

УДК 622.83

Сашурин Анатолий Дмитриевич

доктор технических наук, профессор,
научный руководитель
направления геомеханики,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: sashour@igd.uran.ru

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ, ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИХ РАЗВИТИЯ*

Аннотация:

Рассмотрено развитие научных представлений о геомеханических процессах и явлениях, происходящих при недропользовании, влияние их на устойчивость и безопасность объектов минерально-сырьевого, энергетического комплексов и городской инфраструктуры. Показано, что среди геомеханических процессов, определяющих устойчивость, надежность и безопасность объектов недропользования ведущая роль принадлежит деформационным процессам, возникающим в массиве горных пород под воздействием двух его фундаментальных свойств – иерархически блочной структуры и постоянной подвижности. Исходные представления об условиях недропользования первоначально основывались на известной гипотезе конца XIX века А.Гейма. В соответствии с ней массив горных пород рассматривался в виде сплошной однородной, проявляющей во времени пластические свойства среды, обладающей собственным весом (гравитацией), под воздействием которого в нем формируется однородное гидростатическое напряженно-деформированное состояние. В последующем эта гипотеза дополнялась и совершенствовалась за счет придания массиву горных пород упругих свойств, неоднородности прочностных и деформационных свойств и иерархически блочной структуры слагающих пород, выявления тектонических сил. Все это приближало теоретические представления к реальной действительности, но при этом массив горных пород оставался неподвижным, нарушение равновесия и деформационные процессы в нем происходили лишь в областях влияния объектов недропользования – горных разработок, гидротехнических сооружений и другой масштабной техногенной деятельности. При этом причины многих катастрофических событий не находили исчерпывающего объяснения. Наконец, в конце XX века, с внедрением в практику геомеханических исследований технологий спутниковой геодезии была установлена постоянная подвижность массива горных пород как его фундаментальное свойство, определяющее его естественную форму существования. В сочетании с иерархически блочной структурой постоянная подвижность формирует реальные дискретные, мозаичные, переменные во времени поля напряженно-деформированного состояния, особенности которых рассмотрены в работе.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, массив горных пород, иерархическая блочность, вторичное структурирование, дискретность, мозаичность

DOI: 10.25635/2313-1586.2018.03.021

Sashurin Anatoly D.

Doctor of Engineering, prof.,
Scientific Head of geomechanics,
Institute of Mining UB RAS,
620075, Ekaterinburg,
Mamina-Sibiryaka street, 58
e-mail: sashour@igd.uran.ru

GEOMECHANICAL PROCESSES AND PHENOMENA DETERMINING THE SAFETY AND EFFICACY OF SUBSOIL USE, REGULARITIES OF THEIR DEVELOPMENT

Abstract:

The development of scientific concepts of geomechanical processes and phenomena occurring while the subsoil use, their impact on the stability and safety of the mineral resource and energy complexes, and the urban infrastructure. It is shown that among the geomechanical processes that determine the stability, reliability and safety of the objects of subsoil use, the leading role belongs to the deformation processes that arise in the rock mass under the influence of its two fundamental properties – hierarchically block structure and constant mobility. The initial ideas about the conditions of subsoil use were based on the well-known hypothesis of the late XIX century by Geim. In accordance with it, the rock mass was considered as a continuous homogeneous, showing in time the plastic properties of the medium, which has its own weight (gravity), under the influence of which a homogeneous hydrostatic stress-strain state is formed in it. Subsequently, this hypothesis was supplemented and improved by giving the rock mass elastic properties, heterogeneity of strength and deformation properties and hierarchically block structure of the constituent rocks, and by identifying tectonic forces. All this brought theoretical concepts closer to reality, but the rock mass remained motionless, the imbalance and deformation processes in it occurred only in the areas of influence of subsoil objects – mining, hydraulic structures and other large-scale technological activities. At the same time, the causes of many catastrophic events were not comprehensively explained. Finally, at the end of the XX century, with the introduction into practice of geomechanical research techniques of satellite geodesy was established constant mobility of rock mass as its fundamental property that determines its natural form of existence. In combination with the hierarchically block structure, the constant mobility forms real discrete, mosaic, time variable fields of the stress-strain state, the features of which are considered in the work.

