

А.А. Козырев, Э.В. Каспарьян, Ю.В. Федотова

КОНЦЕПЦИЯ ЕДИНОЙ СИСТЕМЫ КОМПЛЕКСНОГО ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПРИ ВЕДЕНИИ ГОРНЫХ РАБОТ В СКАЛЬНЫХ МАССИВАХ ГОРНЫХ ПОРОД*

Сформулированы общие принципы организации типовой единой комплексной системы геомеханического мониторинга в условиях массивов скальных пород иерархично-блочной структуры при гравитационно-тектоническом поле природного напряженного состояния. Показано, что основной задачей геомеханического мониторинга является изучение состояния горнотехнических систем «сооружение-массив» и фиксация его изменений в пространстве и во времени. При этом главная конечная цель заключается в разработке общей геомеханической модели исследуемой природно-технической системы, на основе которой можно решать любые геомеханические задачи. Также сформулированы этапы работ, выполнение которых является обязательным при создании общей системы геомеханического мониторинга. В качестве примера рассмотрена система геомеханического мониторинга, развернутая на рудниках АО «Апатит», намечены направления ее дальнейшего совершенствования.

Ключевые слова: геомеханический мониторинг, геомеханическая модель, геомеханика.

Общей тенденцией развития инженерной деятельности человечества является неуклонное возрастание воздействий на окружающую среду, что проявляется в резком ухудшении ее общего экологического состояния со всеми отсюда вытекающими последствиями для живой и неживой природы. Подобная ситуация характерна для всех регионов мира, при этом в отдельных случаях, уже достаточно многочисленных, положение становится катастрофическим или весьма близким к нему.

* Исследования выполнены в рамках гранта по приоритетному направлению деятельности РНФ «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами» № 14-17-00751.

Одним из наиболее сильных воздействий на окружающую среду является проведение горных работ, при этом среда, представленная массивом окружающих горных пород, вполне закономерно реагирует на эти воздействия, в частности, в виде развития деформаций и разрушений. Часто, при определенных условиях, эта реакция проявляется в виде динамических и газодинамических форм разрушения пород с интенсивным выделением энергии, что создает угрозы безопасности проведения работ.

В создавшейся ситуации выходом является разработка специальных комплексных подходов к оценке уровня воздействий на окружающую среду, организация контроля ее состояния (мониторинга) с осуществлением своевременных прогнозов и разработкой необходимых профилактических мер по предупреждению и минимизации последствий различного рода негативных явлений.

Мониторинг состояния окружающей среды может быть самым различным (экологический, гидрогеологический, радиологический, радиационный и др.), в зависимости от того, какие воздействия исследуются и какие параметры контролируются. В частности, геомеханический мониторинг заключается в контроле геомеханического состояния сложных природно-технических систем (ПТС), которые образуются вследствие взаимодействия горных сооружений и объектов с природной средой — массивом горных пород.

Вопросы организации мониторинга геомеханического состояния массива горных пород представляют собой новейшее направление геомеханики, как науки, которое сейчас активно развивается и которое пока еще, с точки зрения общих подходов и применяемых терминов, не является полностью сформированным. В настоящее время существуют различные точки зрения на задачи, методы проведения, общую организацию и последовательность этапов выполнения отдельных видов работ при разработке систем мониторинга состояния массива.

Поскольку геомеханическое состояние указанных природно-технических систем определяется широким перечнем различных природных и технических факторов, задачами геомеханического мониторинга, фактически, являются исследование взаимодействия этих факторов, выделение основных из них в данной конкретной ситуации и контроль их изменения на всех этапах существования рассматриваемой системы, т.е. в процессе ее создания, эксплуатации и консервации или вывода из эксплуатации.

К основным природным факторам относятся свойства пород, слагающих массив, структурные неоднородности массива и естественное природное поле напряжений, а к основным техническим факторам – методы ведения горных работ, порядок строительства объектов, применяемая система разработки месторождений полезных ископаемых, характеристики горных выработок и др.

В результате ведения горных работ изменениям подвергаются все природные факторы – компоненты массивов пород, но в различной степени. Во многих случаях изменения свойств пород в процессе разработки могут быть мало заметны. В большей степени наблюдается изменение состояния структурных неоднородностей – раскрываются имеющиеся естественные структурные неоднородности; происходят подвижки по разрывным нарушениям (разломам); образуются новые, техногенные нарушения (трещины). Но в еще большей степени и, практически, повсеместно, имеет место изменение естественного напряженного состояния различных блоков массивов пород.

Кроме того, в процессе эксплуатации в горных выработках и подземных сооружениях обычно выполняются мероприятия по обеспечению их устойчивости и безопасности: возводятся крепь различных конструкций, проводится упрочнение приконтурных областей массива, непосредственно окружающих горные выработки, или, наоборот, специально создаются разгрузочные зоны.

Изучение геомеханического состояния горнотехнических систем «сооружение-массив» и фиксация его изменения в пространстве и во времени является основной задачей геомеханического мониторинга, который требуется организовывать для получения необходимой информации в целях обеспечения безопасности ведения горных работ и эксплуатации любых сооружений, как в подземных условиях, так и на дневной поверхности. При этом главной конечной целью работ по оценке и контролю состояния природно-технических систем является создание общей геомеханической модели исследуемой природно-технической системы, на основе которой можно решать любые геомеханические задачи, а геомеханический мониторинг при этом является одним из основных методов решения этой общей проблемы.

Необходимыми частными задачами в ходе достижения конечной цели являются исследование упомянутых природных и технических факторов с построением соответствующих частных моделей, создание систем контроля необходимых парамет-

ров исследуемых систем и разработка мероприятий, обеспечивающих безопасную эксплуатацию рассматриваемых природно-технических систем.

В условиях конкретных массивов пород и горных предприятий на эти общие требования могут налагаться специфические задачи.

Например, для многих месторождений полезных ископаемых, разрабатываемых подземным способом, в том числе и для Хибин, одной из основных задач геодинамического мониторинга является прогноз динамических проявлений горного давления на рудниках. Все сейсмические явления, в том числе горные удары и техногенные землетрясения, с физической точки зрения являются мгновенными (хрупкими) разрушениями некоторых объемов пород, либо подвижками блоков различных структурных неоднородностей относительно друг друга с выделением (иногда очень интенсивным) накопленной ранее энергии. Отсюда следует вывод, что для прогноза таких событий необходимо получать информацию об уровне энергии, накопленной массивом пород.

