Российская академия наук Уральское отделение Институт горного дела

Посвящается памяти профессора, доктора технических наук Николая Петровича Влоха

# ГЕОМЕХАНИКА В ГОРНОМ ДЕЛЕ

ДОКЛАДЫ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ 4—5 ИЮНЯ 2014 г.



Екатеринбург 2014 УДК 622.83 Г36

Г36

6 Геомеханика в горном деле : доклады Всероссийской научно-технической конференции с международным участием 4–5 июня 2014 г. – Екатеринбург : ИГД УрО РАН, 2014. – 296 с.

#### ISBN 978-5-905522-19-2

В докладах Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Геомеханика в горном деле», проведенной в Институте горного дела УрО РАН Уральской школой геомеханики, посвященной памяти и в связи с 90-летием ее руководителя – профессора, доктора технических наук, действительного члена Академии горных наук Н.П. Влоха, освещены результаты фундаментальных и прикладных исследований по актуальным проблемам наук о Земле и практическим вопросам недропользования. Основное внимание уделено процессам и явлениям, формирующим естественное напряженно-деформированное состояние массива горных пород, трансформирующим его в областях техногенной деятельности с развитием очагов природно-техногенных катастроф, новым методам исследования геомеханических процессов, практике решения задач геомеханики на объектах недропользования.

Материалы конференции могут представлять интерес для широкого круга специалистов, занимающихся научными и практическими проблемами недропользования.

Публикуемые работы прошли редакционную подготовку к изданию. Научно-техническое содержание не подвергалось рецензированию и печатается в авторском представлении.

Конференция проводится при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 14-05-06018.

УДК 622.83

ISBN 978-5-905522-19-2

© Авторы, 2014 © ИГД УрО РАН, 2014

# ПРИРОДА И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ Напряженно-деформированного состояния массива горных пород в естественных условиях

УДК 622.834

## СОВРЕМЕННЫЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ДВИЖЕНИЯ И ИХ РОЛЬ В ФОРМИРОВАНИИ Напряженно-деформированного состояния массива горных пород

#### А.Д. Сашурин

Одной из существенных особенностей стремительного технического прогресса современной цивилизации выступает все более тесное взаимодействие человечества с приповерхностной твердой частью Земли – с верхней частью литосферы. Чем сложнее и масштабнее искусственные объекты, создаваемые на поверхности и под землей, тем чувствительнее они к процессам и явлениям, происходящим в массиве горных пород и на земной поверхности. Объективная необходимость познания этой взаимосвязи технических систем с природной средой осознанно, а в большей мере, пожалуй, стихийно, выдвигает эту сферу наук о Земле на одно из ведущих мест.

Уже в конце прошлого века японский ученый С. Уеда в своей книге «Новый взгляд на Землю» отмечал, что из всех современных наук наиболее быстро развивающимися становятся науки о Земле. В тех их отраслях, которые изучают твердую часть Земли, произошли такие феноменальные изменения, которые представляют интерес не только для специалиста-ученого, но и для любого образованного человека, какие редко встречаются в той или иной области знаний [1].

Несмотря на столь положительную оценку общего прогресса в развитии наук о Земле, отдельные области знаний в этой отрасли существенно отстают от потребностей современного технического прогресса. В первую очередь, это относится к уровню знаний о формировании напряженно-деформированного состояния массива горных пород в условиях его естественного залегания, о его изменениях в области влияния масштабных техногенных систем и объектов, и, самое главное, о закономерностях взаимодействия техногенных систем с происходящими в массиве горных пород деформационными процессами. Следствием этого разрыва является постоянный интенсивный рост количества и тяжести последствий природно-техногенных катастроф на таких объектах, как магистральные нефтегазопроводы, опутавшие Землю на суше и море, скоростные железнодорожные и автомобильные магистрали, здания и сооружения мегаполисов, рвущиеся вглубь и ввысь на 150–200 м и превысившие в отдельных случаях 800-метровую высоту, электростанции атомной и гидротехнической энергетики и, конечно, объекты горнодобывающих предприятий [2, 3, 4]. Жертвы их исчисляются десятками тысяч людей, а в отдельных случаях проявления потенциально опасных катастрофических событий угрожают миллионам людей.

Проблема выявления истоков и закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород обозначена уже во второй половине XIX века, но до настоящего времени не получила должного разрешения, удовлетворяющего требованиям безопасности в строительной индустрии и в других сферах экономической деятельности [5]. Фундаментальные и прикладные исследования по решению этой проблемы занимали ведущее место в деятельности Уральской школы геомехаников и в творчестве Н.П. Влоха, возглавлявшего ее в период с 1964 по 1999 г., памяти которого посвящается данная конференция [6]. Результаты этих исследований позволяют сделать однозначный вывод, что, наряду с постоянной гравитационной составляющей А. Гейма, в формировании напряженно-деформированного состояния важную роль играют деформационные процессы, вызванные экзогенными и эндогенными факторами, объединяемыми в общее понятие – современные геодинамические движения земной коры. Уместно отметить, что ведущая роль сдвижению пород в руднике в формировании напряженно-деформированного состояния прозорливо отведена в 30-е годы прошлого века отечественным основоположником геомеханики И. М. Бахуриным [7].

Первые экспериментальные результаты, поколебавшие принятые в первой половине XX века гипотезы А. Гейма и А. Н. Динника, в зарубежной практике были получены Ж. Талобром на подземных сооружениях гидроэлектростанций Франции, а в отечественной – на горных предприятиях Г.Н. Кузнецовым. В 60–70 гг. прошлого века произошел расцвет экспериментальных измерений напряженного состояния массива горных пород на горных предприятиях, начало которому положили работы Н. Хаста и ряда других зарубежных и отечественных ученых-геомехаников. Основное место среди этих исследований занимало горное дело.

Характерной особенностью натурных измерений напряжений этого времени являлось использование малых баз для измерения де-

формаций. Следствием этого были большие разбросы в результатах. Несмотря на это, большой статистический материал позволял установить некоторые обобщенные характеристики, в частности, постоянство первого инварианта тектонических напряжений по регионам и глубине [8].

Неоднородность напряженно-деформированного состояния создавала серьезные затруднения при решении конкретных задач. В 1971 г. был проведен эксперимент, когда в блоке пород размерами 1,5×1,5×1,5 м было выполнено 130 измерений напряжений с полным отделением блока от массива и, несмотря на это, не сумели однозначно получить значения напряжений в этой точке [9].

Следующим шагом в исследовании напряженного состояния явилось использование больших баз в измерении деформаций, в качестве которых были использованы наблюдательные станции по изучению сдвижения горных пород. По замыслу этот прием должен был устранить неоднородности малых баз. Но при использовании возмущающих полостей большого размера измерения смещений производились на малых интервалах, что порождало большие погрешности [10].

Внедрение технологий спутниковой геодезии во многом продвинуло решение проблемы:

 стало возможным измерять деформации практически на любых базах при проведении экспериментальных работ на земной поверхности;

– одновременно появилась возможность исследовать современные геодинамические движения [11].

Обобщение результатов мониторинга деформационных процессов на геодинамических полигонах, оборудованных на территориях эксплуатируемых месторождений углеводородного сырья, позволило О. Ю. Кузмину выявить аномальные деформации и современные геодинамические движения в районах тектонических нарушений. Они носили цикличный характер с продолжительностью циклов от 2–3 месяцев до полугода и более [12].

В последовавших далее экспериментальных работах Уральской школы геомехаников по исследованию современных геодинамических движений путем проведения непрерывных и дискретных наблюдений с использованием технологий спутниковой геодезии было выявлено два вида геодинамических движений: трендовые, имеющие относительно постоянные скорости и направления движения; цикличные, имеющие полигармоничный характер, включающий продолжительность циклов от первых секунд до нескольких часов и дней [13, 14]. Экспериментальное определение параметров трендовых и цикличных современных геодинамических движений к настоящему времени выполнено более чем на 25 объектах недропользования, охватывающих территорию России и Казахстана от Центрального региона до Якутии. На их основе создана база данных о современных геодинамических движениях [15]. Из нее следует, что оба вида современных геодинамических движений имеют место во всех регионах, независимо от того, к сейсмичной или асейсмичной категории они относятся.

Утвердившиеся данные о современных геодинамических движениях в сочетании с переходом на большие базы измерений позволили сделать очередной важный шаг в познании формирования напряженно-деформированного состояния массивов горных пород, а именно было установлено, что оно является переменным во времени. Дальнейшее углубление и детализация структуры полей напряжений и деформаций показало, что массив горных пород, вмещающий априори иерархически блочное строение, в условиях постоянной подвижности и переменного напряженно-деформированного состояния подвергается вторичному структурированию [16]. При этом на границах вторичных структурных блоков происходит концентрация современных геодинамических движений и структура напряженно-деформированного состояния приобретает дискретный характер, определяемый вторичными структурными блоками.

Таким образом, основными факторами, определяющими формирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород, являются: иерархически блочное строение; постоянная подвижность; вторичное структурирование; концентрация современных геодинамических движений на границах вторичных структурных блоков. Под их воздействием в реальном массиве горных пород формируется мозаичное, относительно однородное по своим усредненным интегральным параметрам напряженно-деформированное состояние. При его относительной однородности в нем, казалось бы, трудно ожидать формирования аномальных зон с резко отличающимися параметрами, которые могли бы рассматриваться в качестве очаговых зон развития катастрофических событий.

Дальнейшее углубление неоднородности в структуре напряженно деформированного состояния массива горных пород обусловлено фрактальным характером границ между соседними вторичными структурными блоками и отмеченной выше концентрацией по ним современных геодинамических движений. Взаимные перемещения соседних структурных блоков представляют собой вторичные движения. При фрактальности их границ выступы и впадины вступают во взаимодействие. Фрагмент границы соседних блоков и схема их взаимодействия показаны схематично на рис. 1. Фронтальные плоскости выступов соседних блоков под воздей-

Фронтальные плоскости выступов соседних блоков под воздействием геодинамических движений наползают друг на друга, создавая зоны концентрации сжимающих напряжений. Одновременно тыльные их плоскости расходятся, образуя зоны разряжения сжимающих напряжений и деформаций, депрессионные зоны, в отличие от зон концентрации, вплоть до полной разгрузки сжимающих напряжений [17].

Именно эта цепочка событий и комплекс факторов находятся в основе формирования структуры и параметров напряженно-деформированного состояния массива горных пород, в котором возникают очаги катастрофических событий в иерархически блочном массиве горных пород, находящемся в постоянном движении под воздействием современных геодинамических движений трендового и цикличного видов, формируются вторичные структурные блоки, по границам которых концентрируются современные геодинамические



Рис. 1. Схема образования зон концентрации современных геодинамических движений в приграничных блоках

движения. Относительная однородность мозаичного характера напряженно-деформированного состояния на интегральном уровне нарушается взаимодействием факториальных элементов границ соседних блоков, создающим очаги катастрофических событий. Зоны концентрации сжимающих напряжений, возникающих на фронтальных плоскостях, представляют собой потенциальную опасность по возможности проявления наведенной сейсмичности в виде техногенных землетрясений. Депрессионные зоны проявляют себя в виде образования мульд проседания разгруженного деструктурированного массива вплоть до образования зон обрушения.

Пример наблюдения явно выраженных встречных современных геодинамических движений на Высокогорском месторождении, отрабатываемом шахтой Магнетитовой в г. Нижнем Тагиле, приведен на рис. 2.

Следствием их явилось сейсмическое событие, произошедшее на этом участке 01.10.2009 с магнитудой 2,3 балла, и возникновение мульды проседания с величиной оседаний до 1,3 м на территории грузовой железнодорожной станции Гора Высокая, вызвавшей разрушение всех станционных путей и прилегающих промышленных зданий (рис. 3).

Аналогично деформационные процессы наблюдались в районе разработки Южной залежи на шахте Северопесчанской в районе г. Краснотурьинска (рис. 4).



Рис. 2. Векторы встречных геодинамических движений в районе железнодорожной станции на Высокогорском ГОКе в период с 2008 по 2009 г.



Рис. 3. Нарушение железнодорожных путей станции в результате образования мульды оседаний в депрессионной зоне



Рис. 4. Векторы встречных геодинамических движений в районе Южной залежи Северопесчанского месторождения

Следствием установленного специфичного проявления современных геодинамических движений явилось образование на первом этапе мульды плавных проседаний, которая далее развилась в полномасштабную зону обрушения (рис. 5). Таким образом, в формировании напряженно-деформированно-

Таким образом, в формировании напряженно-деформированного состояния массива горных пород ведущая роль принадлежит двум фундаментальным его свойствам:

- иерархически блочной структуре, присущей всем крепким скальным породам;

– постоянной подвижности, обусловленной современными геодинамическими движениями трендового и цикличного характера.

Под влиянием современных геодинамических движений иерархически блочный массив претерпевает процесс вторичного структурирования. На границах вторичных структурных блоков происходит концентрация современных геодинамических движений, которые на фронтальных элементах граничных областей создают зоны концентрации и депрессии тектонических напряжений, выступающих в роли очагов катастрофических событий.



Рис. 5. Образование зоны обрушения над Южной залежью в депрессионной зоне (октябрь 2013 г.)

#### Библиографический список

1. Уеда С. Новый взгляд на Землю / С. Уеда. – М: Мир, 1990. – 216 с.

2. Сашурин А. Д. Диагностика геодинамической активности с целью обеспечения безопасности объектов недропользования / А. Д. Сашурин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 6. – С. 274–278.

3. Сашурин А. Д. Уровень обеспеченности геодинамической безопасности объектов атомной энергетики / А. Д. Сашурин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 12. – С. 214–218.

4. Сашурин А. Д. Истоки и причины аварии на Саяно-Шушенской ГЭС: возможное развитие ситуации / А. Д. Сашурин // Гидротехническое строительство. - 2012. – № 1. – С. 37–43.

5. HeimA. MechanismusderGebirgsbildung. - Bale. - 1878.

6. Сашурин А.Д. Становление и развитие уральской школы геомехаников / А.Д. Сашурин // Геотехнологические проблемы комплексного освоения недр: сб. науч. трудов. Вып. 3 (93). Геомеханика в горном деле / ИГД УрО РАН. – Екатеринбург, 2005. – С. 3 – 12.

7. Бахурин И. М. Сдвижение горных пород под влиянием горных разработок / И. М. Бахурин. – М.-Л.: Гостопиздат, 1946. – 229 с.

 Сашурин А. Д. Сдвижение горных пород на рудниках черной металлургии / А. Д. Сашурин. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 1999. – 268 с.

 Сашурин А. Д., Влох Н. П., Зубков А. В. и др. Исследование структуры поля напряжений в крепких горных породах и ее влияние на результаты натурных измерений / А. Д. Сашурин, Н. П. Влох, А. В. Зубков, Я. И. Липин, В. Е. Боликов // Измерение напряжений в массиве горных пород. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1972. – С. 136–143.

10. Сашурин А. Д. Измерение напряженного состояния массива крепких горных пород на больших базах / А. Д. Сашурин // Измерение напряжений в массиве горных пород. Ч. І. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1976. – С. 106–111.

11. Панжин А. А. Деформационный мониторинг породных массивов на больших пространственно-временных базах / А. А. Панжин // Геомеханика в горном деле: доклады всерос. конф. 1–11 окт. 2008 г. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2008. – С. 75–86.

12. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при недропользовании / Ю. О. Кузьмин. – М.: Агентство экономических новостей, 1999. – 220 с.

13. Сашурин А. Д., Панжина Н. А. Геодинамика и безопасность освоения и эксплуатации георесурсов / А. Д. Сашурин, Н. А. Панжина // Проблемы индустриально-инновационного развития горнодобывающих отраслей промышленности и мировая геополитика освоения хризотилового волокна: материалы Пятой междунар. научно-практ. конф. 13–15 окт. 2010 г. / ИГД им. Д. А.Кунаева. – Алматы, 2010. – С. 207–211.

 Панжин А. А. Исследование гармоник квазипериодических современных деформаций породного массива на больших пространственно-временных базах / А. А. Панжин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 9. – С. 313–321. 15. Сашурин А. Д., Мельник В. В., Панжин А. А. и др. База экспериментальных данных о параметрах современных геодинамических движений /А. Д. Сашурин, В. В. Мельник, А. А. Панжин и др. // Свидетельство о государственной регистрации базы данных от 26.02.2014 г. № 2014620345.

16. Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в области сильного техногенного воздействия / В. Н. Опарин и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. – 632 с.

17. Сашурин А. Д. и др. Геодинамический фактор в формировании депрессионно-деструктивных областей в массиве горных пород / А. Д. Сашурин, С. В. Усанов, В. В. Мельник и др. // Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах: Вторая российско-китайская научная конференция 02–05 июля 2012 г. Сб. тр. № 4. – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012. – С. 256–260.

УДК 622.831

# ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА ГОРНОСКЛАДЧАТЫХ РЕГИОНОВ

#### С.Н. Тагильцев

Скальные массивы в большинстве регионов находятся в геодинамическом напряженно-деформированном состоянии (НДС) [1, 2]. Отличительная особенность этого состояния заключается в том, что в приповерхностной части литосферы главное максимальное сжимающее напряжение ( $\sigma_1$ ) ориентировано горизонтально, а минимальное напряжение ( $\sigma_3$ ) в пределах определенного приповерхностного слоя имеет вертикальную ориентировку. Рассматривая закономерности НДС скальных массивов, очень важно установить количественные зависимости, описывающие изменение значений главных напряжений по глубине. Несомненно, что земная кора на каждом участке состоит из нескольких слоев (зон, этажей), которые различаются по литологическим, геомеханическим, геодинамическим и другим характеристикам. Каждая зона литосферы должна отличаться от других слоев по количественным закономерностям напряженного состояния.

Большинство измерений НДС выполнено в подземных горных выработках на глубине от десятков до нескольких сотен метров. Приповерхностная часть земной коры до глубины примерно 400 м рассматривается как зона хрупкой деформации [3, 4]. Опираясь на фактические данные и результаты теоретических исследований, можно установить количественные закономерности распределения по глубине значений главных максимальных напряжений в зоне хрупкой деформации земной коры.

Вблизи поверхности земли происходит разгрузка тектонических напряжений. Этот слой можно рассматривать как подзону разгрузки (подзону разрушения) зоны хрупкой деформации (рис. 1). Подзона разгрузки обычно имеет мощность несколько десятков метров. Распределение напряжения в этом слое подчиняется геостатическим закономерностям [1–3]. Вертикальное напряжение ( $\sigma_{\rm B}$ ) является максимальным и увеличивается с глубиной (*H*) пропорционально весу горных пород:

$$\sigma_{\rm B} = \gamma H, \tag{1}$$

где ү – удельный вес горных пород.

Горизонтальное напряжение ( $\sigma_r$ ) определяется боковым отпором от вертикального напряжения:

$$\sigma_{\rm r} = \lambda \gamma H, \tag{2}$$

где  $\lambda$  – коэффициент бокового отпора.



Рис. 1. Распределение напряжений в верхней части земной коры

Основная часть зоны хрупкой деформации находится в геодинамическом (тектоническом) напряженном состоянии. Для расчета напряжений в этой зоне можно использовать метод, построенный на концепции о предельно напряженном состоянии массива горных пород. Зависимость напряженного состояния от глубины на участке разреза от земной поверхности до глубины, где породы переходят в пластичное состояние, может быть охарактеризована аналитической зависимостью (паспортом прочности), выведенной из уравнения Кулона – Мора для предельно напряженного состояния (ПНС) массива [3].

В работе [4] обосновано, что наиболее достоверно предельно напряженное состояние описывается деформационным критерием ПНС:

$$\sigma_1 = R_c + \sigma_3' / \lambda, \tag{3}$$

где  $\sigma_1$  – максимальное главное нормальное напряжение;  $R_c$  – предел прочности на сжатие;  $\sigma_3'$  – эффективное (пропорциональное деформации) минимальное главное нормальное напряжение.

Применение зависимости (3) критерия ПНС для построения паспортов прочности по результатам лабораторных испытаний образцов горных пород показало, что в этих случаях паспорт прочности значительно лучше соответствует понятию «линейный критерий». Точки испытаний на одноосное сжатие и косой срез ложатся на прямую линию, при этом значения получаемых параметров хорошо согласуются между собой через расчетные зависимости. Конкретные значения величин (в первую очередь, значения  $\phi$ ) лучше соответствуют представлениям о свойствах определенных литологических разностей горных пород. Опыт использования деформационного критерия позволяет в качестве синонима использовать наименование «линейный критерий предельно напряженного состояния» (ЛК ПНС).

Необходимо учитывать [3, 4], что

$$R_{\rm c} = 2R_{\rm oc},\tag{4}$$

$$\sigma_3' = \sigma_3 + R_{\rm p},\tag{5}$$

$$R_{\rm p} = -\lambda R_{\rm oc},\tag{6}$$

где  $R_{\rm OC}$  – предел прочности на одноосное сжатие;  $R_{\rm p}$  – предел прочности на разрыв;  $\sigma_3$  – минимальное главное нормальное напряжение.

При подстановке зависимостей (4–6) в уравнение (3) связь между  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  упрощается:

$$\sigma_1 = R_{\rm oc} + \sigma_3 / \lambda, \tag{7}$$

Последнюю зависимость можно использовать для описания распределения главных нормальных напряжений в зоне хрупкой деформации, заменяя  $\sigma_3$  на величину веса горных пород ( $\gamma H$ ):

$$\sigma_1 = R_{\rm oc} + \gamma H/\lambda, \tag{8}$$

ИЛИ

$$\sigma_1 = R_{\rm oc} + B\gamma H, \tag{9}$$

где  $B = 1/\lambda$ .

Последнее уравнение описывает зависимость  $\sigma_1$  от глубины (*H*) в условиях предельно напряженного состояния, т.е. является преобразованной формой записи линейного критерия для массивов горных пород.

Необходимо также учитывать [3, 5], что коэффициент бокового отпора связан с углом внутреннего трения (ф) следующей зависимостью:

$$\lambda = tg^2 (45^\circ - \phi/2).$$
 (10)

Изменение главных напряжений по глубине определяется значением коэффициента *B* в уравнении (9). Эти значения отличаются от единицы (табл. 1). Значения *B* для пород, слагающих скальные массивы, варьируют в пределах  $2,5\div4,5$ . Зависимость  $\sigma_1$  от *H* значительно отличается от распределения по глубине геостатических напряжений (зависимость  $\gamma H$  от *H*).

Таблица 1

ф, град	20	25	30	35	40
λ	0,5	0,4	0,33	0,27	0,22
В	2,0	2,5	3,0	3,7	4,6

Взаимосвязь характеристик φ, λ, В

Среди значительного количества работ, в которых содержатся сведения по распределению напряжений в верхней части земной коры, можно выделить монографии Н.С. Булычёва [2] и Н.П. Влоха [1]. В первой работе приведены сведения по месторождениям Кольского полуострова и Средней Азии (рис. 2). Во второй работе обобщены данные измерений НДС в подземных рудниках Урала.

Если аппроксимировать линейной зависимостью данные по напряжениям на месторождениях Кольского полуострова и Средней Азии (см. рис. 2), соответственно, получим:

$$\sigma_1 = 27 + 3,2\gamma H,$$
 (11)

$$\sigma_1 = 14 + 2,2\gamma H.$$
(12)

На месторождениях, расположенных в районе городов Нижний Тагил и Кушва [1], подобная зависимость будет иметь следующий вид:

$$\sigma_1 = 12 + 2,9\gamma H.$$
(13)

При пересчете коэффициентов линейных уравнений (11–13) по зависимостям (9, 10) получим значения параметров  $R_{oc}$ ,  $\lambda$  и  $\varphi$  (табл. 2). Анализируя расчетные геомеханические характеристики, представленные в табл. 2, можно сделать вывод, что эти параметры достаточно достоверно отражают деформационные и механические свойства массивов горных пород в соответствующих регионах.

Таблица 2

2	Значения	геомеханических	парамет	ров

Регион измерений	<i>R</i> <sub>oc</sub> , МПа	λ	ф, град
Кольский полуостров	27	0,31	32
Средняя Азия	14	0,45	22
Средний Урал	12	0,35	29



Рис. 2. Изменение горизонтальных напряжений в породных массивах с глубиной (по Н.С. Булычёву, 1989 г.):

а – Кольский полуостров, б – Средняя Азия; 1–5, 8–14 – номера месторождений; 6 – расчетные горизонтальные напряжения ( $\lambda\gamma H$ ); 7 – расчетные вертикальные напряжения ( $\gamma H$ ); сплошная красная линия – усреднение фактических значений горизонтальных напряжений

Результаты расчетов позволяют полагать, что использование линейного критерия предельно напряженного состояния в форме зависимости (9) для описания напряженного состояния массивов горных пород в зоне хрупкой деформации верхней части земной коры показывает хорошее соответствие натурным условиям. Выявленные закономерности позволяют прогнозировать распределение значений главных напряжений по глубине геологического разреза в зависимости от свойств горных пород. На основании данных изучения распределения напряжений по глубине возможно определение геомеханических характеристик конкретного массива.

#### Библиографический список

1. Влох И.П. Управление горным давлением на подземных рудниках / И.П. Влох. – М.: Недра, 1994. – 208 с.

2. Булычев Н. С. Механика подземных сооружений в примерах и задачах: учеб. пособие для вузов / Н. С. Булычев. – М.: Недра, 1989. – 270 с.

3. Тагильцев С. Н. Основы гидрогеомеханики скальных массивов: учеб. пособие / С. Н. Тагильцев. – Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2003. – 88 с.

4. Тагильцев С.Н. Деформационный критерий предельно напряженного состояния скальных массивов / С.Н. Тагильцев // Изв. вузов. Горный журнал. – 2004. – № 1. – С. 3–8.

5. Тагильцев С. Н. Пределы линеаризации закона Кулона – Мора при расчетах НДС массивов горных пород / С. Н. Тагильцев // Материалы X Межотраслевого координационного совещания по проблемам геодинамической безопасности. – Екатеринбург: УГГА, 1997. – С. 212–217.

УДК 622.831.24

# ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ – ФАКТОР НЕОДНОРОДНОСТИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СЕЙСМОАКТИВНЫХ УЧАСТКОВ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

К. Т. Тажибаев, Д. К. Тажибаев

Породные массивы в большинстве случаев сложены разнородными горными породами, состоящими обычно из нескольких минералов, и представляют собой сложные гетерогенные образования. В таких многокомпонентных средах, образовавшихся из расплавленных магм и термальных растворов с последующим неравномерным охлаждением до температур верхней части земной коры, вследствие различия физических свойств, высокого градиента температур вероятность формирования остаточных напряжений высока. Такие напряжения могут образоваться как в однородных, так и в многокомпонентных средах при неравномерных температурных процессах и неоднородных упругопластических деформациях.

Остаточные напряжения могут образоваться от действия внешних сил, а также часто при наличии значительного градиента температур, например, при неравномерном остывании контактных частей магматических и метаморфических пород, при кристаллизации минералов в условиях неравномерного остывания. Сразу же после внедрения краевые участки (контакт) интрузий должны находиться в условиях резкого переохлаждения, т.е., по существу, представлять зону закалки [3]. Образование остаточных напряжений при закалке твердых материалов общеизвестно.

Исследования остаточных напряжений в металлах и технических материалах проводились более 100 лет назад. Детальные исследования остаточных напряжений в горных породах были начаты в начале 70-х годов Н.П. Влохом, Я.М. Липиным и А.Д. Сашуриным [1, 2]. В этих работах были экспериментально установлены существенные как сжимающие, так и растягивающие неоднородные остаточные напряжения в породных блоках, отделенных от массива. Авторы [1, 2, 4] отмечали, что неоднородность величин измеренных в массиве действующих (результирующих) напряжений может быть обусловлена неоднородными остаточными напряжениями.

М. Фридман [5] показал, что метод разгрузки и метод дифракции рентгеновских лучей при измерении остаточных напряжений дают близкие по значениям результаты. Он показал, что ориентация остаточных напряжений хорошо согласуется с элементами структуры массива, из которого для исследования отбирались соответствующие блоки горных пород.

Действительно, экспериментальные измерения (методом полной разгрузки) действующих в породных массивах горно-складчатых областей сейсмоактивных регионов Средней Азии напряжений показали значительную неоднородность напряженного состояния, и, как свидетельствуют результаты, часто горизонтальные напряжения превышали вертикальные, что не укладывается в рамки существующих теоретических положений.