Key words: stress-strain state, rock mass, hierarchical blockage, secondary structuring, discreteness, mosaic

* Работа выполнена в рамках Государственного заказа по проекту № 0405-2018 -0003

Введение

Недропользование, объединяющее в свое понятие всю техногенную деятельность, проводимую в массиве горных пород в подземных условиях и на земной поверхности и использующую горные породы как неотъемлемый конструктивный элемент, относится к наиболее опасным сферам экономики. В России, у которой в силу исторически сложившихся условий на ближайшие несколько десятилетий приоритеты экономики будут связаны с минерально-сырьевым комплексом, интенсивным строительством и другими видами деятельности в области недропользования, проблема обеспечения безопасности объектов, обеспечивающих эту деятельность, приобретает особую актуальность [1]. В последние десятилетия только на угольных шахтах Кузбасса произошло 13 аварий с выбросом газа, унесших жизни 262 шахтеров [2]. Масштабы проблемы станут понятны, если к ним добавить катастрофы на шахтах российского Восточного Донбасса, Воркуты, Урала, а также затопление соляного калийного рудника под городом Березняки, затопление алмазного рудника «Мир» АК «Алроса», сопровождавшееся гибелью шахтеров, и ряд других.

Наряду с авариями и катастрофами на объектах недропользования минерально-сырьевого комплекса, где просматривается прямая взаимосвязь аварий с геомеханическими процессами, во многих сферах недропользования она не столь очевидна. Так, при более внимательном рассмотрении геомеханические истоки аварий и катастроф со всей очевидностью проявляются на гидротехнических объектах [3], на магистральных газонефтепроводах [4], на транспортных объектах [5] и на многих других промышленных и социальных сооружениях.

При рассмотрении причин возникновения аварий и катастроф на объектах недропользования традиционно принимаются во внимание изношенность, низкое качество строительства, ошибки проектирования и нарушения регламента эксплуатации. Естественно, что во всех случаях они в той или иной форме присутствуют, не играя определяющей роли, но это дает основание оставлять без внимания скрытые, глубинные причины природного характера. В действительности истоками катастрофических событий является несоответствие геомеханических условий, принимаемых при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов недропользования, реальным процессам и явлениям, происходящим в массиве горных пород и на земной поверхности. Среди них ведущая роль принадлежит деформациям, возникающим под воздействием современных геодинамических движений.

Исходные представления о процессах и явлениях, протекающих в массиве горных пород при горных разработках и других видах недропользования, первоначально основывались на известной гипотезе конца XIX века А. Гейма. В соответствии с ней массив горных пород рассматривался в виде сплошной однородной, проявляющей во времени пластические свойства среды, обладающей собственным весом (гравитацией), под воздействием которого в нем формируется однородное гидростатическое напряженно-деформированное состояние. В последующем эта гипотеза дополнялась и совершенствовалась за счет придания массиву горных пород упругих свойств, неоднородности прочностных и деформационных свойств и иерархически блочной структуры слагающих пород, выявления тектонических сил. Все это приближало теоретические представления к реальной действительности, но при этом массив горных пород оставался неподвижным, напряженно-деформированное состояние его в период эксплуатации объектов недропользования оставалось неизменным. При этом причины многих катастрофических событий не находили исчерпывающего объяснения.

Коренной пересмотр традиционных взглядов на массив горных пород как на статическую среду произошел в конце XX века, когда многочисленные экспериментальные

исследования на геодинамических полигонах выявили интенсивные современные геодинамические движения земной коры, в том числе в асейсмичных регионах [6]. Применение дифференциальных технологий спутниковой геодезии позволило экспериментально определить их параметры и выйти на создание технологий их диагностики и прогнозные оценки воздействия на объекты недропользования [7, 8].

Таким образом, к настоящему времени экспериментально установлено, что горный массив, имеющий иерархически блочную структуру, под воздействием современных геодинамических движений с широким спектром частот и амплитуд находится в постоянном движении и претерпевает сложные структурные преобразования, формирующие дискретную мозаичную структуру полей напряженно-деформированного состояния. Практика свидетельствует, что наибольшей опасности подвергаются объекты, находящиеся в граничных зонах формирующихся структур, где за счет межблочных подвижек напряжения и деформации в несколько раз выше, чем внутри сформировавшихся блоков.

