

УДК 622.831

**Балек Александр Евгеньевич**

доктор технических наук,  
ведущий научный сотрудник  
лаборатории геомеханики  
подземных сооружений,  
Институт горного дела УрО РАН,  
620075, г. Екатеринбург,  
Мамина-Сибиряка, 58  
e-mail: [balek@igduran.ru](mailto:balek@igduran.ru)

**УЧЕТ МОЗАИЧНОСТИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВОВ СКАЛЬНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ РЕШЕНИИ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ\****Аннотация:*

На основе анализа современных модельных представлений о природном напряженно-деформированном состоянии массива горных пород обосновано, что ключевым фактором формирования поля напряжений в породном массиве является его иерархически-блочное структурное строение. При этом главным фактором выделения структурного блока, вне зависимости от его масштабного иерархического уровня, выступает способность формирующих блок структур более мелкомасштабных иерархий реагировать на внешнее силовое воздействие как единое целое. На данной основе усовершенствована методика поэтапного построения модели геомеханического состояния системы «объект недропользования – вмещающий породный массив», предусматривающая задание граничных условий посредством суперпозиции напряжений и деформаций, получаемых путем решения упругой задачи в статической постановке на трех пространственно-временных масштабных уровнях, отражающих современные геодинамические движения трех иерархий структурных элементов горного массива:

– крупномасштабных литосферных блоков (поперечные размеры в сотни – тысячи километров), определяющих напряженно-деформированное состояние региона;

– структурных блоков рудного поля (размеры порядка сотен метров), определяющих напряженно-деформированное состояние участков месторождения;

– структурных блоков приконтурного породного массива (размеры порядка нескольких дециметров), определяющих напряженно-деформированное состояние геотехнической системы «объект недропользования – вмещающий породный массив».

Практическое применение методики представлено на примере исследований ИГД УрО РАН по геомеханическому обеспечению строительства ствола «Вентиляционный» 2-й очереди шахты «Десятилетие независимости Казахстана» Донского ГОКа (г. Хромтау, Казахстан).

*Ключевые слова:* массив горных пород, напряженно-деформированное состояние, структурное строение, иерархическая блочность, современные геодинамические движения, натурные исследования, объекты недропользования, геомеханическое обеспечение

DOI: 10.25635/2313-1586.2018.03.140

**Balek Alexander E.**

Doctor of Engineering,  
Leading Research Worker,  
Institute of Mining UB RAS,  
620075, Ekaterinburg,  
Mamina-Sibiryaka street, 58  
e-mail: [balek@igduran.ru](mailto:balek@igduran.ru)

**TAKING INTO ACCOUNT THE MOSAIC STRUCTURE OF STRESS-STRAIN STATE OF ROCK MASS DURING SOLVING THE PRACTICAL TASKS OF MINING***Abstract:*

The analysis of the contemporary models of the nature of stress-strain state have proved that the key factor in the formation of the stress field is hierarchically block structure of the rock mass. The main factor, that obtain the selection of the structural unit regardless to the hierarchical level, is the ability of smaller structures for responding to external force uniformly. On this basis the method of construction of geo-mechanical model of the system "underground working – enclosing rock mass" have been improved. The task of determining the boundary conditions by the superposition of stresses and strains, which is to be determined by the decision of the elastic problem in a static statement on three spatial and temporal scales. The levels reflect modern geodynamic movement of three hierarchies of structural rock mass elements, namely:

- large lithospheric blocks (cross-sectional dimensions are hundreds and thousands kilometers), determining stress-strained state of the region;

- structural blocks of the ore field (dimensions are about hundreds of meters), defining stress-strained state of the field sites;

- structural rock mass blocks around underground workings (the dimensions are about several decimeters), determining stress-strained state of the geotechnical system "underground working – enclosing rock mass."

The paper presents a practical example of the method in the researching work of the Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences on geo-mechanical maintenance of shaft "Ventilationny" of mine "Decade of Kazakhstan's independence" (Donskoi GOK, Khromtau, Kazakhstan).

*Keywords:* rock mass, the stress-strain state, structural composition, hierarchical block structure, contemporary geodynamic motion, in-situ research, underground workings, geomechanical maintenance

\* Работа выполнена в ходе реализации Госзадания № 007-01398-17-00, тема № 0405-2015-0012

### Введение

Основная практическая задача геомеханического обеспечения объектов недропользования сводится к адекватному отображению взаимодействия геотехнологических факторов с модельными представлениями о массиве горных пород, отражающими параметры и пространственно-временные характеристики его напряженно-деформированного состояния (НДС), связывающие между собой компоненты напряжений и деформаций, действующие в рассматриваемом горном массиве. Эти параметры, в свою очередь, увязываются с комплексом показателей, определяющих динамику ведения горных работ в процессе недропользования [1].