Поскольку указанные горнотехнические системы «сооружение-массив» в общем случае представляют собой сложные многокомпонентные конструкции, организация геомеханического мониторинга в них должна базироваться на системных принципах, отражающих изменение состояния в пространстве и времени массива горных пород и различных инженерных конструкций, возводимых в период строительства сооружений или эксплуатации месторождений.

Накопленный к настоящему времени опыт организации и проведения наблюдений по контролю геомеханического состояния массивов пород в условиях различных месторождений позволяет сформулировать общие принципы организации типовой единой комплексной системы геомеханического мониторинга и обозначить основные направления ее дальнейшего совершенствования.

При разработке систем комплексного геомеханического мониторинга должны быть учтены следующие положения:

- структура геомеханического мониторинга должна быть многокомпонентной и многоуровневой (иерархичной) и соответствовать структурным особенностям контролируемого массива (всей иерархии слагающих его блоков), результатам геомеханического районирования, и классам контролируемых объектов;

- геомеханический мониторинг должен быть комплексным с использованием различных методов наблюдений в соответствии с особенностями контролируемых объектов;
- структура геомеханического мониторинга должна быть оптимизирована с точки зрения экономических и технических затрат на его организацию;
- единая система геомеханического мониторинга должна быть открыта и предусматривать безболезненное подключение вновь появляющихся объектов контроля и применение новых методов наблюдений.

Опыт выполнения геомеханического мониторинга на различных горных предприятиях Кольского полуострова убеждает в том, что общая концепция организации геомеханического мониторинга должна предусматривать выполнение следующих обязательных этапов:

1. Разработку моделей массивов пород и контролируемых процессов, выполнение геомеханического районирования территории рассматриваемых объектов и составление общей структурной схемы геомеханического мониторинга исследуемой природно-технической системы.

2. Выбор приоритетных контролируемых параметров.

3. Измерение этих параметров в натуральных условиях.

4. Сопоставление расчетных и измеренных величин с целью верификации принятых моделей.

5. Расчет на моделях критических значений параметров, соответствующих переходу участков массива в опасное состояние.

6. Оценку современного состояния контролируемого объекта путем сопоставления измеренных и критических значений наблюдаемых параметров.

7. Разработку технических мер по обеспечению эффективности и безопасности горных работ.

8. Контроль реализации разработанных технических мер и их корректировка.

Здесь натурные измерения являются одной из необходимых, может быть даже основных, но отнюдь не исчерпывающих частей мониторинга массива горных пород. Между тем необходимо отметить, что до сих пор весьма распространены попытки свести мониторинг только к непрерывным натурным наблюдениям, чем существенно сужается общий подход к решению проблем его организации.

В перечне указанных этапов основными являются первые три этапа, а остальные можно рассматривать как производные от них.

Необходимо отметить, что перечень указанных этапов представляет собой некоторый идеальный алгоритм организации геомеханического мониторинга, который на практике обычно нарушается тем, что последовательность выполнения этапов определяется временем появления практических приоритетных задач и объемами имеющейся информации, программы выполнения отдельных этапов взаимно корректируются вследствие появления новой или уточнения имеющейся информации, а также вследствие невозможности достижения поставленных целей (например, прогноза времени проявлений горных ударов) при современном состоянии методических и научных разработок.

Вместе с тем приведенное выделение этапов представляется целесообразным с методической точки зрения, поскольку позволяет представить всю перспективу выполнения необходимых действий для успешного решения общей проблемы организации мониторинга геомеханического состояния сложных природно-технических систем.

Далее, в соответствии с изложенным подходом, перейдем к детальному рассмотрению основных этапов общей концепции мониторинга.

Первый этап предусматривает непременно разработку моделей рассматриваемых массивов и отслеживаемых процессов. При этом в принципе модельные представления могут быть любыми (математические или физические модели, простой набор каких-то представлений в виде последовательности выполнения работ, проектные разработки и др.), и это определяется степенью детальности имеющейся информации для массивов и рассматриваемых процессов. Однако даже в случае явно недостаточного объема информации, модели, пусть примитивные, должны быть разработаны, иначе проведение мониторинга становится малопродуктивным. В процессе проведения мониторинга уровень знаний об объекте наблюдений увеличивается, вследствие чего модели обычно усложняются и их адекватность реально развивающимся процессам повышается.

Начальной стадией этих работ обычно является построение инженерно-геологической модели массива пород, в котором проводятся горные работы.

Первичной основой для построения инженерно-геологической модели массива пород служит обычная геологическая документация – геологические планы (карты) и разрезы, которые, по сути, являются специализированными моделями реального массива пород. Недостающая информация, например,

о свойствах пород или параметрах природного поля напряжений должна быть получена в ходе специальных исследований.

По сути своей инженерно-геологическая модель представляет собой систематизированные представления о свойствах, структурных особенностях и естественном напряженном состоянии массива пород еще до проведения каких-либо горных работ.

Однако основное качественное отличие инженерно-геологической модели от всех исходных материалов заключается в одновременном комплексном анализе геологических условий, физико-механических свойств пород и начального напряженного состояния массива, на основе чего выполняется целенаправленная схематизация рассматриваемого массива пород, которая заключается, как правило, в упрощении сложного строения и состава массива, уменьшения разнообразия участков массива путем объединения их в комплексы с близкими показателями физико-механических свойств, а также с одинаковыми особенностями поведения пород при различных воздействиях на них. Таким образом возникает возможность выполнения геомеханического районирования массива, и на этой основе определения принципиальной структуры будущей общей геомеханической модели природно-технической системы, а также обоснования основных методов мониторинговых наблюдений и общей схемы наблюдательных сетей.

Следующей стадией модельных построений является составление частных геомеханических моделей отдельных ранее выделенных участков массива. При этом на инженерно-геологическую модель накладывается реальная горнотехническая ситуация и фиксируются все изменения естественного состояния массива, вызванные горными работами на какой-то определенный момент времени. По мере развития горных работ частные геомеханические модели непрерывно пополняются и детализируются.

Второй этап общей организации геомеханического мониторинга заключается в выборе и обосновании приоритетных контролируемых параметров, которые в достаточной степени и однозначно будут определять состояние контролируемых объектов и одновременно могут быть с достаточной точностью измерены при современном состоянии измерительной техники и доступности применяемой аппаратуры.

Основными параметрами, однозначно определяющими геомеханическое состояние элементов природно-технических си-

стем, являются напряжения и связанные с ними перемещения (деформации), а остальные параметры – размеры областей разрушения, координаты очагов разрушений, выделяющаяся энергия и т.д. – можно считать производными.

При этом с точки зрения приоритетных параметров, на данном этапе развития горного дела и геомеханики наибольший научный, методический и практический интерес представляют смещения (деформации) и области разрушения.