К сожалению, в законодательных и нормативных документах, регламентирующих проектирование объектов недропользования, кроме свода правил СП 11-104-97 «Инженерно-геодезические изыскания для строительства», проведение исследований современных геодинамических движений не предусматривается [9]. Однако на практике и этот норматив не соблюдается из-за слабой проработанности методов их исследования.

1 Методы исследования

Геомеханические процессы, происходящие в массиве горных пород, являются многофакторными явлениями, исследования которых требуют комплексного подхода, включающего полевые экспериментальные работы по изучению современных геодинамических движений с использованием технологий спутниковой геодезии, изучение структуры массива горных пород и закономерностей вторичного структурирования с использованием геофизических методов и теоретические исследования по прогнозной оценке воздействия геомеханических процессов на объекты недропользования.

1.1 Определение современных геодинамических движений

Современные геодинамические движения определяются путем повторного определения координат пунктов государственной геодезической сети, заложенных в разные годы, методами спутниковой геодезии GPS. Для этих целей используются пункты триангуляции 1 – 3 классов. Современные геодинамические движения представляют собой изменения пространственных координат геодезических пунктов в промежутках между повторными циклами высокоточных наблюдений. На начальном этапе измеряются изменения за промежуток времени с их оборудования до периода проведения полевых наблюдений вначале мониторинга. По полученным разностям пространственных координат отстраиваются полные векторы смещений пунктов, отражающие произошедшие за этот период движения земной коры и вызванные ими деформации. Векторы смещений позволяют далее расчетным путем определить параметры деформаций.

Спутниковые измерения производятся с использованием двухчастотных приемников фирмы Trimble Navigation (4000 SSE, 5800) и фирмы Carl Zeiss (GePoS RD 24), позволяющих получать координаты точек с точностью от нескольких миллиметров до 1 – 2 см в зависимости от базы измерений.

Обеспечение высокой точности измерений достигается также за счет планирования времени спутниковых измерений с помощью фирменных программ планирования, позволяющих учитывать количество видимых спутников, маску их угла возвышения, расположение спутников. Измерения проводятся в режимах статики и быстрой статики с эпохой накопления данных 2 секунды способом непосредственных измерений, когда одновременно работают приемники на пунктах, ограничивающих каждую сторону сети.

Обработка полевых спутниковых наблюдений производится программным обеспечением фирмы Trimble, позволяющим осуществлять полный цикл обработки данных

от загрузки файлов измерений до уравнивания сети с оценкой точности. Для оценки качества выполненных измерений используются статистические показатели индивидуальных векторов, а также вычисление невязки путем суммирования векторов по заданному периметру с помощью программного модуля вычисления невязок. Контрольной процедурой для созданной сети является свободное уравнивание (т.е. уравнивание с минимальным наложением условий), позволяющее выявить ошибочные базовые линии. Полученные векторы смещений геодезических пунктов с помощью математического аппарата механики сплошной среды переводятся в поля деформаций в виде изолиний значений главных горизонтальных деформаций и напряжений растяжения или сжатия и наклонов (кренгов), т.е. тех параметров, которые характеризуют влияние деформационных процессов на объекты недропользования.

1.2 Определение структуры массива горных пород

Изучение структуры массива горных пород на участке природопользования производится в два этапа. На первом этапе оценивается укрупненное тектоническое строение на основе фондовых геологических материалов или с использованием аэросъемки, космических снимков.

Второй этап направлен на детализацию строения массива горных пород, точное определение положения тектонических нарушений, их размеров, состояния слагающих пород. Для этой цели используются геофизические методы: электроразведка в вариантах вертикального зондирования и срединного градиента; спектральное сейсмопрофилирование; георадарное зондирование. Применение комплекса геофизических методов для изучения структуры массива горных пород позволяет получить информацию о строении массива от земной поверхности до глубин 100–150 м.

2 Экспериментальные объекты

Исследования деформационных процессов проводились на многих горных предприятиях Урала (шахта Северопесчанская Богословского РУ; шахты Южная, Магнетитовая и Эксплуатационная Высокогорского ГОКа; шахта Сидеритовая Бакальского РУ), Казахстана (шахты Молодежная и ДНК Донского ГОКа; шахта Соколовская и Качарский карьер ССГПО), Западной и Восточной Сибири (нефтедобывающие предприятия в районах городов Сургут, Кагалым, Нягань; Коршуновский ГОК), Юго-Восточной Якутии (Эльгинское угольное месторождение) и других. Наиболее полные экспериментальные исследования по продолжительности мониторинга деформационных процессов, охвату территории, подвергающейся воздействию горных разработок, развитию горных работ за время исследований, применяемым методам исследования и другим факторам проведены на шахте Магнетитовой Высокогорского ГОКа, используемой в качестве экспериментального объекта.