Так же, как и в других науках, изучающих НДС твердых тел при механических воздействиях, в геомеханике в качестве главного предмета натуральных исследований и интерпретаций объективно выступают взаимные перемещения отдельных точек (объемов) горного массива, поскольку только они являются непосредственно измеряемыми параметрами. Относительные же деформации являются параметром расчетным, поскольку определяются путем деления замеренных перемещений на расстояние между смещающимися точками.

Также исключительно расчетным путем определяются и любые внутренние силы, которые при определенных условиях возникают в нагруженной среде вследствие взаимных перемещений ее различных точек. Данные силы, именуемые напряжениями, отражают механическую связь между отдельными структурными элементами деформируемой среды. Для массива горных пород по самой своей физической природе они заведомо не могут быть однородными, поскольку возникают в местах соприкосновения между отдельными структурными элементами деформируемых породных объемов: на контактах между минеральными зернами, на плоскостях контактов между структурными блоками, тектоническими нарушениями, тектоническими плитами и т.п. В итоге неоднородность напряженно-деформированного состояния горного массива, как правило, изначально заведомо превышает степень неоднородности его структурного строения, определяясь значениями взаимных перемещений и приращениями деформаций и напряжений в пространстве и во времени.

Вместе с тем, в отличие от конструкционных и строительных материалов, масштабная неоднородность массивов горных пород обладает выраженной иерархичностью, причем в очень широком диапазоне масштабов: от наиболее крупномасштабного иерархического уровня литосферных тектонических плит до зерен и кристаллов породообразующих минералов. При взаимодействии породного массива с силовыми полями, вызванными различного рода внешними силами, масштабная неоднородность обуславливает пространственно-временную изменчивость его НДС.

Практика разработки рудных месторождений подтверждает, что для подавляющего большинства массивов скальных горных пород характерны иерархически-блочное структурное строение и наличие современной геодинамической активности [2]. Такие условия обуславливают «мозаичность» и существенную изменчивость НДС в пространстве и времени, что всегда необходимо принимать во внимание при решении практических задач недропользования и учитывать при методологических подходах в любого рода исследованиях, выполняемых при освоении недр [4, 5].

Вместе с тем следует признать, что до сих пор геомеханика не обладает такими модельными представлениями об объекте, которые бы позволили делать теоретические прогнозные заключения о количественных параметрах его напряженно-деформированного состояния на различных масштабных уровнях и, соответственно, о количественных характеристиках различных рангов полей напряжений, не говоря уж об их изменчивости в пространстве и во времени. Получить такие данные в настоящее время можно лишь путем натуральных разномасштабных инструментальных исследований непосредственно на объектах недропользования.

*Теория, материалы и методы исследования*

Основу подавляющего большинства современных методов натуральных замеров НДС горного массива составляет решение обратной геомеханической задачи по замеренным деформациям, вызванных целенаправленным перераспределением напряжений, происходящим вследствие выемки в напряженном массиве полостей с известными формой и размерами: скважин, щелей, выработок, выработанных пространств и пр. В расчетах первоначальных напряжений предполагается, что происходит упругое деформирование сплошной однородной и, как правило, изотропной среды с однородным полем первоначальных напряжений [6, 7].

При натуральных замерах крупномасштабных полей напряжений, соизмеримых с объемами месторождений и горных отводов, в качестве разгрузочных полостей используются карьеры, выработанные пространства и зоны обрушения от подземных горных работ. Проблема трудоемкости натуральных замеров смещений на больших реперных интервалах успешно решается за счет использования технологий спутниковой геодезии [8 - 12].

При этом иерархическая блочность и подвижность разномасштабных породных структур вызывают сложности, которые связаны отнюдь не с обеспечением точности замеров. Для большинства геомеханических задач 2 – 4-миллиметровой точности спутниковой геодезии более чем достаточно. Главная проблема заключается в выделении искомой трендовой составляющей из всего хаоса случайных разнонаправленных фоновых (т.е. происходящих естественным образом, а не под действием горных работ) подвижек, которые постоянно претерпевает тот конкретный структурный породный блок, на поверхности которого находится рассматриваемый реперный пункт, спутниковый приемник, лазерный дальномер, тахеометр и пр.

Другой существенной проблемой является адекватная оценка механизма деформирования породного массива, вмещающего разгрузочную полость. При решении обратной геомеханической задачи выявления НДС на больших породных объемах использование «традиционной» модели деформирования сплошной упругой изотропной среды не всегда допустимо. Нередко возникает необходимость учета подвижек крупных породных блоков по тектоническим нарушениям, что требует применения дискретной (блочной) математической модели. Решение задачи при этом существенно усложняется, поскольку возникает необходимость задания конфигурации подвижных блоков, граничных силовых условий и, самое сложное, прочностных и деформационных параметров по границам сдвигающихся породных структур.