Методики непосредственного определения смещений в настоящее время разработаны достаточно полно и с применением новейших методов спутниковой геодезии (GPS-технологий) и физических методов измерения длин (лазерной и радио-дальномерии) позволяют получать надежные данные с высокой, практически, постоянной точностью (порядка нескольких миллиметров на километр измеряемого расстояния) в весьма широком диапазоне горно-геологических и метеорологических условий.

Методы космической геодезии обладают дополнительными преимуществами, поскольку при этом достаточно легко решаются проблемы исходных пунктов, не требуется прямой видимости между контролируруемыми пунктами и можно получать информацию о смещениях, практически, без ограничений по времени суток и климатических сезонов. Еще одним преимуществом методов космической геодезии являются возможности единовременного получения всех трех координат измеряемых смещений, однако при этом необходимо учитывать, что смещения по направлению одной из координат (Z) определяются на порядок менее точно по сравнению с двумя другими координатами (X и Y). Последние достижения в этой области позволяют говорить уже в целом о приемлемой точности измерений, а также о принципиальных возможностях получения данных дистанционным путем и в автоматическом режиме.

Однако дело осложняется тем, что в условиях иерархично-блочного строения массивов перемещения каких-либо фиксированных точек складываются как из собственно деформаций отдельных блоков, так и их перемещений и разворотов, как единых целых в общей системе массива.

В последнее время с помощью специальных методов обработки результатов натурных наблюдений удается выделить собственно деформации структурных блоков и, таким образом, появилась принципиальная возможность оценивать энергетическое состояние блоков и контролировать изменение энергонасыщенности блоков во времени [1].

Что касается параметров областей разрушения, то они определяются в настоящее время, главным образом, с помощью геофизических методов, в частности, методов сейсмического контроля, ультразвукового прозвучивания и профилирования, сейсмоакустических методов, сейсмотомографии и др. Из этих методов в настоящее время в наибольшей степени аппаратурно обеспечены и потому находят широкое применение сейсмические и сейсмотомографические методы.

Исходя из вышесказанного, эффективным является комплексирование деформационных методов (геодезических) с сейсмическими методами контроля состояния массива. Если деформационные методы позволяют получить информацию о формировании энергонасыщенных зон, связанных с подготовкой разрушений, то сейсмические методы отражают динамику реализации разрушений в структурных неоднородностях массива пород и позволяют с относительно малыми затратами организовывать иерархические системы, обеспечивающие контроль среды на разных уровнях иерархии блочного строения массива пород.

Прежде, чем переходить к детальному рассмотрению наиболее ответственного третьего этапа организации геомеханического мониторинга, отметим особенности деформирования и разрушения иерархично-блочной среды (массива горных пород), установленные в последнее время в ходе выполнения специальных исследований.

В частности, было выявлено и подтверждено результатами непосредственных натуральных наблюдений, что разрушение блочных структур массивов горных пород начинается на уровне самых мелких блоков, а затем по мере возрастания значений удельной энергии разрушение происходит по структурным неоднородностям все более низких рангов [2]. Этим объясняется наличие акустической эмиссии, предшествующей разрушению испытуемого под прессом образца горных пород, а также «шумы» массива перед горным ударом или форшоковые явления перед землетрясением. Об этом же свидетельствует достаточно четкая последовательность развития динамических проявлений в массивах пород по мере возрастания степени напряженности массива пород: от начальных форм — шелушения и стреляния к собственно горным и горно-тектоническим ударам и далее — техногенным землетрясениям.

Например, в условиях Хибинского массива по мере увеличения выработанных пространств в проявлениях сейсмичности

все более четко просматривается влияние крупных структурных неоднородностей – тектонических нарушений (разломов) в пределах шахтных полей. Это подтверждает необходимость организации геомеханического мониторинга по всей иерархии структурных блоков, слагающих рассматриваемый массив пород.

Третий этап организации комплексной системы мониторинга состоит в проведении измерений параметров, выбранных на втором этапе.

В этом случае единая комплексная система геомеханического мониторинга массива пород представляется в виде сети полигонов, состоящих из отдельных наблюдательных пунктов, заложенных как на дневной поверхности, так и в подземных выработках.

Причем пункты необходимо закладывать в пределах горных отводов с таким расчетом, чтобы минимальное число пунктов в пределах каждой контролируемой границы структурных блоков было не менее двух. По возможности пункты желательно закладывать и непосредственно в структурные неоднородности, являющиеся границами структурных блоков.

Отсюда вытекает, что минимальное число пунктов на каждой грани структурного блока должно равняться четырем. Общее число пунктов в системе мониторинга на поверхности может достигать нескольких десятков.

Основными методами наблюдений при таких размерах контролируемой области могут быть только методы спутниковой геодезии (GPS-технологии), однако в необходимых случаях (для контроля, а также повышения точности и надежности наблюдений на отдельных локальных, особенно проблемных участках) возможно и применение дальномерных измерений.

Весьма целесообразно геодезические наблюдения на поверхности дополнить сейсмическими, для чего отдельные геодезические пункты совместить с сейсмическими. При этом количество совмещенных (геодезических и сейсмических) пунктов может быть не очень велико и составлять не более 10% от общего числа пунктов на поверхности.

В подземных условиях целесообразна организация трех видов наблюдений (наклонно-деформометрических, сейсмических и геодезических) и соответственно развитие трех видов сетей для контроля состояния массива на различных уровнях структурных блоков.

В частности, для контроля состояния структурных блоков, образуемых естественной трещиноватостью массива целесо-

образно использовать наклономерные и деформометрические методы наблюдений, для чего на специальных участках горных выработок необходимо оборудовать наблюдательные станции в пределах подземных границ горных отводов рудников. Для этих наблюдений возможно использование аппаратных комплексов, разработанных ИФЗ РАН совместно с ГоИ КНЦ РАН [3].

Для контроля состояния более крупных структур в подземных выработках можно организовывать наблюдательные сети, состоящие из сейсмических или сейсмоакустических пунктов. Подобные системы в настоящее время широко применяются в условиях различных месторождений.

Для контроля состояния еще более крупных структур в подземных выработках целесообразно закладывать полигоны для выполнения геодезических (прецизионных нивелирных и дальномерных) измерений. Опыт таких наблюдений на рудниках Кольского полуострова насчитывает уже несколько десятков лет.