Район залегания Высокогорского железорудного месторождения представляет собой сложный комплекс техногенного ландшафта, созданного почти трехвековой добычей открытым и подземным способами (рис. 1).

Основные техногенные объекты месторождения, участвующие в формировании напряженно-деформированного состояния массива горных пород непосредственно Высокогорского месторождения, занимают территорию площадью около 200 га. В Южной части этого комплекса находится отработанный Медноруднянский карьер площадью около 24 га и глубиной 80 м. С запада к нему вплотную подходит отработанный Главный карьер, имеющий площадь около 110 га и глубину 275 м. В настоящее время выработанное пространство Главного карьера используется для складирования отходов флотации. На северном фланге Главный карьер соединен с зоной обрушения от подземных разработок шахты Магнетитовой, общая площадь которой составляет около 65 га.

Таким образом, сложившийся комплекс техногенного воздействия добычи и переработки полезных ископаемых создает обширную область влияния в массиве горных

пород и на земной поверхности с разнообразными участками по условиям формирования напряженно-деформированного состояния, обеспечивающую благоприятные условия для исследования геомеханических процессов и явлений, сопровождающих разработку месторождения на глубины свыше 700 м.



Рис. 1 – Схема размещения горнодобывающих объектов в районе Высокогорского железорудного месторождения:

- 1 - Высокогорское месторождение; 2 - Лебяжинский рудник; 3 - Естюнинская шахта;
- 4 - Гальяновский карьер; 5 - шлаковые отвалы; 6 - Тимано-Кокчетавская тектоническая зона;
- 7 - Турьинский разлом; 8 - Сбросо-сдвиг Главный

Геологическое строение Высокогорского месторождения очень сложное. Месторождение включает целый ряд рудных комплексов, в которых выделяются два пояса оруденения Западный и Восточный, отличающиеся по условиям залегания и формам рудных тел. Простираение обоих рудных поясов северо-западное под углом $45 - 75^{\circ}$. Рудные тела залегают согласно с вмещающими их породами рудно-скарновых зон (рис. 2).

Восточный рудный пояс протягивается через все Высокогорское месторождение на расстояние 1,5 км. Мощность его колеблется от 100 до 160 м. По территориальному признаку он разделен крупными тектоническими нарушениями на Восточно-Ревдинский и Западно-Ревдинский участки. Вся рудоносная зона представляет собой серию рудных тел с углами падения $55 - 70^{\circ}$. Пострудная дизъюнктивная тектоника разбивает рудные тела на тектонические блоки с амплитудами смещения от нескольких метров до 150 – 200 м относительно друг друга как по простиранию, так и по падению. Каждый блок, в свою очередь, разбит более мелкими дизъюнктивными нарушениями, благодаря чему создается блоковое строение рудных залежей.

В целом в формировании месторождения принимали участие дорудные, синрудные и пострудные тектонические процессы, нарушения от которых по своей значимости разбиваются на I, II и III порядки и обозначаются, соответственно, собственными именами, буквами русского алфавита и арабскими цифрами.