Наглядное подтверждение вышеизложенных положений можно получить из диаграмм «напряжения – деформации», используемых геомеханиками в качестве основного показателя механического поведения образцов горных пород под нагрузкой. При этом следует рассматривать не идеализированные кривые, представляемые в многочисленных учебных пособиях, а реальные натурные данные. В качестве такого примера на рис. 1 представлены кривые «напряжения (Deviatoric Stress) – деформации (Axial Strain)», полученные при испытаниях одной из разновидностей гранита (Lac du Bonnet granite) на жестком прессе с непрерывной фиксацией измеряемых значений (или, если быть точным, с очень малым интервалом времени между замерами) [13]. Такой режим испытаний позволяет проявиться фрактальной структуре диаграммы «напряжения – деформации», поскольку механическое поведение образцов горных пород под нагрузкой так же, как и породных массивов, обладает свойствами иерархичности и самоподобия, которые являются закономерным отражением их иерархически-блочного структурного строения.

Из рис. 1 хорошо видно, что даже те отрезки кривых, поведение которых в масштабе нагружаемого образца в целом вполне обоснованно трактуется как линейно-упругое (стадия А), фактически являются сериями самоподобных объектов и состоят из скачков и спадов измеряемых напряжений, повторяющих качественную форму всей кривой,

но на более мелких масштабных уровнях. Особенно наглядно это проявляется на увеличенном фрагменте отрезка диаграммы, где прослеживаются по крайней мере два самоподобных масштабных уровня, повторяющих форму всей кривой в целом.

Данное свойство открывает принципиальную возможность для оценки прочностных и деформационных параметров больших объемов горного массива на базе математики фракталов на стадии испытаний породных образцов. Но оно же обуславливает и практическую непредсказуемость механического поведения различных объемов земной коры и массивов горных пород. В зависимости от рассматриваемого пространственного и временного масштаба деформационного процесса один и тот же участок породного массива в качестве самоподобного объекта может находиться на совершенно различных стадиях: от линейно-упругой до стадии остаточной прочности.

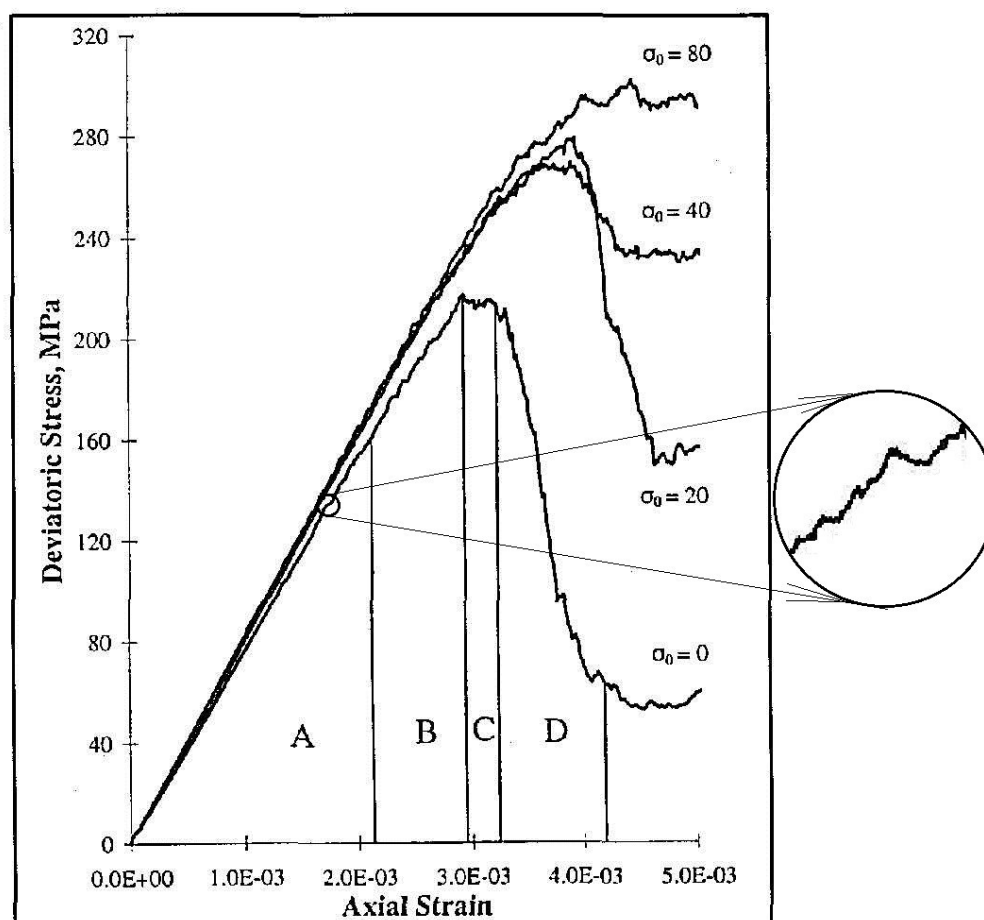


Рис. 1 – Кривые «напряжения – деформации», полученные по результатам испытаний образцов гранита при различных значениях боковой нагрузки  $\sigma_0$  (соответственно: 0, 20, 40, 80 МПа) на различных стадиях деформационного процесса, а именно: A – уплотнения и линейно-упругого деформирования, B – нелинейно-упругого; C – неупругого; D – запредельного деформирования; E – остаточной прочности