При этом, поскольку геомеханическое состояние массивов, в частности, их напряженно-деформированное состояние в большинстве случаев определяется степенью активности крупных геологических структур, подобные полигоны целесообразно закладывать в горных выработках, в первую очередь, на пересечении с этими структурами — разломами и желательнее еще до развития очистных работ. Длины полигонов могут быть не большими, достаточно по 3–4*m* в каждую сторону от пересекаемой выработкой структурной неоднородности (исходя из размеров зоны влияния разрывного нарушения), где *m* — видимая мощность структурной неоднородности. Первоочередная цель наблюдений по этим полигонам — определить степень активности контролируемых структур, в частности оценить величины и скорости подвижек материала, заполняющего разлом, относительно вмещающих пород. С этой целью часть контрольных реперов должна быть заложена непосредственно в тело разлома.

В пределах выделенных блоков геомеханического районирования массива необходимо выполнять измерения параметров полей действующих напряжений с применением прямых (методом разгрузки) или косвенных (геофизических) методов.

Вполне естественно, что все наблюдательные сети и полигоны должны быть строго увязаны между собой путем применения единой системы координат, согласованных сроков проведения измерительных циклов и методологически единых методов обработки получаемой информации.

При этом необходимо отметить, что реализация предложенного подхода, безусловно, потребует принятия существенных организационных решений, в частности, организаций специальных структурных подразделений с достаточным штатом квалифицированных исполнителей – геодезистов, маркшейдеров, геологов, геофизиков. Причем, в зависимости от необходимых масштабов работ, эти подразделения должны создаваться либо в рамках горного предприятия или даже за его рамками, например, как подразделения экологической службы регионального или областного уровня.

Необходимо отметить, что к настоящему времени нельзя назвать ни одного примера достаточно полного решения указанной проблемы для объектов горной промышленности, хотя решений отдельных частных задач уже предложено довольно много. Относительно более полно, с точки зрения общей методологии, решаются вопросы контроля состояния объектов и окружающей среды в атомной промышленности, а также для отдельных объектов нефтегазовой индустрии. В частности, в качестве единичного положительного примера достаточно полной реализации комплексного подхода можно указать организацию системы мониторинга на Астраханском газоконденсатном месторождении [4].

Не является исключением и состояние указанной проблемы на рудниках АО «Апатит», где имеются примеры успешного решения отдельных частных задач и реализации методических разработок, но еще предстоит выполнить большой объем работ для создания единой комплексной системы мониторинга, способной решать различные геомеханические вопросы, в том числе и основной практический вопрос по повышению надежности прогноза динамических проявлений горного давления – горных ударов и техногенных землетрясений.

В качестве примеров реализации отдельных частных вопросов по организации систем мониторинга приведем результаты наблюдений на рудниках АО «Апатит» в пределах природно-технической системы «Хибины».

Массив пород Хибинских месторождений апатит-нефелиновых руд изучен весьма детально, так как разработка месторождений производится с 30-х годов прошлого столетия и масштабы добычи руд чрезвычайно велики.

К настоящему времени выполнен огромный объем исследований и получена детальная информация по всем компонентам массива. В частности, вопросы генезиса и тектоники массива

обобщены в основополагающей работе [5], детальное изучение структурных неоднородностей массивов отдельных месторождений выполнено Ф.М. Онохиным [6], физико-механические свойства на высшем структурном уровне (на уровне образцов) исследованы И.А. Турчаниновым и Р.В. Медведевым [7], особенностям естественного напряженного состояния посвящены обобщающие работы И.А. Турчанинова, Г.А. Маркова, А.А. Козырева [8]. В результате этих исследований инженерно-геологическая модель и основные черты геомеханического районирования массива представляются достаточно ясно.

Геомеханические модели массива и горнотехнической ситуации регулярно разрабатываются для каждого блока месторождений, вводимого в эксплуатацию. При этом используется математическое моделирование на основе применения методов конечных элементов. Решения выполняются в упругой постановке, с использованием в качестве граничных условий результатов постоянно выполняемых непосредственных натуральных измерений параметров напряженного состояния [9].

В настоящее время на рудниках АО «Апатит» развернута сейсмическая сеть, обеспечивающая контроль состояния массива пород в зоне проведения горных работ с разрешением в пространстве порядка от нескольких до сотен метров, т.е. на среднем уровне иерархии в рамках рассматриваемой концепции. Сейсмическая сеть эксплуатируется около 30 лет, в результате накоплен значительный опыт организации подобных наблюдений и анализа получаемых результатов.

Начиная с 1990 г. на месторождениях Хибин выполняются деформационные измерения на измерительных полигонах, оборудованных в выработках Объединенного Кировского рудника (ОКР), в карьере Центральный и в транспортном тоннеле Расвумчоррского рудника.

Конкретные практические задачи проведения наблюдений в каждом случае были различными, однако общим направлением при выборе мест заложения и схемы полигонов являлось стремление получить информацию о развитии геомеханических процессов в условиях сложной геомеханической и горно-технологической обстановки.

В частности, в массиве пород ОКР, геодезические полигоны были оборудованы в подземных выработках гор. +252 и +172 м и на поверхности в Саамском карьере для контроля напряженно-деформированного состояния массива пород в районе крупной тектонической структуры – Саамского разлома (рис. 1).

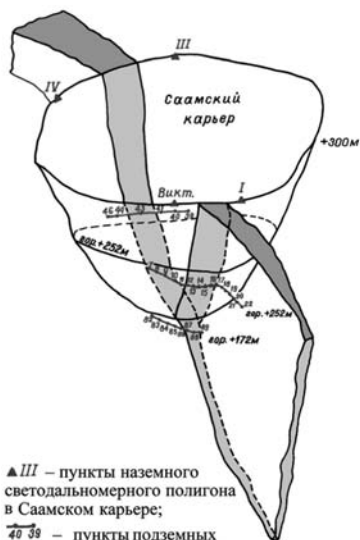
Саамский разлом (2-ой порядок по классификации проф. М.В. Раца) представляет собой зону шпрудштейнизированных пород, залегающую практически отвесно вкрест простирания рудного тела. Зона заполнена окисленными породами, имеющими малую прочность по сравнению с породами массива. Мощность зоны на разных участках колеблется в пределах от 1 до 136 м. Северо-восточная часть разлома является руслом р. Лопарской, юго-западная часть – пересекает Саамский карьер.

На гор. +252 м ОКР регулярные прецизионные наблюдения методом повторных нивелирований, соответствующие по точности наблюдениям на государственных высотных сетях II класса, были начаты в 1991 г. и выполнялись до 2013 г.

Поскольку нивелирные наблюдения обеспечивали измерения перемещений только в вертикальном направлении, для получения более полной картины изменения напряженно-деформированного состояния контролируемого массива пород подземные нивелирные полигоны в 1995 г. были дополнены измерительным светодальномерным полигоном из 5 пунктов в Саамском карьере. Наблюдения на этом полигоне проводились в период 1996–2003 гг., а затем были прекращены ввиду завершения работ в карьере и отсутствия доступа к пунктам наблюдений.