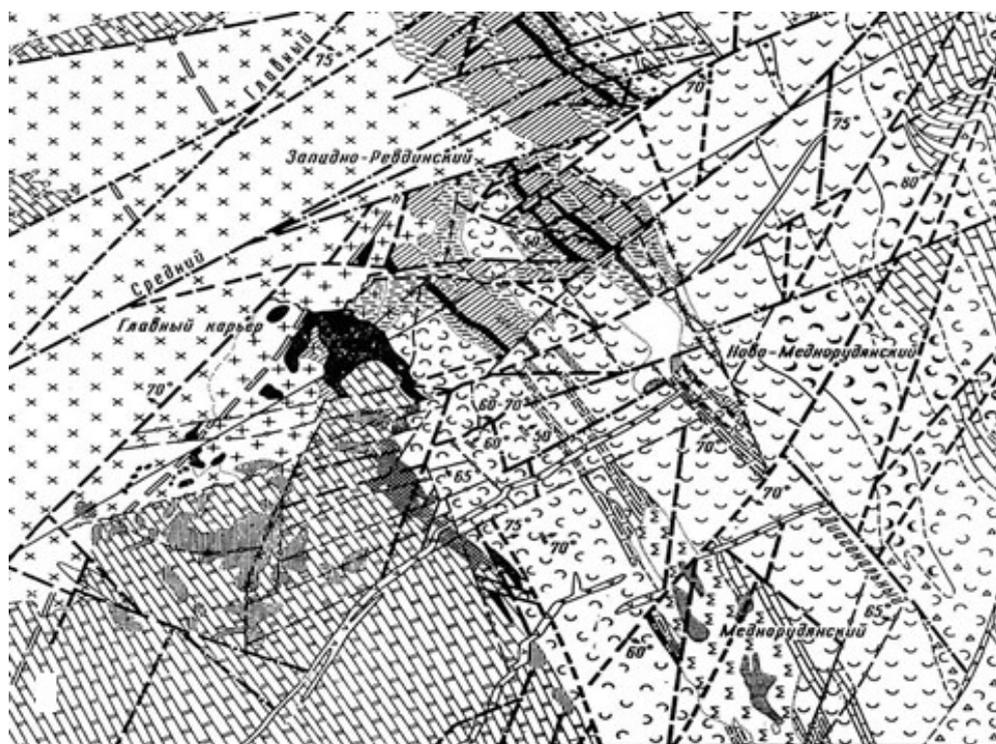


Рис. 2 – Схема геологического строения Высокогорского железорудного месторождения

Месторождение разбивается тектоническими нарушениями I порядка за счет происшедших по ним смещениям с вертикальными амплитудами до 150 м и горизонтальными до 300 м на три крупных тектонических блока. Перемещения крупных тектонических блоков хорошо видны на рис. 2. В подземных горных выработках тектонические нарушения II порядка наблюдаются в виде трещин мощностью несколько сантиметров, выполненных глиной трения. Иногда они сопровождаются зонами раздробленных, сильно расланцованных или перемятых пород мощностью до 13 м.

Таким образом, структура массива горных пород соответствует классическому понятию иерархически блочной среды, модель которой принята в проводимых исследованиях, рассмотренных в данной работе [10, 11].

3 Результаты исследований

Результаты мониторинга геодинамических движений на геодинамическом полигоне, охватывающем непосредственный район разработки Высокогорского месторождения, за период 2006 – 2008 гг. представлены на рис. 3 в виде векторов смещений геодезических пунктов за каждый год. Как видно из рисунка, смещения всех геодезических пунктов, используемых в геодинамическом полигоне, ежегодно изменяли свою направленность и величины, что свидетельствует об изменчивости напряженно-деформированного состояния. Оценка изменений поля напряженно-деформированного состояния массива горных пород в границах геодинамического полигона осуществлялась на компьютерной модели, использующей математический аппарат теории упругости, в которой в качестве граничных условий задавались полученные экспериментальные смещения. В связи с многокомпонентностью тензора напряженного состояния, параметры которого в каждой точке характеризуются двумя величинами главных напряжений и их направлениями, анализ закономерностей формирования и развития поля напряженно-деформированного состояния весьма проблематичен. Поэтому в качестве показателя, отражающего изменения напряженного состояния, принят первый инвариант тензора напряжений,

представляющий собой сумму главных напряжений. Этот показатель позволяет выделить в поле напряжений зоны с однородным характером изменений напряженного состояния. Зоны, в которых первый инвариант отрицательный, соответствуют возрастанию сжатия и, наоборот, в зонах с положительным инвариантом идет снижение сжатия и могут возникнуть растягивающие напряжения. Распределение зон растяжения и сжатия по территории техногенного влияния горных работ, проводимых на Высокогорском месторождении по годам в период 2006 – 2009 гг., приведено на рис. 4 – 6.