В итоге многолетних экспериментальных исследований напряженного состояния удароопасных рудных месторождений Средней Азии было установлено, что в сейсмоактивных зонах и на удароопасных участках шахтных полей рудных и угольных месторождений пространственное распределение действующих напряжений неоднородное и имеет периодический характер. Было экспериментально доказано, что неоднородность, а иногда знакопеременность действующих в массиве напряжений обусловлены наличием в указанных выше зонах неоднородного поля остаточных напряжений, так как колебательный (периодический) характер пространственного распределения действующих напряжений по фазе совпадал с характером распределения остаточных напряжений [6].

Анализ более поздних экспериментальных данных позволил исследователям научной школы Н.П. Влоха [7] сделать предположение, что действительное напряженное состояние горного массива в каждой точке складывается из двух основных составляющих – из внешнего поля напряжения и внутреннего, присущего каким-то отдельным структурным блокам. Под внутренним полем напряжения подразумевается напряженное состояние отделенного от массива структурного блока горной породы, которое в каждом элементарном объеме этого блока характеризуется своим тензором напряжений, именуемых остаточными напряжениями (они существуют и при снятии внешних сил).

К.Т. Тажибаевым [8] была разработана структурная модель квазиизотропной горной породы, где показано, что реальная среда массив горных пород – представляет собой единство непрерывности (континуум) и дискретности, т. е. дискретно-связанную среду. Предлагается рассмотреть горную породу при изучении процессов ее деформирования и разрушения как конструкцию, состоящую из определенно расположенных и связанных по локальным участкам структурных элементов, где приложенная извне нагрузка распределяется согласно строению этой внутренней конструкции. В предложенной модели рассматриваются структурные иерархические уровни с присущими каждому из них неоднородностями (дефектами). Согласно иерархической системе структурных уровней, каждый вышестоящий уровень включает элементы структуры всех нижестоящих, т. е., согласно структурной схеме, плита сложена из блоков, блоки в свою очередь состоят из зерен, зерна составлены из кристаллических отдельностей и, наконец, кристаллические отдельности состоят из атомов и молекул. При соответствующем масштабе рассмотрения для каждого структурного элемента присущи соответствующие величины напряжения.

Как известно, измеренное в породном массиве методом разгрузки (действующее) напряжение представляет собой сумму всех напряжений (разгрузка от гравитационных, остаточных и других напряжений) первого рода. Рассматривая породный массив как упругую однородную среду, А.Н. Динник в свое время получил следующее решение задачи о напряженном состоянии:

$$\sigma_{z} = \gamma H, \tag{1}$$

$$\sigma_x = \sigma_y = m\sigma_z = m\gamma H = \frac{\mu}{1-\mu} \cdot \gamma H, \qquad (2)$$

где  $m = \mu/1 - \mu$  – коэффициент бокового распора;  $\mu$  – коэффициент Пуассона горной породы; H – рассматриваемая глубина;  $\gamma$  – среднее значение объемного веса рассматриваемых горных пород;  $\sigma_z$  – вертикальная составляющая действующего (измеренного) нормального напряжения;  $\sigma_y$ ,  $\sigma_x$  – горизонтальные составляющие действующего нормального напряжения по соответствующим направлениям.

Поскольку коэффициент бокового распора меньше единицы, то по вышеуказанным формулам горизонтальные составляющие напряжения всегда меньше, чем вертикальные. Однако при многочисленных инструментальных измерениях напряжений было установлено, что горизонтальные составляющие напряжения нередко превышают вертикальные, часто вертикальные составляющие также не соответствовали расчетным данным.

В большей мере несоответствия были характерны для сейсмоактивных горных регионов, а в пределах шахтного поля – для удароопасных участков магматических и гидротермальных образований. Эти несоответствия вызваны прежде всего тем, что теория упругости и существующие методы расчета не учитывают начальные имеющиеся остаточные напряжения, обусловленные геологической историей, термомеханическими условиями формирования породного массива, а также неоднородностью его вещественного состава и структуры.

Экспериментально измеренное по деформациям действующее в породном массиве напряжение, как указано выше, представляет собой сумму всех имеющихся напряжений в момент измерения. Для общего случая предлагаем определять действующее (результирующее) напряжение по следующей формуле:

$$\sigma_{\mu} = \sigma_{o} + \sigma_{r} + \sigma_{t} + \sigma_{n}, \qquad (3)$$

где  $\sigma_{\rm H}$  – измеренное (действующее) нормальное напряжение;  $\sigma_{\rm r}$  – гравитационное напряжение;  $\sigma_{\rm o}$  – остаточное напряжение;  $\sigma_{\rm t}$  – термическое напряжение;  $\sigma_{\rm n}$  – приливное напряжение, обусловленное силами межпланетарного взаимодействия.

В уравнении (3) отсутствие так называемого тектонического напряжения объясняется тем, что это напряжение рассматривается как возникающее от стационарной долговременной разгрузки (релаксации) остаточных напряжений. Тектонические процессы – это, главным образом, горизонтальные перемещения тектонических плит в результате релаксации остаточных напряжений на их границах [6, 9]. И по терминологии тектоническое напряжение определяется как «напряжение в горных породах, возникающее при протекании тектонических процессов, а также остаточное напряжение от заканчивающихся тектонических процессов»<sup>\*</sup>. Термическое напряжение, как известно, может иметь существенное значение только в зонах повышенных температур (более 100 °C). Приливное напряжение нерегулярное и по сравнению с гравитационными или остаточными напряжениями имеет весьма малое значение, поэтому термическим и приливным напряжением можно пренебречь при решении инженерных задач.

Исходя из указанного, для сейсмоактивных зон породного массива, где нет повышенных (по сравнению с обычной температурой разрабатываемых месторождений) температур, действующее (результирующее) напряжение можно определить так:

$$\sigma_{\mu} = \sigma_0 + \sigma_{\Gamma}, \tag{4}$$

ИЛИ

$$\begin{cases} \sigma_{z} = \sigma_{oz} - \sigma_{ez} = \sigma_{oz} - \gamma H, \\ \sigma_{x} = \sigma_{ox} + \frac{\mu}{1 - \mu} \gamma H, \\ \sigma_{y} = \sigma_{oy} + \frac{\mu}{1 - \mu} \gamma H, \end{cases}$$
(5)

где  $\sigma_{oz}, \sigma_{ox}, \sigma_{oy}$  – остаточные напряжения по направлениям *X*, *Y*, *Z*, соответственно, (вертикальное составляющее гравитационного напряжения всегда сжимающее, т. е. имеет отрицательный знак, а горизонтальное имеет положительный знак).

Необходимо отметить, что измеренные в блоках, кусках, кернах (по деформациям горных пород) остаточные напряжения всегда меньше, чем остаточные напряжения в массиве, так как при отделении кусков от массива происходит разгрузка всех видов напряжений, в том числе частично остаточных. Поэтому остаточное напряжение следует представить как

$$\sigma_{\rm o} = \sigma_{\rm Ho} K_{\rm p}, \qquad (6)$$

<sup>\*</sup> Горное дело: терминологический словарь. – М.: Недра, 1974. – 527 с.

где  $\sigma_{uo}$  – измеренное в куске (керне, образце) горной породы остаточное напряжение;  $K_p$  – коэффициент разгрузки остаточного напряжения.

Результаты экспериментальных исследований показали, что для условий повторной разгрузки кернов с диаметрами 60 мм (путем бурения внутреннего керна с диаметром 40 мм)  $K_p = 3$ .

С учетом значения данного коэффициента равенства (4) и (5) можно представить в следующем виде:

$$\begin{cases} \sigma_{_{\rm H}} = 3\sigma_{_{\rm HO}} + \sigma_{_{\rm F}} \text{ или } \sigma_{_z} = 3\sigma_{_{\rm HOZ}} - \gamma H, \\ \sigma_{_x} = 3\sigma_{_{\rm HOX}} + \left[\frac{\mu}{(1-\mu)}\right] \cdot \gamma H, \\ \sigma_{_y} = 3\sigma_{_{\rm HOY}} + \left[\frac{\mu}{(1-\mu)}\right] \cdot \gamma H, \end{cases}$$
(7)

где  $\sigma_{\text{ног,}} \sigma_{\text{ног,}} \sigma_{\text{ног,}}$ 

В стадии геологической разведки и проектирования разработки месторождений практически невозможно определить напряжения на различных глубинах, хотя для геомеханической части проекта необходимы сведения о напряженном состоянии породного массива, которых всегда не хватает. В связи с этим для сейсмогенных горных регионов предлагается определить остаточные напряжения методами разгрузки или рентгенографии в кернах пород во всех трех направлениях для данной глубины и затем рассчитать действующие в породном массиве напряжения по предложенным формулам (7). Следует отметить, что для расчетов напряжений определяются и учитываются остаточные напряжения первого рода.

Результаты сравнения расчетных данных напряжений (7) с экспериментальными данными, полученными для Восточно-Коунрадского месторождения (шахта № 6, горизонт 220 м,  $\gamma_{cp} = 2,7$  т/м<sup>3</sup>, H = 220 м,  $\mu = 0,25$ ), показали достаточное соответствие (рис. 1, 2).

Из рис. 1 и 2 видно, что формулы хорошо описывают даже случаи скачкообразного и знакопеременного изменения напряжения. Следует также отметить, что напряжения, измеренные в массиве, и остаточные напряжения, измеренные в кернах, отобранных из участков замера действующих напряжений в массиве, по длине скважины изменяются периодически и согласованно между собой по фазе.



Глубина скважины, м



экспериментальные и расчетные значения действующих в массиве горных пород напряжений (Восточный Коунрад, шахта 6, гор. 220, квершлаг 1, жила 5, вертикальная скважина, σ<sub>1</sub>, 1 – экспериментальное, 2 – расчетное)



Рис. 1. Расчетные и экспериментальные значения напряжений (горизонтальная скважина):

экспериментальные и расчетные значения действующих в массиве горных пород напряжений (Восточный Коунрад, шахта 6, гор. 220, квершлаг 1, жила 5, вертикальная скважина, σ<sub>3</sub>, 1 – экспериментальное, 2 – расчетное) Наряду с вышеуказанным подходом, когда напряжение породного массива можно определить по величине остаточных напряжений, определяемых методом полной разгрузки в кернах и расчетным данным по формуле (7), предлагается новый подход, основанный на применении установленной закономерности изменения относительной величины скорости прохождения ультразвуковой поляризованной сдвиговой волны от механического напряжения в твердых материалах (закон Кушбакали) [10, 11, 12] для определения как действующих, так и остаточных напряжений.

Сущность закономерности изменения относительной величины скорости прохождения ультразвуковой поляризованной сдвиговой (поперечной) волны в зависимости от изменения механического напряжения в твердых материалах заключается в том, что изменение механического напряжения в твердых материалах приводит к пропорциональному, в зависимости от величины установленной новой характеристики твердого материала – волнового модуля напряжения – K, изменению относительной величины скорости прохождения ультразвуковой сдвиговой поляризованной волны в направлении, перпендикулярном к направлению действия напряжения. Функциональная связь между напряжениями, их направлением, скоростями распространения поляризованных сдвиговых волн, волновым модулем напряжения выражается следующими формулами.

$$\begin{cases} \sigma_x = (\frac{V_{soz}}{V_{sz}} - 1)K_z, \\ \sigma_y = (\frac{V_{sox}}{V_{sx}} - 1)K_x, \\ \sigma_z = (\frac{V_{soy}}{V_{sy}} - 1)K_y, \end{cases}$$
(8)

где  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  – нормальное напряжение по направлению *X*, *Y*, *Z*, соответственно;  $K_x$ ,  $K_y$ ,  $K_z$  – волновой модуль напряжения (название наше) по направлениям *X*, *Y*, *Z*, соответственно;  $V_{sx}$ ,  $V_{sy}$ ,  $V_{sz}$  – скорость прохождения через определенную базу нагруженного материала ультразвуковой сдвиговой поляризованной волны по направлениям *X*, *Y*, *Z*, соответственно;  $V_{sox}$ ,  $V_{soz}$  – скорость прохождения через определенную базу нагруженного материала ультразвуковой сдвиговой поляризованной волны по направлениям *X*, *Y*, *Z*, соответственно;  $V_{sox}$ ,  $V_{soy}$ ,  $V_{soz}$  – скорость прохождения ультразвуковой сдвиговой поляризованной волны по направлениям *X*, *Y*, *Z*, соответственно, при отсутствии напряжения (ненагруженное состояние).

Изменение относительной величины скорости прохождения ультразвуковой поляризованной сдвиговой волны с вектором поляризации, совпадающим с направлением напряжения, обусловлено тем, что изменение напряжения в направлении, перпендикулярном направлению прохождения ультразвуковой сдвиговой поляризован-



Рис. 3. График остаточного напряжения по разным направлениям:  $\sigma_x = 30 \text{ MIIa}; \sigma_{1 \text{max}} = 49,6 \text{ MIIa} (азимут 20°); \sigma_{2 \text{ min}} = 10,5 \text{ MIIa} (азимут 110°); <math>\tau_{\text{max}} = 30,05 \text{ MIIa}$ 



Рис. 4. График остаточного напряжения по разным направлениям:  $\sigma_z = -33,1 \text{ MIIa}$ ;  $\sigma_{1\text{max}} = -49,58 \text{ MIIa}$  (50°);  $\sigma_{2\text{ min}} = 4,15 \text{ MIIa}$  (140°);  $\tau_{\text{max}} = -26,86 \text{ MIIa}$ 

ной волны, вызывает деформацию материала. По формуле (8) были определены остаточные напряжения в метасамотите Кумторского месторождения (рис. 3, 4).

Из рис. 3 и 4 следует, что, прозвучивая по направлениям *Z*, *Y*, *X*, с помощью ультразвуковых поляризованных сдвиговых волн, можно определить по ортогональным к указанным направлениям нормальные напряжения  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  и главные нормальные напряжения по соответствующим плоскостям путем поворота излучателя и приемника поляризованной сдвиговой волны через каждые 1 или 10° от нуля до 180°, синхронно поворачивая излучатель и приемник ультразвуковой волны. После определения главных нормальных (максимальных и минимальных) напряжений можно определять и максимальные касательные напряжения.

#### Библиографический список

1. Влох Н. П. Исследование остаточных напряжений в крепких горных породах / Н. П. Влох, Я. М. Липин, А.Д. Сашурин // Современные проблемы механики горных пород / материалы 4-й Всес. конф. по механике горных пород. – Л.: Наука, 1972. – С. 186–189.

2. Липин Я. Н. О закономерностях распределения остаточных напряжений в кусках крепких горных пород / Я. Н. Липин, Н. П. Влох, А. Д. Сашурин // Измерение напряжений в массиве горных пород: материалы 3-го семинара. Новосибирск, 1971 // ИГД СО АН СССР. – Новосибирск, 1972. – С. 123–127.

3. Шарков Е.В. В подземных мастерских Плутона. Что такое интрузивы / Е.В. Шарков. – М.: Наука, 1986. – 144 с.

4. Исследование структуры поля напряжений в крепких горных породах и ее влияние на результаты натурных измерений / А. Д. Сашурин, Н. П. Влох, А. В. Зубков, Я. М. Липин, В. Е. Голиков // Измерение напряжений в массиве горных пород: материалы 3-го семинара. Новосибирск, 1971 / ИГД СО АН СССР. – Новосибирск.: Наука, 1972. – С. 136–140.

5. Friedman M. Residual elastic strain in rock // Tectonophysics. – v.15, No 4. – 1975. – P. 297–333.

6. Тажибаев К. Т. Условия динамического разрушения горных пород и причины горных ударов / К. Т. Тажибаев. – Фрунзе: Илим, 1989. – 180 с.

7. Влох Н. П. Стреляние скальных пород и мероприятия его предупреждения / Н. П. Влох, Л. И. Липин, А. В. Зубков // Горные удары, методы оценки и контроля удароопасности массивов горных пород: материалы VI Всесоюзной конф. по механике горных пород. Фрунзе, 3–5 октября 1978. – Фрунзе: Илим, 1979. – С. 151–161.

8. Тажибаев К. Т. Деформация и разрушение горных пород / К. Т. Тажибаев. – Фрунзе: Илим, 1986. –106 с.

9. Тажибаев К.Т. Концепция стационарной деформации литосферных плит, прогноз и предупреждения тектонических землетрясений / К.Т. Тажибаев // Известия НАН Кыргызской Республики. – 2009. – № 2. – С. 47–57.

10. Тажибаев К. Т. Закон изменения времени прохождения поляризованных поперечных волн от напряжений в твердых средах / К. Т. Тажибаев // Известия НАН Кыргызской Республики. – 2010. – № 3. – С. 36–44.

11. Тажибаев К. Т. Закон изменения скорости прохождения поляризованной поперечной ультразвуковой волны от напряжения в твердых материалах и его применение / К. Т. Тажибаев // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. – 2011. – Т. 11. – № 11. – С. 151–156.

12. Диплом № 453 на научное открытие от 3.10.2013. Закономерность изменения относительной величины скорости прохождения ультразвуковой поляризованной сдвиговой волны от механического напряжения в твердых материалах (закон Кушбакали) / К. Т. Тажибаев, Д. К. Тажибаев, М. С. Акматалиева; Международная академия авторов научных открытий и изобретений. Российская академия естественных наук, Москва.

УДК 622.831

# ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОД НЕНАРУШЕННОГО Массива на руднике жомарт

#### В. Н. Токсаров, В. А. Асанов, Л. С. Шамганова, А. А. Ударцев

Месторождение медистых песчаников Жаман-Айбат расположено в 130 км к юго-востоку от г. Жезказган, его отработка ведется рудником Жомарт на глубине 380–680 м. В настоящее время горные работы ведутся буровзрывным способом с применением панельно-столбовой системы разработки со следующими параметрами: ширина барьерных целиков – 40 м; расстояние между осями барьерных целиков – 125 м; сетка расположения междукамерных целиков – 19×19 м; пролет камеры – 9 м.

Вовлечение в разработку новых участков месторождения характеризуется увеличением глубины ведения горных работ и, как следствие, ухудшением горно-геологических условий. С целью уточнения параметров системы разработки для глубоких горизонтов выполнены исследования по оценке напряженно-деформированного состояния (НДС) пород нетронутого массива.

В рамках параметрического обеспечения расчетов НДС массива было выполнено определение прочностных и деформационных свойств горных пород по результатам испытаний на одноосное сжатие. Экспериментами установлено, что предел прочности образцов песчаника на сжатие варьируется в диапазоне от 28,8 до 169,5 МПа и составляет в среднем 96,2 МПа, среднее значение модуля упругости 19,3 ГПа.

Измерение напряжений проводилось методом щелевой разгрузки в стенках трех подготовительных выработок, пройденных под различными углами друг к другу и находящихся вне зоны влияния очистных работ (рис. 1). При реализации метода щелевой разгрузки осуществлялся следующий порядок работ. На стенке выработки устанавливались два репера, и с помощью щелемера фиксировалось расстояние между ними ( $b \approx 300$  мм). Затем между реперами прорезалась щель, и измерялось смещение реперов, возникающее в результате частичной разгрузки стенки выработки [1, 2].

Компонента напряжений, перпендикулярная плоскости щели, определялась в соответствии с выражением [3]

$$\sigma_n = \frac{E}{k} \frac{\Delta}{b},$$

где E – модуль упругости массива;  $\Delta$  – смещение между реперами при разгрузке; k – безразмерный коэффициент, характеризующий степень разгрузки массива горных пород на данной базе измерений [4]; b – расстояние между реперами (база).



Рис. 1. Выкопировка из плана горных работ

На всех экспериментальных участках измерения выполнялись в вертикальном и горизонтальном направлениях. В каждом направлении создавалось по 3–5 щелей для обеспечения необходимой достоверности результатов.

Методика расчета напряжений в нетронутом массиве заключалась в численном моделировании такого естественного напряженного состояния массива, которое обеспечивает расчетное напряжение на контуре выработки, соответствующее результатам натурных измерений (рис. 2).

С этой целью методом конечных элементов решалась задача о деформированном состоянии, формирующемся в окрестности выработки под действием естественного поля напряжений, заданного весом вышележащих пород [4]. Уровень вертикальных напряжений, создаваемый весом толщи вышележащих пород, при  $\gamma = 2,7$  т/м<sup>3</sup> и глубине выработок 650 м на экспериментальных участках составляет 17,5 МПа.

По результатам натурных экспериментов и численного моделирования нетронутого массива рудника Жомарт установлено, что максимальные горизонтальные напряжения ( $\sigma_1$ ) составляют 27,7 МПа и действуют в направлении, перпендикулярном линии простирания



Рис. 2. Схема оценки поля напряжений ненарушенного массива методом щелевой разгрузки

рудных тел. Соответственно, минимальные главные горизонтальные напряжения ( $\sigma_2$ ) величиной 16,2 МПа действуют вдоль простирания рудных тел.

#### Библиографический список

1. Асанов В. А. Исследование напряженного состояния соляного массива методом щелевой разгрузки / В. А. Асанов и др. // Управление НДС массива горных пород при открытой и подземной разработке месторождений полезных ископаемых: тез. докл. Всесоюз. конф. / ИГД СО РАН. – Екатеринбург-Новосибирск, 1996. – С. 4–5.

2. Влох Н.П. Совершенствование метода щелевой разгрузки / Н.П. Влох, А.В. Зубков, Ю.Г. Феклистов // Диагностика напряженного состояния породных массивов. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1980. – С. 30–35.

3. Влох Н. П. Управление горным давлением на подземных рудниках / Н. П. Влох. – М.: Недра, 1994. – 207 с.

4. Барях А.А. Интерпретация результатов щелевой разгрузки / А.А. Барях, Н.А. Еремина, В.А. Асанов // Проблемы безопасности при эксплуатации месторождений полезных ископаемых в зонах градопромышленных агломераций. – Екатеринбург: ГИ УрО РАН, 1997. – С. 17–22.

УДК 622.831

### ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА Горных пород стрельцовского рудного поля

М.В.Лизункин, А.В.Бейдин

В настоящее время и в перспективе актуальной задачей для ОАО «ППГХО» является поддержание объемов и рентабельности производства урана в условиях тенденции сокращения его в остаточных запасах руды и увеличения доли разработки маломощных рудных тел по мере углубления горных работ [1]. Рентабельность отработки таких запасов может быть достигнута путем применения высокопроизводительных систем разработки (например, подэтажных штреков) и физико-химической геотехнологии (блочное подземное выщелачивание замагазинированной руды) [2]. Необходимым условием применения таких технологий является геомеханическое обоснование параметров конструктивных элементов систем разработки и крепления горных выработок на основе первоначальных (природных) напряжений горного массива.

Исследования напряженно-деформированного состояния массива горных пород осуществляли на разрабатываемых в настоящее время месторождениях Юбилейное, Стрельцовское и Антей, входящих в Стрельцовское рудное поле.

Юбилейное месторождение приурочено к центральной части Тулукуевской зоны разломов. Урановое оруденение месторождения сосредоточено в осадочно-туфогенных и фельзитовых комплексах пород (полевошпатовые песчаники, разногалечные конгломераты, туфопесчаники, туфы и туфолавы фельзитов, покров фельзитов, трахидациты) [3]. Рудные залежи сконцентрированы в интервале глубины 50–450 м от поверхности. В целом по месторождению подавляющая часть запасов урана (около 99%) сосредоточена в породах верхней толщи. При этом в фельзитах локализовано 54% запасов, в породах туфогенно-осадочной толщи 45%, из которых более 90% сосредоточено в пластообразных залежах. На долю трахидацитов верхнего покрова приходится менее 1% запасов урана. Рудные тела имеют жило-, линзо- и гнездообразные формы. Крепость руды и пород по шкале профессора М.М. Протодьяконова колеблется от 5 до 14–16.

Тектоническое строение Юбилейного месторождения определяется проявлением системы крутопадающих разрывов северо-западного простирания, составляющих Тулукуевскую зону разломов. Между основными разрывами широко развиты системы оперяющих нарушений, зоны трещиноватости, дробления и брекчирования. В зонах тектонических нарушений вмещающие породы неустойчивы, а вне зон – средней устойчивости. Руды, локализованные во всех разностях пород, неустойчивы.

Месторождения Стрельцовское и Антей расположены в восточной части Стрельцовской вулканотектонической кальдеры. Стрельцовское месторождение локализовано в осадочно-вулканогенной толще, слагающей верхний структурный этаж. В породах нижнего структурного этажа, являющихся фундаментом Стрельцовской кальдеры, непосредственно под Стрельцовским месторождением образовалось месторождение Антей. По структурным, литологическим и морфологическим особенностям оба месторождения существенно различаются, в связи с чем выделены в самостоятельные объекты [3].

Урановое оруденение на Стрельцовском месторождении концентрируется в пределах шести пространственно разобщенных участков, контролируемых узлами сопряжения разноориентированных зон разломов. Рудные залежи, включающие около 80% запасов урана, на поверхности не проявлены и сконцентрированы в интервале глубины 300–550 м от поверхности. Основные запасы урана (77%) сосредоточены в трахидацитах, 16% – в базальтах, остальные – в кварцевых порфирах и конгломератах. На месторождении выделяется три основных морфологических типа рудных залежей, пространственно связанных между собой: крупные жилообразные залежи и мелкие жилы, уплощенные пологонаклонные штокверкоподобные залежи, пластообразные пологозалегающие залежи.

Месторождение Антей, уникальное по количеству и качеству урановых руд, локализуется в средне- и крупнозернистых порфировидных и биотитовых гранитах фундамента и базальных конгломератах на глубине 350–1400 м от дневной поверхности. Геолого-структурные особенности определяются проявлением на его площади сложной системы крутопадающих разрывов различной ориентировки и многочисленных пологих срывов. Основную роль в локализации уранового оруденения играют тектонические наруше-



Рис. 1. Схема расположения разгрузочных щелей по измерению напряжений горных пород на месторождении Юбилейное

ния северо-восточного простирания. Месторождение Антей является наиболее глубоко залегающим объектом Стрельцовского рудного поля, склонным к горным ударам, а с глубины 500 м, по заключению ВНИМИ, опасным по горным ударам. Оно отделяется от расположенного выше Стрельцовского месторождения безрудным покровом нижних базальтов.

По физико-механическим свойствам гранитоиды обладают высокими прочностью и упругостью и незначительной пористостью. Рудные тела представлены крупными линейно вытянутыми крутопадающими жилообразными залежами сложной формы и мелкими жилообразными залежами простой морфологии. Крепость руды и пород по шкале профессора М.М. Протодьяконова изменяется от 8 до 16–18. Вне зон тектонических нарушений породы большей частью средней устойчивости, в зонах нарушений и рудоносных участках, в связи с повышенной трещиноватостью, породы неустойчивые.

Измерение напряжений горных пород производили методом щелевой разгрузки по методике Института горного дела УрО РАН [4]. Оценка действующего напряжения в элементе массива осуществлялась по изменению его напряженного состояния проходкой щели и измерения при этом соответствующих реакций в виде деформаций распорных реперов, установленных перпендикулярно этой щели.

На Юбилейном месторождении напряжения определяли в квершлаге 11к-501 и штреке 2-502 (рудник № 8, гор.V (+420 м)). Глубина горных работ составила 300 м. Станции располагались ниже и юго-восточнее дна отработанного карьера «Тулукуй», соответственно, на 60 и 300–400 м в ненарушенном горными работами массиве, представленном трахидацитами. Всего измерено напряжение в 21 щели (рис. 1). В качестве примера приведены фотографии разгрузочных щелей на стенках выработки (рис. 2).



Рис. 2. Фотографии вертикальной (*a*) и горизонтальной (*б*) разгрузочной щелей на стенке выработки

На Стрельцовском месторождении, которое отрабатывает рудник № 1, напряжения определяли в орте 5-721 и полевом штреке 5-701 (гор.VII (+303,2 м), блок 5-821) и полевом штреке 5-803 (гор. VIII (+245 м), пройденных в трахидацитах. Глубина горных работ составила 400 и 460 м. Всего измерено напряжение в 21 щели. На рис. 3 представлена схема расположения наблюдательных станций в блоке 5-821 (гор.VII (+303,2 м)).