В 1998 г. были начаты наблюдения на нивелирном полигоне гор. +172 м по 39 пунктам. Полигон пересекает, по меньшей мере, три блочные структуры, включая Саамский разлом, разделенные геологическими нарушениями с различными элементами залегания. Поскольку первые наблюдения на гор. +172 м были выполнены до выполнения горных работ по массовой отработке блоков (2001 г.), здесь удалось зафиксировать начальное геомеханическое состояние массива.

В 2003 г. на гор. +252 м, также непосредственно в районе Саамского разлома, был заложен подземный светодальномер-



▲ III – пункты наземного светодальномерного полигона в Саамском карьере;
 40 39 – пункты подземных нивелирных полигонов

Рис. 1. Общая схема расположения нивелирных и светодальномерных полигонов в районе Саамского разлома (Объединенный Кировский рудник, ОАО «Апатит»)

ный полигон из 6 пунктов. Выбор места заложения полигона определен по результатам нивелирных наблюдений на участке самого активного деформирования массива пород.

Анализ результатов более чем 20-ти летних натурных измерений на полигоне ОКР в районе Саамского разлома показал, что основной особенностью здесь является четко зафиксированное поднятие реперов в период 1991–2006 гг. в пределах тела самого разлома по отношению к вмещающему массиву пород при незначительных знакопеременных флуктуациях.

Накопленное за указанный период наблюдений (1991–2006) максимальное относительное вертикальное перемещение внутренней части разлома составило +10,98 мм (26.01.06). Следует отметить, что вертикальные смещения реперов и соответственно скорость поднятий увеличиваются по мере приближения к центральной зоне разлома.

На рис. 2 приведены результаты наблюдений вертикальных перемещений наиболее активных реперов полигона гор. +252 м в пределах Саамского разлома.

Как видно из приведенных данных, на первой стадии в период с 1991 по 2004 гг. шло равномерное поднятие материала-заполнения Саамского разлома. На второй стадии, в период с 2004 по 2007 гг. его состояние стабилизировалось. Затем на третьей стадии в период с 2007 по 2008 гг. наблюдалось резкое опускание заполнителя, после чего наступила 4 стадия стабилизации, окончившаяся 2011 г. Пятая стадия оказалась самой короткой –

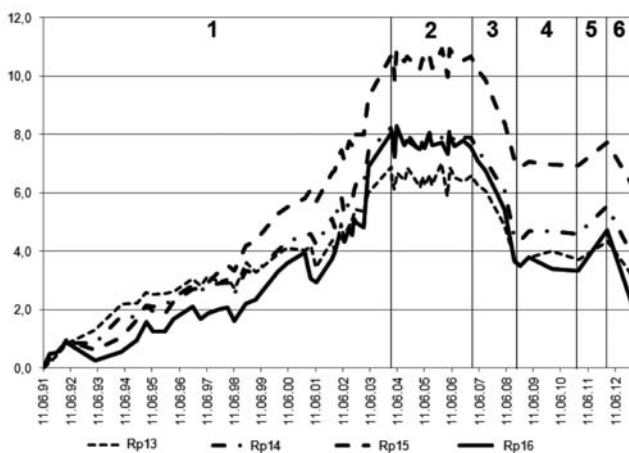


Рис. 2. Вертикальные перемещения реперов полигона гор. +252 м в пределах Саамского разлома. 1–6 стадии состояния массива

меньше года, а последующая за ней, шестая стадия – характеризуется вновь резким опусканием заполнителя.

Поднятия материала-заполнения Саамского разлома также зафиксированы и на полигоне гор. +172 м. Одновременно с этим светодальномерные измерения, проведенные в Саамском карьере в период 1996–2003 гг. и на гор. +252 м выявили очень малые (в пределах нескольких миллиметров, на пределе точности измерений) изменения расстояний между реперами в направлении вкрест простирания разлома.

Зафиксированные особенности деформирования массива пород в зоне Саамского разлома позволили выдвинуть предположение об его активности и притоке тектонической энергии непосредственно по телу разлома, выражающееся в зафиксированном подъеме реперов при незначительных изменениях расстояний между берегами разлома. При этом изменение режима деформирования, по-видимому, обусловлено вскрытием разлома горными работами на нижних горизонтах и прекращением доступа энергии к верхним частям разлома.

Высказанные предположения в целом согласуются с результатами анализа сейсмической активности района Саамского разлома в пределах ± 200 м от его оси (рис. 3).

Необходимо отметить, что до середины 2006 г. система наблюдений не захватывала район разлома и о процессах, происходящих в нем можно судить лишь косвенно по редким событиям, случайно оставшимся в базе данных. Начиная с середины

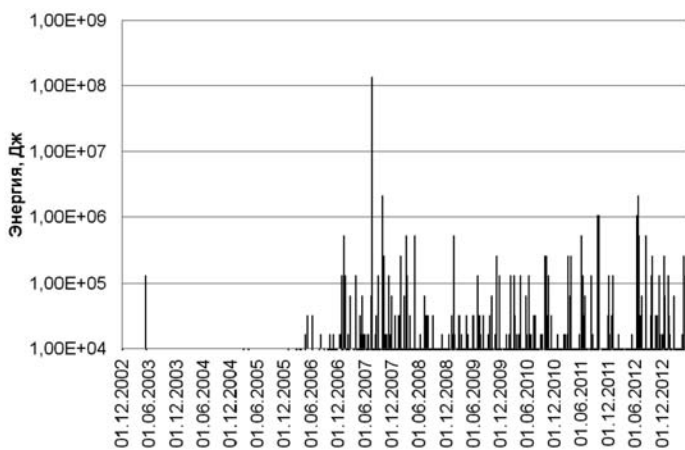


Рис. 3. Сейсмическая активность в районе Саамского разлома (± 200 м от его оси) за 2002–2012 гг.

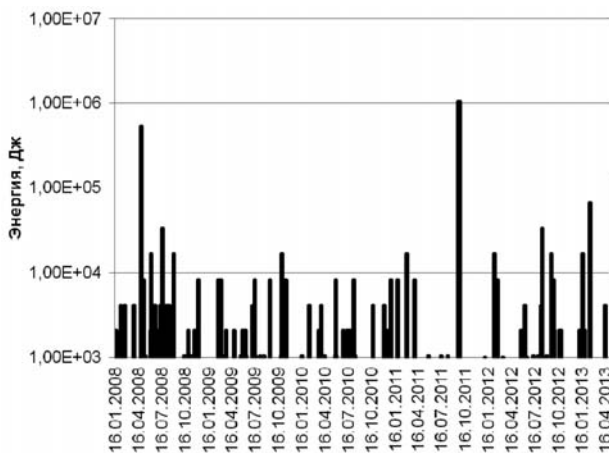


Рис. 4. Сейсмическая активность в районе Саамского разлома (± 25 м от его оси) за 2008–2013 гг.