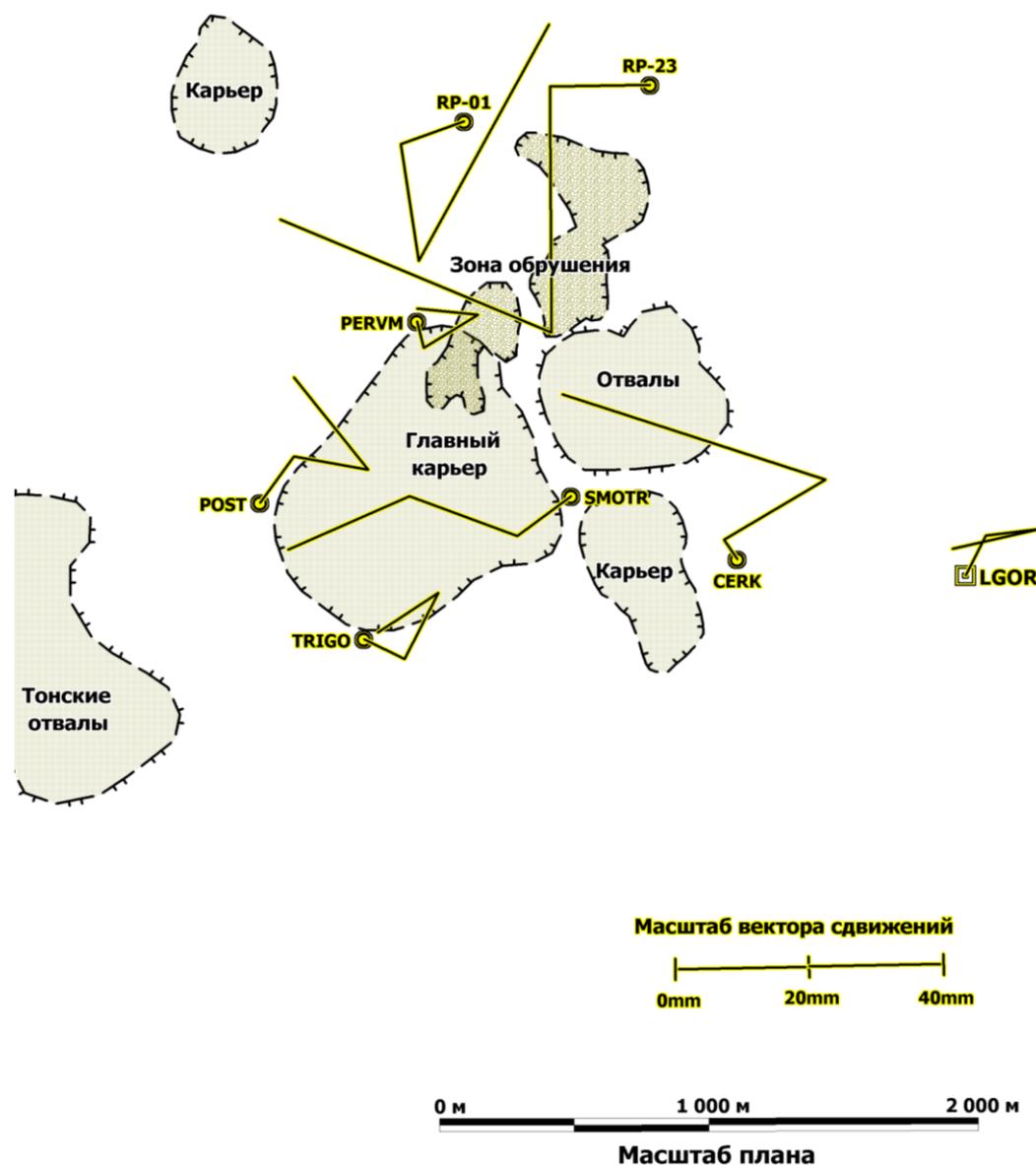


Рис. 3 – Схема геодинамического полигона Высокогорского месторождения и траектории геодинамических смещений за период 2006 – 2009 гг.

В период 2006 – 2007 гг. (см. рис. 4) зона сжатия занимала центральную часть территории в области влияния разрабатываемого Высокогорского месторождения. Зоны растяжения формировались с западного и восточного флангов и были вытянуты в меридиональном направлении. В 2007 – 2008 гг. (см. рис. 5) зона сжатия укорачивается в меридиональном направлении, сохраняясь в центральной части. Активно развивается западная зона растяжений, в которой сформировались два обособленных участка концентрации напряжений. Восточная зона растяжения сокращается по площади, но в ней возрастают величины напряжений.