На месторождении Антей, разработку которого осуществляет рудник Глубокий, напряжения определяли в ортах 6а-1401, 6а-



Рис. 3. Схема расположения наблюдательных станций в блоке 5-821 (гор.VII (+303,2 м))

1400, штреке 6а-1401 (гор.XIV (–120 м)) и блоке 6а-1312 (заходка 22 (слой 4), слоевой орт, гор.XIII (–60 м)). Глубина горных работ составила 872 и 820 м. Наблюдательные станции располагались в средненапряженных участках горного массива, представленного гранитами. Всего измерено напряжение в 23 щелях. Схема расположения наблюдательных станций приведена на рис. 4.

Шпуры для установки распорных реперов бурили электроперфоратором глубиной 50 мм, диаметром 10 мм. В качестве реперов использовали металлические анкерные болты. Разгрузочные щели пропиливали ручной дисковой алмазной пилой диаметром 250 мм, шириной 3 мм и глубиной 50 мм. Расстояние между реперами определяли микрометром с точностью 1 · 10<sup>-2</sup> мм.

По данным измерений расчетным путем для месторождений Юбилейное, Стрельцовское и Антей установлены, соответственно, 114, 66 и 138 значений напряжений, в том числе действующих вертикально 54, 34 и 66 определений, по простиранию, т.е. продольные напряжения, 30, 16 и 36 определений и вкрест простирания – поперечные напряжения 30, 16 и 36 определений. Средние значения первоначальных напряжений (вертикальное, продольное, поперечное) представлены в табл. 1.



Рис. 4. Схема расположения наблюдательных станций в ортах 6а-1401, 6а-1400 и штреке 6а-1401 (гор.XIV (-120 м))

Таблица 1

	-			-			
			Результаты натурных измерений				
		Теоретическое напряжение (по гипотезе А. Гейма), МПа	напряжений горных массивов				
Напряжение	Глубина разработки, м		Число единичных определений напряжения	Напряжение, МПа ± предельное откл-е	Отношение продольного напряжения к вертикальному sпp/sв	Отношение поперечного напряжения к вертикальному sп/sв	
Юбилейное месторождение							
Вертикальное		-7,4	54	-7,5±0,6			
Продольное	300	-7,4	30	-7,7±1,2	1,03	1,01	
Поперечное		-7,4	30	-7,6±1,0			
Стрельцовское месторождение							
Вертикальное		-10,1	34	$-10,8\pm1,2$			
Продольное	400	-10,1	16	-6,9±1,6	0,64	0,64	
Поперечное	1	-10,1	16	-6,9±1,0			
Месторождение Антей							
Вертикальное		-22,8	66	-22,8±2,7			
Продольное	870	-22,8	36	-16,3±2,4	0,7	1,5	
Поперечное		-22,8	36	-34,1±3,3			

# Результаты натурных измерений напряжений массива горных пород на месторождениях Юбилейное, Стрельцовское и Антей

Величины напряжений аппроксимируются формулами:

• для условий Юбилейного месторождения

 $\sigma_{\rm B} = -1.01 \gamma H$ ,  $\sigma_{\rm IID} = -1.04 \gamma H$ ,  $\sigma_{\rm II} = -1.03 \gamma H$ ,

• для условий Стрельцовского месторождения

$$\sigma_{\rm B} = -\gamma H, \ \sigma_{\rm IID} = -1,11\gamma H, \ \sigma_{\rm II} = -0,92\gamma H,$$

• для условий месторождения Антей

$$\sigma_{\rm B} = -\gamma H, \ \sigma_{\rm np} = -0,7\gamma H, \ \sigma_{\rm n} = -1,5\gamma H,$$

где *ү* – плотность пород и руд, МН/м<sup>3</sup>; *H* – глубина горных работ, м.
На основе выявленных закономерностей определены первоначальные напряжения горного массива для расчета параметров конструктивных элементов систем разработки для различных глубин, представленные в табл. 2–4.

Таблица 2

Первоначальные напряжения горного массива для Юбилейного месторождения

Глубина разработки	Напряжение, МПа			
от поверхности, м	вертикальное $\sigma_{\scriptscriptstyle B}$	продольное $\sigma_{np}$	поперечное $\sigma_n$	
300	-7,5	-7,7	-7,6	
400	-9,9	-10,3	-10,2	
500	-12,5	-12,8	-12,7	
600	-14,9	-15,4	-15,2	
700	-17,5	-17,9	-17,8	
800	-19,9	-20,5	-20,3	

Таблица 3

Первоначальные напряжения горного массива для Стрельцовского месторождения

Глубина разработки	Напряжение, МПа			
от поверхности, м	вертикальное $\sigma_{_B}$	продольное $\sigma_{np}$	поперечное $\sigma_n$	
300	-7,6	-4,8	-4,8	
400	-10,1	-6,5	-6,5	
500	-12,6	-8,1	-8,1	
600	-15,1	-9,7	-9,7	
700	-17,6	-11, 3	-11,3	
800	-20,2	-12,9	-12,9	

Таблица 4

# Первоначальные напряжения горного массива для месторождения Антей (средненапряженные участки)

Глубина разработки	Напряжение, МПа			
от поверхности, м	вертикальное $\sigma_{_B}$	продольное $\sigma_{np}$	поперечное $\sigma_n$	
600	-15,7	-11,0	-23,6	
700	-18,3	-12,8	-27,4	
800	-21,0	-14,7	-31,5	
900	-23,6	-16,5	-35,4	

Установленные величины напряжений на месторождениях Юбилейное, Стрельцовское и Антей рекомендуется использовать при проектировании геотехнологии блочного подземного выщелачивания урана, расчета конструктивных параметров систем разработки и обоснования способов управления горным давлением.

Работа выполнена в ходе реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства «Создание комплексной технологии отработки беднобалансового уранового сырья геотехнологическими методами» при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки России).

#### Библиографический список

1. Лизункин В. М. Комбинированная геотехнология добычных работ с рентгенорадиометрической сортировкой и выщелачиванием урана из бедной рудной массы в подземных условиях / В. М. Лизункин, А. А. Морозов, А. В. Бейдин // Горный журнал. – 2013. – № 8(2). – С. 21 – 25.

2. Лизункин В.М. Отработка маломощных крутопадающих урановых жил способом подземного выщелачивания / В.М. Лизункин, А.А. Гаврилов, А.А. Морозов // Горный журнал. – 2013. – № 8(2). – С. 25–28.

3. Геология Урулюнгуевского рудного района и молибден-урановых месторождений Стрельцовского рудного поля / Л. П. Ищукова и др. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998. – 524 с.

4. Влох Н. П. Управление горным давлением на подземных рудниках / Н. П. Влох. – М.: Недра, 1994. – 208 с.

# НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД В ОБЛАСТЯХ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОГЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

## УДК 622.831.1

## СОВРЕМЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ ПРИРОДНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ПРОБЛЕМЫ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ<sup>\*</sup>

#### А.А. Козырев

Многочисленными исследованиями отечественных и зарубежных ученых установлен факт широкой распространенности тектонических напряжений в верхней части земной коры как в изверженных кристаллических породах, так и в осадочном (метаморфизованном) комплексе пород.

М. В. Гзовским в 1954 году впервые было введено понятие «тектонические поля напряжений» [1, 2], им же в этот период предложен метод реконструкции палеонапряжений (ориентировки главных напряжений) по геологическим данным о трещинных структурах.

По данным экспериментальных определений в породах кристаллического и складчатого фундамента горизонтальные напряжения превышают вертикальные в 60% случаев, в осадочных породах – в 15–20%. Причем это превышение может достигать 5–10 раз, и именно горизонтальные напряжения определяют особенности проявлений горного давления и устойчивость конструктивных элементов систем разработки месторождений полезных ископаемых и комплексов различных подземных выработок.

Принципиально меняется понятие «глубокие рудники», поскольку динамические проявления горного давления отмечаются уже на глубине 200–300 м.

В настоящее время получили признание две концепции о формировании поля напряжений в верхней части земной коры. Согласно первой, естественное поле напряжений определяется действием гравитационных и остаточных напряжений, связанных с генезисом

<sup>\*</sup> Исследования проводятся при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 12-05-00507.

формирования массивов. Остаточные напряжения рассматриваются как самоуравновешивающиеся компоненты напряжений при отсутствии действия внешних сил. Согласно второй концепции, суммарное поле напряжений в массиве определяется совместным действием гравитационного и тектонического полей, соотношение между которыми меняется в значительных пределах. Тектонические поля напряжений связываются с современными движениями плит и блоков земной коры.

Условия и закономерности проявления тектонических напряжений весьма разнообразны. Параметры поля напряжений в массиве характеризуются большой изменчивостью как по площади, так и с глубиной и находятся в сложной зависимости от тектонотипа региона, интенсивности современных движений, свойств пород, структурных неоднородностей и нарушенности массива, рельефа и ряда других факторов (рис. 1). Тектонически напряженные массивы отличаются повышенными значениями градиента скорости современных поднятий земной коры, повышенной сейсмической активностью, аномальными проявлениями горного давления в скважинах и под-



Рис. 1. Карта напряженного состояния горных пород в основных горнопромышленных районах бывшего СССР, по данным измерений в рудниках

земных выработках на сравнительно малых глубинах. Анализ опубликованных материалов, а также результатов наших определений различными методами и наблюдение за проявлениями горного давления на рудниках и в глубоких скважинах Кольского полуострова и Средней Азии позволили установить приуроченность проявления высоких горизонтальных напряжений к зонам тектонических поднятий земной коры [3, 4]. Эта приуроченность просматривается как закономерная для территории Кольского полуострова, Фенноскандии, Средней Азии и не противоречит данным по другим территориям и регионам (см. рис. 1). Всюду, где наблюдаются современные поднятия земной коры или такие поднятия имели место в геологическом прошлом и отражены в рельефе, возможно проявление высокой горизонтальной напряженности. Поднятия могут быть связаны как с вертикальными, так и горизонтальными движениями участков земной коры. В зонах опусканий и медленных погружений земной поверхности наблюдается гравитационное напряженное состояние, поэтому горизонтальные напряжения здесь могут быть меньше вертикальных.

## Анализ натурных измерений

Измерениями на рудниках Кольского полуострова [5] доказано превышение горизонтальных напряжений над вертикальными ( $\gamma H$ ) до 5–10 раз в зависимости от глубины горных работ. Тектонические напряжения, установленные вне зоны влияния очистных горных работ, на значительной площади достигают значений 50–60 МПа (рис. 2, A). Для этой территории скорость современных поднятий составляет 1–3 мм/год.

Направление максимального сжатия регионального поля напряжений близко к субмеридиональному, для локальных полей напряжений на месторождениях максимальные напряжения сжатия могут быть ориентированы в субширотном направлении или по простиранию рудного тела [4].

В пределах Курской магнитной аномалии горизонтальные напряжения в 2–3 раза превышают вертикальные [6]. При этом горизонтальные напряжения обладают существенной анизотропией. Максимальные сжимающие напряжения тяготеют к направлению с азимутом 150°. Вся зона криворожских структур в районе Шепетовка – Новоград-Волынский и северо-западная часть Украинского кристаллического щита поднимается со скоростью 5,0–7,5 мм/год.

Для территории Урала, испытывающей современные поднятия (особенно в южной части) со скоростью 1,5–5,0 мм/год, зарегистрировано крайне неравномерное распределение упругих напряжений в





массиве [7–12]. Максимальное сжатие действует преимущественно в субширотном направлении под небольшими углами к горизонтальной плоскости, т. е. преимущественно вкрест простирания основных геологических структур. Величина максимальных сжимающих напряжений достигает на отдельных месторождениях 50 МПа. Максимальные сжимающие напряжения в массиве в 1,5–5,0 раз превышают напряжения от веса вышележащей толщи. Вместе с тем эти напряжения неодинаковы для различных рудных районов и резко меняются в пределах месторождения, участка и даже отдельных блоков (см. рис. 2, E).

Для Джезказганского месторождения установлено действие высоких горизонтальных напряжений, превосходящих вертикальные в 2–7 раз [15]. Вертикальные напряжения приближенно соответствуют вычисленным по весу вышележащей толщи пород. Повсеместно наблюдается анизотропия горизонтальных напряжений ( $\sigma_3/\sigma_2 \approx 1,8-3,6$ ). Максимальные главные напряжения ориентированы в субмеридиональном направлении и параллельны флексурам. Наибольшие горизонтальные напряжения зафиксированы в купольных частях антиклинальных складок, наименьшие – у флексур. Величина максимальных сжимающих напряжений колеблется от 12 до 54 МПа, что связано с интенсивностью трещиноватости массива. Отмечаются дифференцированные движения отдельных блоков фундамента в современный период, что обуславливает тектоническую напряженность пород.

Многочисленные экспериментальные исследования напряженного состояния пород выполнены на месторождениях Средней Азии, которая является одной из наиболее сейсмоактивных областей, характеризующейся сложным геологическим строением, высокой современной мобильностью земной коры и сильно расчлененным рельефом. Скорости региональных поднятий достигают здесь 5–10 мм/год. Для этого региона установлено преобладание горизонтальных напряжений над вертикальными, причем максимальное сжатие ориентировано преимущественно в субмеридиональном направлении. При этом простирание основных геологических структур, антиклинальных складок, хребтов имеет субширотное направление.

Поле напряжений на локальных участках может менять свои параметры под влиянием различных факторов. В значительной мере на величину напряжений и их направление влияют рельеф местности и свойства пород. В зависимости от указанных факторов величина  $\sigma_3$ колеблется от 5 до 70–80 МПа [14, 16] (рис. 2,  $\Gamma$ ). В пределах Таджикистана нашими измерениями на Душанбинском геофизическом полигоне, а также измерениями В. Я. Степанова в подземных выработках Рогунской ГЭС [17] установлено превышение горизонтальных напряжений над вертикальными. При этом в зависимости от свойств пород максимальные сжимающие напряжения изменяются в пределах от 14 до 70 МПа. Направление регионального сжатия – субмеридиональное, однако вблизи разломов, долин направление максимального сжатия может быть субширотным.

В районе Горной Шории и Хакасии большой объем экспериментальных определений полей напряжений выполнен Сибирским филиалом ВНИМИ и ВостНИГРИ. Измерения проведены на Таштагольском, Абаканском, Шерегешском, Орловском месторождениях. Установлено, что максимальные сжимающие напряжения действуют в горизонтальной плоскости, причем их направление преимущественно перпендикулярно складчатости, а также простиранию рудных тел. Направление максимальных сжимающих напряжений 315-335°. Горизонтальные напряжения в 1,5-3,0 раза выше напряжений от веса вышележащей толщи пород уН. Абсолютная величина напряжения σ<sub>3</sub> достигает 50–60 МПа на глубине до 800 м от поверхности [13, 18] (см. рис. 2, В). Наличие тектонического поля напряжений обусловлено геотектоническими процессами глобального характера. Месторождения находятся в пределах сейсмоактивной зоны Алтае-Саянской складчатой области, в которой происходят современные тектонические движения земной коры с деформациями сжатия. В целом, согласно существующим представлениям, Алтае-Саянская горная область как часть Евразийской плиты движется на юг со скоростью 0.77 см/год и испытывает давление от встречного движения Индийской плиты [19].

По данным ИГД СО РАН, в условиях Кузнецкого угольного бассейна вне зон геологических нарушений напряженное состояние массива в первом приближении соответствует расчетному по гипотезе Динника [20]. По данным П. В. Егорова, горизонтальные напряжения обладают значительной анизотропией и превышают вертикальные напряжения от веса вышележащих пород. Максимальные сжимающие напряжения до 2 и более раз могут превышать гравитационные и ориентированы по азимуту 150–160° [21]. Кузнецкий бассейн характеризуется повышенными скоростями новейших вертикальных тектонических движений (до 3 мм/год).

В Восточном Приамурье (месторождение Николаевское) измерениями ИГД СО РАН отмечено превышение горизонтальных напряжений над вертикальными, причем в горизонтальной плоскости отмечается анизотропия напряжений [22]. Максимальные сжимающие напряжения на глубине до 850 м от поверхности не превышают 40 МПа и ориентированы по азимуту 340°. Район характеризуется повышенным градиентом скорости вертикальных новейших движений, повышенной сейсмической активностью, так как располагается недалеко от оси Курило-Камчатского желоба.

На Норильских месторождениях в пределах рудников «Октябрьский», «Комсомольский», «Талнахский», «Таймырский» установлено наличие значительных горизонтальных напряжений, изменяющихся от 20 до 80 МПа, что до 1,5–2,0 раз выше напряжений от веса пород [23–26]. Вторая горизонтальная компонента напряжений составляет, ориентировочно, половину от максимальной. Вертикальная составляющая соответствует весу пород вышележащей толщи. Отмечены резкая неоднородность поля напряжений, наличие участков с чисто гравитационным распределением напряжений, взаимосвязь избыточной напряженности со свойствами пород, тектонической нарушенностью массива. Рассматриваемый район характеризуется повышенным градиентом скорости новейших вертикальных тектонических движений.

На Северном Кавказе в пределах Тырныаузского месторождения также установлено действие высоких горизонтальных сжимающих напряжений, превышающих  $\gamma H$  [27, 28]. Максимальные сжимающие напряжения имеют северо-западное (юго-восточное) направление с азимутом ~320°. Кавказ – район с высоким градиентом скорости вертикальных новейших движений. Скорость современных поднятий составляет около 8 мм/год. В целом, по имеющимся сейсмическим данным, в районе Северного Кавказа максимальное сжатие ориентировано по азимуту 110–290°.

В последнее время появились подтверждения справедливости подобной взаимосвязи для условий осадочных пород Донбасса, где горизонтальная составляющая напряжений в породах угленосной толщи практически в пределах всего Донбасса больше вертикальной [29]. Согласно исследованиям на Донбасском геофизическом полигоне, отмечается горизонтальное сжатие угленосной толщи. При этом скорость современных горизонтальных движений оценивается величиной 1–2 см/год, а скорость вертикальных движений 3–4 мм/год.

## Анализ и интерпретация зарубежных данных

Значительный объем измерений напряжений выполнен в Западной Европе, Северной Америке, Канаде, Австралии, Японии, на африканском континенте. Обобщение этих данных приводится в работах [30–39]. Из приведенных данных следует, что примерно в 65% случаев выполненных измерений горизонтальная составляющая тензора напряжений выше вертикальной. Главные напряжения в горизонтальной плоскости чаще всего не равны между собой, что не может быть обусловлено лишь влиянием анизотропии массива. Наиболее распространено мнение о линейной зависимости избыточных горизонтальных напряжений с глубиной. Как правило, все исследователи ссылаются на формулы Н. Хаста или Н.К. Булина [40–41]:

$$\sigma_x + \sigma_y = \sigma_{xmax} + \sigma_{xmin} = 0,098H + 18,0, M\Pi a, \sigma_{xy} = 0,031H + 6,0, M\Pi a,$$

где  $\sigma_x, \sigma_y$  – горизонтальные сжимающие напряжения по двум взаимно перпендикулярным направлениям; *H* – глубина, м. Для территории Северной Америки Б. Хаймсоном [31] получена зависимость  $\sigma_x = 0,0196H + 5, M\Pi a.$ 

Для территории Канадского щита Г. Хергетом [32] приводится формула  $\sigma_r = 0.04H + 8.139$ , МПа. Позже Б. Арьянгом была уточнена эта формула [42]:  $\sigma_r = 11.27 + 0.0344H$ , МПа (рис. 3)

Для территории Австралии Г. Воротницкий и Д. Денхам [32] изменение горизонтальных напряжений с глубиной аппроксимируют уравнением  $\sigma_r = 0,0215H + 7,26$ , МПа. В более поздней работе М. Lee и др. [43] были уточнены направление максимального сжатия на территории Австралии и величина напряжений  $\sigma_r$ . Подобно Г. Хергету, Г. Воротницкий и Д. Денхам также определили, что в Австралии имеется ряд мест, где горизонтальные напряжения меньше или равны вертикальным.



Рис. 3. Изменение горизонтальных максимальных (*a*), горизонтальных минимальных (б) и вертикальных (*в*) напряжений в Канаде и их аппроксимация линейными зависимостями по [42]

В Японии [36] по результатам измерений методом разгрузки установлено, что вертикальные напряжения с глубиной изменяются в соответствии с зависимостью  $\sigma_{\rm B} = \gamma H$ , а горизонтальная составляющая не имеет прямого отношения к толще покрывающих пород. Значение данной компоненты обычно превышает значение вертикальных напряжений.

Отношение  $(\sigma_r)_{max}/(\sigma_B)$  составляет величину 1,0–1,3, в отдельных случаях достигает значения 2,6. Авторы работы [37] объясняют результаты своих измерений движением плит Филиппинского моря и Тихого океана в сторону границы Азиатской плиты.

В. Brady и E. Brown [44] на основании обобщения имеющихся экспериментальных данных (рис. 4) дают следующую формулу для определения коэффициента K, равного отношению суммы горизонтальных напряжений ( $\sigma_x + \sigma_y$ ) к удвоенному значению вертикальной компоненты: K = 0,3 + 1500/H. При этом сделано допущение, что вертикальные напряжения соответствуют следующему выражению:  $\sigma_r = 0,027H$ , МПа.

Из вышеизложенного следует, что по приведенным формулам может быть получен очень широкий диапазон величин горизонтальных напряжений, в особенности для небольших глубин (табл. 1). Поэтому к использованию установленных зависимостей необходимо подходить осторожно, поскольку положенные в их основу измерения часто не привязаны к абсолютным глубинам, блочности массива и свойствам пород, тектоническим нарушениям. Так как большая часть измерений выполнена в гористой местности и на сравнительно



Рис. 4. Компиляция мировых измерений напряжений, показывающая: *a* – связь вертикальных напряжений с глубиной; *б* – коэффициент *K* [44]

#### Таблица 1

	Максимальные напряжения $\sigma_{r max}$ (МПа)						
Глубина от поверхности <i>H</i> , м	H. Xacr*	Н. Булин	Г. Хергерт	Б. Хаймсон	Б. Арьянг	Г. Воротницкий, Д. Денхам	Б. Бради*, Е. Браун
1000	71,0	37,1	48,0	25,0	45,0	29,0	58,0
500	41,0	22,0	28,0	15,0	28,0	18,0	47,0

Расчетные значения максимальных напряжений σ<sub>г</sub>

\* Рассчитано исходя из предпосылки, что  $\sigma_{\Gamma \min} / \sigma_{\Gamma \max} = 0.6$ .



Рис. 5. Мировая карта напряжений

небольших глубинах (до 1000 м), представляется целесообразным учитывать концентрацию напряжений за счет влияния рельефа поверхности. Эти и ряд других обстоятельств позволяют усомниться в правомерности использования обобщенных уравнений, особенно по континентам и регионам.

Для условий Хибинских и Ловозерских рудников на Кольском полуострове с углублением горных работ отмечается снижение разницы между максимальными горизонтальными напряжениями и вертикальными. Так, если вблизи поверхности на глубине до 100–150 м отношение  $\sigma_3:\sigma_1 \approx 5 \div 10$ , то на глубине 500–600 м  $\sigma_3:\sigma_1 \approx 2 \div 3$ . По-видимому, с глубиной за счет роста вертикальной составляющей отношение  $\sigma_3:\sigma_1$  будет стремиться к единице.

Аналогичные выводы на основании обобщения мировых данных делают G. Herget, а также B. Brady и E. Brown. Они считают, что на глубине 1–2 км от поверхности горизонтальные и вертикальные напряжения выравниваются. Имеющиеся данные по Южной Африке на глубинах до 3000 м свидетельствуют о гидростатическом распределении напряжений на этих глубинах [34, 44].

Таким образом, на многих рудниках в различных районах бывшего СССР и за рубежом непосредственными измерениями установлено действие сложного гравитационно-тектонического поля напряжений. Условия и закономерности проявления тектонических напряжений весьма разнообразны. Группой ученых из разных стран в рамках международной программы исследований литосферы составлена мировая карта напряжений в верхней части земной коры [35, 45], на которой приведены последние результаты определений тектонических напряжений различными способами на всех континентах, а в некоторых случаях и под дном океанов (рис. 5). Анализ этой карты свидетельствует о том, что проявления тектонических напряжений приурочены главным образом к границам взаимодействия литосферных плит, зонам субдукции и связаны напрямую с движением плит.

#### Выводы

1. Основная особенность значений напряжений, установленных различными методами, — это неопределенность ранга этих напряжений (глобальный, региональный, локальный). Факторы, определяющие ранг установленных напряжений, не приведены.

2. Избыточные горизонтальные напряжения приурочены к зонам тектонических поднятий земной коры; чем выше скорость современных поднятий, тем выше уровень тектонических напряжений в верхней части земной коры. Поднятия могут быть связаны как с вертикальными, так и горизонтальными движениями участков земной коры.

3. Тектонические напряжения в нетронутом массиве горных пород на многих месторождениях достигают 50–60 МПа и более. При этом их величина превышает вертикальные в 3–5 раз, а вблизи поверхности и до 10 раз. Напряжения весьма неоднородны в пределах региона, месторождений и отдельных блоков и определяются тектонотипом месторождения, свойствами пород, блочностью и структурной нарушенностью массива, влиянием разломов, рельефа поверхности.

4. Максимальное сжатие в большинстве случаев ориентировано субгоризонтально в направлении вкрест простирания складчатых структур. При этом в зависимости от свойств вмещающих пород и рудного тела направление максимального сжатия может меняться на 90°.

5. Для глубины до 700–800 м установлен в основном линейный характер изменения горизонтальных напряжений с увеличением глубины. На больших глубинах (1500–2000 м) отмечается тенденция выравнивания горизонтальных и вертикальных напряжений (гидростатическое состояние), что необходимо учитывать при проектировании ведения горных работ. При дальнейшем увеличении глубины до 3,0–4,0 км вертикальные напряжения могут снова превышать горизонтальные.

6. Тектонически напряженные массивы характеризуются повышенными значениями скорости современных поднятий геологических структур, значительной сейсмической активностью, динамическими проявлениями в скважинах и горных выработках на малых глубинах.

7. Принципиально меняется понятие глубоких рудников, поскольку динамические проявления горного давления отмечаются уже на глубине 200–300 м от поверхности. При этом необходимо защищать выработки не от вертикального давления, как это делается традиционно надработкой месторождения, а от горизонтального сжатия, формируя вертикальные щели либо полости в определенном направлении. Разработан целый комплекс мер по защите отдельных выработок или конструктивных элементов систем разработки от действия избыточных тектонических напряжений. Это направление и форма поперечного сечения выработок, направление фронта развития горных работ, разгрузка массива бурением строчки сближенных скважин, крепление выработок и т.д.

#### Библиографический список

1. Гзовский М.В. О задачах и содержании тектонофизики / М.В. Гзовский // Изв. АН СССР. Сер 3. Геофизика. – 1954. – № 3. – С. 244–263.

2. Гзовский М. В. Тектонические поля напряжений // Изв. АН СССР. Сер. 5. Геофизика. – 1954. – № 5. – С. 390–410.

3. Марков Г. А. О распространении горизонтальных тектонических напряжений в зонах поднятий земной коры / Г.А. Марков // Инженерная геология. – 1980. – № 1. – С. 20–30.

4. Управление горным давлением в тектонически напряженных массивах / А. А. Козырев и др. – Апатиты: КНЦ РАН, 1996. – Ч.1. – 160 с.

 Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок / И. А. Турчанинов и др. – М.: Наука, 1978. – 256 с.

 Казикаев Д. М. Определение рациональных параметров камерной системы с учетом естественного напряженного состояния массива горных пород / Д. М. Казикаев, Г. Г. Суржин, Б. А. Фомин // Напряженное состояние породных массивов. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1978. – С. 38–44.

7. Определение напряженного состояния горного массива / А. Д. Сашурин и др. // Устойчивость бортов карьеров и горное давление. – М.: Недра, 1966. – С. 94–98.

8. Проявление горного давления на Гороблагодатском руднике / Н. П. Влох, А. Д. Сашурин, А. В. Зубков, В. М. Царегородцев // Горный журнал. – 1967. – № 6. – С. 55 – 57.

9. Влох Н. П. Измерение напряжений в массиве крепких горных пород / Н. П. Влох, А. Д. Сашурин. – М.: Недра, 1970. –124 с.

10. Влох Н. П. Управление горным давлением на железных рудниках / Н.П. Влох, А.Д. Сашурин. – М.: Недра, 1974. – 184 с.