2006 г. в зону расширенной системы сейсмических наблюдений вошел и разлом.

В целом же, по графику распределения выделившейся сейсмической энергии за период 2002–2012 гг. (рис. 2) видно, что 14.07.2007 г. в районе разлома зафиксировано максимальное ее значение ($1,34E+08$ Дж). Подготовка данного события началась, по видимому, в 2006 г. и предварялась серией форшоков. После реализации данного события последовала серия афтершоков. К 2009 г. разлом несколько снизил свою активность, а к 2011 г. она опять увеличилась и до конца 2012 г. оставалась на уровне $1,0E+05$ Дж.

Можно проследить, что происходит непосредственно в теле разлома, уменьшив размеры рассматриваемой области до ± 25 м от его оси, поскольку в районе ведения горных работ его мощность в среднем равна 50 м (рис. 4).

Как следует из данных, представленных на рис. 4, непосредственно в теле разлома фиксируются события с энергией до $1,0E+07$ Дж. Так, за период 2008–2013 гг. выделяются три пика, соответствующих событиям 27.04.2008 г. с энергией $5,24E+05$ Дж, 20.09.2011 г. с энергией $1,05E+06$ Дж и 13.05.2013 г. с энергией $1,31E+05$ Дж на общем фоне событий со энергией $1,0E+04$ Дж.

Это позволяет сделать вывод о том, что изменению состояния Саамского разлома соответствует изменение сейсмической активности, как в теле разлома, так и в зоне его влияния.

Влияние структурных неоднородностей на деформирование массива пород проявляется и в результатах наблюдений на

геодезических полигонах в карьере Центральный и в тоннеле Расвумчоррского рудника.

Геодинамическая ситуация в районе карьера Центральный отличается повышенной сложностью по сравнению с другими рудниками АО «Апатит». Это обусловлено высокой напряженностью массива пород в целом и большими объемами

изъятой и перемещенной горной массы, а также наличием развитого подземного комплекса транспортных выработок (глубокие рудоспуски и тоннели большого сечения). Ситуация осложняется также подземными работами в непосредственной близости от карьера. Эти факторы обуславливают повышенную геодинамическую активность массива пород, что выражается в периодически происходящих в районе карьера Центральный крупных динамических проявлениях горного давления.

Объектом наблюдений в карьере является крупный разлом А-А (2-ой порядок по классификации проф. М.В. Раца) в пределах западного фланга карьера, вблизи которого осуществлялись крупномасштабные работы по формированию отвала пород и одновременно проводилась отработка открытым и подземным способами в пределах стыковочной зоны между подземным рудником и карьером (рис. 5).

Одновременно решались практические задачи контроля устойчивости северо-западного борта карьера при его подработке подземными работами.

Для решения поставленных задач и оценки общей геомеханической ситуации в 1999 г. на территории карьера Центральный был заложен светодальномерный полигон, который к настоящему времени состоит из 7-ми фундаментальных пунктов, располагающихся по обе стороны наблюдаемого разлома (А-А). Светодальномерные наблюдения выполнялись в период 1999–2012 гг. Весьма показательно, что по результатам наблюдений расстояние между пунктами, находящимися в районе отвала, нормальное к разлому А-А, единственное из всех остальных, проявляет тенденцию к увеличению (с небольшим возрастанием скорости в период 30.08.06–06.10.08). Это свидетельствует о проявлении процессов растяжения (может быть и очень сильных) в теле разлома. При этом необходимо учесть, что

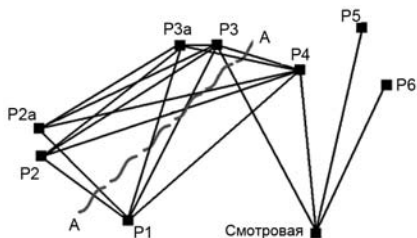


Рис. 5. Схема светодальномерного полигона в карьере Центрального рудника (ОАО «Апатит»)

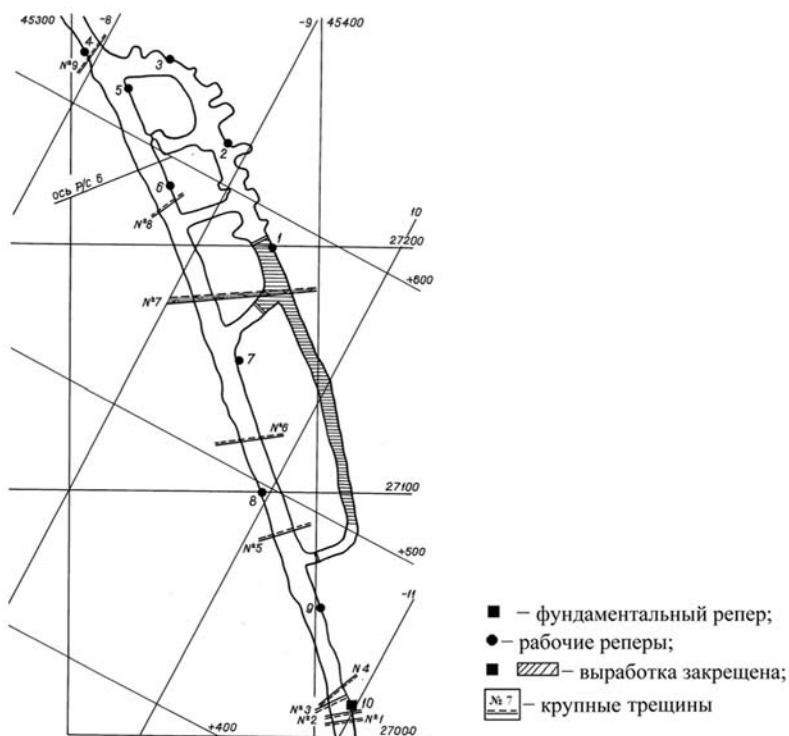


Рис. 6. План наблюдательного полигона (тоннель, район 6-го рудоспуска, Центральный рудник ОАО «Анатит»)

выход разлома на поверхность (или под поверхность) был сильно пригружен отвалом пород, который формировался здесь в течение многих лет. В то же время незначительные знакопеременные изменения расстояния между пунктами, находящимися у выхода разлома на поверхность (тоже нормальное к разлому А-А) показывают, что на этом участке разлом А-А либо уже отсутствует, либо не проявляет заметной активности.