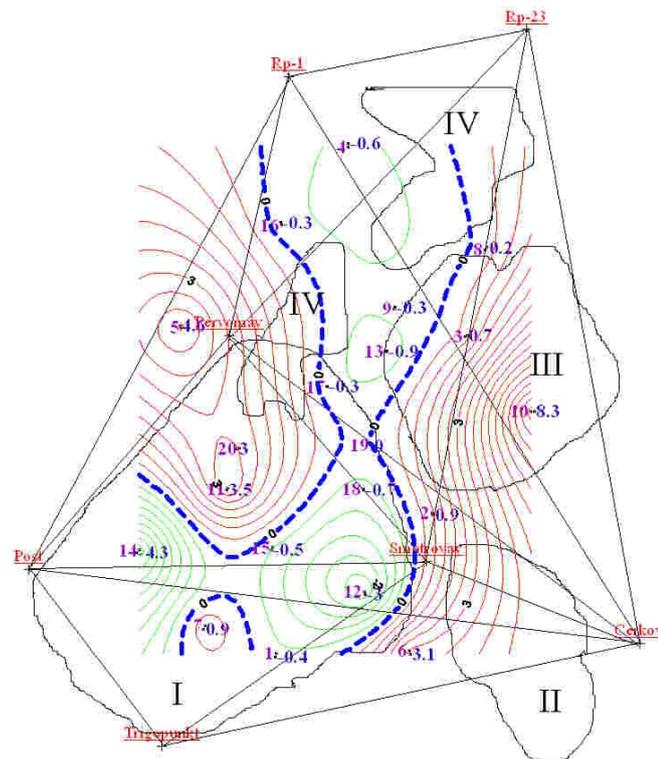


Рис. 4 – Схема распределения параметров первого инварианта приращения напряженного состояния в массиве горных пород за период 2006 – 2007 гг. (усл. обозначения см. рис. 6)

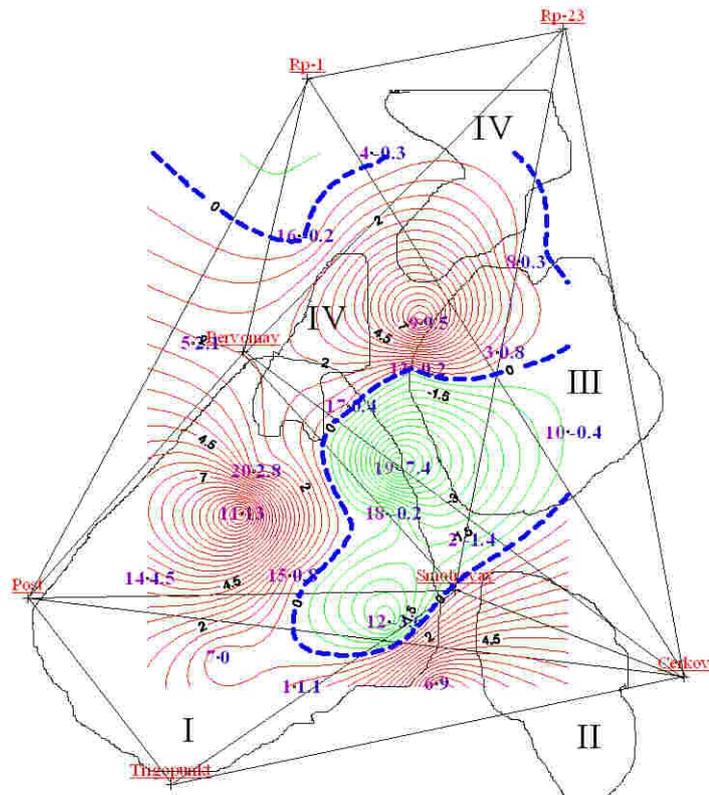


Рис. 5 – Схема распределения параметров первого инварианта приращения напряженного состояния в массиве горных пород за период 2007 – 2008 гг. (усл. обозначения см. рис. 6)

- изменения напряженного состояния неоднородны по площади и сопровождаются формированием мозаичной дискретной структуры поля напряжений;
- мозаичность и дискретность структуры напряженно-деформированного состояния приводит к образованию зон концентрации напряжений и деформаций и депрессионных зон, где напряжения стремятся к нулю. В проведенных исследованиях амплитуда изменений величины первого инварианта тензора напряжений составляет от -18 МПа сжатия до +13 МПа растяжения.