11. Влох Н.П. Напряжения в земной коре и их влияние на проявление горного давления / Н.П. Влох, А.В. Зубков // Подземная разработка рудных месторождений: сб. науч. тр. / ИГД МЧМ СССР. – Свердловск, 1969. – Вып. 22. – С. 151–160.

12. Влох Н. П. О характере первичной напряженности горных пород / Н. П. Влох, А. В. Зубков, А. Д. Сашурин // Геология и геофизика. – 1972. – № 11. – С. 117–120.

13. Оценка тектонических полей напряжений при отработке железорудных месторождений Горной Шории и Хакасии / В.В. Шрепп и др. // Взаимосвязь геолого-тектонического строения, свойств, структурных особенностей пород и проявлений избыточной напряженности / ГоИ КНЦ РАН. – Апатиты, 1984. – С. 109–111.

14. Напряженное состояние горных пород на рудных месторождениях Средней Азии и оценка их удароопасности / И. Т. Айтматов и др. // Напряженное состояние породных массивов / ИГД СО АН СССР. – Новосибирск, 1978. – С. 112–115.

15. Чабдарова Ю. И. Горное давление в антиклинальных структурах Джезказгана / Ю. И. Чабдарова, Ю. В. Болгожин, А.Н. Букин. – Алма-Ата: Наука, 1980. – 194 с.

16. Айтматов И. Т. Геомеханика рудных месторождений Средней Азии / И. Т. Айтматов. – Фрунзе: Илим, 1987. – 246 с.

17. Напряженное состояние массива горных пород в районе строительства Рогунского гидроузла / В. Я. Степанов и др. // Напряженно-деформированное состояние и устойчивость скальных склонов и бортов карьеров. – Фрунзе: Илим, 1979. – С. 104–114.

18. Поля напряжений Рудного Алтая и его связь с геолого-структурными факторами / Ш. А. Болгожин и др. // Взаимосвязь геолого-тектонического строения, свойств, структурных особенностей пород и проявлений избыточной напряженности ; ГоИ КНЦ РАН. – Апатиты, 1985. – С. 104–106.

19. Кучай В.К. Современная динамика земли и орогенез Памиро-Тянь-Шаня / В.К. Кучай. – М.: Наука, 1983. – 208 с.

20. Курленя М.В. Результаты экспериментальных исследований напряженного состояния угольных массивов Кузбасса / М.В. Курленя // Напряженное состояние земной коры. – М., 1973. – С. 128–134.

21. Егоров П. В. Исследования напряженного состояния нетронутого массива осадочных пород в Кузбассе / П. В. Егоров // Измерение напряжений в массиве горных пород: материалы IV Всесоюзного семинара, Новосибирск, 26–29 июня 1973 г., Ч. II–III / ИГД СО РАН. – Новосибирск, 1974. – С. 3–10.

 О напряженно-деформированном состоянии Николаевского месторождения / В. Д. Барышников и др. // ФТПРПИ. – 1982. – № 2. – С. 3–12.

23. Результаты изучения напряженного состояния нетронутого массива пород на Талнахском и Октябрьском месторождениях / И. М. Петухов и др. // Измерение напряжений в массиве горных пород: материалы науч. конф. / ИГД СО РАН. – Новосибирск, 1976. – С. 6–9.

24. Петухов И. М. Предотвращение горных ударов на рудниках / И. М. Петухов, П. В. Егоров, Б. Ш. Винокур. – М.: Недра, 1984. – 230 с.

25. Бронников Д. М. Разработка руд на больших глубинах / Д. М. Бронников, Н. Ф. Замесов, Г. И. Богданов. – М.: Недра. 1982. – 292 с.

26. Естественное поле напряжений и динамические формы разрушения горного массива на руднике «Октябрьский» / Б. М. Липчанский и др. // Напряженное состояние породных массивов: сб. науч. тр. / ИГД СО АН РАН. – Новосибирск, 1978. – С. 27–32.

27. Исследования удароопасности массива горных пород на рудниках Северного Кавказа / К. В. Кучухидзе и др. // Методы и технические средства контроля и прогнозирования проявлений горного давления на подземных рудниках цветной металлургии. – Свердловск, 1979. – С. 35–37.

28. Кучухидзе К.В. Направление максимальных напряжений в массиве альджуртинских гранитов Тырныаузского месторождения / К.В. Кучухидзе, Г.Я. Балиашвили // Взаимосвязь геолого-тектонического строения, свойств, структурных особенностей пород и проявлений избыточной напряженности. – Апатиты, 1984. – С. 140–142.

29. Волошин Н. Е. Внезапные выбросы и способы борьбы с ними в угольных шахтах / Н.Е. Волошин. – Киев: Техника, 1985. – 127 с.

30. Введение в механику скальных пород / под ред. Х. Бока. – М.: Мир, 1983. – 276 с.

31. Tectonic stresses in the Alpine-Wediterranean region // Rock Mechanics. 1980. N 9. -225 p.

32. Herget G. Ground stress determination in Canada // Rock Mechanics. 1974. N 7. – P. 53–64.

33. Worotnicki G., Denham D. The state of stress in the upper part of the earth's crust in Australia according to measurements in tunnels and mines and from seiamic observations. Investigation of stress in rock-Ad-vances in stress measurement // Preprint, Int. Soc. Rock. Mech. Symp., Sydney. 1976. – P. 71–82.

34. Brown E.T., Hoek E. Trends in relationships between measured in situ stresses and depth //International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Geomechanics Abstracts. -M. 1978. V. 15. N 4. -P. 211–215.

35. Zoback M.L., Zoback M.D., Adams. J. Global patterns of tectonic stress nature // Nature. - 1989. - V. 341. - N 6240. - P. 291-298.

36. Kanagawa T., Hibino S., Ishida I., Hayashi M., Kitahara Y. In Situ Stress Measurements in the Japanese Islands: Over-coring Results from a Multi-element Gauge Used at 23 Sites.Int.J.Rjck Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr. Printed in Great Britain/ 1986. Vol 23. No 1. – P. 23–39.

37. Potvin Yv., Hadjigeorgiou J., Stacey D. Introduction // Challenges in Deepand High Stress Mining. Copyrught 2007. Australian Centre for Geomechanics. The University of western Australia. P. 1–13.

38. Linder Ernest N., Halpern Jack A. In situ stress in North America: // A compilation. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sci. and Geomech. Abstr. – 1978. – V. 15. – N 4. – P. 183–203.

39. Wesseloo J. Stacey T.R. Updated in situ stress database for Sounthern Africa. Proceedings In-situ Rock Stress Lu, Li Kjoholt & Dahle (eds), Taylor & Francis. Balkema. 2006. P. 467–471.

40. Hast N. The state of stress in the upper part of the Earth's cristas determined by measurements of absolute rock stress // Nanerwissonschaiten. 1974. N 11. – P. 463–475.

41. Булин Н.К. Некоторые выводы из анализа измерений естественных напряжений в подземных горных выработках // Напряженное состояние земной коры. – М. 1973. С. 168–178.

42. Arjang B. Database on Canadian in situ ground stresses. CANMET Mining and Mineral Scinces Laboratories / Division Report MMSL 01-029, Mach 2001 (revised 2004).

43. Lee M.F., Mollison L.J., Mikula P. Pascoe V. In situ rock stress measurements in Western Australia's yilgarn Craton. Proceedings In-situ Rock Stress Lu, Li Kjoholt & Dahle (eds), Taylor & Francis . Balkema. – 2006. – P. 35–42.

44. Brady B., Brown E. Rock Mechanics for Underground mining. Third edition. Kluwer Academic Publishers, 2004. – 688 p.

45. Heidbach, O., Tingay, M., Barth, A., Reinecker, J., Kurfeß, D., Müller, B., The World Stress Map based on the database release 2008, equatorial scale 1:46,000,000, Commission for the Geological Map of the World, Paris, doi:10.1594/GFZ.WSM.Map2009, 2009.

## ПРОБЛЕМА МОНИТОРИНГА АКТИВИЗИРОВАННЫХ ЗОН ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

#### О.А. Хачай

Определение структуры горных массивов, выделение потенциально опасных зон потери их устойчивости является только началом решения важной и актуальной проблемы прогноза поведения массива. С другой стороны, изучение его в подземных условиях является как бы натурной лабораторией, о важности которого постоянно упоминал в своих работах Ю. П. Булашевич – основатель нашего Института геофизики УрО РАН [1, 2].

Одной из фундаментальных проблем горного дела, которую традиционно относят к проблемам геомеханики, является проблема создания теории и методов изучения строения и состояния массивов горных пород с целью прогноза и предотвращения катастрофических явлений при отработке месторождений. Идейным вдохновителем поиска комплексного геофизического и геомеханического подхода к решению этой проблемы на Урале был Н. П. Влох [3, 4].

Определение состояния и динамики массива – задача более сложная, чем картирование его структуры. Отдельные части массива могут находиться в различном напряженном состоянии, а соответствующие деформации могут быть как упругими, так и пластическими. Среда может быть многофазной. Резкое изменение состояния блоков может привести к потере устойчивости всего массива и горному удару. Изменение состояния определяется как природным, так и техногенным воздействием на массив и проявляется, в том числе, в виде образования техногенных полостей и накачки механической энергией во время массовых взрывов, предусмотренных технологией отработки. Явление нестационарности горного массива на сегодняшний день является известным фактом [5, 6]. Проявления ее бывают многообразны: от малозаметных в виде увеличения проницаемости за счет увеличения трещиноватости горных пород до регистрируемых в виде толчков, микроударов, горных ударов, горнотектонических ударов [7]. Последние относятся уже к катастрофическим явлениям, которые инициируются как внутренними, так и внешними техногенными причинами. Для прогнозирования таких явлений при отработке конкретного рудного месторождения важно калибровать отклик горного массива в ответ на контролируемое механическое воздействие. При этом задача включает:

 поиск и идентификацию зон включений в слоисто-блоковом изотропном по физическим свойствам массиве и слежение за их миграцией под влиянием изменения техногенных напряжений,

 – оценку состояния массива по типу включений: контакт на границах пород различного состава, либо трещиноватая среда с различной степенью влагонасыщенности и фиксации ее изменения во времени.

Поэтому актуальна задача создания комплексного подхода к исследованию состояния массива горных пород на базе взаимоуточняющих геофизических и геомеханических методов.

На основе теоретического анализа возможности использования геофизических полей различной природы и практического использования новых методик исследования горных массивов сформулированы основные принципы реализуемой на сегодняшний день системы мониторинга напряженного состояния массивов горных пород, представляемых моделью локальных включений, имеющих иерархическую структуру, погруженных в слоисто-блоковую изотропную среду. Мониторинг производится для изучения нестационарности проявлений этих локальных зон, связанных, в том числе, с изменением состояния массива. Предлагаемая система мониторинга организована в виде нескольких вложенных друг в друга циклов. Первый цикл (внутренний) построен на итерационном принципе и состоит из последовательности процедур: а) выявление локальных зон неоднородности по электропроводности производится с помощью объемной методики индукционных электромагнитных исследований; в дальнейшем строится геометрическая модель изучаемого массива горных пород [8, 9]; б) проведение математического моделирования сейсмического поля в рамках заданной геометрии среды с различными упругими характеристиками [10, 11]; в) построение комплексной электромагнитной и сейсмической модели локальной зоны массива горных пород; г) вычисление компонентов тензора вторичных напряжений, создаваемых зоной неоднородности по электрическим и упругим свойствам; д) построение единой модели по геомеханическим и геофизическим данным напряженного состояния в пределах локальной зоны неоднородности. Во втором цикле проводится сортировка и классификация результатов применения мониторинга, увязка физических и механических свойств изучаемой локальной зоны массива горных пород с использованием подходов [12], формирование временного ряда их изменения под воздействием техногенных и естественных факторов. В третьем (внешнем) цикле определяется количественная взаимосвязь между физическими и механическими параметрами, характеризующими вторичное напряженное состояние каждой из локальных зон массива горных пород в зависимости от геологических, техногенных и сейсмогенных факторов.

По предложению Н. П. Влоха эта система была опробована на ряде массивов, различающихся как по вещественному составу и их геологической классификации (осадочные, вулканогенно-осадочные, вулканогенные), так и по степени удароопасности. Были изучены объекты на Урале (шахта «Магнезитовая», СУБР, Узельгинский рудник) и Таштагол, Западные Саяны. Каждый из этих объектов позволил установить особенности структуры и поведения массива, выделить и ранжировать факторы, влияющие на устойчивость массива. Это удалось исключительно при возможности сопоставления различных факторов в рамках единой комплексной методологии геофизических и геомеханических исследований.

Приведем результаты опробования и эффективности предлагаемой системы мониторинга массива горных пород на шахте «Магнезитовая» (1-й (внутренний) цикл). Опыт геофизических работ в подземных условиях с использованием различных физических полей с целью картирования зон нарушенности скального массива и изучения связи их динамических проявлений в удельных физических параметрах массива свидетельствует о наибольшей эффективности и технологичности использования бесконтактных электромагнитных методов исследования.

## Описание натурных экспериментов

Натурные эксперименты проводились на шахте «Магнезитовая» (г. Сатка, Челябинская обл.) в течение 1997–1999 гг. в феврале – апреле каждого года для изучения строения межвыработочного пространства, оценки степени неоднородности горного блока и изменчивости его строения и состояния во времени. В этих экспериментах лично участвовал и руководил ими Н.П. Влох.

Магнезитовое оруденение Саткинского месторождения приурочено к исключительно сложному залеганию среднезернистых доломитов и проявлено в виде пластообразных и линзообразных тел, залегающих в целом согласно с ними. Породы и рудные тела имеют моноклинальное залегание. Протяженность последних колеблется от 140 м до 3,6 км. Длина их по падению достигает 500 м, мощность изменяется от 8 до 50 м. Контакты магнезитовых тел с доломитами четкие. Часто внутри залежей магнезита наблюдаются прослои доломита, дайки диабазов, габбро-диабазов, диабазовых порфиритов и карстовые полости. Эти дайки образуют обычно крутопадающие тела, реже пластообразные залежи, залегающие согласно с магнезитами и доломитами; мощность их достигает 20 м и протяженность 270 м [11].

Разработка месторождения подземным способом началась в опытном блоке подэтажно-камерной системой с применением твердеющей закладки по методике, изложенной в [14, 15]. Однако данные по предельно допустимым площадям обнажений этих пород отсутствовали, поэтому проводимые исследования необходимы были еще и для решения прикладной задачи – определения состояния массива конкретных горных пород и его изменения вокруг очистных выработок.

На период проведения электромагнитных исследований в отработке были камеры первой очереди, когда кровля и стенки их были представлены массивом горных пород (доломитом и магнезитом), расположенными вкрест простирания залежи магнезита. Электромагнитные индукционные наблюдения велись на двух взаимно параллельных уровнях: на горизонте -297 м в семи взаимно параллельных выработках и на горизонте -277 м в двух выработках. В начале эксперимента в 1997 г. они представляли собой подкровельные выработки длиной до 120 м, шириной 3 м и высотой 3 м. Затем, согласно технологии отработки массива, эти выработки имели ширину до 8 м в той части, где находился магнезит. Там, где были пропластки доломита, ширина выработок оставалась прежней – 3 м. Затем эти выработки отрабатывались, их высота увеличивалась до 10 м и межвыработочное пространство между горизонтами в процессе отработки камер уменьшалось по высоте от 17 до 10 м. Профили наблюдения проходили вдоль выработок практически по их середине. Наблюдения модулей трех компонент магнитного поля на 5 частотах (от 5 до 80 кГц) велись с помощью аппаратуры Института геофизики УрО РАН (разработчик – А.И. Человечков) независимо по каждой выработке, при этом источник возбуждения находился в той же выработке, что и приемник. Один цикл наблюдений заключал в себе многочастотные измерения двух горизонтальных и вертикальной компонент переменного магнитного поля при перемещении приемника с заданным шагом и фиксированным положением источника, далее источник перемещался в другую точку профиля и цикл измерений повторялся. Во всех выработках было по 4 цикла наблюдений.

## Анализ данных электромагнитного мониторинга

После обработки данных в рамках специализированной системы были получены для всех частот распределения эффективного сопротивления как функции расстояния. Анализ данных осуществлялся в рамках концепции трехэтапной интерпретации; так, с использованием алгоритмов интерпретации первого этапа [8] были получены одномерные модели распределения удельного электрического сопротивления в межвыработочном пространстве, которые для всех выработок соответствуют модели однородного полупространства с сопротивлением 1000 Омм. Из анализа экспериментальных значений эффективного сопротивления в камерах горизонтов –297 м и –277 м до и после отработки камер (частота 40 кГ ц) после предварительной обработки фильтрации [8] следует, что геоэлектрический параметр  $\rho_{эф\phi}$ , характеризующий массив горных пород как вмещающую неоднородности среду, не меняется с течением времени (данные получены в 1997 и 1998 г.). Интенсивное техногенное влияние на  $\rho_{эф\phi}$  при повышенной сотрясаемости в результате взрывных работ при отработке месторождения практически не проявляется.

В работах [9–11] для построения объемной модели введен параметр геоэлектрической неоднородности δ как функция частоты, расстояния между точкой приема и точкой расположения источника, распределения удельного сопротивления как во вмещающей среде, так и внутри локальных зон. Он оказался важным тензочувствительным параметром. Нами анализировался определяемый для каждой выработки средний параметр геоэлектрической неоднородности для каждой частоты в отдельности в виде:

$$\overline{\delta_{m}^{i}} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^{K} \delta_{mk}^{i}, \quad \delta_{mk}^{i} = \frac{\left|H_{\phi m}^{i}\right|}{\left|H_{\rho mk}^{i}\right|} \cdot 100\% \cdot$$

Здесь *i* – номер частоты (1–5 кГц, 2–10 кГц, 3–20 кГц, 4–40 кГц, 5–80 кГц); *К* – число перемещений источника возбуждения в пределах участка наблюдений; *k* – номер точки расположения источника возбуждения; *m* – номер точки расположения приемника.

Анализ результатов, полученных в ходе натурных экспериментов в 1997 и 1998 г., показывает, что эффект изменения параметра геоэлектрической неоднородности с течением времени значителен и фиксируем в рамках проводимых наблюдений. Как правило, эти изменения больше по абсолютной величине на частоте 5 кГц по сравнению с остальными частотами. Для интерпретации этих данных нами был создан итерационный алгоритм на базе минимизации функционала, учитывающего взаимное боковое влияние и влияние верх – низ следующего вида:

$$Q^{i} = \frac{1}{N} \sum_{N} \frac{1}{M_{N}} \sum_{m=1}^{M_{N}} \left| \overline{\delta_{m}^{i}} - \overline{\delta_{m}^{Ti}} \right|,$$

где N – количество учитываемых взаимодействий в профильных данных объемной системы наблюдений,  $M_N$  – количество точек на-блюдения на каждом профиле наблюдений,  $\delta_m^{T_i}$  – аппроксимационная конструкция или теоретический средний параметр геоэлектрической неоднородности в точке наблюдения номера m [8]. Физический смысл аппроксимационной конструкции для горизонтальных аномальных составляющих магнитного поля состоит в следующем: это есть поле погруженных в горизонтально-слоистую среду с геоэлектрическими параметрами вмещающей неоднородности среды токовых линий конечной длины произвольной ориентации в плоскости, параллельной плоскости наблюдения. Алгоритм реализован в виде программного продукта. В результате минимизации определяются следующие параметры: *n* – количество аномальных объектов, координаты левого конца каждого источника и его длина, вертикальная координата и М – момент источника, значение которого пропорционально проводимости объекта, создающего в магнитном поле эффект, эквивалентный полю сингулярных источников. Была построена объемная модель распределения локальных неоднородных зон в результате интерпретации данных электромагнитных исследований 1998 г. на двух уровнях: горизонтах -297 м и -277 м. Аналогичная модель построена и по данным 1997 г. Для одного цикла наблюдений положение источников, ассоциируемых с аномальными зонами, определяемое по данным для различных частот, не меняется, но значение момента М зависит от частоты. Для разных циклов наблюдений происходит изменение также и геометрического расположения аномальных зон, свидетельствуя о реакции массива на техногенное воздействие. До отработки камер источники аномального поля располагались исключительно в межвыработочном пространстве горизонтов -297 м и -277 м. Обнаружилась зональность их распределения по глубине: так, выделены следующие глубины от почвы камер горизонта -400 м: 2-3 м; 4,5-6; 8,5-9; 10-13,5. После отработки эти зоны возникли также и в кровле камер горизонта -297 м. Анализ среднего по частоте параметра М показал, что для большинства аномальных зон его значение меньше, чем 0,2, которое принято за фоновое. Выделено несколько аномальных зон, для которых M > 0,2.

Если аномальная зона связана с наличием контакта двух сред различной проводимости, то значение момента сингулярного источника не должно зависеть от частоты. В случае же трещиноватых сред



Рис. 1. Результаты совместных геомеханических и электромагнитных исследований:  $a - план расположения скважин в кровле камеры 217 на горизонте -277 м; <math>\delta$  – расположение скважин в разрезе; e - данные геомеханических исследований на интервале 8–10 м по тремскважинам, пробуренным вверх из камеры 217 в камеру 417; <math>z – распределение параметра геоэлектрической неоднородности в подкровельной выработке 417 до ее отработки;  $\partial$  – результаты прямых геомеханических исследований (VI – зоны разрушения) и прогнозные положения аномальных зон трещиноватости по электромагнитным данным (V). Условные обозначения: I – проекция подобранных источников аномального поля, соответствующих положению зоны повышенной трещиноватости, расположений на глубине 9 м под почвой подкровельной выработки камеры 417; II – одиночные трещины длиной от 2–5 м; III – трещины с раскрытием до 0,7 мх; IV – зона разрухи; I – частота 5 кГц, 2 – частота 10 кГц, 3 – частота 20 кГц, 4 – частота 40 кГц, 5 – частота 80 кГц может наблюдаться зависимость момента или сопротивления в аномальной зоне от частоты, и чем больше влагонасыщеность среды, тем большее значение дисперсии можно ожидать. Анализ величины дисперсии параметра M в зависимости от частоты для выделенных наиболее значимых аномальных зон показал, что наибольшие значения дисперсии имеют место на частотах 5 и 10 кГц. Этот эффект позволяет идентифицировать ослабленные трещиноватые зоны, отделив их от обычных ненарушенных контактов и включений других пород.

Имеется качественное морфологическое сходство дисперсионных кривых до и после техногенного воздействия на массив, величина дисперсии при этом после отработки камер уменьшилась.

Для проверки гипотезы о природе аномальных геоэлектрических зон, связанных с избыточной трещиноватостью, были проведены геомеханические исследования. На рис.1 приведено сопоставление полученных результатов. По данным геомеханических исследований, во второй и третьей скважинах были обнаружены зоны интенсивной трещиноватости, относящиеся к зонам разрухи, в первой скважине таких зон не было обнаружено.

Электромагнитные исследования были проведены раньше, чем геомеханические, и по результатам их интерпретации был построен прогнозный разрез, включающий в себя и положение неоднородных зон (рис. 1,  $\partial$ ). Геомеханические исследования были проведены после отработки камеры 417, при этом камера 217 оставалась подкровельной выработкой. Положение зоны разрушения по второй скважине хорошо совпадает с прогнозным положением зоны трещиноватости по электромагнитным данным, первая скважина прошла мимо зоны трещиноватости, и это тоже соответствует прогнозному разрезу, построенному по электромагнитным данным, третья скважина прошла через зону нарушенности, но, по электромагнитным данным, до отработки камеры 417 она была ближе к почве камеры 417. Вполне вероятно, что после ее отработки она переместилась вниз.

На рис. 2 приведены результаты совместных трехкомпонентных электромагнитных и сейсмических исследований в Таштагольском подземном руднике, проведенных в рамках единой методики единообразно с проводимыми экспериментами на Узельгинском руднике и в шахте «Магнезитовая», г. Сатка. Выполнено подробное сопоставление результатов электромагнитной съемки с геологической информацией, предоставленной геологической службой рудника. Следует отметить, что значения параметра геоэлектрической неоднородности на магнетитовых месторождениях достигают больших значений: 1000% и более. Это характерно для всех магнетитовых шахт, на которых проводились электромагнитные исследования: г. Кушва, шахта «Южная»; Высокогорский ГОК, шахта «Магнетитовая», Таштагольский подземный рудник. Интересно понять, отчего этот параметр резко увеличивается в своих абсолютных значениях по сравнению с показателями шахт других типов месторождений. Например, на осадочных породах значения не зависят от вещественного состава пород конкретной шахты.

На Таштагольском руднике комплексные геофизические исследования проводились только в рамках одного цикла наблюдений, поэтому совместный анализ распределения параметров геоэлектрической и сейсмической неоднородности позволяет сделать лишь выводы прогнозного характера о возможном развитии зон



Рис. 2. Результаты электромагнитных и сейсмических исследований на Таштагольском подземном руднике:

*а* – горизонт –350 м, орт 18; *б* – горизонт –350 м, орт 20; *в* – горизонт –210 м, орт 2. Распределение среднего параметра сейсмической неоднородности, увеличенного в 10 раз: *I* – частота 96 Гц, 2 – 60 Гц; распределение среднего параметра геоэлектрической неоднородности: *сплошная кривая* – частота 5 КГц, *лунктирные линии*: частота 10 кГц, длина пунктира 0,15 дюймов, 20 кГц – 0,1, 40 кГц – 0,05, 80 кГц – 0,2; *n* – номера пикетов потенциальной неустойчивости массива. На горизонте -350, орт 18 (см. рис. 2, *a*) зоны трещиноватости, выделенные по электромагнитным данным, хорошо согласуются и с сейсмическими данными на более низкой частоте (60 Гц). Аномалия сейсмического параметра неоднородности на частоте 96 Гц смещена на 5 м влево по профилю и свидетельствует о возможном наклонном к поверхности выработки выходе трещиноватой зоны. Однако процесс трещиноватости носит установившийся характер.

Аналогичная картина наблюдается и для горизонта –210, орт 2 (см. рис. 2, в). На горизонте –350, орт 19 (см. рис. 2, б) сейсмические наблюдения проводились в зоне расположения трещины, влияние которой картируется параметром сейсмической неоднородности, в то время как в электромагнитных данных эта неоднородность не отражается.

На Узельгинском руднике в рамках той же методики было проведено восемь циклов измерений по профилю, расположенному в выработке, которая идет вкрест рудного тела. Измерения проводились: три – в ноябре 1999 г. (между первым и вторым циклом измерений был массовый взрыв на том же горизонте –550 м, что и расположена выработка, на расстоянии 100 м от начала профиля в его створе), три – в марте 2000 г. (аналогично в 1999 г. между первым и вторым циклом измерений был массовый взрыв на том же горизонте –550 м, что и расположена выработка, на расстоянии 200 м от начала профиля под углом 60° к профилю наблюдения) и два – в марте 2001 г. (оба цикла наблюдений проведены после массового взрыва на горизонте –610 м).

На рис. З изображен фрагмент интерпретации мониторинговой информации за три цикла наблюдения в 1999 г. на частоте 5 кГц. Видно, что в так называемой зоне дезинтеграции, примыкающей к выработке, происходит перемещение и изменение интенсивности аномальных зон неоднородности. При сравнении расположения зон нарушенности в массиве до взрыва и на второй день после взрыва видно, что конфигурация расположения аномальных зон возвращается к состоянию до техногенного воздействия. На следующий день после взрыва мы видим по возрастанию интенсивности аномальных зон активизацию зон неоднородности как над выработкой, так и под ней, кроме того прослеживается выделенное направление усиленной трещиноватости, которое может привести массив в неустойчивое состояние, например дилатансии. На второй день после массового взрыва выделились более четко две конфигурации треугольного вида зон неоднородностей, сходящиеся к одной из вершин к середине выработки.



Рис. 3. Геоэлектрические разрезы, построенные по данным попланшетного электромагнитного индукционного мониторинга массива горных пород околовыработочного пространства выработки ДСШ-4, находящейся в зоне техногенного воздействия:

Горизонт –550 м, 1999 г., частота 5кГц: a - 11 ноября (день до массового взрыва),  $\delta - 16$  ноября (день после массового взрыва), s - 18 ноября (два дня после массового взрыва), c -распределение среднего параметра геоэлектрической неоднородности: 5–11ноября, 6–16 ноября, 7–18 ноября.