По остальным направлениям наблюдалось устойчивое сжатие массива пород в квазилинейном режиме, что совпадает с общим направлением действия максимальных тектонических напряжений в массиве. Расстояния между пунктами устойчиво уменьшаются от цикла к циклу практически с постоянной скоростью, без видимых признаков затухания.

Поскольку, в принципе, для получения более полной картины о развитии геомеханических процессов в массивах пород, сеть наблюдаемых пунктов должна включать как полигоны на

дневной поверхности, так и полигоны непосредственно в подземном пространстве, в 2006 г. в тоннеле (под карьером Центральный) в районе 6-го рудоспуска был оборудован измерительный полигон для выполнения высокоточных нивелирных и светодальномерных наблюдений (рис. 6).

Целью организованных наблюдений в тоннеле является прогноз возможных сильных сейсмических событий в районе глубоких рудоспусков по результатам контроля состояния массива пород, в частности, смещений крупных структурных блоков.

Дополнительной мотивацией организации полигона в тоннеле послужило техногенное землетрясение с магнитудой $M = 2,2$ (по данным КФ ГС РАН); энергией $2,15E+09$ Дж (по данным АСКСМ), которое произошло в сентябре 2004 г. в районе карьера. в результате которого основные разрушения в выработках были зафиксированы на глубине 140 м от дневной поверхности. При этом в подземных выработках данное событие проявилось в виде серии толчков, произошедших в районе рудоспуска № 6 и выброса руды в объеме $0,2 \text{ м}^3$ по южной стенке рудоспуска и ее сопряжению с кровлей к западу от субвертикальной трещины, залеченной цеолитом. Колебания поверхности при данном землетрясении ощущались жителями г. Кировск и пос. Кукисвумчорр. Данное событие сопровождалось длительной серией афтершоков.

Необходимо отметить, что и после этого геодинамическая активность данного участка массива продолжала проявляться. Так, 13 февраля 2008 г. произошел вывал породы в тоннеле, на сопряжении пути № 7 с разворотной нишей (ПК8), а 25 мая 2009 г. АСКСМ-Р ЦГМ АО «Апатит» был зарегистрирован рост сейсмической активности в районе рудоспусков карьера и крупное сейсмическое событие с энергией $5,0E+10$ Дж, отнесенное к техногенным землетрясениям. Источником этого землетрясения признана подвижка по разлому «Дразнящее эхо», а причинами — длительное техногенное воздействие во время эксплуатации месторождений «Плато Расвумчорр» и «Апатитовый цирк».

Породы данного участка представлены массивными среднекрупнозернистыми полевошпатовыми уртитамы, равномерно-трещиноватыми (6–10 трещин на 1 погонный метр), с углом падения трещин 30° . Участок пересекает мощная шпреуштейнизированная зона — структурная неоднородность № 7.

Светодальномерный полигон в районе рудоспуска № 6 пересекает все структурные блоки, образованные крупными трещинами. Светодальномерные наблюдения выполняются на пунк-

тах, расположенных в пределах прямой видимости от места установки инструмента — фундаментального пункта, который условно считается неподвижным.

Полученные результаты высокоточного нивелирования и светодальномерных измерений свидетельствуют о резком изменении состояния массива и его деформирования по разные стороны от зоны шпреуштейнизации. Также достаточно четко разделяются вертикальные перемещения контролируемого участка массива по времени — до и после сильного сейсмического события, произошедшего 25.05.09. Непосредственно после события вертикальные перемещения резко возросли (циклы 27.05.09 и 17.09.09), а затем уменьшились до значений, характерных для периода времени до сейсмического события. Последние 6 циклов наблюдалось незначительное поднятие реперов.

В отношении светодальномерных измерений расстояний различия в перемещениях реперов, расположенных по разные стороны от структуры № 7, проявляются менее отчетливо. Можно лишь говорить, что расстояние до самого дальнего репера в течение всего периода наблюдений постепенно увеличивается, т.е. он отдаляется от исходного фундаментального пункта, а изменения расстояний до других реперов имеют знакопеременный характер и существенно меньше по своей величине. При этом наименьшие колебания проявляются у репера, расположенного перед структурой № 7.

Результаты геодезических измерений были детально обработаны для разделения перемещений реперов, обусловленных подвижками самих структурных блоков, и перемещений, вызванных их деформированием, а также для оценки изменений степени напряженности выделенных структурных блоков.

Все данные о деформациях, вращениях и, особенно, об изменении дополнительной энергии свидетельствуют о том, что блок ближайший к зоне шпреуштейнизации данного полигона является наиболее подвижным относительно других блоков, и он в наибольшей степени реагирует на все изменения напряженно-деформированного состояния массива в данном районе.

Таким образом, все приведенные результаты свидетельствуют о том, что на рудниках АО «Апатит» к настоящему времени имеются, практически, все основные компоненты единой системы мониторинга, но они пока действуют в известной степени обособлено и первоочередной задачей дальнейших работ должно стать их объединение как методически, так и организационно.

При этом необходимо выполнять и дальнейшее совершенствование самих компонентов системы.

В частности, при разработке математических моделей необходимо с большей детальностью учитывать граничные условия и степень неоднородности рассматриваемых участков массива, а анализ получаемых данных выполнять с учетом различных схем разрушений горных пород.

Основой разрабатываемых математических моделей должны стать результаты геомеханического районирования массива по результатам натурных деформационных измерений и определения параметров полей напряжений, при этом особое внимание необходимо обращать на оценку степени активности структурных неоднородностей.

Совершенствование методов фиксации разрушений в массиве, т.е. сейсмической системы контроля, должно быть направлено на повышение информативности получаемых результатов, на разработку методики определения соответствия наблюдаемых разрушений — очагов сейсмических явлений конкретным рангам структурных неоднородностей, а также на методы определения пороговых значений энергии разрушения для них.