В этой связи для решения подавляющего большинства практических задач геомеханического обеспечения до сих пор в основном и используются идеализированные математические модели, в задачу которых входит отображение напряженно-деформированного состояния горного массива в виде систем уравнений, решаемых либо в аналитическом виде, либо с помощью тех или иных приближенных численных методов. Современный уровень развития вычислительной техники позволяет моделировать практиче-

ски весь комплекс деформационных процессов, происходящих в конечном объеме породного массива под воздействием горного давления, в том числе процессов дезинтеграции и взаимных подвижек его структурных блоков. Однако основная проблема заключается не в технике моделирования, а в обеспечении соответствия геомеханической модели натурным условиям реального горного массива для всего множества его иерархических структурных элементов, причем с учетом динамики развития деформируемой системы: при взаимных подвижках отдельных структурных блоков на различных этапах дезинтеграции (разрушения) рассматриваемого породного объема.

Поскольку неотъемлемым свойством массива горных пород является разномасштабная самоподобная иерархичность с очень детальной блоковой делимостью (коэффициент взаимного вложения структурных блоков составляет около 2 – 3, а фрактальная размерность – 1,8 – 1,9), то задача выявления расчетных параметров для каждого иерархического уровня оказывается чрезвычайно сложной. Предлагается решить данную проблему путем использования объективно существующей генетической связи между структурным строением и напряженным состоянием породного массива.

#### *Результаты натуральных исследований и их обсуждение*

Принимаем во внимание, что основным (помимо сил гравитации) источником природного напряженного состояния массива горных пород являются постоянные и преимущественно горизонтальные взаимные движения разномасштабных литосферных структур (плит, блоков, дислокаций и пр.), происходящие, главным образом, под действием тектонических сил. Прочие силовые факторы глобального (космического) и локального характера вносят лишь отдельные искажения в исходное поле напряжений. Породный массив при этом не является статической мозаикой однажды сформировавшихся и по-разному напряженных иерархических блочных структур. В качестве самоорганизующейся системы он пребывает в непрекращающемся процессе деформирования, дезинтеграции и повторной консолидации. На различных масштабных уровнях в нем периодически происходит перестройка структуры и адаптация полей напряжений и деформаций к новому временно устойчивому состоянию [14].

Таким образом, ключевым геомеханическим фактором, определяющим структурный блок горного массива, является способность формирующих его породных структур более мелкомасштабных иерархий реагировать на внешнее силовое воздействие как единое целое. Данное свойство горного массива и открывает возможность для решения практических задач геомеханики в статической постановке на относительно небольшом числе пространственно-временных масштабных уровней путем задания на каждом из них, в качестве граничных силовых условий, тех напряжений и деформаций, которые действуют в рассматриваемый период времени на более крупномасштабном уровне.

При проведении расчетов НДС следует учитывать особенности перехода между последовательными этапами математического моделирования, определяемыми различными масштабными уровнями. В первую очередь принимаются во внимание соответствие типов граничных задач, детализация структурного строения рассматриваемого объема горного массива и разброс его физических свойств. Так, на наиболее крупномасштабном уровне оценка НДС осуществляется на основе данных о полях напряжений и деформаций, полученных по картам сейсмического районирования региона. Для более мелких масштабов граничные условия задаются из упругих решений, определяемых предшествующим (более крупным) уровнем. Решения, получаемые для каждого этапа моделирования, в последующем корректируются с привлечением данных инструментальных измерений напряжений и деформаций на соответствующем масштабном уровне.

Наглядным примером практического применения данной методики являются многолетние научно-исследовательские работы, проводимые ИГД УрО РАН для геомеханического обеспечения подземных горных работ на шахтах Донского ГОКа: шахте

«Десятилетие независимости Казахстана» («ДНК»)(до 2001 г. – шахта «Центральная») и шахте «Молодежная» [15].

Геологические условия Донских хромитовых месторождений отличает чрезвычайно низкая устойчивость серпентинитового горного массива, которая обусловлена его разбитостью многочисленными хаотичными трещинами и разноориентированными тектоническими нарушениями на структурные блоки различных масштабно-иерархических уровней. Связи между породными блоками изначально довольно слабы, а при увлажнении, когда тальковидный милонитовый или серпофитовый заполнитель трещин становится мыльным на ощупь, они падают практически до нуля. Кроме того, на обнажениях серпентинизированные породы склонны к ускоренному выветриванию, вплоть до мелкоблочного состояния, что сопровождается дилатационным увеличением объема.