Условные обозначения:  $\rho_1^n$  – удельное сопротивление; n – номер слоя (два слоя расположены над выработкой, два слоя – под выработкой, выработка обозначена сплошной черной линией); 1 – номер блока;  $\rho^n$  – среднее значение удельного сопротивления для каждого слоя. Цифрами обозначены мощности слоев, прилегающих к выработке; в той части слоя, где мощность не указана, следует пользоваться вертикальным масштабом; N – номер пикетов; 1–4 –локальные зоны геоэлектрической неоднородности с различной контрастностью по проводимости с вмещающей средой;  $I - 0.01 < M_0 \le 0.5$ ;  $2 - 0.5 < M_0 \le 2$ ;  $3 - 2 < M_0 \le 4$ ;  $4 - M_0 > 4$ , где  $M_0 -$  коэффициент, пропорциональный контрастности проводимости и длине зоны неоднородности

Полученные результаты свидетельствуют о том, что изменения в массиве горных пород, находящемся под техногенным воздействием, происходят в локальных зонах и иерархично. Методика позволяет отслеживать динамику изменений на различных иерархических уровнях и вырабатывать критерии опасности или катастрофичности каждого из этих уровней. Сейсмическая и электромагнитная информация носят взаимно дополняющий характер при картировании и прогнозировании поведения массива, находящегося под техногенным влиянием. Он опирается на использование активных методов геофизического мониторинга с использованием контролируемых сосредоточенных источников возбуждения, допускающих пространственное перемещение по заданной системе наблюдений с перекрытиями [13–19].

Идеи Н. П. Влоха нашли свое осуществление в дальнейших наших работах в рамках новых моделей горного массива иерархического строения, новых методов исследования в рамках теории изучения открытых динамических систем. Светлая память об учителе и ученом, опередившем время, живет в наших сердцах.

## Библиографический список

1. Булашевич Ю. П. Изменение концентрации радона в связи с горными ударами в глубоких шахтах / Ю.П. Булашевич, А.К. Юрков, В.В. Николаев // Доклады РАН. – 1996. – т. 346. – № 22.

2. Булашевич Ю. П. О возможности предсказания времени проявления горного удара по изменению концентрации радона / Ю. П. Булашевич, А. К. Юрков, В. В. Николаев // Горный журнал. – 1992. – № 2.

3. Влох Н. П. Управление горным давлением на подземных рудниках / Н. П Влох. – М.: Недра, 1994. – 207 с.

 Влох Н. П. Проблема определения напряженного состояния массива скальных пород / Н. П. Влох // Проблемы механики горных пород: труды Российской конф. по механике горных пород. – СПб.: Изд-во СПбГАСУ, 1997. – С. 93–102.

5. Адушкин А. А. Влияние структуры и геодинамики на напряженное состояние земной коры / А. А. Адушкин, В. М. Цветков // Проблемы механики горных пород: труды Российской конф. по механике горных пород. – СПб.: Изд-во СПбГАСУ, 1997. – С. 7–12.

6. Шкуратник В. Л. Эффекты памяти в горных породах. Физические закономерности, теоретические модели / В.Л. Шкуратник, А.В. Лавров. – М.: Изд-во Академии горных наук, 1997. – С. 158.

7. Каталог горных ударов на рудных и нерудных месторождениях / ВНИМИ. - Л., 1986. - С. 183.

8. Хачай О. А. Использование новой трехмерной методики электромагнитных исследований строения горных массивов / О. А. Хачай, Е. Н. Новгородова // Физика Земли. – 1999. – № 5. – С. 7–12.

9. Трехмерные электромагнитные исследования строения и состояния массива горных пород / О. А. Хачай и др. // Горная геофизика: материалы международной конференции / ВНИМИ. – СПб., 1998. – С. 591–598.

10. Хачай О. А. Новые подходы к анализу сложнопостроенных нелинейных нестационарных сред / О. А. Хачай, М. Ю. Хачай // Уральский геофизический вестник. – 2003. – № 5. – С. 24–28.

11. Выбор системы разработки и обоснования ее параметров при добыче магнезита подземным способом / Н.П. Влох и др. // Горный журнал. – 1994. – № 5. – С. 22–25.

12. Влох Н.П. Геомеханическое обеспечение эффективной и безопасной разработки рудных месторождений подземным способом / Н.П. Влох // Горный вестник. – 1995. – № 4. – С. 28–31.

13. Хачай О.А. Комплексные геофизические исследования (теория и практические результаты) / О.А. Хачай // Уральский геофизический вестник ИГФ УрО РАН. – 2000. – № 1. – С. 107–110.

14. Хачай О. А. Объемная электромагнитная методика изучения строения и динамики геологической среды в рамках дискретной и иерархической модели / О. А. Хачай // Экология Северных территорий России. Проблемы, прогноз ситуации, пути развития, решения: материалы междунар. конф. / Ин-т экол. проблем Севера, УрО РАН. – Архангельск, 2002. – Т. 2. – С. 86–91.

15. Хачай О. А. Отражение динамики фазового состояния массива горных пород по результатам многоуровневых электромагнитных мониторинговых исследований в удароопасной шахте (Таштагол) / О. А. Хачай, Т. А. Хинкина, О. Ю. Хачай // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2002. – № 11. – С. 109–114.

16. Хачай О. А. Опыт построения объемных геоэлектрических моделей по мнгоуровневым электромагнитным исследованиям на шахтах различного вещественного состава / О. А. Хачай, Е. Н. Новгородова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – № 10. – С. 57–59.

17. Хачай О. А. Метод получения уравнения взаимосвязи факторов, описывающих горные удары (на примере СУБРа) / О. А. Хачай, О. Ю. Хачай // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2001. – № 2. – С. 46–49.

18. Метод картирования зон потенциальной неустойчивости массива горных пород различного вещественного состава с использованием данных динамической сейсмики и электромагнитных индукционных исследований / О. А. Хачай и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2001. – № 2. – С. 10–16.

19. Трехмерный электромагнитный мониторинг состояния массива горных пород / О. А. Хачай и др. // Физика Земли. – 2001. – № 2. – С. 85–92.

## ESTIMATING THE GEOTECHNICAL PARAMETERS FROM CSEM MONITORING DATA AT THE CITY OF 15TH MAY, EGYPT

Magdy A. Atya, Olga Hachay, Oleg Khachay, El Said A. El Sayed

The site of investigation, 15<sup>th</sup> May city, is a new suburb of Helwan, at about 35 km south of Cairo, Egypt. The work is aimed to investigate the rock mass stability at "Quarter 27" in 15th May City. A controlled source electromagnetic (CSEM) approach developed earlier by IGF UB RAS (Geophysical Federal Institute, Ural Branch of Russian Academy of Science) is applied to image the ranked deformation levels in the massive structure. The wide profile system of observation has been used to monitor the three components of the alternating magnetic field along predefined measuring lines in the study area. Four cycles of observation have been carried out in 2008, 2010, 2011, and 2012. The acquired data sets have been subjected to analytical processing procedure to estimate the changes in the geotechnical parameters during the time of these four cycles of observation. The analytical treatments provided good information about the structure of the rock massive and its rank of degradation, the lateral distribution of the geotechnical heterogeneity, and finally a conclusive outcome about foundation stability. We conclude that the general dynamic state close to the destruction level within the investigation area is getting worse over the time; this is reflected in the crack's densities and positions, also on the changes in the lateral distribution of geoelectric heterogeneity as an indicator of the saturation of the surface rock in the study area with water.

The site of investigation belongs to the new communities that had been established on the outer extensions of the city of greater Cairo, and namely on the city of 15<sup>th</sup> May City. It is located at about 35 km to the south of Cairo downtown. This city had been built on Eocene limestone intercalated with thin beds of clay and very thin beds of salt [1]. Generally, the Eocene limestone sediments in Egypt are characterized with karstification resulting in fractures, cracks, cavities, and land subsidence. Consequently, short after the city was constructed it started to suffer deformations that could be evidenced on the paved roads, the successive landfalls of the foundation grounds, the water accumulation through the fissures to form swamps, and the divergence of the blocks of the dwelling. Therefore, a cooperation work had been initiated between IGF UB RAS (Geophysical Institute Federal, Ural Branch of Russian Academy of Science) and NRIAG (National Research Institute of Astronomy and Geophysics) to investigate and monitor the state stability in a pilot area (Quarter 27). Four cycles of field observations (2008, 2010, 2011, and 2012) had been acquired along profiles crossing and intersecting the Quarter dwellings. The analytical screening and mapping of the rock massive structure approaches to critical trends with meaningful impacts to the factor "safe" in the engineering geophysics and mining [2]. The present work proposed the rock massive at its optimum state at the top of ranged hierarchic structure model, and the rock massive at its present state represents a rank of disintegration or level of deformation. Investigating the rock mass stability requires well understanding of structural model and proposing a technical procedure to estimate the geotechnical and geoelectrical parameters as key information of dynamic state and stability of the massive structure. In 2003, a new technique had been approached to reveal the disintegration zones in rocks of different content [3]. It involves the application of controlled source electromagnetic method "CSEM" to image the ranked deformation levels in the massive structure. The new technique had been applied in a mutual work between the Russian IGF UB RAS and the Egyptian NRIAG. The work had been devoted to monitoring a complicated engineering case at the city of 15<sup>th</sup> May, Helwan. The monitoring data had been acquired over 4 measuring cycles 2008, 2010, 2011, and 2012. The processing scheme was developed over several phases and conceptual proposals related to the site nature and the system of observation. The analysis of the data of all four cycles provided information about the geoelectrical section of the blocks structure and small disintegration zones using the data of lateral geotechnical heterogeneity distribution, and finally a conclusive outcome about the foundation stability. Understanding the rock massive structure as a conceptual ranged hierarchic structure model is the key point to investigate the inner state dynamics and the self organized system associated to the massive structure; this could be achieved by geophysical methods considering the model proposed by Hachay O.A.[4]. The block-hierarchic structure is the result of the destruction processes. Applying an external mechanical stress will influence the initial inner structure forming the hierarchic structural deformation levels, which can be indicated by geophysical fields. The embedded heterogeneities of the smaller rank and the block dimensions in the discrete piece-heterogeneous block medium model are named as heterogeneities of the second rank (heterogeneities can be named as heterogeneities of the next rank depending upon research scale). Applying external induction electromagnetic field with many frequencies and arrays using a controlled source and the elaborated processing and interpretation technologies [2] allows revealing the disintegration zones, which indicate the rock

stability. The objects of electromagnetic monitoring of geological medium state are heterogeneities of the second rank, which appear and change during the variations of external influence. In the Institute of Geophysics UB RAS, a new method was established to monitor the massive state, which allows classifying the massive by its degree of stability [4]. In the frame of natural research we can identify the geoelectrical heterogeneities of the second rank and achieve the objective of monitoring. They are defined by interpretation of the ratio of two horizontal components of the measured modulus of the alternating magnetic field on fixed frequencies  $\omega$  at different positions in space points  $x_i$ , i.e.:

$$\overline{\delta}(x_l,\omega) = \frac{1}{k} \sum_{n=1}^{k} \frac{|H_{\varphi}(x_l,\omega)|}{|H_{\varphi}(x_l,\omega)|} \bullet 100\%, \qquad (1)$$

where  $\delta(x_l, \omega)$  is the average parameter of horizontal unhomogeneities,  $H_{\rho}(x_l, \omega)$ -horizontal magnetic component directed to the source of excitation,  $H_{\varphi}(x_l, \omega)$ -horizontal magnetic component directed perpendicular to  $H_{\rho}(x_l, \omega)$ , k-number of arrays, which content the same  $x_l$ .

Applying the approaches interpreting the space-frequency distribution of the average parameter (1) we approximate the disintegration zones by small current lines located into the block geoelectrical section. The moment  $\tilde{M}_0$  of these current lines is identified and named as intensity of disintegration zones observed on the whole profile. These zones are located on different depths of the cross section, therefore we divide the depth on some intervals: 0–1 m, 1–2 m, 2–3 m,3–4 m, 4–5 m, 5–6 m,



Figure 1. Distribution of integral intensity of cracks of the block layered half space for sub parallel wide profiles, CSEM monitoring data

6–7 m, 7-8m, 8-9m, 9-10m, 10-11m and so on. Then we two elaborated integral parameters; the distribution of the summed intensity of the disintegration zones for each interval along the profile ( $S_{int erval}$ ), and integral distribution of the intensity of the disintegration zones for all intervals ( $S_{ipt egral}$ ) along the profile. The first provides information about the activity of crack's which in turn indicates qualitatively the stability level of the rock massive, and the second helps to classify the massive stability in terms of numerical criterions using the synergetic theory approaches [4]. The following equation is used to estimate the parameters:

$$S_{l,\text{int}\,erval}(N_l,T,\omega) = \sum_{i=1}^{N_l} \widetilde{M}_0^i(\omega,T)$$
(2)

$$S_{\text{int egral}}(L,T,\omega) = \sum_{l=1}^{L} S_{l,\text{int erval}}(N_l,T,\omega), \qquad (3)$$

where  $\tilde{M}_0^i$  is the intensity of the disintegration zone, N<sub>l</sub> is the number of disintegration zones inside one interval l, L is the total number of intervals,  $\omega$  is circle frequency of observation, and T is the time in years of a cycle of monitoring,  $S_{integral}$ ,  $\tilde{M}_0^i$  are in conventional units. This technique had been provided in the deep mines of bauxite and magnetite (up to 800 m depth); in which, the prediction and defining of the instable localities inside the mines and the forecasting of the energetic dynamic events were definitely right and approved [2–6]. Furthermore; this procedure had been applied to estimate the geoelectrical and geomechanical state in inhabitated area of Cairo with multilevel appearances of instable features. The system of observation, method of processing and interpretation had been detailed in [7].

#### Acknowledgements

The work had been done in the frame of the Twin Agreement between the National Research Institute of Astronomy and Geophysics (NRIAG) of Egypt and the Federal Institute of Geophysics (IGF) Ural Branch (UB), Russian Academy of science (RAS) together with the Ural Federal University The institutions supported the work with researchers and equipments. The last two cycles of monitoring had been done under the research project ID: 2989 financed by the Science and Technology Development Fund (STDF).

#### References

<sup>1.</sup> Morsi, A. M., Speijer, R. P. High-resolution ostracode records of the Paleocene-/ Eocene transition in the South Eastern Desert of Egypt – taxonomy, biostratigraphy, paleoecology and paleobiogeography. Senckenbergiana lethaea, 2003. 83. 61–93.

2. Hachay O.A. The three-stage concept of common interpretation for 3-d electromagnetic and seismic fields and some results of it's practical realization.// Engineering and environmental geophysics for the 21-st century. Proceedings of the international symposium on engineering and environmental geophysics. Chengdu. 1997. P. 286–292.

3. Hachay O.A., Novgorodova E.N. and Hachay O.Yu. A new method for revealing disintegration zones in rocks of different content. Rock information and analytical bulletin. 2003. 11. P. 26–29 (in Russian).

4. Hachay O.A.A new method for estimation and forecasting of the degree of stability state of rock massive. // Advances in heterogeneous material mechanics Proceedings of the second international conference on heterogeneous material mechanics. June 3–8, 2008. DEStech Publications, Inc. P. 1096–1099.

5. Hachay O.A. and Khachay O.Yu. A warning System for catastrophic Man-Made Hazards using electromagnetic induction Monitoring, verified in rock burst massif of different Matter Content.// Geophysical Research abstracts. Vol.12. EGU2010-2654.

6. Hachay O.A., Khachay A.Yu and Khachay O.Yu. Dynamical model for evolution of rock massive as a response on a changing of stress-deformed state. // Fractal analysis and Chaos in Geosciences. INTECH, Croatia. 2012. Chapter 5. P. 87–108.

7. Magdy A. Atya, Olga A. Hachay, Mamdouh M. Soliman, Oleg Y. Khachay, Ahmed B. Khalill, Mahmoud Gaballah, Fathy F.Shaaban and Ibrahim A.El. Hemali. CSEM imaging of the near surface dynamics and its impact for foundation stability at quarter 27,15-th of May City, Helwan, Egypt. // Earth sciences research journal, 2010, Vol.14, N1. P. 76–87.

## УДК 622.831

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ДНА КАРЬЕРОВ ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ РАЗРАБОТКЕ КРУТОПАДАЮЩИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

## К.Ч. Кожогулов, С.Ж. Куваков, К.Ж. Усенов, А.П. Алибаев

Горнодобывающая отрасль является одним из приоритетных направлений развития экономики Кыргызской Республики. В последнее время в республике наблюдается рост числа горнодобывающих предприятий, предусматривающих использование комбинированного способа выемки запасов (Макмал, Кумтор, Чаарат, Бозымчак и др.), что требует решения актуальной научной задачи, заключающейся в исследовании напряженно-деформированного состояния (НДС) массива дна карьеров.

Терек-Сайский рудник разрабатывает месторождение полиметаллических руд комбинированным способом. Рудное тело 10-ю месторождения «Тереккан» расположено в южной части месторождения на левобережье реки Терек-Сай и приурочено к крутопадающей зоне дробления. Часть рудного тела 10-ю расположена под дном карьера; верхняя часть отработана карьером до отметки 1605 м; угол падения рудного тела 55°. Мощность рудного тела варьирует от 0,7 до 10 м и в среднем составляет около 3 м.

Система разработки с магазинированием руды предусматривается для отработки запасов камеры, где мощность рудного тела колеблется от 1,5 до 4,0 м, составляя в среднем 3,5 м при устойчивых рудах и вмещающих породах. Системы разработки с отбойкой руды из подэтажных штреков применяются при отработке запасов камер, где средняя мощность рудного тела 6,5 м и более. Для отработки подкарьерных запасов применялась система разработки с магазинированием руды с отбойкой основной части запасов блока с помощью скважин. Для отбойки остальной части запасов, расположенных непосредственно под дном карьера, применялась мелкошпуровая отбойка руды. При этом оставлялась рудная потолочина мощностью 6 м.

При отработке запасов Терекканского месторождения в последнее время участились случаи внезапного самообрушения потолочин камер (табл. 1). Из таблицы видно, что внезапные самообрушения потолочин при выемке подкарьерных запасов приводят к существенному осложнению технологических процессов, сопровождаются значительными потерями полезных ископаемых, а иногда и горно-шахтного оборудования, ухудшаются технико-экономические показатели рудников [1–4]. Анализ причин возникновения случаев самообрушения потолочин показывает, что главной причиной этих нарушений является ведение горных работ без учета существующих горно-геологических, горнотехнических условий, геомеханической ситуации на отрабатываемом месторождении и, вследствие этого, неправильный выбор системы разработки. В связи с этим возникла необходимость изучения НДС массива дна карьера «Тереккан».

Исследованием физико-механических свойств массива пород месторождения Тереккан занимались различные организации в разные годы при разработке проекта отработки месторождения. Горно-геологическая обстановка в районе месторождения считается достаточно сложной. Физико-механические свойства пород разных образцов, которые отбирались на различных глубинах, отличаются друг от друга незначительно. С ростом глубины увеличение тектонической нарушенности массива не наблюдается; его НДС с глубиной изменяется за счет статической нагрузки, вызываемой весом вышележащей толщи.
В исследованиях, проведенных под руководством И. Т. Айтматова, отмечается [5], что в пределах Чаткало-Кураминской складчатой системы выделяется жесткий Кассанский блок, в основании которого залегает толща докембрийских пород.

Таблица 1

37		10		п
Характер обрушения	Время	Место	Причины	Принятые меры
Заколообразование, обрушение горной массы в камере, потрескивание целиков между заездами в камеру, обрушение горной массы из борта ка- рьера в небольших объемах	апрель, 2009 г.	Борт карье- ра 10-ю, кровли и борта очистных выработок на горизон- те штольни № 25	В результате обильных дождей ухудшилась устойчивость борта карьера 10-ю, кровли и борта очистных выработок на гори- зонте штольни № 25. Сложные горно-геоло- гические условия, ру- довмещающие породы подвержены сильному дроблению тектониче- скими нарушениями и имеют неустойчивую характеристику	Система- тические наблюде- ния за со- стоянием массива в камерах
Самообрушение борта карьера, обру- шение потолочины (4 м), очистное пространство было заполнено, запасы отбитой руды оказа- лись под завалами, часть готовых к выемке запасов руды была потеряна (16570 т), содержа- ние золота в руде снизилось от 5,6 до 1,0 г/т	30 апре- ля 2009 г.	Борт карьера, потолочина (4 м) камеры 4	Сильное землетрясение, 6 баллов по шкале Рихтера	Для выем- ки запасов данного блока было пред- ложено изменить систему разработ- ки, т. е. увеличить параметры целиков и потолочи- ны
Самообрушение по- толочины камеры-4	май, 2009 г.	Потолочина камеры 4 рудного тела 10-ю	Сложные горно-геоло- гические условия ме- сторождения, сильное дробление рудовмеща- ющих пород потоло- чины тектоническими нарушениями	Система- тические наблюде- ния за со- стоянием пород по- толочины

Характер обрушения потолочин камер

Продолжение таблицы 1

Характер обрушения	Время	Место	Причины	Принятые меры
После массового взрыва произошло самообрушение потолочины камеры 10 вокруг восстаю- щего № 2 рудного тела 11-ю. Образовалась щель диаметром 10–12 м с выходом на днев- ную поверхность	24 марта 2011 г.	Камера 10 рудного тела 11-ю, высота потолочного целика <i>h</i> = 8 м	Массовый взрыв про- изводился на самом верхнем подэтаже; не- устойчивые рудовме- щающие породы; на поверхности рудовме- щающие породы были сильно увлажнены ливневыми дождями	Система- тические наблюде- ния за со- стоянием потолочи- ны камеры
При проходке бу- рового штрека (на 10-м метре) камеры 13 из-за геологиче- ских условий прои- зошло самообруше- ние кровли	ноябрь, 2011 г.	Буровой штрек камеры 13	Неустойчивость гор- ных пород (под завала- ми остались комплек- ты горно-проходческо- го оборудования)	

Подобные отдельные жесткие и более монолитные массивы в подвижных и сейсмоактивных областях могут играть роль концентраторов напряжений в верхних частях земной коры. Эти массивы и блоки обычно сравнительно просто выделяются в процессе геологического и тектонического изучения района, а также при выполнении геологоразведочных работ. В таких местах следует ожидать иных закономерностей распределения напряжений, чем в целом по региону.

Результаты исследований проектно-исследовательского центра (ПИЦ) «Кен-Тоо» показали, что физико-механические свойства руды месторождения более крепкие, чем свойства вмещающих пород. Коэффициент крепости по М. Протодьяконову составляет для руд f=9-16, для вмещающих сланцев f=4-8. Известняки имеют коэффициент крепости f=8-10. Объемный вес пород в целиках составляет: малосульфидные руды 2,7 т/м<sup>3</sup>, сульфидные руды 3,07 т/м<sup>3</sup>. По этим целикам значение коэффициента рыхления колеблется от 1,34 до 1,547, составляя в среднем 1,44. Средняя влажность для руд 0,26%. Объемный вес окисленных руд 2,33 т/м<sup>3</sup>, а средняя влажность 1,23%. Руды месторождения устойчивые, вмещающие породы – средней устойчивости и неустойчивые. Сцепление массива, определенное по формуле Фисенко, составляет для руды 0,35 МПа, для вмещающих пород 0,147 МПа.

Деформационные свойства руд и вмещающих пород представлены в табл. 2.

Таблица 2

	Прочность, МПа		ент И	гости, Ia	ент а	й з	ň"	ГЬ	ннего ад	Ie
Наименование	на сжатие	на разрыв	Коэффици крепост	Модуль упрул Е·104, МІ	Коэффици Пуассон	Удельны вес, г/см	Oбъемны вес, г/см	Пористос	Угол внутрен трения, гр	Сцеплени
Руда (кварцевая брекчия, берези- ты, катаклазиты)	89,0	23,6	14–18	3,0	0,25	2,78	2,71	1,0	50	32,5
Кварцево-слю- дистые сланцы	48,0	7,6	4–8	1,1	0,18	2,75	2,70	1,6	48	11,0
Джаспероиды	107,9	10,5	7-11	2,1	0,23	2,75	2,65	2,7	41	11,5
Мрамор	82,0	11,3	8-12	3,5	0,23	2,71	2,69	2,5	40	12,5

Физико-механические свойства руд и вмещающих пород месторождения Тереккан

Для изучения НДС массива горных пород Терекканского месторождения при отработке подкарьерных запасов был использован метод конечных элементов [6]. Количество узлов 338, количество элементов 92.

Для расчета, согласно геологическому разрезу XII-XII рудного тела 10-ю, были приняты следующие параметры карьера (рис. 1): высота правого борта 75 м, левого борта 48 м, ширина дна карьера 20 м. Угол наклона правого борта 78°, левого борта 77°. Для расчетов были использованы следующие физико-механические свойства руды и породы: порода – кварцевая брекчия, модуль Юнга 30000 МПа, коэффициент Пуассона 0,25, объемный вес 27100 Н/м<sup>3</sup>, сцепление 32,5 МПа, угол внутреннего трения 50°. Руда – кварцево-слюдистые сланцы, модуль Юнга 11000 МПа, коэффициент Пуассона 0,18, объемный вес 27000 Н/м<sup>3</sup>, сцепление 11 МПа, угол внутреннего трения 48° [1].

Концентрация вертикальных напряжений возникает в пределах рудного тела. Горизонтальные напряжения концентрируются в пределах рудного тела в местах пересечения лежачего бока залежи с дном карьера, а также на месте пересечения дна карьера и левого борта. Наибольшие значения вертикальных напряжений наблюдаются в пределах рудной залежи на глубине, равной 0,5 ширины дна карьера, т. е. ниже глубины 10 м. Здесь возникает зона наибольших вертикальных сжимающих напряжений со значениями от 2,930 до 1,880 МПа. Под дном карьера происходит снижение значений вертикальных напряжений, которые за пределами дна постепенно возрастают (рис. 2).

Наибольшие значения горизонтальных сжимающих напряжений образуются в пределах рудного тела на глубине ниже 10 м от дна карьера. Здесь образуется зона сравнительно повышенных сжимающих напряжений со значениями от 0,368 до 0,580 МПа.

Зона повышенных растягивающих напряжений возникает на месте пересечения дна и левого борта карьера. Эта зона распространяется по рудному телу до глубины, равной  $(0,4-0,5)N_{\rm d}$  ( $N_{\rm d}$  – ширина дна карьера). Значения этих напряжений в этой зоне меняются от 1,54 до 0,106 МПа.

Зона сравнительно небольших горизонтальных растягивающих напряжений в приповерхностной части левого борта распространяется до места пересечения висячего бока залежи и борта карьера. Значения растягивающих напряжений в этой точке равняются 0,253 МПа.

Под дном карьера за пределами рудной залежи со стороны лежачего бока наблюдаются сжимающие напряжения, которые с глубиной переходят в растягивающие.



Рис. 1. Проекция на вертикальную плоскость рудного тела 10-ю месторождения Тереккан, профиль 12

Далее осуществлена оценка напряженного состояния по сечению XIII-XIII. Количество узлов составляло 490, количество элементов 132.

Принятые параметры карьера для данного разреза: высота левого борта 75 м, правого борта 51 м, ширина дна карьера 6,5 м. Угол наклона правого борта 75°, левого борта 80°. Верхняя часть отработана карьером до отметки 1605 м. Угол падения рудного тела в этом горизонте 55° (рис. 3).

В данном случае концентрация вертикальных напряжений возникает в пределах рудной залежи со стороны висячего бока (рис. 4).

Концентрация горизонтальных напряжений возникает на месте пересечения левого борта и дна карьера, такая же концентрация наблюдается вокруг выработки, расположенной в левом борту со стороны висячего бока. Горизонтальные растягивающие напряжения наблюдаются над выработкой висячего бока и изменяются от 1,86 до



Рис. 2. Распределение: *а* – горизонтальных; *б* – вертикальных; *в* – касательных напряжений по разрезу 12



Рис. 3. Проекция на вертикальную плоскость рудного тела 10-ю месторождения Тереккан, профиль 13

0,825 МПа. Под дном карьера также наблюдаются горизонтальные напряжения растягивающего характера. Эта зона распространяется по рудному телу до глубины, равной (2,46–2,60) $N_{\rm g}$ . Значения напряжений в ней меняются от 1,20 до 0,561 МПа.