В результате выполнения указанных работ может быть обеспечено поступательное решение проблемы создания общей геомеханической модели месторождений и геомеханического мониторинга с целью обеспечения безопасности горных работ в условиях постоянно усложняющихся горно-геологических и горнотехнических условиях разработки апатит-нефелиновых месторождений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Savchenko S., Kasparyan E.* The theoretical principles in geomechanical monitoring data processing for a block medium. Proceeding of the International Geomechanics Conference 11–15 June 2007, Nessebar, Bulgaria. V-1 – V-8.
2. *Савченко С. Н.* Особенности напряженного состояния блочных массивов пород с учетом размеров неоднородностей. Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Т. 1. — Новосибирск, 2011. — С. 245–250.
3. *Козырев А. А., Каган М. М., Константинов К. Н., Жиров Д. В.* Изменения деформаций и наклонов геоструктурного блока в процессе подготовки и реализации техногенного землетрясения // Записки горного института. — 2012. — т. 199. — С. 230–235.
4. *Кашников Ю. А., Ашихмин С. Г., Букин В. Г., Гришко С. В., Гетманов И. В., Одинцов С. Л., Горбатиков А. В.* Деформационные предвестники техногенных землетрясений при разработке месторождений углеводородов // ФТПРПИ. — 2011. — № 4. — С. 40–49.

5. Горбунов Г. И., Бельков И. В., Макиевский С. И. и др. Минеральные месторождения Кольского полуострова. — Л.: Наука, 1981. — 272 с.

6. Онохин Ф. М. Особенности структуры Хибинского массива и апатито-нефелиновых месторождений. — Л.: Наука, 1975. — 106 с.

7. Турчанинов И. А., Волярович М. П., Бондаренко А. Т., Ковалева Г. А., Медведев Р. В., Томашевская И. С., Тюремнов В. А. Атлас физических свойств минералов и пород Хибинских месторождений. — Л.: Наука, 1975. — 71 с.

8. Турчанинов И. А., Марков Г. А., Иванов В. И., Козырев А. А. Тектонические напряжения и устойчивость горных выработок. — Л.: Наука, 1978. — 256 с.

9. Марков Г. А. Тектонические напряжения и горное давление в рудниках Хибинского массива. — Л.: Наука, 1977. — 213 с.

10. Опарин В. Н. и др. Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия / Отв. ред. Н. Н. Мельников. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. — 632 с. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Козырев Анатолий Александрович*¹ — доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе, e-mail: kozar@goi.kolasc.net.ru,

*Каспарьян Эдуард Варужанович*¹ — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: kasp@goi.kolasc.net.ru,

*Федотова Юлия Викторовна*¹ — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: fjulia@mail.ru,

¹ Горный институт Кольского научного центра РАН.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2016. No. 4, pp. 168–191.

UDC 622.271

A.A. Kozyrev, E.V. Kaspar'yan, Yu.V. Fedotova

CONCEPT OF A UNIQUE COMPLEX GEOMECHANICAL MONITORING SYSTEM WHEN MINING IN HARD ROCK MASSIFS

The authors have formulated general principles of organization of a typical unique complex geomechanical monitoring system under conditions of hard hierarchically-blocked rock massifs at gravity-tectonic field of natural stress state. It has been shown that a principal task for geomechanical monitoring is studying of mining-engineering "facility-rock massif" systems state and fixation of its spatial and time changes. At that, the main final purpose is to design a general geomechanical model for the natural-engineering system under study which could be used for solving different geomechanical tasks. The authors have defined working stages implementation of which is obligatory when creating the unique geomechanical monitoring system.

As an example, a geomechanical monitoring system installed in JSC Apatit mines was observed and trends in its further improvement were marked.

Key words: geomechanical monitoring, geomechanical model, geomechanics.

AUTHORS

Kozyrev A.A.¹, Doctor of Technical Sciences, Professor,
Deputy Director, e-mail: kozar@goi.kolasc.net.ru,
Kasparyan E.V.¹, Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher,
e-mail: kasp@goi.kolasc.net.ru,
Fedotova Yu.V.¹, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,
e-mail: fjulia@mail.ru,
¹ Mining Institute of Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences,
184209, Apatity, Russia.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was supported by the Russian Science Foundation, in priority area of activities «Fundamental Research and Prediscovery Undertaken by Individual Teams of Scientists,» Grant No. 14-17-00751.

REFERENCES

1. Savchenko S., Kasparyan E. The theoretical principles in geomechanical monitoring data processing for a block medium. *Proceeding of the International Geomechanics Conference* 11–15 June 2007, Nessebar, Bulgaria. V-1 – V-8.
2. Savchenko S. N. *Osobennosti napryazhennogo sostoyaniya blochnykh massivov porod s uchetom razmerov neodnorodnostey. Geodinamika i napryazhennoe sostoyanie nedr Zemli*. T. 1. (Particularities in stress state of blocked rock massifs with accounting dimensions of heterogeneities. Geodynamics and the Earth's subsoil stress state, vol. 1), Novosibirsk, 2011, pp. 245–250.
3. Kozyrev A. A., Kagan M. M., Konstantinov K. N., Zhironov D. V. *Zapiski gornogo instituta*. 2012. т. 199, pp. 230–235.
4. Kashnikov Yu. A., Ashikhmin S. G., Bukin V. G., Grishko S. V., Getmanov I. V., Odintsov S. L., Gorbaticov A. V. *Fiziko-tehnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2011, no 4, pp. 40–49.
5. Gorbunov G. I., Bel'kov I. V., Makievskiy S. I. *Mineral'nye mestorozhdeniya Kol'skogo poluostrova* (The Kola Peninsula mineral deposits), Leningrad, Nauka, 1981, 272 p.
6. Onokhin F. M. *Osobennosti struktury Khibinskogo massiva i apatito-nefelinovykh mestorozhdeniy* (Particularities of the Khibiny rock massif structure and apatite-nepheline deposits), Leningrad, Nauka, 1975, 106 p.
7. Turchaninov I. A., Volarovich M. P., Bondarenko A. T., Kovaleva G. A., Medvedev R. V., Tomashevskaya I. S., Tyuremnov V. A. *Atlas fizicheskikh svoystv mineralov i porod Khibinskikh mestorozhdeniy* (Atlas of physical characteristics of the Khibiny minerals and rocks), Leningrad, Nauka, 1975, 71 p.
8. Турчанинов И. А., Марков Г. А., Иванов В. И., Козырев А. А. *Tektonicheskie napryazheniya i ustoychivost' gornykh vyrabotok* (Tectonic stresses and mining excavation stability), Leningrad, Nauka, 1978, 256 p.
9. Markov G. A. *Tektonicheskie napryazheniya i gornoe davlenie v rudnikakh Khibinskogo massiva* (Tectonic stresses and rock pressure in the Khibiny mines), Leningrad, Nauka, 1977, 213 p.
10. Oparin V. N. *Destruktsiya zemnoy kory i protsessy samoorganizatsii v oblastiakh sil'nogo tekhnogennogo vozdeystviya*. Pod red. N. N. Mel'nikova (Destruction of the Earth's crust and self-organization processes in high mining-induced impact areas, Mel'nikov N. N. (Ed.)), Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2012, 632 p.