Принято считать, что в такого рода породных массивах горное давление, действующее на крепь подземных выработок и вмещающий породный массив, должно определяться исключительно собственным весом налегающей породной толщи. В массиве формируется так называемое гидростатическое НДС, при котором горизонтальные напряжения создаются только за счет бокового распора от постоянной вертикальной нагрузки, обусловленной собственным весом. В соответствии с такими представлениями на шахте максимальные напряжения нетронутого горного массива, как вертикальные, так и горизонтальные, для максимальной глубины 1290 м не должны были превышать 33 МПа.

Между тем результаты натурных исследований показали явное несоответствие поля напряжений горного массива месторождений ДонГОКа стационарному гидростатическому, что проявилось в наличии в напряженном состоянии нетронутого горного массива существенной тектонической компоненты. Очевидной причиной этого являются современные геодинамические движения, которые не только обуславливают наличие в поле первоначальных напряжений тектонической компоненты, но также, при определенных условиях, приводят иерархически блочный массив скальных горных пород в состояние непрерывной подвижности. Структурные породные блоки различных масштабных уровней постоянно смещаются относительно друг друга и, таким образом, существенно влияют как на НДС горного массива, так и на устойчивость объектов недропользования.

Несоответствие НДС горного массива месторождений ДонГОКа стационарному гидростатическому было экспериментально зафиксировано различными методами и на различных масштабных уровнях, а именно:

1) В масштабах подземных выработок (т.е. на базах деформирования от дециметров до первых десятков метров):

– по эллиптичности сечения вертикальных стволов шахты «ДНК», определенной по результатам замеров упругих смещений незакрепленных призабойных породных стенок в процессе проходки стволов;

– по эллиптичности эпюр распределения напряжений, полученных по результатам замеров напряжений в бетонной крепи стволов «Клетевой» и «Скипо-клетевой» на глубинах 297 – 610 м;

– по наличию на глубинах более 700 м «технологической» эллиптичности тубинговых колец, возникающей в процессе монтажа тубинговой крепи при проходке стволов.

2) В масштабах месторождений и шахтных полей (т.е. на базах деформирования от нескольких десятков метров до первых километров):

– по расчетной анизотропии напряженного состояния нетронутого горного массива, полученной при решении обратной геомеханической задачи при моделировании процессов очистной выемки руды и формирования зоны обрушения шахты «Молодежная» с использованием результатов натурных замеров деформаций реперных линий на земной поверхности и в подземных выработках;

– по расчетной анизотропии напряженного состояния нетронутого массива, полученной при моделировании подвижек крупномасштабных структурных блоков, параметры которой совпали с результатами натуральных замеров смещений реперных пунктов на земной поверхности шахты «ДНК»;

– по совпадению расчетных параметров анизотропии НДС с условиями формирования преобладающей направленности элементов до- и пострудной тектоники, выявленной в горном массиве обеих шахт методами геолого-морфологического анализа, а также с зафиксированными аномалиями в формировании зон обрушения.

Вследствие всего вышеперечисленного, фактически на шахте «ДНК» на глубине 1290 м максимальные напряжения нетронутого горного массива достигают не 33, а 47 МПа.

Наиболее существенным следствием наличия высоких тектонических напряжений в низкопрочном, но при этом иерархически блочном массиве хрупких скальных горных пород явилась реализация его перехода на забоях проходимых горных выработок в так называемое «запредельное» НДС. Это состояние характеризуется взаимными подвижками структурных породных блоков и объемов горного массива, определяющими внешние нагрузки на крепь выработок.

Результаты многолетних исследований ИГД УрО РАН показали, что в массиве серпентинитовых пород ДОН ГОКа на базах деформирования от дециметров до первых десятков метров переход в «запредельное» НДС происходит при достижении глубин 500 – 600 м, когда концентрация напряжений на забоях стволов и крупных камерных выработок достигает пределов прочности массива. Положение усугубляется склонностью серпентинитовых пород к пучению при взаимодействии с щелочной шахтной водой и воздухом, которое особенно заметно проявляется при проходке стволов по зонам тектонических нарушений.

Данное заключение получено на основании следующего комплекса натуральных данных [16]:

1) По результатам замеров напряжений методом щелевой разгрузки в бетонной крепи шахтных стволов было выявлено, что на глубине 500 – 600 м при неизменных геологических условиях и толщине крепи происходит резкое (в 5 – 6 раз) увеличение максимальных напряжений.

2) По результатам замеров прироста деформаций крепи и приконтурного массива в процессе проходки стволов на шахте «ДНК» было установлено, что скачкообразно быстрое увеличение напряжений крепи явилось следствием столь же быстрого увеличения зоны сдерживающего влияния забоя: с 1,5 – 2 диаметров ствола (что характерно для условий упругого деформирования ненарушенного горного массива) до 3 – 4 диаметров (что указывает на условия пластического деформирования нарушенного массива в условиях запредельного напряженного состояния). Соответственно, в 2 раза возрастала и зона влияния забоя, определяемая протяженностью зоны неупругих деформаций горного массива вокруг выработки, что негативно сказывалось на устойчивости прилегающих выработок.