Таким образом, расчеты напряженного состояния Терекканского месторождения показывают, что горизонтальные напряжения концентрируются в пределах рудного тела в местах пересечения лежачего бока залежи с дном карьера, а также на месте пересечения дна карьера и левого борта (по разрезу XII-XII). Наибольшие значения вертикальных и горизонтальных напряжений наблюдаются в пределах рудной залежи на глубине, равной 0,5 ширины дна карьера. Зона повышенных растягивающих напряжений возникает на месте пересечения дна и высокого борта карьера и распространяется по рудному телу до глубины, равной  $(0,4-0,5)N_{\rm d}$  по разрезу XII-XII и  $(2,46-2,60)N_{\rm n}$  по разрезу XII-XIII.

#### Библиографический список

1. Кожогулов К.Ч. Геомеханические основы и технология при комбинированной разработке крутопадающих месторождений / К.Ч. Кожогулов, К.Ж. Усенов, А.П. Алибаев. – Бишкек: КГ-МИ, 1999. – 186 с.

 Алибаев А. П. Геомеханика и технология при комбинированной разработке рудных месторожений / А. П. Алибаев. – Бишкек: «Инсанат», 2008. – 192 с.







Рис. 4. Распределение: *а* – горизонтальных; *б* – вертикальных; *в* – касательных напряжений по разрезу 13

3. Казикаев Д. М. Комбинированная разработка рудных месторождений / Д. М. Казикаев. – М.: Горная книга, 2008. – 360 с.

4. Каплунов Д. Р. Комбинированная разработка рудных месторождений / Д. Р. Каплунов, М. В. Рыльникова. – М.: Горная книга, 2012. – 344 с.

5. Айтматов И. Т. Проблемы техногенной геодинамики недр в горных регионах / И. Т. Айтматов // Напряженное состояние породного массива и наведенная геодинамика недр: труды междунар. науч. конф. // ИФиМГП НАН КР. – Бишкек: Изд-во ИФиМГП НАН КР, 2006. – С. 13–30.

6. Осмонова Н. Т. Оценка напряженно-деформированного состояния массива горных пород при отработке подкарьерных запасов месторождения Тереккан / Н. Т. Осмонова // Известия вузов. – 2012. – № 5. – С. 41–44.

УДК 622.831.1

# РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА СОВРЕМЕННЫХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ МЕТОДАМИ ВЫСОКОТОЧНОЙ ГЕОДЕЗИИ И ГРАВИМЕТРИИ НА САМОТЛОРСКОМ ГЕОДИНАМИЧЕСКОМ ПОЛИГОНЕ

### Ю.В. Васильев, М.Л. Юрьев, С.И. Яковлев

Техногенное воздействие в результате интенсивной и долговременной добычи углеводородов при отработке нефтегазовых месторождений нарушает природное напряженно-деформированное состояние (НДС) массива недр. По своей интенсивности и масштабам проявления эти события оказались в ряде случаев сравнимы с сильными природными геодинамическими событиями. Становится очевидным, что воздействие человека на недра посредством операций по добыче углеводородного сырья приводит к нарушению природных деформационных режимов. Это создает предпосылки для возникновения целого ряда взаимосвязанных процессов: природно-техногенных и индуцированных землетрясений, деформаций геологической среды (слома колонн скважин, оседания земной поверхности, нарушения устойчивости наземных и подземных сооружений), активизации разломов и других форм механической неустойчивости горных массивов, с которыми связаны флюидодинамические явления (межпластовые перетоки, загрязнение водоносных горизонтов, газовые грифоны).

На территории Тюменской области, включая субъекты федерации Ямало-Ненецкий автономный округ (ЯНАО) и Ханты-Мансийский автономный округ (ХМАО), находятся в разработке более 600 месторождений нефти и газа, крупнейшими из которых являются Самотлорское, Уренгойское, Заполярное, Ямбургское, Бованенковское. Нормативные документы Ростехнадзора требуют от недропользователей выполнения условий лицензионных соглашений по разработке проекта для рациональной выемки сырья под застраиваемой территорией для обеспечения безопасности объектов промышленного и гражданского назначения. В горноотводных актах, которые являются составной частью лицензии на недропользование, изложены обязанности пользователей недр по обеспечению горно-экологического мониторинга (мониторинга вредного воздействия горных работ на окружающую среду).

Результаты многолетнего мониторинга на геодинамических полигонах Губкинский, Уренгойский, Самотлорский, Кальчинский, Бахиловский свидетельствуют о зафиксированных величинах оседания земной поверхности до 400 мм при максимальных горизонтальных смещениях до 30 мм [1].

Актуальность рассматриваемой темы заключается в том, что почти все крупные населенные пункты территории ХМАО и ЯНАО, превратившиеся из вахтовых поселков в города, такие как Новый Уренгой, Муравленко, Губкинский, Нефтеюганск, Пыть-Ях, Мамонтово, Нижневартовск, Мегион, Лангепас, Радужный, Излучинск, оказались в зоне отработки месторождений. В связи с этим возникает проблема обеспечения геодинамической безопасности гражданских и промышленных сооружений от влияния добычи нефти и газа как при эксплуатации месторождений, так и после полной их выработки и консервации.

В соответствии с требованиями условий лицензионного соглашения и действующих нормативных документов Ростехнадзора [2] на территории Самотлорского месторождения ОАО «Самотлорнефтегаз» и ОАО «ТНК-Нижневатовск» в 2002 г. был создан Самотлорский геодинамический полигон (СГДП), состоящий из 85 глубинных реперов. С 2003 г. по настоящее время ежегодно выполняется комплекс геодезических работ (высокоточное нивелирование II класса, спутниковые наблюдения) и геофизических исследований (гравиметрия, измерения локального магнитного поля земли) для определения характеристик НДС недр. При детализации наблюдений на геодинамическом полигоне в период с 2006 по 2008 г. было дозаложено еще 10 реперов (на Усть-Вахской площади 6 реперов и 4 в проблемных участках). Таким образом, геодинамический полигон в настоящее время состоит из 95 пунктов наблюдений.

Основной целью работы на геодинамическом полигоне является обеспечение эколого-промышленной безопасности от техногенного влияния разработки Самотлорского месторождения на природную среду, объекты нефтегазодобычи, промышленные и гражданские сооружения, попадающие в площадь горного отвода (Нижневартовская ГРЭС, пос. Излучинск, северная часть города Нижневартовска). Для решения поставленных целей и задач использовалась методологическая основа комплексирования нескольких методов – анализ результатов геодезических измерений, гравиметрии, дистанционного зондирования земли, сейсморазведки, геолого-промысловой обстановки, гидрогеологических и инженерно-геологических условий.

С 2002 по 2013 г. выполнено 11 годовых циклов геодинамического мониторинга, был проведен следующий комплекс геодезических и геофизических работ:  – геометрическое нивелирование II класса; превышения высот между пунктами геодинамического полигона были рассчитаны в поле силы тяжести, с точностью, обеспечивающей среднеквадратическое отклонение (СКО) не более 1,2 мм;

 – спутниковые измерения осуществлялись для определения координат центров наблюдательных пунктов и направления их горизонтальных смещений; точность по вертикали не менее 5–6 мм, по горизонтали 3–4 мм;

– гравиметрические измерения выполнялись с точностью, обеспечивающей среднеквадратическую погрешность (СКП) не более 0,007 мГал; гравитационный мониторинг направлен на выявление динамических аномалий во времени сил тяжести земли на дневной поверхности, которые обусловлены изменениями плотностных характеристик на глубине.

Результаты 11 цикла высокоточных геодезических измерений, полученных геометрическим нивелированием II класса, за период 2002–2013 гг. выявили, что у подавляющего числа пунктов СГДП высоты уменьшились. В целом за 2002–2013 гг. подъем высотных отметок произошел только в двух пунктах (0077 и 0080) из 46 реперов (рис. 1). Максимальная величина накопленного оседания составляет – 191 мм (пункт 0061), а максимальная величина подъема +13 мм (пункт 0077).

Профильные линии отображают динамику вертикальных сдвижений по данным нивелирования и динамику плотностных характеристик по данным высокоточной гравиметрии за весь период наблюдений 2002–2013 гг. (рис. 2).

Полученные результаты свидетельствуют об общей тенденции к увеличению отрицательных значений высот, что позволяет сделать вывод о стабильном оседании земной поверхности над подрабатываемой территорией Самотлорского месторождения в центральной и юго-восточной части лицензионного участка.

По векторным полям горизонтальных движений за период 2012–2013 гг. мульда оседания районируется на несколько геодинамических эпицентров, каждый из которых имеет замкнутую форму векторной направленности к центру. При этом прослеживаются отдельные локальные участки разнонаправленных горизонтальных движений земной поверхности, что свидетельствует о блоковом характере подвижек. Максимальные значения горизонтальных смещений 31 мм (п.0060).

По данным наблюдаемых значений силы тяжести и значениям горизонтальных градиентов силы тяжести, рассчитанным с использованием программы интерпретации геопотенциальных полей мето-



Рис. 1. Карта-схема вертикальных движений пунктов СГДП по данным нивелирования II класса повышенной точности за период 2002–2013 гг. Масштаб 1:200 000

дом векторного сканирования VECTOR [3] были определены аномальные области увеличения (уплотнения-проседания территории) и уменьшения (разуплотнения-подъема территории). Это свидетельствует о вертикальных перемещениях земной коры, а также дефиците масс, образующихся в результате эксплуатации месторождения (рис. 3).

Повторные гравиметрические наблюдения позволяют контролировать изменение плотностной характеристики и локальных неоднородностей среды, которые могут быть концентраторами НДС недр месторождения. Площадное выделение плотностных неоднородностей связано с решением задачи построения корреляционной модели «тектонические блоки – плотностные неоднородности». В свою очередь, это позволяет решить задачу прогнозирования зон повышенного геодинамического риска, так как такие неоднородности являются механически неустойчивыми. Физический смысл гравитационного мониторинга заключается в том, что извлекается



Рис. 2. Динамика вертикальных деформаций по данным высокоточного нивелирования на линии пунктов 0084-0022 СГДП за период 2002–2013 гг.



Рис. 3. Динамические аномалии (разность полных горизонтальных векторов, к=1) с сечением изоаномал 0,005 мГал в разломно-блочном варианте за период 2002–2013 гг. Масштаб 1:200 000

более легкий флюид, который замещается более тяжелым рабочим агентом (жидкостью).

Основные принципы создания системы геодинамического мониторинга базируются на представлениях о том, что современные геодинамические процессы – это сложный комплекс взаимосвязанных деформационных, сейсмических, геохимических и флюидодинамических процессов, возникающих в зонах локальных, структурных неоднородностей геологической среды (разломы, природная и техногенная трещиноватость, плотностные неоднородности и др.). Для построения геолого-тектонической модели месторождения выполнены работы по геодинамическому районированию – дешифрирование и линеаментный анализ аэрокосмоснимков, его генерализация с последующей работой по построению карты динамически напряженных зон (ДНЗ), которые являются проекцией глубинных разломов на земной поверхности. Выполненному геодинамическому районированию обеспечивается глубинное геолого-тектоническое подтверждение посредством последующего комплексирования с материалами структурных карт, временных сейсмических разрезов.

Таким образом, геодинамическое районирование территории Самотлорского месторождения базируется на использовании наземных и аэрокосмических методов, изучении истории геологического развития, тектонического строения, неотектонического и современного режима геоблоков земной коры, простирания зон планетарно-тектонической трещиноватости. Тектонические и структурные карты позволили выявить ДНЗ, связанные с разломами С-3 и С-В направлений, главные из которых 10-10 и 18-18 (рис. 4).

Самотлорское месторождение, открытое в 1965 г. и введенное в разработку в 1969 г., является многопластовым. Всего выявлено 64 залежи, из которых одна газовая (ПК<sub>1</sub>) и четыре нефтегазовых ( $AB_1^{1+2}$ ,  $AB_1^3$ ,  $AB_{2-3}$ ,  $AB_{4-5}$ ). Максимальный размер площади нефтегазоносности по пласту  $AB_1^{1+2}$  составляет 65 х 40 км. Этаж нефтеносности от 1500 до 2500 м (от ЮВ<sub>1</sub> до ПК<sub>1</sub>).

По состоянию на 1.01.2014 из недр месторождения накопленная добыча жидкости составила 11,9 млрд т, в том числе накопленная добыча нефти 2,39 млрд т. Для получения такого результата в систему поддержания пластового давления (ППД) закачено 13,7 млрд м<sup>3</sup> рабочего агента (подземных, поверхностных и сточных вод). Общий фонд скважин составляет 15563 (7986 добывающих и 3259 нагнетательных) единиц. Такая гигантская техногенная нагрузка (почти 10 скважин на 1 км<sup>2</sup> площади) инициирует проявление геодинамических процессов природно-техногенного генезиса, которые форми-



Рис. 4. Карта современной геодинамической обстановки Самотлорского месторождения. Масштаб 1:200 000

руют деформационные, сейсмические и флюидодинамические изменения в недрах.

Анализ результатов геодезических измерений на геодинамическом полигоне за период с 2002 по 2013 г. свидетельствует о том, что система недр месторождения из-за долговременной и интенсивной добычи углеводородов формирует «раскачанную» гидродинамическую систему, что, в свою очередь, создает условия для пульсационного характера НДС пород коллекторов. Кроме того, на техногенное влияние в формировании мульды оседания накладывается природный фактор гравитационного поля земли и регионального поля тектонических напряжений. Поэтому причиной образования мульды оседания земной поверхности являются геодинамические процессы природно-техногенного генезиса.

Сопоставительный анализ полученной информации по накопленной добыче нефти с начала разработки на 1.01.2014 с данными по динамике приращения сил тяжести земли за период 2002–2013 гг. свидетельствует о высокой корреляционной связи формирования современных деформационных процессов с динамикой плотностных характеристик по гравиметрии (рис. 5). Это связано с тем, что замещение в недрах нефти водой при заводнении залежи (закачки рабочего агента) приводит к изменению гравитационного поля, которое, в свою очередь, влечет за собой изменение ортометрических высот и создает условия для формирования мульды оседания [4].

# Выводы

1. Полученные материалы отображают общую тенденцию к увеличению отрицательных значений высотных отметок наблюдательных пунктов СГДП, что свидетельствует о стабильном оседании земной поверхности над подрабатываемой территорией Самотлорского месторождения в центральной и юго-восточной части лицензионного участка.

2. Прослеживается взаимосвязь формирования современных деформационных процессов с динамикой плотностных характеристик (по гравиметрии), с динамикой падения пластовых давлений (по картам изобар) и величиной отбора жидкости (нефти) по основным показателям разработки.

3. Анализ данных геодезических измерений на геодинамическом полигоне за период с 2002 по 2013 г. свидетельствует о том, что на техногенное влияние в формировании мульды оседания накладывается природный фактор влияния гравитационного поля земли и регионального поля тектонических напряжений. Поэтому



Рис. 5. Схема накопленных отборов нефти с начала разработки Самотлорского месторождения на 01.01.2014, совмещенная с изолиниями наблюдаемых значений сил тяжести земли (ΔG, мГал) за период 2002–2013 гг.

причиной образования мульды оседания земной поверхности являются современные геодинамические процессы природно-техногенного генезиса.

#### Библиографический список

1. Кашников Ю.А. Механика горных пород при разработке месторождений углеводородного сырья / Ю.А. Кашников, С.Г. Ашихмин. – М.: Недра, 2007. – 466 с.

2. Инструкция по производству маркшейдерских работ. РД 07-603-03. Госгортехнадзор России. – М., 2003. – С. 117.

3. Васильев Ю. В. Анализ результатов геодезических и гравиметрических измерений на Самотлорском геодинамическом полигоне / Ю.В. Васильев, М. Л. Юрьев, С. И. Яковлев // Маркшейдерский вестник. – 2012. – № 5. – С. 36–42.

4. Васильев Ю.В. Техногенное влияние добычи углеводородов на формирование мульды оседания земной поверхности Самотлорского месторождения / Ю.В. Васильев, А.В. Радченко, М. Л. Юрьев // Маркшейдерия и недропользование. - 2013. – № 5. – С. 63–66.

## УДК 622.268:624.131.537

## УВЕЛИЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ПУТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

### 3. Дж. Эфендиева

Известно, что важнейшей задачей проектирования разработки месторождений полезных ископаемых подземным способом является обеспечение устойчивости горных выработок. Критерием устойчивости горных пород является прочность породного массива и напряжения на контуре выработки. Во время изучения прочностных свойств горных пород необходимо учитывать горное давление, влажность и трещиноватость породного массива. Величина действующих напряжений определяется их концентрацией на контуре горной выработки. Действие данных факторов необходимо учитывать при оценке устойчивости горных пород в выработке.

Изменение напряженно-деформированного состояния породы при разгрузке вызывает появление остаточных напряжений. Одной из причин их возникновения является структурное изменение горных пород под силовым воздействием. Величина этих напряжений зависит как от начальных давлений в элементах породы, так и от физических свойств горных пород. После разгрузки остаточные напряжения приводят породу в напряженное состояние, а растягивающее напряжение приводит к изменению во времени физических свойств горных пород [1].

Наиболее часто встречающийся предел изменения величины нагрузки на контуре горной выработки, составляющий более 20–30%, обусловлен реологическими свойствами пород, характеризующимися изменениями всех механических характеристик при длительном воздействии нагрузок.

Одно из основных реологических свойств пород – это ползучесть, постепенный рост деформации породы во времени при постоянном напряжении или же постепенное снижение напряжения при постоянной деформации. Значительная ползучесть присуща связным породам (глинам, аргиллитам, глинистым сланцам). Величина ползучести, как известно, зависит от нагрузки на породу и направления ее приложения, а также от пластичности.

Для обеспечения долговечности и повышения надежности горных выработок предложен метод, реализуемый следующим образом: из горной выработки проводятся скважины до пласта пластичных глин и глиносодержащих пород. Путем нагнетания через эти скважины определенного, порядка 3–4% объема пор, количества воды придается ползучесть глинистым породам, что приводит к релаксации напряжений, а это в свою очередь способствует «разгрузке» (перераспределению напряжения) давления вышележащих пород на контур выработки. Величина «разгрузки» определяется как физико-механическими свойствами пород, так и параметрами скважин и количеством нагнетаемой воды.

С целью исследования было отобрано 120 образцов глин трех разновидностей, свойства которых были определены стандартными методами.

Отметим, что исследуемые образцы относятся к пластичным телам и могут удовлетворительно описываться механической моделью Сен-Венана [2]. На основании полученных данных были построены графики (рис.1) зависимости числа пластичности (J) и относительного показателя напряжений (R). Кривые 1 и 2 показывают, что глинистые образцы при пропитке их водой становятся пластичными и ползучими, что приводит к снижению напряжений в породе [3].

В целях оценки эффективности обработки глиносодержащих пород были проведены испытания по 30 специально изготовленным образцам, результаты которых обработаны на ЭВМ методом регрессионного анализа.



Рис. 1.

Проведенные исследования еще раз подтвердили, что, увеличивая пластичность породы путем нагнетания воды в глинистый пласт, можно достичь увеличения ползучести породы и, как следствие, перераспределения нагрузки, следовательно, уменьшения напряжения в массиве вокруг горной выработки.

### Библиографический список

1. Мороз А. И. Самонапряженное состояние горных пород / А. И. Мороз. – М.: Изд-во МГГУ, 2004. – 288 с.

2. Исаева З. Дж. Исследование свойств глиносодержащих пород Азербайджана / З. Дж. Исаева // Усовершенствование техники и технологии разработки месторождений полезных ископаемых. – Баку, 1991. – С. 51–52.

3. Мухтаров Г. Г. Регулирование физико-механических свойств сыпучих, рыхлых и глиносодержащих пород / Г. Г. Мухтаров, З. Дж. Исаева, Р. Б. Мурадов // Усовершенствование техники и технологии разработки месторождений полезных ископаемых. – Баку, 1991. – С. 23–27.

# ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ГЛУБОКИХ ГОРИЗОНТОВ КОЧКАРСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО Месторождения

## В. Н. Калмыков, Р. В. Кульсаитов, Д. П. Самойленко, П. В. Волков, С. С. Неугомонов

Многочисленными исследованиями напряженного состояния уральских месторождений выявлена тектоническая природа поля напряжений, в котором одна из горизонтальных составляющих в несколько раз превышает вертикальную, что в совокупности с определенными физико-механическими свойствами слагающих массив пород может привести к динамическим проявлениям горного давления, которые повышают затраты на добычу полезного ископаемого, создают опасные условия труда для горнорабочих, а также снижают эффективность отработки месторождения в целом.

Кочкарское золоторудное месторождение расположено в северной части одноименного рудного поля на восточном склоне Южного Урала и занимает площадь 12 км<sup>2</sup>. Южнее на 3 км находится отработанное Новотроицкое золотомышьяковое месторождение, эксплуатация которого началась в 1875 г. Геологическое строение обусловливается обилием даек жильных пород, пронизывающих плагиогранитный массив в субширотном направлении. Для Кочкарского месторождения характерны кварцевые малосульфидные жилы. Количество даек составляет около 15% площади, и распространяются они в массиве неравномерно, образуя зоны сгущения. В пределах месторождения выделяются три основные зоны сгущения: Северная, Центральная и Южная. Простирание зон восток – северо-восточное 70-80°, падение крутое 70-85° как северное, так и южное. Длина зон составляет 3-4 км, мощность 100-150 м. Пластовский массив плагиогранитов приурочен к антиклинальной структуре и отличается сложным строением. Рудные тела представлены золотоносными кварцевыми жилами и жильными зонами крутого падения мощностью 0,4-0,7 м. Сложность морфологии кварцевых жил, их мощность и размеры зависят, главным образом, от того, с какой средой они связаны: с зонами сгущения даек «табашек» или с отдельными изолированными дайками. Кварцевые жилы, залегающие в зонах сгущения даек, отличаются исключительной сложностью строения, очень часто золотосодержащие жилы представляют собой серию сближенных кварцевых линз, ориентированных вдоль оси рудных зон.

По степени трещиноватости вмещающие породы Кочкарского месторождения делятся на три класса:

1. Сильнотрещиноватые. Среднее расстояние между трещинами различных систем составляет 0,1–0,25 м.

2. Среднетрещиноватые. Среднее расстояние между трещинами различных систем составляет 0,25–0,5 м.

3. Слаботрещиноватые. Среднее расстояние между трещинами различных систем составляет 0,5–1,5 м.

Плагиограниты и «табашки» отличаются интенсивностью трещиноватости: «табашки» имеют значение числа трещин 2,5–2,8 на 1 погонный метр массива, а плагиограниты 3,8–4,2.

На сегодняшний день месторождение, отнесенное к опасным по горным ударам [1], отрабатывается системами разработки подэтажных штреков (рисунок) в различных вариациях [2]. Доля применения данной системы разработки составляет 100%. Высота этажей на основных горизонтах 100 м. Они, в свою очередь, разделяются промежуточными горизонтами высотой 50 м на подэтажи. Порядок отработки этажей нисходящий. Запасы в пределах этажа отрабатываются в обратном порядке по простиранию (от флангов к центру). Применение этой системы дало возможность увеличить



Конструкция системы разработки подэтажных штреков

интенсивность отработки выемочных единиц, снизить выемочную мощность (1,37 м) и, как следствие, разубоживание руды. Производительность труда при системе подэтажных штреков составляет 2.65 м<sup>3</sup>/(чел смен).

результате продолжительной эксплуатации Кочкарского В месторождения системами с открытым очистным пространством образовалось большое количество пустот, разделенных рудными и безрудными целиками. Совокупность горно-геологических условий залегания месторождения, физико-механических свойств пород, большой изрезанности массива и низкой интенсивности ведения горных работ может способствовать проявлению горного давления, в том числе и в динамической форме.

В 1987–1990 гг. Институтом физики и механики горных пород АН Киргизской ССР [3] совместно с работниками производственного объединения «Южуралзолото» были проведены теоретические и экспериментальные исследования на глубине 512 м, направленные на разработку методики оценки степени удароопасности участков Кочкарского месторождения, склонного к горным ударам, методом геомеханических аналогий. На базе выполненных научных исследований и опытно-промышленных работ составлены Рекомендации по оценке удароопасности участков Кочкарского месторождения.

Результаты испытаний физико-механических свойств пород, проведенных Институтом физики и механики горных пород АН Киргизской ССР, приведены в табл. 1 (по данным ППИ).

Таблина 1

0.38

0.34

		глубине 512 м		
Породы	Предел прочности на сжатие б <sub>сж</sub> , МПа	Предел прочности на растяжение б <sub>раст,</sub> МПа	Модуль упругости, Е·10 <sup>-5</sup> , МПа	Коэффициент Пуассона, µ

15

16

7

9

360

143

Плагиогранит

«Табашка»

Физико-механические свойства порол Кочкарского месторожления на

Испытания напряженного состояния нетронутого массива на Кочкарском месторождении проведены двумя методами: по методике М.В. Гзовского и методом полной разгрузки. Результаты исследований напряженного состояния нетронутого массива приведены в табл. 2.

Таблица 2

Порола	Величины напряжений			Расчетное	Глубина измерения Н. м			
породи	δ <sub>x</sub>	δ <sub>y</sub>	δ <sub>z</sub>	$\delta_z = \gamma H$ , ΜΠα				
Плагиогранит	47	22	10	12,5	512			

Значения напряженного состояния нетронутого массива глубоких горизонтов Кочкарского месторождения на глубине 512 м

Анализ результатов натурных экспериментов показал, что горизонтальные напряжения не равны между собой ( $\delta_x \neq \delta_y$ ) и превышают вертикальные в 2–4 раза. Максимальные сжимающие напряжения  $\delta_x$  направлены субмеридионально и перпендикулярно залеганию геологических структур.

На сегодняшний день подземные горные работы на центральном рудном поле Кочкарского месторождения ведутся шахтами «Центральная» и «Восточная» на горизонтах 550, 600, 650, 700, 750 м, в связи с чем появилась необходимость в исследовании напряженно-деформированного состояния массива на глубоких горизонтах, направленного на выявление степени удароопасности участков месторождения, составление рекомендаций по оценке удароопасности, указаний по безопасному ведению горных работ на участках Кочкарского месторождения, склонных к горным ударам.

В связи с этим были поставлены задачи: получить фактические параметры естественного поля напряжений в пределах фронта горных работ Кочкарского месторождения, определить физико-механические свойства пород, слагающих массив месторождения, и степень удароопасности массива на глубине более 512 м.

Оценка напряженного состояния нетронутого массива на Кочкарском месторождении на глубоких горизонтах (600, 650, 700 м) проведена с использованием известного метода щелевой разгрузки [3]. Данный метод основан на взаимосвязи между действующими напряжениями и деформациями упругого восстановления элемента горной породы, проявляющимися в процессе нарушения связи этого элемента с окружающим массивом. Сущность метода заключалась в следующем: в прилегающем к горной выработке монолитном массиве выбуривались два отверстия на определенном расстоянии, в которых расклинивались реперы; микрометр устанавливался между реперами, и его показания обнулялись; после чего алмазным диском прорезалась щель между реперами; по истечении определенного времени расстояние между реперами снова замерялось микрометром. Замеры напряжений проводились в бортах выработок, пройденных непосредственно по жилам или пересекающих их на горизонтах 600, 650, 700 м. К жилам, в которых проводились исследования, относятся ЮЛВК, Северная Александровская, Северная Николаевская, Дегтярско-Кузнецовская, Сретенская, Северная Октябрьская, Октябрьская, Юбилейная. В каждой точке в выработке производились замеры для определения вертикальных и горизонтальных компонент. Для определения упругих характеристик пород в точках замеров отбирались и исследовались образцы пород. Результаты исследований напряженного состояния нетронутого массива приведены в табл. 3.

