

Рассмотрены основные звукометрические и геофизические методы обнаружения и регистрации динамики развития напряженного состояния горной породы и последующих деформационных процессов. Ранняя стадия проявления пластических деформаций в горной породе теоретически связывается с изменениями на уровне кристаллической решетки, текстурной и структурной упаковок породы, сопровождающихся лавинообразным проявлением микротрещин в особых очаговых точках и генерацией акустических колебаний высокочастотной области и малой интенсивности.

Звукометрические методы регистрации динамики процесса развития напряжений эффективны, но трудоемки и дорогие для непрерывного контроля и периодического обновления. Методы требуют параллельного функционирования лабораторных установок нагружения при акустико-эмиссионном контроле и периодических извлечений композиционного образца для просмотра в лабораторных условиях на полярографе.

Учитывая достижения в области волоконно-оптических технологий, наиболее эффективным способом непрерывного контроля напряженно-деформированного состояния исследуемого массива (блока, элемента горной выработки) представляются волоконные – оптические линии на основе оптических решеток Брегга или интерференционной картины по принципу Фабри – Перо. В качестве датчиков используются также решетки Брэгга и собственно волоконно-оптические датчики.

Литература

1. Власов С.Н., Маковский Л.В., Меркин В.Е. при участии Куплиса А.Э., Сарabeeва В.Ф., Торгалова В.В. «Аварийные ситуации при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей и метополитенов» // 2-ое изд. доп. – М.: ТИМР. – 2000.
2. Гармаш В.Б., Егоров Ф.А., Коломиец Л.Н., Неугодников А.П., Поспелов В.И. Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении «ФОТОН-ЭКСПРЕСС». – НАУКА, 2005. – № 6.
3. Гребёнкин С.С., Самойлов В.Л., Петренко Ю.А. Управление состоянием массива горных пород: учеб. пособ. для студ. – Донецк: «ВИК», 2010. – 191 с.
4. Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и рассыпных месторождений полезных ископаемых подземным способом. ПБ 03–553–03, НПО ОБТ, 2003.
5. Леонтьев А.В. Физические и методические аспекты акустоэмиссионного контроля напряженно-деформированного состояния массива горных пород // Журнал Интерэкспо Гео–Сибирь. – Выпуск № 3, том 2. – 2013.
6. Методическое руководство по комплексному горно-экологическому мониторингу при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей. – М.: УРАН ИПКОН РАН, НИПИИ «Ленметрогипротранс», 2009. – 68 с.
7. РД 06–329–99. Инструкция по безопасному ведению горных работ на рудных и нерудных месторождениях, объектах строительства подземных сооружений,

склонных и опасных по горным ударам (утв. Постановлением Госгортехнадзора РФ от 24.11.1999. № 86).

8. Теличенко В.И., Зерцалов М.Г., Конюхов Д.С., Королевский К.Ю., Король Е.А. «Современные технологии освоения подземного пространства мегаполисов». Научное издание. – М.: Издательство АСВ, 2010. – 322 с.

9. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах» С изменениями и дополнениями, приказ № 129 Госгортехнадзора, 2015.

10. Шамелис И.М. «Тоннели и их восстановление», Часть II. – Л.: РТА, 1956.

11. Ямщиков В.С., Шкурятник В.Л., Лыков К.Г., Фарафонов В.М. Оценка напряженного состояния массива на основе эмиссионных эффектов памяти в горных породах околоскважинного пространства/ФТПРПИ, 1991. – №2. – С. 26–29.

12. Deutsch W.L., Koerner R.M., Lord A.E. Determination of prestress of in situ soils using acoustic emission // J. Geotech. Engrg., ASCE. 1989. – V. 115. №2. – P. 228–245.

13. Pollock A. Physical Acoustics Corporation (PAC) Author's reprint from the book Metals Handbook), 9th edition, vol. 17, ASM International (1989): pp. 278–294.

DOI: 10.23671/VNC.2016.3.20836

CONTROL OF THE MOUNTAINOUS AREA STRESS-STRAINED STATE BY THE SOUND RANGING AND GEOPHYSICAL METHODS

© 2016 Kh.O. Chotchaev

Geophysical institute VSC RAS, Russia, 362002, Vladikavkaz, Markov street, 93a,
e-mail: cgi_ras@mail.ru

The level of industrial safety in the mining branch remains one of the low, which is caused, in the first place, by the insufficient mastery of the geotectonic conditions for section, by the absence of innovation developments in warning of extraordinary situations with the mine-constructing and mining works, by the weak automation of the dangerous operations of production process. However, the main reason for high accident rate in the mountain branch is the low level of the of the manifestation and development control organization in the massif of deformation processes, the insufficient resolution of the utilized methods of control, complexity and high costs of conducting observations, lack of interference defense of the utilized radio circuits and power lines of measuring units. Work examines the basic sound ranging and geophysical methods of the stress-strained state dynamics of the rocks checking, physicommechanical changes in the matrix of the rock at the level of structural-textural packing and crystal lattice. The effectiveness substantiation of the fiber-optic materials use as the communications lines and detectors of pressure on the basis of the Bragg diffraction lattice is given.

Keywords: the stress-strained state, control, polarization-optical method, acoustic-emission phenomenon, ultrasonic studies, electromagnetic pulses, the fiber-optic pressure sensors, lattice of Bragg.