3) По данным оптического бурскопического зондирования пород вокруг стволов и горизонтальных выработок установлено, что увеличение зоны влияния явилось следствием нарушения сплошности и последующего запредельного деформирования массива, проявляющегося в сдвиговых и ротационных смещениях структурных породных блоков размерами от нескольких сантиметров до 1,5 – 2 м на величину 1 – 1,5 см и более. Эти смещения способны оказывать концентрированные пригрузки на крепь горных выработок, вызывая ее разрушение.

Кроме того, было выявлено, что вследствие снижения прочности породного массива, неизбежно происходящего по мере увеличения баз деформирования, на более крупных масштабных уровнях переход в запредельное НДС реализуется даже в условиях нетронутого массива.

Это явление также было подтверждено натурными исследованиями. Замеры смещений реперных пунктов методами спутниковой геодезии показали, что на базах деформирования от нескольких десятков метров до первых километров на шахтах ДонГОКа интенсивно проявляется современная геодинамическая активность. Для удобства анализа весь спектр выявленных геодинамических движений был подразделен на 2 вида: на трендовые – обладающие относительно выдержанными направленностью и скоростями за продолжительные промежутки времени (месяцы, годы) и короткопериодные – имеющие переменную направленность с короткими циклами (от минут до нескольких суток).

Замеренные на поверхности шахтного поля трендовые горизонтальные геодинамические движения за 15 лет достигали 203 – 231 мм, а вызываемые ими относительные деформации массива – 0,85 мм/м. Такой уровень дополнительных деформаций нетронутого массива, составляющий 30 – 50 % от статических, учитываемых при проектировании, вполне способен вызвать нарушения как в крепи горных выработок, так и в поверхностных зданиях и сооружениях.

Замеренные амплитуды короткопериодных движений достигали 38 мм по вертикали и 22 мм по горизонтали с периодами около 1,5 – 2 часов. Вызванные этими смещениями максимальные горизонтальные деформации сжатия – растяжения составляли 0,16 мм/м, а вертикальные деформации наклона – 0,45 мм/м. Прямой угрозы для объектов недропользования такие деформации не представляют, однако они могут активизировать побочные негативные эффекты, связанные с усталостью конструктивных материалов и ослаблением связи между структурными блоками породного массива.

Деформационная пригрузка от разномасштабных геодинамических движений может достигать критических значений за счет концентрации в крепях и конструктивных элементах систем подземной разработки. Так, например, в разное время в камерах рудодворов на шахте «ДНК» в монолитных бетонных и железобетонных крепях были зафиксированы пригрузки, достигающие 3,7 мм/м – по трендовым и 0,3 мм/м – по короткопериодным движениям. Эти пригрузки сопровождалась трещинообразованием в монолитной бетонной крепи камер.

Неизбежным следствием современных подвижек крупных породных объемов нетронутого массива является пространственно-временная изменчивость НДС на более мелкомасштабных уровнях. Данное явление подтверждается следующим комплексом результатов натурных исследований:

1) По данным периодических электрометрических зондирований породного массива, проводимых в течение 2-х лет в горизонтальных выработках шахты на глубинах 480 и 560 м (в районе рудного тела № 1 месторождения «Миллионное»), соотношение горизонтальных тектонических компонент составляло порядка  $\sigma_2 / \sigma_1 = 2,8$ , а азимут действия  $\sigma_2$  – около 5 – 7°. Эти данные совпадали с простиранием рудоконструирующих структур массива и элементов протектоники на данном участке. При этом в зонах мощных тектонических нарушений и, соответственно, хаотичной трещиноватости напряженное состояние было близко к гидростатическому и составляло около  $\sigma_2 / \sigma_1 = 1,0$ .

2) Анализ результатов натурных исследований структуры массива горных пород в окрестностях ствола «Вентиляционный» и НДС его крепи показали, что подвижками крупных породных структур относительно друг друга и давлением подвигающихся породных блоков на крепь ствола были обусловлены произошедшие в районе расщелины гор. -560 м нарушения тубингов. По данным спектрального сейсмопрофилирования и георадарного зондирования выше сопряжения гор. -560 м под углом 40 – 45 градусов ствол пересекала граница между двумя участками серпентинитового массива, различающимися по своим физико-механическим свойствам: относительно высокомодульным устойчивым крупноблочным массивом, в котором находится большая часть порожняковой ветви расщелины, и низко модульным сильнотрещиноватым, в котором целиком находится грузовая ветвь и прилегающий участок ствола (рис. 2).