Таблица 3

Порода	Величи	ины напряжени	Расчетное $\delta = \gamma H$	Глубина измерения		
породи	$\delta_x$	δ <sub>y</sub>	δ <sub>z</sub>	о <sub>г</sub> үн, МПа	<i>Н</i> , м	
Плагиогранит	55,1 - 56,3	33,06 - 35,7	22,4-24,7	16,8	600	
	59,7 - 60,5	36,5 - 37,3	25,1-28,4	18,2	650	
	63,8-64,6	40,5 - 41,7	31,6-33,1	19,6	700	

Значения напряженного состояния нетронутого массива глубоких горизонтов Кочкарского месторождения

Анализ результатов натурных экспериментов показал, что горизонтальные напряжения на глубоких горизонтах (более 512 м) не равны между собой ( $\delta_x \neq \delta_y$ ) и превышают вертикальные в 2–2,6 раза. Максимальные сжимающие напряжения  $\delta_x$  преимущественно направлены субмеридионально, вкрест простирания геологических структур. Установлено, что измеренные величины вертикальной компоненты напряжений на 30–70 % превышают значения расчетных величин 16,8; 18,2; 19,6 МПа, определяемые весом налегающей толщи пород (при глубинах 600, 650, 700 м), что объясняется влиянием очистных и подготовительных выработок на вышележащих горизонтах, а также большой изрезанностью Кочкарского рудного поля тектоническими нарушениями различного рода. Результаты испытаний физико-механических свойств пород приведены в табл. 4.

Таблица 4

Физико-механические свойства горных пород глубоких горизонтов Кочкарского месторождения

Породы	Предел проч- ности на сжатие, б <sub>сж</sub> , МПа	Объемный вес, г/см <sup>3</sup>	Предел прочности на растяже- ние, б <sub>раст</sub> , МПа	Коэффици- ент крепо- сти по М. Прото- дьяконову	Модуль упругости Е·10 <sup>5</sup> , МПа	Коэффициент Пуассона, µ
Плагиогранит	109,3–164,0	2,78-2,81	18,4–22,5	11,2–13,6	0,64–0,80	0,29–0,36
«Табашка»	86,9–130,4	2,36–2,40	15,0-18,3	6,5-8,0	0,29–0,35	0,22–0,26

По полученным значениям физико-механических свойств пород, слагающих Кочкарское месторождение, были построены паспорта прочности и определены значения сцепления и угла внутреннего трения.

Согласно данным паспортов прочности величина сцепления для плагиогранита имеет значение 25,5–27,1 МПа, угол внутреннего трения 45,6–47,00; для «табашки»: сцепление 20,8–21,2 МПа, угол внутреннего трения 46,8–47,80.

Сравнение механических характеристик с данными верхних горизонтов свидетельствует о наличии тенденции увеличения их с глубиной. Значение коэффициента Пуассона пород с увеличением глубины снижается: для плагиогранита на 25 %, для «табашки» на 35 %.

Анализ результатов определения физико-механических свойств пород, слагающих Кочкарское месторождение, и оценка пород по различным деформационным критериям показали, что породы на глубине более 512 м являются прочными, высокомодульными, хрупкими, способными накапливать упругую энергию и внезапно высвобождать ее в форме взрыва.

Значения горизонтальных напряжений в нетронутом массиве не равны между собой и превышают вертикальные в 2–2,5 раза, что соответствует исследованиям на глубине до 512 м и является характерной чертой жильных удароопасных месторождений. С увеличением глубины прослеживается тенденция к росту как вертикальных, так и горизонтальных напряжений в массиве, что приведет к росту числа проявлений горного давления в динамической форме.

### Библиографический список

1. Приказ Ростехнадзора от 02.12.2013 № 576 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Положение по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам» (зарегистрировано в Минюсте России 04.04.2014 № 31822). – URL: www.consultant. ru/cons doc LAW 161687/

2. Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. Спец. вып. журн. – 2007. – Октябрь.

3. Рекомендации по оценке удароопасности участков Кочкарского месторождения методом геомеханических аналогий / И. Т. Айтматов и др.; АН КиргССР. – Фрунзе, 1990.

4. Геомеханика и геотехнология / А.В. Зубков; Рос. акад. наук, Урал. отд-ние, ИГД. – Екатеринбург: УрО РАН, 2001. – 334 с.

УДК 622.831.24

## ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫМ СОСТОЯНИЕМ ПРИКОНТУРНОГО МАССИВА ГОРНЫХ Выработок на угольных шахтах

### В. Ф. Демин, Т. В. Демина

Аналитическое моделирование выполнено с применением численного метода конечных элементов. Рассматривается напряженно-деформированное состояние (НДС) массива вокруг действующей выемочной выработки. Решение осуществляется в упругой постановке вследствие сравнительно непродолжительного времени деформирования горных пород в окрестности подготовительного забоя при его подвигании. В отличие от известных подходов конкретизируются размеры зон распространения деформаций с анализом их параметров.

Исследования, произведенные на математических моделях с использованием программного комплекса ANSYS, позволяют установить влияние горно-геологических факторов на условия эксплуатации крепей горных выработок. В программном комплексе ANSYS была построена модель массива вмещающих горных пород, соответствующая условиям залегания пласта, и применена программа, позволяющая определить НДС в рассматриваемой точке техногенного пространства и оценить устойчивость породного обнажения для последующего принятия технологических мер.

В соответствии с программой развития горных работ на глубине 580–576 м предусмотрено проведение конвейерного штрека 61К12-В 3-го района шахты «Саранская» Угольного департамента АО «АрселорМиттал Темиртау». Мощность пласта К12 составляет 5,3 м, угол падения пласта 140. Угол проведения выработки +1–2°. Пласт К12 имеет сложное строение и состоит из 10–12 угольных пачек, разделенных прослойками аргиллита и углистого аргиллита мощностью 0,01–0,12 м. В непосредственной кровле пласта К12 залегают серые слоистые аргиллиты и алевролитов 1,35–1,83 м, крепость 3,5 по шкале проф. М. М. Протодьяконова. Основная кровля сложена серыми среднезернистыми песчаниками мощностью 39,3–15,8 м, крепостью 5. Почва пласта К12 представлена темно-серыми аргиллитов 2,5, алевролитов 3,5; мощность аргиллитов 0,85–2,3; алевролитов 1,15 м. Ниже залегают песчаники серые, среднезернистые, крепкие, мощностью 21,2–2,15 м, крепостью 6,4. При ведении горных работ будет пересечен ряд опасных зон. Анализ геомеханической обстановки представлен в табл. 1.

Таблица 1

Наименование выработки	Дли- на, м	Ширина, м	Высота, м	Площадь сечения, <sup>M<sup>2</sup></sup>	Тип крепле- ния	Шаг уста- новки рам крепи, м	Тип затяж- ки
Конвейерный штрек 61 К12-В	600	5,63/5,39	3,64/3,55	17,3/14,4	Металл, анкер	0,75	MM

#### Характеристика выработки

В геомеханическом отношении условия проведения конвейерного штрека относятся к средней сложности (рис. 1).

Динамика изменения перемещений и напряжений во времени при поддержании выработки в зоне влияния опорного давления от очистных работ показана на рис. 2. При использовании только анкеров первого уровня (до 2,4 м) состояние выработки не удовлетворяет эксплуатационным параметрам.

Исследовано влияние расслоений в горном массиве при различном его коэффициенте нарушенности (трещиноватости) (рис. 3).

Развитие трещинообразования (диталансия пород) во времени (DT) в зависимости от глубины расположения (Гр) с комбинированным (анкерным и металлоарочным) креплением представлено эмпирическими зависимостями (при R<sub>2</sub>=0,94):

 $\hat{I}_{,,1,2,2,3}$  для кровли и боков  $D_{T} = 1,028 + 0,0004\Gamma p + 0,056T,$ для почвы  $D_{T} = 1,387 + 0,0004\Pi + 0,109T,$  м. (1)



Рис. 1. Схема к расчету НДС 3-го района шахты «Саранская» Угольного департамента АО «АрселорМиттал Темиртау»: *a* – структура разреза вмещающих пород; *б* – строение массива по конвейерному

штреку; в – расчетная схема



Рис. 2. Перемещения и напряжения во времени при поддержании выработки в зоне влияния опорного давления от очистных работ: *а* – перемещение по оси *y*; *б* – напряжение по оси *y*  Максимально отдаленное распространение расслоений в кровле (4,1–4,2 м) и в боках (3,3–3,4 м) характерно для прямоугольной формы сечения выработки, против арочной, соответственно, (3,6–3,7 и 2,7–2,8 м), что снижает технологическое расслоение пород вокруг контуров выработки.

Исследование изолиний максимальных касательных напряжений в боковых вмещающих породах при арочной, полигональной, трапециевидной и прямоугольной формах поперечного сечения выработок показывает, что на зону изолиний ослабления углепородного массива и на картину распределения касательных напряжений  $\tau_{\rm k}$  форма выработок оказывает существенное влияние. Максимальные концентрации ( $\tau_{\rm k}$ =25 МПа) для арочной и полигональной крепей располагаются на почве, включая зоны примыкания к боковым стенкам выработки; для прямоугольной – там же и в кровле, а с ростом  $\tau_{\rm k}$  до 35 МПа – у боковых стенок выработки. По глубине распространения касательных напряжений в глубь массива  $\tau_{\rm k}$ =5 и 15 МПа: для прямоугольного сечения выработки – вертикальные на 3,6–3,7 м и 0,8–0,9 м, горизонтальные на 3,3–3,4 м и 0,7–0,8 м; для полиго-



Рис. 3. Расслоения в горном массиве при различном его коэффициенте нарушенности (трещиноватости): при металлоарочной крепи: *a* – 1,5, *б* – 1,85, *в* – 2,0; при комбинированной крепи: *г* – 1,5, *d* – 1,85, *e* – 2,0

нального сечения – вертикальные на 4,7–4,8 м и 1,2–1,3 м, горизонтальные 3,4–3,5 и 0,8–0,9 м; для арочного сечения – вертикальные 4,3–4,4 и 1,2–1,3 м, горизонтальные на 3,8–3,9 и 0,8–0,9 м, что свидетельствует о более приемлемой для рассматриваемых условий прямоугольной формы поперечного сечения горной выработки.

Сравнительная оценка проведенных исследований с испытаниями в производственных условиях показала удовлетворительную сходимость параметров НДС породных массивов.

УДК 622.838.5

## ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ДАВЛЕНИЯ НА ЦЕЛИКИ

Ю.Г. Феклистов, А.Д. Голотвин

В практике ведения подземных горных работ по различным причинам приходится оставлять целики полезного ископаемого. При отработке протяженных пластообразных залежей целики часто имеют форму ленты. Известны различные подходы для оценки давления на целики [1–6, 7–11].

На рисунке представлена общая схема распределения давления на целик пласта, имеющий упругую область и области предельного состояния [2–4]. Данная схема определяется как результат наложения давления от встречных зон опорного давления краевых частей пластов. При этом величина суммарного опорного давления распределяется только на целик, сохраняя баланс сил пригрузки от сил разгрузки. Согласно этим условиям, составлена система уравнений, позволяющая определить основные параметры давления на целик.

Распределение давления в зонах предельного состояния принято, согласно [3], в виде:

$$\sigma_{v}^{\mathrm{A}} = \sigma_{\mathrm{nn}} + 2,6\sigma_{\mathrm{nn}}x / m_{\mathrm{B}} - \gamma H, \qquad (1)$$

где  $\sigma_{nn}$  – прочность пласта на одноосное сжатие в массиве, МПа;  $\gamma$  – объемный вес пород, МН/м<sup>3</sup>;

*H* – глубина горных работ, м;

x – расстояние от груди забоя в сторону неотработанного массива, м;  $m_{\rm B}$  – вынимаемая мощность пласта, м.



Схема к расчету параметров давления на целик с упругой областью:  $B_{\rm II}$  – ширина целика;  $B_{\rm o}$  – упругая зона;  $d_1$ ,  $d_2$  – зона предельного состояния;  $\sigma^{\rm a}_{y\,\rm max1}$ ,  $\sigma^{\rm a}_{y\,\rm max2}$  – общее максимальное дополнительное давление на целик со стороны восстания и падения;  $\sigma^{\rm a}_{y\,\rm max1}$ ,  $\sigma^{\rm a}_{y\,\rm max2}$  – максимальное дополнительное давление, создаваемое пригрузкой от подработанных пород, соответственно, со стороны восстания и падения;  $L_{\rm \gamma H1}$ ,  $L_{\rm \gamma H2}$  – пролеты восстановления давления, м;  $\gamma H_1$ ,  $\gamma H_2$  – геостатическое давление пород, соответственно, со стороны восстания и падения;  $Q_1$ ,  $Q_2$  – величина разгрузки, соответственно, со стороны восстания и падения

Значения параметра затухания (*b*) в упругой части зоны опорного давления приняты согласно полученной зависимости (в натурных условиях – в шахтах и на моделях из эквивалентных материалов) [7–9]:

$$b = 0,35 \left( H^2 m_{\rm B} \right)^{1/3}, \,\mathrm{M}$$
 (2)

Размер выработанного пространства, при котором вблизи его центра давление достигает значений начального геостатического давления ( $L_{\gamma H}$ ), определен на основе анализа шахтных и лабораторных исследований (ВНИМИ, ИГД им. А. А. Скочинского, Куз-НИУИ). Установлена зависимость данного параметра ( $L_{\gamma H}$ ) от глубины горных работ и отношения средней прочности массива ( $\sigma_{\text{сжм}}$ ) к геостатическому давлению ( $\gamma$ H). Получена расчетная формула:

$$L_{yH} = 0.5 (\sigma_{cxm} / \gamma H)^{0.5} \pm 10\%,$$
(3)

где ү – объемный вес пород, МПа;

*H* – глубина горных работ, м;

 $\sigma_{\rm сжм}$  – средневзвешенная прочность массива, МПа;  $\sigma_{\rm сжм} = k_{\rm стр} \, \sigma_{\rm сжк} \, (k_{\rm стр} - коэффициент структурного ослабления;$  $<math>\sigma_{\rm сжк}$  – прочность пород на сжатие в куске при стандартных испытаниях на прессе, МПа).

Система уравнений для оценки давления на ленточный целик с упругой областью следующая:

$$\begin{cases} \sigma_{y\,\text{max1}}^{a} = '\sigma_{y\,\text{max1}}^{a} + '\sigma_{y\,\text{max2}}^{a} e^{\frac{-B_{o}}{b_{2}}}; \\ \sigma_{y\,\text{max2}}^{a} = '\sigma_{y\,\text{max2}} + '\sigma_{y\,\text{max1}}^{a} e^{\frac{-B_{o}}{b_{1}}}; \\ \sigma_{y\,\text{max1}}^{a} = \sigma_{nn1} - \gamma H_{1} + \frac{2,6 \cdot \sigma_{nn1} d_{1}}{m_{\text{B}}}; \\ \sigma_{y\,\text{max2}}^{a} = \sigma_{nn2} - \gamma H_{2} + \frac{2,6 \cdot \sigma_{nn1} d_{2}}{m_{\text{B}}}; \\ \frac{Q_{1} + (\gamma H_{1} - \sigma_{nn1})^{2} m_{\text{B}}}{1,3 \cdot \sigma_{nn1}} = b_{1} \cdot '\sigma_{y\,\text{max1}}^{a} \left(1 - e^{\frac{-B_{o}}{b_{1}}}\right) + \\ + \frac{\left('\sigma_{y\,\text{max1}}^{a^{2}} + 2 \cdot '\sigma_{y\,\text{max1}}^{a} / \sigma_{y\,\text{max2}}^{a} e^{\frac{-B_{o}}{b_{2}}}\right) \cdot m_{\text{B}}}{1,3 \cdot \sigma_{nn2}} + \frac{'\sigma_{y\,\text{max1}}^{a^{2}} e^{\frac{-2B_{o}}{b_{1}}} m_{\text{B}}}{1,3 \cdot \sigma_{nn2}}; \\ \frac{Q_{2} + (\gamma H_{2} - \sigma_{nn2})^{2} m_{\text{B}}}{1,3 \cdot \sigma_{nn2}} = b_{2} \cdot '\sigma_{y\,\text{max1}}^{a} e^{\frac{-B_{o}}{b_{1}}} + \\ + \frac{\left('\sigma_{y\,\text{max2}}^{a^{2}} + 2 \cdot '\sigma_{y\,\text{max2}}^{a} / \sigma_{y\,\text{max1}}^{a} e^{\frac{-B_{o}}{b_{1}}}\right) \cdot m_{\text{B}}}{1,3 \cdot \sigma_{nn2}}} + \frac{(\sigma_{y\,\text{max2}}^{a^{2}} e^{\frac{-2B_{o}}{b_{1}}} m_{\text{B}}}{1,3 \cdot \sigma_{nn1}}; \\ + \frac{\left('\sigma_{y\,\text{max2}}^{a^{2}} + 2 \cdot '\sigma_{y\,\text{max2}}^{a} / \sigma_{y\,\text{max1}}^{a} e^{\frac{-B_{o}}{b_{1}}}\right) \cdot m_{\text{B}}}{1,3 \cdot \sigma_{nn2}}} + \frac{(\sigma_{y\,\text{max2}}^{a^{2}} e^{\frac{-2B_{o}}{b_{1}}} m_{\text{B}}}{1,3 \cdot \sigma_{nn1}}; \\ + \frac{\left('\sigma_{y\,\text{max2}}^{a^{2}} + 2 \cdot '\sigma_{y\,\text{max2}}^{a} / \sigma_{y\,\text{max1}}^{a} e^{\frac{-B_{o}}{b_{1}}}\right) \cdot m_{\text{B}}}{1,3 \cdot \sigma_{nn1}}}; \\ + \frac{\left('\sigma_{y\,\text{max2}}^{a^{2}} + 2 \cdot '\sigma_{y\,\text{max2}}^{a} / \sigma_{y\,\text{max1}}^{a} e^{\frac{-B_{o}}{b_{1}}}\right) \cdot m_{\text{B}}}{1,3 \cdot \sigma_{nn1}}}; \\ + \frac{\left('\sigma_{y\,\text{max2}}^{a^{2}} + 2 \cdot \sigma_{y\,\text{max2}}^{a} / \sigma_{y\,\text{max1}}^{a} e^{\frac{-B_{o}}{b_{1}}}\right) \cdot m_{\text{B}}}{1,3 \cdot \sigma_{nn1}}}; \\ + \frac{\left('\sigma_{y\,\text{max2}}^{a^{2}} + 2 \cdot \sigma_{y\,\text{max2}}^{a} / \sigma_{y\,\text{max1}}^{a} e^{\frac{-B_{o}}{b_{1}}}\right) \cdot m_{\text{B}}}{1,3 \cdot \sigma_{nn1}}}; \\ + \frac{\left(\sigma_{y\,\text{max2}}^{a^{2}} + 2 \cdot \sigma_{y\,\text{max2}}^{a} / \sigma_{y\,\text{max2}}^{a} / \sigma_{y\,\text{max1}}^{a} e^{\frac{-B_{o}}{b_{1}}}\right) \cdot m_{\text{B}}}{1,3 \cdot \sigma_{nn1}}}; \\ + \frac{\left(\sigma_{y\,\text{max2}}^{a^{2}} + 2 \cdot \sigma_{y\,\text{max2}}^{a} / \sigma_{y\,\text{max2}}^{a} / \sigma_{y\,\text{max1}}^{a} + 2 \cdot \sigma_{y\,\text{max1}}^{a} / \sigma_{y\,\text{max2}}^{a} / \sigma_{y\,\text{max1}}^{a} / \sigma_{y\,\text{max2}}^{a} / \sigma_{y\,\text{max2}}^{a} / \sigma_{y\,\text{max1}}^{a} / \sigma_{y\,\text{max2}}$$

где  $\sigma_{y \max 1}^{\pi}$  – суммарное максимальное дополнительное давление с левой стороны целика, МПа;

 $\sigma_{y_{max2}}^{\pi}$  – суммарное максимальное дополнительное давление с правой стороны целика, МПа;

<sup>'</sup>σ<sup>д</sup><sub>ymax1</sub> – часть максимального дополнительного давления, обусловленного пригрузкой с левой стороны (Q1), МПа;

<sup>'</sup>σ<sup>*д*</sup><sub>*y*max2</sub> – часть максимального дополнительного давления, обусловленного пригрузкой с правой стороны (Q2), МПа;

*b*<sub>1</sub> – параметр затухания давления в упругой части с левой стороны целика, м;

 $b_2$  – параметр затухания давления в упругой части с правой стороны, м;

*m*<sub>в</sub> – вынимаемая мощность пласта, м;

*d*<sub>1</sub> – размер зоны предельного состояния с левой стороны, м;

d<sub>2</sub> – размер зоны предельного состояния с правой стороны, м;

 $\sigma_{\mbox{\tiny nnl}}$  – прочность пласта угля на сжатие с левой стороны, МПа;

σ<sub>пл2</sub> – прочность пласта угля на сжатие с правой стороны, МПа;

γ*H*<sub>1</sub> – уровень разгрузки с левой стороны, МПа;

 $\gamma H_2$  – уровень разгрузки с правой стороны, МПа;

 $B_{\rm II}$  – ширина целика, м;

Во – протяженность упругой области целика.

Данная система уравнений решалась путем последовательных приближений.

В случае, когда целик весь находится в предельном состоянии, но его несущая способность достаточна для поддержания всех подработанных пород, развивается максимальное давление. Параметры распределения давления на целик, его ширина (В<sub>ц max</sub>) определяются из следующих условий:

$$\begin{cases} Q_{1} = (\sigma_{nn1} - \gamma H_{1})d_{1} + \frac{1,3 \cdot \sigma_{nn1}d_{1}^{2}}{m_{B}}; \\ Q_{2} = (\sigma_{nn2} - \gamma H_{2})d_{2} + \frac{1,3 \cdot \sigma_{nn2}d_{2}^{2}}{m_{B}}; \\ d_{1} + d_{2} = B_{umax}. \end{cases}$$
(5)

В случае, если целик весь находится в предельном состоянии, но его несущая способность недостаточна для поддержания всех подработанных пород, а лишь их части, то параметры распределения

давления на целик и величины пригрузок  ${}^{\prime}Q_1$ ,  ${}^{\prime}Q_2$  определяются из условий:

$$\begin{cases} {}^{\prime}Q_{1} + {}^{\prime}Q_{2} = (\sigma_{nn1} - \gamma H_{1})d_{1} + \frac{1.3 \cdot \sigma_{nn1}d_{1}^{2}}{m_{B}} + (\sigma_{nn2} - \gamma H_{2})d_{2} + \frac{1.3 \cdot \sigma_{nn2}d_{2}^{2}}{m_{B}}; \\ {}^{\prime}Q_{1} \\ {}^{\prime}Q_{2} = \frac{Q_{1}}{Q_{2}}; \\ d_{1} + d_{2} = B_{u}. \end{cases}$$
(6)

где  ${}^{\prime}Q_1$  и  ${}^{\prime}Q_2$  – уменьшенные величины пригрузок со стороны выработанных пространств, МН/м.

В случае, если целик не способен поддерживать вес столба пород над собой и пригрузку от подработанных пород, он поддерживает только вес столба над собой. При этом его несущая способность возрастает благодаря возникающему боковому подпору от обрушенных пород. Параметры давления на такой целик определяются из условий:

$$\left[ \left( \sigma_{nn1} - \gamma H_1 + 2, 6 \cdot \sigma_{nn1} \frac{d_1}{m_{_B}} \right) = \left( \sigma_{nn2} - \gamma H_2 + 2, 6 \cdot \sigma_{nn2} \frac{d_2}{m_{_B}} \right);$$

$$\left( d_1 + d_2 = B_u; \right) = \left( \left( \sigma_{nn1} - \gamma H_1 \right) d_1 + \frac{1, 3 \cdot \sigma_{nn1} d_1^2}{m_{_B}} - \left( \left( \sigma_{nn2} - \gamma H_2 \right) d_2 + \frac{1, 3 \cdot \sigma_{nn2} d_2}{m_{_B}} \right) = B_u \gamma H,$$

$$(7)$$

где  $\sigma_{nn1}$ ,  $\sigma_{nn2}$  – увеличенные прочности пласта с разных сторон из-за бокового подпора от обрушенных пород, МПа.

В таблице приведены результаты расчетов влияния давления на ленточные целики различной ширины ( $m_{\rm B} = 2$  м,  $\alpha = 20^{\circ}$ ) на глубине 400 м и размеров прилегающих отработанных участков более 200 м с учетом фактора времени (t = 0 мес; t = 60 мес).

Рассмотренный выше математический аппарат, полученный на основе экспериментально-аналитического подхода, и разработанное программное обеспечение позволяют детально и оперативно оценить давление на ленточные целики в зависимости от достаточно большого количества горно-геологических и горнотехнических факторов.

Ширина целика, м	5	0	2	2	4	5
Время, мес.	0	60	0	60	0	60
Средняя прочность массива, МПа	5,2	2,1	5,2	2,1	5,2	2,1
Пролет L <sub>γ<sub>H1</sub></sub> , м	144	86	30	5	0	0
Пролет L <sub>γ<sub>H2</sub>, м</sub>	156	92	36	8	0	0
Прочность пласта $\sigma_{\rm пл},$ МПа	4,0	1,6	4,0	1,6	4,0	1,6
Ширина упругой области, м	40	28	0	0	0	0
Максимальный коэффициент концентрации напряжений	3,4	2,7	5,5	2,4	1,6	1,0

Результаты расчетов давления на ленточные целики

#### Библиографический список

1. Руппенейт К.В. Некоторые вопросы механики горных пород / К.В. Руппенейт. – М.: Углетехиздат, 1954. – 384 с.

2. Ардашев К. А. Совершенствование управления горным давлением / К. А. Ардашев и др. – М.: Недра, 1967. – 279 с.

3. Теория защитных пластов / И. М. Петухов и др. – М.: Недра, 1976. – 224 с.

4. Фисенко Г. Л. Предельные состояния горных пород вокруг выработок / Г. Л. Фисенко. – М.: Недра, 1976. – 272 с.

5. Прочность и деформируемость горных пород / Ю. М. Карташов и др. – М.: Недра, 1979. – 269 с.

6. Борисов А. А. Механика горных пород и массивов / А. А. Борисов. – М.: Недра, 1980. – 353 с.

7. Белов В.А. Оценка параметров опорного давления впереди очистного забоя / В.А. Белов, А.Д. Голотвин // Известия вузов. Горный журнал. – 2005. – № 1. – С. 18–21.

8. Белов В. А. Влияние целиков и краевых частей угольных пластов на подготовительные выработки / В. А. Белов, А. Д. Голотвин, В. В. Потапов // Известия вузов. Горный журнал. – 2011. – № 7. – С. 98–101.

9. Голотвин А. Д., Феклистов Ю. Г. и др. Рекомендации по управлению горным давлением в очистных забоях на шахтах ОАО «Челябинскуголь»: утв. 21.11.2000 г. Управление Челябинского округа ГГТН РФ / А. Д. Голотвин, Ю. Г. Феклистов. – Екатеринбург: УФ ВНИМИ, УГГА, ОАО «Челябинскуголь», 2000. – 93 с.

10. Зубков А. В., Феклистов Ю. Г. Совершенствование метода расчета параметров целиков / А. В. Зубков, Ю. Г. Феклистов; ИГД МЧМ СССР.– Свердловск, 1988. – 15 с. – Деп. в Черметинформ. 24.06.88, № 4559 чм.

11. Зубков А. В., Феклистов Ю. Г. и др. Исследования закономерностей нагружения ленточных целиков и их сопряжений / А. В. Зубков, Ю. Г. Феклистов и др.; ИГД МЧМ СССР. – Свердловск, 1989. – 10 с. – Деп. в Черметинформ. 20.02.89, № 4961 чм.
УДК 622.273.26

## ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ЦЕЛИКА ПРИ ИЗВЛЕЧЕНИИ ЗАПАСОВ РУДНОГО ТЕЛА ЭТАЖНО-КАМЕРНОЙ Системой разработки с комбинированной закладкой выработанного пространства камеры

#### Э. Ю. Мещеряков, А. Б. Аллабердин

При отработке запасов рудного тела в восходящем порядке этажно-камерной системой разработки с комбинированной закладкой выработанного пространства (рис. 1) необходимо геомеханическое подтверждение несущей способности искусственного целика, ширина и прочность, которого рассчитываются аналитически.

Оценка напряженно-деформированного состояния массива твердеющей закладки при этажно-камерной системе разработки осуществлялась с помощью математического моделирования методом конечных элементов в объемной постановке задачи в программном комплексе INVENTOR AUTODESK. Исследовалось НДС искусственного целика прочностью 3 МПа в камерах высотой 60 м и шириной от 10 до 20 м, который испытывает давление, оказываемое только породной закладкой. Физико-механические свойства твердеющей смеси и породы, заданные при создании модели, приняты по данным [1] и представлены в табл. 1. Распределение давления на модель, имитирующую твердеющий монолитный массив, осуществля-



Рис. 1. Этажно-камерная система разработки с комбинированной закладкой выработанного пространства и расположением камер по простиранию рудного тела: 1 – полевой вентиляционный штрек; 2 – полевой доставочный штрек; 3 – подэтажный буровой штрек; 4 – транспортный заезд; 5 – подэтажный буровой орт; 6 – породная закладка лось согласно действию давления породной закладки на подпорную стенку (рис. 2).