5 Выводы

Таким образом, основным процессом, определяющим безопасность и эффективность недропользования, являются деформации, происходящие в массиве горных пород и на земной поверхности под воздействием современных геодинамических движений и техногенной деятельности. Ведущую роль деформационных процессов в начале прошлого XX века отмечал один из отечественных основоположников геомеханики И.М. Бахурин, отождествляя деформации и сдвигание горных пород: «Сдвигание пород в руднике является одним из основных затруднений при добыче полезного ископаемого. Оно же является одной из основных угроз безопасному ведению горных разработок: оно ломает крепление, уменьшает полезное сечение выработок, а иногда и совершенно заваливает их. Мы не ошибемся, если скажем, что вся история горного дела, вся история изыскания наилучших систем разработок есть история борьбы со сдвижением горных пород» [12].

С позиций современного уровня познания массива горных пород спектр процессов и явлений, определяющих безопасность и эффективность недропользования, существенно расширяется. К ним относятся изменения параметров напряженно-деформированного состояния во времени; вторичное структурирование иерархически блочного массива горных пород с формированием временно консолидированных блоков; формирование мозаичной структуры поля напряженно-деформированного состояния; дискретизация поля напряженно-деформированного состояния; концентрация напряжений и деформаций на границах вторичных временно консолидированных блоков; формирование зон повышенных напряжений и деформаций и депрессионных зон. Залогом безопасного и эффективного недропользования является проектирование, строительство и эксплуатация объектов недропользования на основе приведенных процессов и явлений, происходящих в массиве горных пород.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность коллективу отдела геомеханики, исследования которого на многих горных предприятиях послужили основой данной работы.

Литература

1. О состоянии защиты населения территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2002 году: Государственный доклад // Экологический вестник России. – 2003. - № 6. - С. 19-28; № 7. - С. 20-35; № 8. - С. 21 – 33; № 9. - С. 27 - 41.
2. Коршунов Г. И. Системный кризис проблемы управления состоянием массива горных пород на угольных шахтах России / Г. И. Коршунов, Ю. В. Шувалов, В. М. Шик // Горное дело. Оборудование. Технологии: II Уральский горнопромышленный форум: 2 межрегион. спец. выставка и научно-техн. конф. Офиц. каталог: тез. докл. / УрО РАН, ИГД УрО РАН, Союз машиностроит. предприятий Свердловской обл. - Екатеринбург: Издат. Дом Филантроп, 2007. – С. 84 - 87.
- 3 Сашурин А. Д. Истоки и причины аварии на Саяно-Шушенской ГЭС: возможное развитие ситуации / А. Д. Сашурин // Гидротехническое строительство. - 2012. - № 1. - С. 37 - 43.

4. Сашурин А. Д. Диагностика и мониторинг аварийных участков трассы, проектируемых, строящихся и эксплуатируемых нефтегазопроводов / А. Д. Сашурин // Химическая техника. - 2005. - № 6. - С. 28 - 31.
5. Сашурин А. Д. Почему мост " опустил крылья" / А. Д. Сашурин // Технадзор. - 2009. - № 8. - С. 20 - 21.
6. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при недропользовании / Ю. О. Кузьмин. – М.: Агенство экологических новостей, 1999. – 220 с.
7. Панжин А. А. Об особенностях проведения геодинамического мониторинга при разработке месторождений полезных ископаемых Урала с использованием комплексов спутниковой геодезии / А. А. Панжин Н. А. Панжина // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2012. - № 6. - С. 46 - 55.
8. Коновалова Ю. П. Геодинамические аспекты выбора безопасных площадок размещения особо ответственных объектов недропользования / Ю. П. Коновалова // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2011. - № 11. - С. 133 - 138.
9. СП 11-104-97. Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Одобрен Госстроем России 14.10.97 г. № 9-4/116.
10. Садовский М. А. Естественная кусковатость горной породы / М. А. Садовский // ДАН. - 1979. - Т. 247. - № 4. – С. 829 – 831.
11. Садовский М. А. Иерархия от пылинок до планет / М. А. Садовский // Земля и Вселенная. -1984. - № 6. – С. 4 – 9.
12. Бахурин И. М. Сдвигение горных пород под влиянием горных разработок / И. М. Бахурин. – М. – Л.: Гостопиздат, 1946. – 229 с.