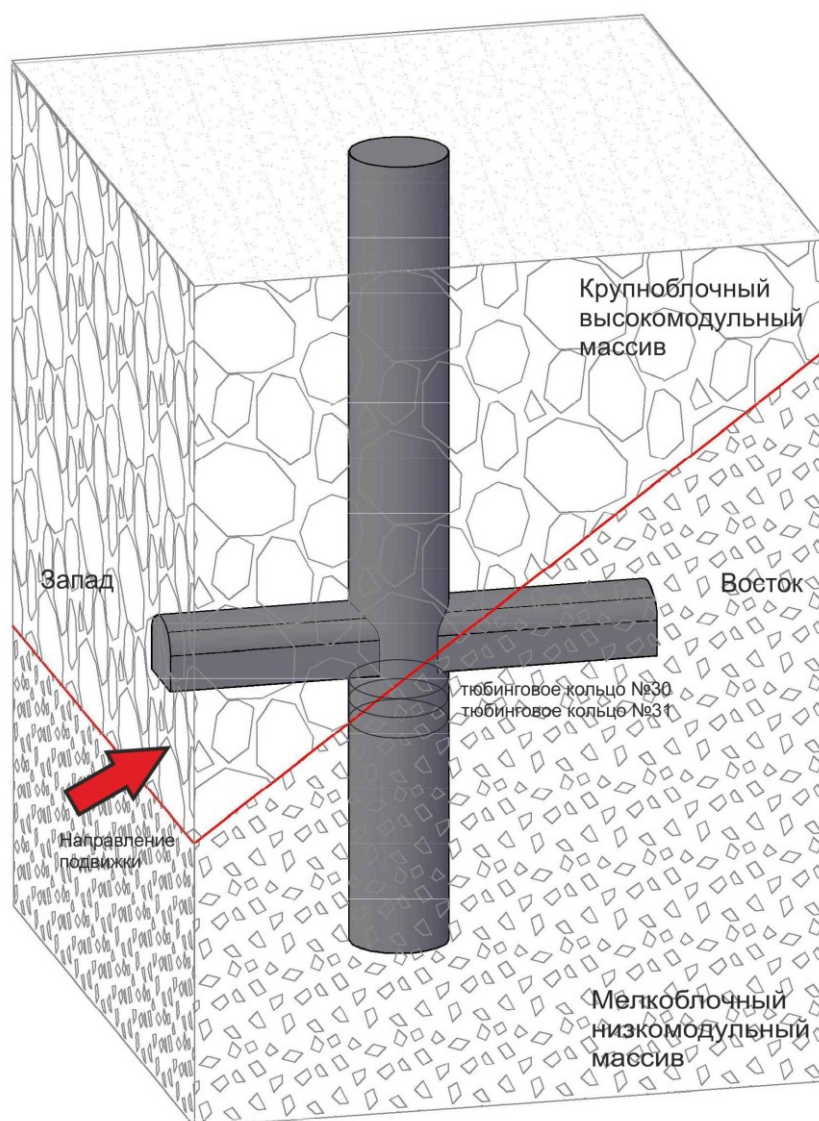


Рис. 2 – Схема подвижки крупномасштабного породного блока в районе расщелки горизонта -560 м при проходке ствола «Вентиляционный»

Местоположение и характерные особенности деформаций тубинговых колец и нарушений тубингов однозначно указывали на то, что в районе расщелки горизонта -560 м имело место смещение относительно крупноблочного и высокомодульного участка серпентинитового массива со стороны порожняковой ветви расщелки в восточном направлении. Смещение было спровоцировано выемкой породных объемов в стволе и выработках сопряжения. Это смещение, действуя подобно плите пресса на более низко модульный и мелко раздробленный массив, прилегающий к стволу и грузовой ветви, привело к повышенной концентрации напряжений по северной и южной породным стенкам ствола. Концентрация напряжений обусловила превышение пределов прочности приконтурного массива на этих участках и переход его в запредельное напряженно-деформированное состояние, т.е. в условия постепенного разрушения. Разрушение же хрупких материалов, таких как скальные горные породы, вследствие взаимных подвижек их структурных элементов (блоков), неизбежно сопровождается дилатационным увеличением объема и выдавливанием отдельных блоков в сторону свободных поверхностей. Породные блоки выдавливались в ствол «Вентиляционный» с северной и южной сторон, что привело к аномальной эллипсоидности тубинговых колец и нарушениям целостности тубингов.

### Заключение

Многолетние исследования НДС массивов горных пород Уральского региона показали следующее:

1) Параметры физико-механических свойств и НДС горного массива по самому своему определению неразрывно связаны с пространственными и временными масштабами рассматриваемого породного объема и, соответственно, с масштабами его взаимодействия с окружающей средой. А потому в принципе некорректно вести речь о свойствах произвольно взятой точки горного массива без привязки к масштабам конечного породного объема, вмещающего рассматриваемый объект недропользования.

2) Для конечного породного объема средние значения физико-механических параметров и НДС задаются суперпозицией полей напряжений и деформаций, каждое из которых соответствует своему масштабному уровню, зависящему от параметров иерархически блочного структурного строения горного массива.

На основе данных положений в ИГД УрО РАН разработана и реализована методика поэтапного построения модели геомеханического состояния системы «подземное сооружение – вмещающий породный массив», в которой граничные условия задаются суперпозицией напряжений и деформаций, получаемых в статической постановке упругой задачи на трех пространственно-временных масштабных уровнях, отражающих современные геодинамические движения трех иерархий структурных элементов горного массива:

1) крупномасштабных литосферных блоков (поперечные размеры в сотни - тысячи километров), определяющих НДС региона;

2) структурных блоков рудного поля (размеры порядка сотен метров), определяющих НДС участков месторождения;

3) структурных блоков приконтурного породного массива (размеры порядка нескольких дециметров), определяющих НДС геотехнической системы «подземное сооружение – вмещающий породный массив».

### Литература

1. Балек А.Е. К вопросу о соответствии терминологической системы современной геомеханики практическим задачам недропользования / А.Е. Балек // Проблемы недропользования. - 2018. - № 1. - С. 30–38. - DOI: 10.25635/2313-1586.2018.01.030.

2. Инновационная технология диагностики геодинамической активности геологической среды и оценки безопасности объектов недропользования / А.Д. Сашурин, А.Е. Балек, А.А. Панжин, С. В. Усанов // Горный журнал. - 2017. - №.12 - С. 16 – 20.

3. Sainoki A. Dynamic behavior of mining-induced fault slip / A. Sainoki, H. S. Mitri // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. - 2014. - Vol. 66. - P. 19 – 29.

4. Корнилков С.В. О методологическом подходе к исследованиям в области освоения недр на основе системности, комплексности, междисциплинарности и инновационной направленности / С.В. Корнилков, В. Л. Яковлев // Горный журнал. - 2015. - № 1. - С. 4 - 9.

5. Исследование переходных процессов при комбинированной разработке рудных месторождений / В.Л. Яковлев, И.В. Соколов, Г.Г. Саканцев, И.Л. Кравчук // Горный журнал. - 2017. - № 7. - С. 46 - 50.

6. Estimation of regional stress state and Young's modulus by back analysis of mining-induced deformation / Kodama J., Miyamoto T., Kawasaki S., Fujii Y., Kaneko K. et al. // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. - 2013. - Vol. 63. - P. 1–11.

7. Determination of the stress field in a mountainous granite rock mass / Figueiredo B., Cornet F. H., Lamas L., Muralha J. // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. - 2014. - Vol. 72. - P. 37–48.

- 8 Mine surface deformation monitoring using modified GPS RTK with surveying rod: initial results / C. Liu, J. X. Gao, X. X. Yu, J. X. Zhang et al. // Survey Review. - 2015. - Vol. 47. - P. 79 - 86.
9. Millimeter-Accuracy Structural Deformation Monitoring Using Stand-Alone GPS / Yan Bao, Wen Guo, Guoquan Wang et al. // Journal of Surveying Engineering. - 2017. - Vol. 144.
10. Monitoring geodynamic activity in the Victoria Land, East Antarctica: Evidence from GNSS measurements / Zanutta, A., Negusini, M., Vittuari, L. et al. // Journal of Geodynamics. - 2017. - Vol. 110. - P. 31 - 42.
11. Ludovico Biagi, Florin Calin Grec, Marco Negretti Low-Cost GNSS Receivers for Local Monitoring: Experimental Simulation, and Analysis of Displacements // Sensors. - 2016. - Vol. 16. - P. 21 - 40.
12. The potential of GPS precise point positioning method for point displacement monitoring: A case study / Yigit C.O., Coskun M.Z. Yavasoglu H. et al. // Measurement. - 2016. - Vol. 91. - P. 398 - 404.
13. Geomaterials and recent developments in micro-mechanical numerical models / Comments by Senior Editor // ISRM News Journal. -1997.- Vol. 4 Number 2. - P. 11 - 14.
14. Балек А.Е. Явление самоорганизации деформационных полей массива горных пород и его использование при решении задач геомеханики / А.Е. Балек // Проблемы недропользования. - 2016. - № 4. - С. 90 – 97. - DOI: 10.18454/2313-1586.2016.04.090
15. Тиль В.В. Освоение глубоких горизонтов хромитовых месторождений в стратегии развития Донского ГОКа: Проблемы и пути решения / В.В. Тиль, М.М. Бекеев, А.Д. Сашурин // Горный журнал. - 2013. - № 5. - С. 17 - 21.
16. Балек А.Е. Особенности формирования напряжений в крепи вертикальных выработок в условиях запредельного напряженно-деформированного состояния скальных породных массивов / А.Е. Балек // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. - № 11. – С. 202 - 212.