Таблица 1

Физико-механические свойства рудного, породного и закладочного	
массивов	

Массив	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Модуль деформации, МПа	Коэффициент Пуассона	
Твердеющая закладка	2,0	150	0,4	
Породная закладка	2,76	50	0,4	

Результаты моделирования напряженного состояния искусственного твердеющего массива под действием давления бокового распора, оказываемого породной закладкой, представлены графически на рис. 3, где видно, что напряжения концентрируются у основания искусственного целика (например, для ширины 15 м  $G_{\rm max}$ = 1,559 МПа), то есть в месте его фиксации, и значения не превышают прочностных характеристик целика, что свидетельствует о том, что расчетная ширина с нормативной прочностью (3 МПа) обеспечивает устойчивое его состояние. Результаты оценки НДС объединены в графике (рис. 4).

Дальнейшие исследования были направлены на определение значений смещения целика в результате действия сдвиговых нагрузок. Проведенная оценка смещений относительно вертикальной плоскости показала, что незначительный сдвиг происходит в верхней части целика и составляет для камеры шириной 15 м max = 2,62473 мм. В основании же смещений нет. Это объясняется тем, что основание целика защемлено под действием собственной силы тяжести, а верх-



Рис. 2. Общий вид модели и распределение нагрузок на твердеющий массив





Рис. 3. Распределение напряжений в искусственном твердеющем массиве при ширине камеры 10, 12, 15, 18, 20 м – соответственно, *a*, *б*, *в*, *с*, *d* 



Рис. 4. Зависимость максимальных сжимающих напряжений при различных значениях ширины камеры



Рис. 5. Смещения искусственного твердеющего массива относительно вертикальной плоскости, при ширине камеры 10, 12, 15, 18, 20 м – соответственно, *a*, *б*, *в*, *c*, *d* 



Рис. 6. Зависимость максимальных смещений искусственного целика при различных значениях ширины камеры



Рис. 7. Распределение растягивающих напряжений в искусственном твердеющем массиве при ширине камеры 10, 12, 15, 18, 20 м – соответственно, *a*, *б*, *в*, *г*, *д* 

няя часть целика не защемлена ни массивом вмещающих пород, ни вышележащим рудным массивом (рис. 5).

Характер изменения значений максимального смещения искусственного целика в зависимости от его ширины представлен на рис. 6.

В целом значения смещений незначительны и недостаточны для его сдвига либо «опрокидывания».

Наиболее опасными напряжениями, возникающими в твердеющем целике, являются растягивающие нагрузки, ввиду слабого сопротивления бетона растяжению.\*

Анализ геомеханической модели (рис. 7) на данный вид напряжений, возникающих в искусственном массиве под действием

Прокофьев П. П. Давление сыпучего тела и расчет подпорных стенок. – М.: Стройиздат, 1947. – 214 с.



Рис. 8. Зависимость максимальных растягивающих напряжений при различных значениях ширины камеры

породной закладки, выявил зоны концентрации, которые располагаются у основания целика, и его предельное значение составляет  $\sigma_{max} = 0,3184$  МПа (при  $b_{kam} = 15$  м), что не превышает предельного значения на растяжение твердеющего целика.

Полученные значения максимальных растягивающих напряжений при различных значениях ширины камер объединены на графике (рис. 8).

Таким образом, результаты геомеханических исследований указывают на то, что сжимающие, растягивающие и сдвиговые напряжения, возникающие в твердеющем массиве под действием породной закладки, при предложенной системе разработки с комбинированной закладкой не превышают пределов прочности твердеющей части. А это значит, что при данных условиях искусственный целик будет находиться в устойчивом состоянии и не будет разрушаться, что в свою очередь обеспечивает безопасность ведения горных работ при извлечении запасов смежной камеры.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В БЕТОННОЙ КРЕПИ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ ГАЙСКОГО ГОКА

## С.В. Сентябов

Капитальные бетонные сооружения (стволы), возводимые в массиве горных пород, наряду с выполнением технологических функций, должны соответствовать требованиям безопасности работающего персонала и объектов, расположенных в зоне их влияния. При расчете параметров устойчивости бетонной крепи вертикальных стволов учитывается множество технологических, технических и природных факторов.

После проходки ствола полная конвергенция его стенок в условиях плоской деформации составит

$$U_{D(x)} = \frac{(1-\mu^2)}{E_n} (\sigma_x K_{x(x)} + \sigma_y K_{x(y)} + \sigma_z K_{x(z)}),$$
(1)

$$U_{D(y)} = \frac{(1-\mu^2)}{E_n} (\sigma_x K_{y(x)} + \sigma_y K_{y(y)} + \sigma_z K_{y(z)}),$$
(2)

где  $U_D$  – конвергенция стенок ствола по диаметру, мм; D – диаметр ствола, мм;

 $E_{\rm II}$  – модуль упругости массива пород;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $K_{i(i)}$  – условные коэффициенты концентрации;  $\sigma_x$ ;  $\sigma_y$  – главные горизонтальные напряжения, МПа.

С приближением к забою конвергенция стенок ствола уменьшается, составляя на расстоянии от забоя 2D - 100%; D - 97%; 0,5D - 80%; 0,25D - 70% и у забоя 50% (рис. 1) [1].

Рассмотрим деформации  $U_{D(x)}$  и  $U_{D(y)}$  на разных расстояниях от забоя L/D и построим графики  $U_{D(x)}$  и  $U_{D(y)}$  в зависимости от отношения L/D=0,1; 0,4; 0,8; 1,2; 1,6; 2,0; 2,4 (табл. 1, 2), (рис. 2, 3).

Таблица 1

Условные коэффициенты концентрации на различном удалении от забоя

L/D	0,1	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4
$K_{x(x)}$	1,68	2,02	2,38	2,64	2,84	2,9	3,0
$K_{x(y)}$	-0,6	-0,62	-0,8	-0,88	-0,92	-0,98	-1,0
$K_{x(z)}$	-0,32	-0,29	-0,24	-0,15	-0,08	-0,025	0

Таблица 2

L/D	0,1	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4
$U_{D(y)}$	-1,75	-3,1	-4,3	-5,1	-5,5	-5,6	-5,7
$U_{D(x)}$	-6,7	-8,8	-11,3	-12,7	-13,3	-13,6	-13,7

Изменение диаметра ствола за счет конвергенции стенок



Рис. 1. Схема конвергенции стенок ствола



Рис. 2. График изменения диаметра ствола за счет конвергенции стенок  $U_{D(Y)}$ 

При совмещенном способе проходки и возведении бетонной крепи в верхней части кольца происходит сдвижение крепи в момент, когда бетон не набрал полную прочность.

$$E^{0}_{\delta} \leq E^{0}_{\delta}, \tag{3}$$

где:  $E_6^0$  – модуль упругости бетона после снятия опалубки в период непрерывного возведения крепи;  $E_6^{\pi}$  – модуль упругости бетона при длительном набирании прочности.

В процессе исследований на месторождении натурные определения напряжений, действующих в крепи стволов, проводились при помощи модифицированного метода щелевой разгрузки. Измерения были проведены на глубине –830, –910, –990, –1070 и –1390 м Гайского подземного рудника.

Суть метода заключается в измерении деформации индикатором часового типа между реперами до разгрузки и после нее на базе 70 мм. При выполнении исследований метод был значительно модернизирован за счет использования в качестве режущего инструмента бензорезов последнего поколения. По результатам измерений с помощью нового метода были получены определенные деформации и пересчитаны в напряжения, представленные в табл. 3.



Рис. 3. График изменения диаметра ствола за счет конвергенции стенок U<sub>D(X)</sub>

Таблица 3

Результаты расчета напряжений в бетонной крепи ствола методом						
щелевой разгрузки						

1-я станция	2-я станция	3-я станция	4-я станция	5-я станция	6-я станция
(горизонт	(горизонт	(горизонт	(горизонт	(горизонт	(горизонт
-830 м)	-910 м)	-990 м)	-1070 м)	-1390 м)	-1390 м)
<i>−</i> 4,6 МПа	<i>−</i> 4,6 МПа	−1,1 МПа	−2,3 МПа	−1,1 МПа	-2,3 МПа

Полученные величины напряжений в крепи, возведенной при совмещенном способе проходки, подтверждают, что бетон не набрал полную прочность и деформировался пластично. Вместе с этим реперы также претерпели изменения. Вместо съемных цанговых реперов использовались постоянные оловянные, установленные по обе стороны от щели на осевой линии. Это позволило снизить себестоимость их производства, а также появилась прекрасная возможность производить измерения изменения напряженного состояния во времени.

По выполненным измерениям вычисляется  $\Delta L$  смещения реперов на базе 70 мм (табл. 4) и путем решения плоской задачи теории упругости получаются напряжения в бетонной крепи по формуле (4):

$$\sigma = \frac{E_{\delta}\Delta L_{AB}}{24 - L(1 - K_1 + \mu K_2)},\tag{4}$$

где  $\Delta L_{AB}$  – величина смещения реперов на базе AB, см;  $E_{E}$  – модуль упругости бетона, МПа; L – расстояние между реперами, м; K – интегральные коэффициенты концентрации напряжений, действующие на участках между основными реперами и разгрузочной щелью. Коэффициент определялся по зависимости, опубликованной в монографии [1];  $\mu$  – коэффициент Пуассона деформируемого материала крепи. При замерах в бетонной крепи ствола повсеместно принимается  $\mu = 0,3$ .

Таблица 4

	The second secon									
	10.07.13		18.12.13		03.04.14		18.06.14			
Горизонт	$\Delta L$ , см	Δσ, МПа	$\Delta L$ , см	Δσ, МПа	$\Delta L$ , см	Δ <del>σ</del> , МПа	$\Delta L$ , см	Δσ, МПа		
-830 м	0,04	-4,6	0,04	-4,6	0,04	-4,6	0,06	-6,8		
—910 м	0,04	-4,6	0,06	-6,9	0,07	-7,9	0,10	-11,4		
—990 м	0,01	-1,1	0,01	-1,1	0,04	-4,6	0,06	-6,8		
-1075 м	0,02	-2,3	0,03	-3,4	0,04	-4,6	0,12	-13,6		
-1390 м	0,01	-1,1	0,01	-1,1	0,03	-3,4	0,12	-13,6		
	0,02	-2,3	0,02	-2,3	0,05	-5,6	0,14	-15,9		

Величины замеренных деформаций и вычисленных напряжений в бетонной крепи ствола «Клетевой» на базе 70 мм

Графики на рис. 4 согласуются с измерениями изменений астрофизических напряжений в массиве, проводимыми лабораторией геодинамики и горного давления Института горного дела с 1998 г. [2]. Разница в величинах напряжений объясняется разномодульностью пород и концентрацией напряжений в приконтурной части ствола. На рис. 5 представлен график изменений астрофизических напряжений в массиве пород месторождения с начала 2013 г.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. При совмещенном способе проходки природные напряжения практически не оказывают влияния на формирование напряжений в бетонной крепи ствола, они не превышают 2–3 МПа из-за того, что бетон при совмещенном способе проходки не набрал полную прочность и деформировался пластично.

2. Основные напряжения в бетонной крепи ствола формируются за счет переменных во времени астрофизических напряжений и мо-



Рис. 4. График изменения напряжений во времени в бетонной крепи ствола «Клетевой» на базе 70 мм



Рис. 5. График изменения астрофизических напряжений в массиве пород Гайского месторождения

гут достигать 10–15 МПа, а в перспективе 20–30 МПа, что превысит нормативную прочность бетона.

#### Библиографический список

1. Зубков А.В. Геомеханика и геотехнология / А.В. Зубков. – Екатеринбург: УрО РАН, 2001. – 335 с.

2. Зубков А.В. Горнотехнические условия отработки колчеданных месторождений / А.В. Зубков // Уральский горнопромышленный форум: V: Колчеданные месторождения – геология, поиски, добыча и переработка руд: материалы Всерос. науч. конф. Чтения памяти С.Н. Иванова // УрО РАН, Институт геологии и геохимии УрО РАН и др. – Екатеринбург, 2013. – С. 60–62.

## ВЛИЯНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ НАГРУЗКИ НА ДИНАМИКУ НАПРЯЖЕННО-Деформированного состояния массива горных пород

## В.И. Ручкин, О.Д. Желтышева

Термин «искусственный массив» вполне подходит к висячему боку Естюнинского месторождения. Отработка месторождения железных руд до 1976 г. велась открытым способом, а начиная с 1977 г. ведется подземным способом. При открытой разработке месторождения на висячем боку рудного поля был сформирован отвал горных пород.

К настоящему времени подземным способом полностью отработаны запасы трех горизонтов, два горизонта -120 м и -180 м на стадии доработки, действующим является только один горизонт -240 м (рис. 1). Отрабатываемые рудные тела залегают в крепких скальных породах с коэффициентом крепости по Протодьяконову  $f = 14 \div 18$ , мощность рудных тел составляет от 5 до 15 м. Рудные тела на начальном этапе отрабатываются с оставлением целиков с последующим погашением пустот. Подземными горными выработками на южном фланге месторождения было подсечено тектоническое нарушение. Помимо этого, по данным, представленным местной геологической службой, массив представляет собой геологическую среду, имеющую разноранговые тектонические нарушения (см. рис. 1). Таким образом, сформировался искусственный горный массив, представляющий собой породную консоль протяженностью более одного километра, на поверхности которой расположен отвал горной породы, а в ее основании помимо этого ведется еще и подземная отработка месторождения. Следовательно, рассматриваемый массив уже не является естественным горным массивом.

В связи с увеличением плана добычи на Высокогорском ГОКе было принято решение начать отработку техногенных месторождений открытым способом. Данные месторождения в количестве трех единиц расположены на вышеуказанном «искусственном» массиве горных пород. На нем начиная с 1996 г. в режиме мониторинга с периодичностью один раз в год проводится комплекс инструментальных наблюдений, состоящий как из традиционных геодезических измерений, так и из наблюдений методом спутниковой геодезии (с 2001 г.). Наблюдения проводятся по грунтовым реперам профильных линий наблюдательной станции (рис. 2). Кроме того, на базе









данной станции из части грунтовых реперов и пунктов шахтной полигонометрии был создан геодинамический полигон.

По результатам инструментальных наблюдений в 2001 г. была зафиксирована незначительная активизация процесса сдвижения подработанной толщи висячего бока. Зона, характеризующая границу мульды сдвижения на дневной поверхности, практически приблизилась к аналитически рассчитанной отметке. Зоны опасных деформаций, как горизонтальных, так и вертикальных, не имели постоянной фиксации в пространстве. Сама зона обрушения осталась в границах начального периода наблюдения (1996 г.), но один грунтовый репер профильной линии XII, расположенной на отвале горной породы, пропал – на месте его закладки на момент выполнения измерений было только ровное отверстие, диаметр которого соответствует диаметру реперов.

Репера с № 1 по 5 данной профильной линии были заложены в естественном массиве между отвалом и бортом карьера, и северо-западнее от них на некотором расстоянии наблюдались трещины раскрытия, но при этом граница зоны обрушения оставалась на прежнем месте. С развитием объема очистных работ процесс сдвижения еще не получил существенного развития в горном массиве в соответствии с расчетами, но в этот момент времени фиксировались плавные расширения зоны обрушения, которые заключались в том, что по реперам № 1–5 уже не представлялось возможным проводить наблюдения, так как массив был обильно покрыт трещинами. Граница зоны опасных вертикальных деформаций опережает границу зоны горизонтальных опасных деформаций, граница мульды сдвижения вышла за пределы профильных линий.

Таким образом, наглядно прослеживается активизация развития процесса сдвижения в массиве, но под массивом мы понимаем естественный массив горных пород, а в данном случае над ним расположен отвал горных пород. Следовательно, наблюдается развитие процесса в естественном горном массиве, активное проявление которого на дневную поверхность сдерживает отвал. Эта динамика хорошо прослеживается по временным показателям: с 1996 по 2001 г. – хаотичное проявление тех или иных зон, характеризующих этапы формирования зон сдвижения, 2001–2005 гг. – потеря реперов (№ 1–5) в массиве, потеря репера на самом отвале, устойчивое формирование границы опасных деформаций, выход за пределы профильных линий границы мульды сдвижения. Следовательно, в этом «искусственном массиве» начинают активно протекать процессы сдвижения, но в замедленной форме благодаря наличию отвала горных пород. Кроме того, из результатов инструментальных

наблюдений было установлено, что наблюдательная станция уже не удовлетворяет требованиям Инструкции [2]. Было принято решение реконструировать наблюдательную станцию, теперь она охватывала не только отвал, но и располагалась в естественном массиве между подошвой отвала и поселком Естюниха, т. е. практически весь периметр висячего бока месторождения стал подконтрольным в свете развития процесса сдвижения в горном массиве.

При выполнении наблюдений 2011 г. во время рекогносцировки было установлено, что репера № 8 и 11 по профильной линии XII пропали аналогично реперу в 2001 г. После обработки результатов полевых наблюдений было выявлено, что территория отвала горных пород, контролируемая тремя профильными линиями, подвержена активному оседанию: массив под отвалом горных пород полностью находится в разуплотненном состоянии. Зона критических горизонтальных и вертикальных деформаций с величинами, превышающими нормативные значения ( $i = 4 \cdot 10^{-3}$ ,  $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-3}$ ), пока установлена на отвале пустых пород. За период наблюдения с 2005 по 2011 г. была выявлена сильная активность в развитии полного спектра процесса сдвижения подотвального массива и, как следствие, проявление сдвижения на поверхности отвала в виде активизации горизонтальных подвижек и разуплотнения «исскуственного массива».

При выполнении полевых работ летом 2012 г. было установлено, что до репера № 9 профильной линии XII произошло обрушение всего массива горных пород, а следовательно, и отвала (рис. 3, 4). В связи с этим доступ в район обрушившегося участка на тот момент был невозможен. На него удалось попасть только в декабре 2012 г. после соблюдения некоторых формальностей. По результатам рекогносцировки было установлено, что по линии XII потеряны реперы № 16 и 17, т. е. реперы, расположенные в непосредственной близости от края отвала. Также было потеряно по одному реперу на линиях IX и XI на отвале пустых пород. Помимо этого на отвале хорошо прослеживались проталины на общем фоне заснеженного отвала; из них местами поднимался пар [3, 4].

По результатам последней серии наблюдений вырисовывается следующая картина развития процесса оседания горного массива, превышающего объем выработанного пространства: граница мульды сдвижения очень быстро покинула пределы реконструированной профильной линии. Оседая, отвал выдавливает массив, расположенный на северо-восточном фланге в зоне тектонических неоднородностей, то же самое наблюдается и по фронту отвала, только с меньшей интенсивностью – сказывается положение реперов линии относительно рудного тела. Дневная поверхность северо-западного



Рис. 3. Космический снимок территории Естюнинского месторождения: a-до обрушения 2012 г.;  $\delta-$  после обрушения 2012 г.

фланга, контролируемая линиями III и IV, расположенными на некотором удалении от отвала, по результатам наблюдений, подвержена оседанию. Развитие процесса сдвижения массива горных пород на данном участке в отличие от других происходит по классической схеме – оседание благодаря отсутствию техногенной нагрузки. Если данная нагрузка в какой-то мере и оказывает влияние на общий процесс развития сдвижения в виде знакопеременных величин, то оно очень незначительное и его можно проследить только в наименьшие периоды наблюдений при сравнении с сериями данного цикла.

Следовательно, в массиве активизировался процесс деформаций – как вертикальных, так и горизонтальных, наблюдаются непостоянные, имеющие миграционный характер движения границы зон и знакопеременные величины напряженно-деформированного состояния массива. Об этом свидетельствуют непостоянные величины векторов горизонтальных смещений, которые, однако, придерживаются примерно одного направления – в сторону подсеченного тектонического нарушения. Это касается массива, расположенного над горными выработками, тогда как в горном массиве, расположенном в стороне от выработок или на фланге рудного тела, наблюдается не



Рис. 4. Зона обрушения, сформировавшаяся в 2012 г.

только резкое изменение величин горизонтальных сдвижений массива, но и изменчивость направления векторов сдвижения.

Следовательно, можно заключить, что геологическая среда рассматриваемого массива под воздействием техногенных напряжений вызывает перераспределение естественных напряжений, и весь этот комплекс оказывает негативное влияние на межблоковые связи. Отсюда по результатам инструментальных измерений наблюдаются разного рода «нестандартные» величины горизонтальных сдвижений и знакопеременный характер напряженно-деформированного состояния массива.

## Библиографический список

1. Геология СССР. Т. XII. – М.: Недра, 1973. – 632 с.

2. Инструкция по наблюдениям за сдвижением горных пород и земной поверхности при подземной разработке рудных месторождений. Утв. Госгортехнадзором СССР 03.06.1986. – М.: Недра. – 112 с.

3. Мониторинг деформаций поверхности висячего бока Естюнинского месторождения : отчет о НИР // рук. А. Д. Сашурин, С. В. Усанов; ИГД УрО РАН. – Екатеринбург, 2012. – 67 с.

4. Диагностика геодинамической активности горных пород Естюнинского месторождения, мониторинг и прогноз развития процесса сдвижения при его отработке: отчет о НИР // рук. А. Д. Сашурин; ИГД УрО РАН. – Екатеринбург, 2005. – 136 с.

УДК 622.831.325.3

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЗОНАЛЬНОЙ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ ГОРНОГО МАССИВА При его подработке (надработке)

## С.Н. Лис

Большое значение для извлечения метана из угольного пласта имеет знание границ зон различной газовой динамики в под- и надработанном массиве, которые определяются геомеханическим состоянием массива в данной зоне. Согласно существующим схемам сдвижения горных пород при выемке угольных пластов вся толща пород по величине нарушенности подразделяется на три зоны: обрушения, расслоений и плавного сдвижения без разрыва сплошности. Зона обрушения характеризуется потерей связности слоёв и падением их на почву пласта. Зона расслоений оценивается наличием расслоений на контактах слоёв различной литологии и прочности, а также системы трещин. Зона связного сдвижения не имеет признаков нарушенности. Каждая зона в свою очередь подразделяется на три подзоны, которые различные исследователи называют по-разному и поэтому они не имеют чёткого определения.

Для надработанного массива основным показателем изменения его геомеханического состояния является удалённость от надрабатывающего пласта (мощность междупластья М). Сдвижение и разрыхление пород массива является следствием выемки пласта определённой мощности, чем больше вынимаемая мощность пласта, тем больше величина оседания и разрыхления пород. Следовательно, определяющим фактором, кроме мощности междупластия, для подработанного массива является вынимаемая мощность подрабатывающего пласта *m*, поэтому здесь основным показателем является кратность подработки K = M/m. Выработка этих показателей дала возможность приблизительно определять границы зон различного геомеханического состояния в массиве. Однако до настоящего времени никем не сделан следующий шаг: определение взаимозависимости размеров этих зон. Логично было бы предположить, что развитие каждой последующей зоны зависит от размеров и развития ей предшествующей. Определение алгоритма такой взаимозависимости было бы значительным шагом вперёд в горной науке. Попробуем определить такой алгоритм.

Имеющиеся сведения о границах зон различного геомеханического состояния и газовой динамике горного массива над выработанным пространством нами сведены в таблицу 1, а сведения по границам этих зон под выработанным пространством – в таблицу 2. Эти сведения получены разными исследователями в различных горно-геологических условиях, тем не менее, как показывает анализ, имеется общая закономерность расположения границ данных зон.

В современной теории систем, диагностике их качественных состояний, в синергетике как теории самоорганизации, кооперативного действия, возникновения новых качеств, эволюции имеет большое значение следующая числовая последовательность: 0,5; 0,62; 0,68; 0,72; 0,75; 0.78 и т. д., которая выражает оптимальные количественные отношения между элементами (компонентами), составляющими систему, или их параметрами. Этой же последовательности соответствуют пространственные связи в системной организации пород

## Таблица 1

## Границы зон геомеханического состояния и газовой динамики горного массива над выработанным пространством, определённые разными исследователями

№ зоны	Верхняя граница зоны, <i>К</i> = <i>M/m</i>	Характеристика зоны	Источники информации
Ι	3–6	Зона беспорядочного обрушения со средним коэффициентом разрыхления 1,137	Петухов И. М. [1]; Медянцев А. Н. [2]; Старонь Т. [3]; КНИУИ [4, 5]
II	8–11	Зона динамических проявлений сдвиже- ния. Прочные породы деформируются и разрушаются блоками. Снижение прочно- сти угля в два раза, а упругости в 2 – 4 раза	Петухов И. М. [1]; Айруни А. Т. [6]; КНИУИ [7]
III	12–16	Зона трещин и разломов со средним коэф- фициентом разрыхления 1,042. Зона упоря- доченного обрушения пород с прочностью больше 45,0 МПа. Зона интенсивного вы- деления метана	Печёрский бас- сейн; КНИУИ [7]
IV	20	Зона интенсивного расслоения	Петухов И. М. [1] и др.
V	30-32	Верхняя граница интенсивного трещи- нообразования. Зона влияния подработки с разрывом сплошности. Область полной защиты от внезапных выбросов угля и газа	Петухов И. М. [1]; Медянцев А. Н. [2]; КНИУИ [5, 7]
VI	40	Зона водопроводящих трещин	Петухов И. М. [1]
VII	50	Сквозные газопроводящие трещины – ка- налы, образующие единую газопроводя- щую систему	Айруни А. Т. [6]
VIII	60–64	Зона расслоений, образования полостей Вебера. Зона значительной естественной дегазации и практически полной защиты от внезапных выбросов угля и газа	Петухов И. М. [1]; КНИУИ [7]
IX	73–80	Зона плавного прогиба слоёв без разруше- ния их целостности. Наблюдается мигра- ция метана	Медянцев А. Н. [2]; Лидин [8]; КНИУИ [4]
X	100	Предельная величина радиуса дегазиру- ющего влияния подработки. Образование трещин, не создающих единой газопро- водящей системы; трещины, секущие межпластовую толщу, имеют большое сопротивление	Петухов И. М. [1]; Айруни А.Т. [6]

Таблица 2

#### Границы зон геомеханического состояния и газовой динамики горного массива под выработанным пространством, определённые разными исследователями

№ зоны	Нижняя граница зоны М	Характеристика зоны	Источники информации
Ι	15–16	Зона интенсивного расширения, трещино- образования, поднятия. Скозные газопрово- дящие трещины, образующие единую газо- проводящую систему. Область интенсивной дегазации пласта и полной защиты от вне- запных выбросов угля и газа	Айруни А. Т. [6]; КНИУИ [7]
II	30-32	Зона расширения, расслоения, трещино- образования. Трещины, не создающие еди- ной газопроводящей системы. Трещины, секущие межпластовую толщу, имеют боль- шое сопротивление	Петухов И. М. [9]; Айруни А. Т. [6]; КНИУИ [7]
III	50	Зона незначительных деформаций. Пре- дельная величина дегазирующего влияния надработки	Айруни А. Т. [6]

в земных недрах [10]. Члены этого ряда являются положительными корнями уравнения

$$X^{n+1} + X - I = 0, (1)$$

где *n* – порядковый номер члена данной последовательности.

Точные значения (с точностью до четвёртого знака после запятой) корней (X) уравнения (1) приведены в таблице 3 до значений ранга кратности n = 0; 1; 2; ...; 10. Необходимо отметить, что принцип кратных отношений, который используется в данной последовательности, скрывает в себе общенаучные основания структурной гармонизации систем безотносительно к их реальной принадлежности к тем или иным уровням организации материи и проявляется в своём действии на каждом из них. Достаточно сказать, что в химии он известен в качестве закона кратных отношений Дальтона, в кристаллографии – закона целых отношений или закона рациональных параметров Гаюи (Аюи), который фигурирует здесь как один из основных. Более того, ныне признано – это один из фундаментальных законов атомно-молекулярной структуры вещества в его твёрдой фазе. Впрочем, не только вещества, но и волновых процессов. Например, всякая стоячая волна может существовать в ограниченном

объёме, если длина этой волны кратна его размерам, что выполняется только для определённых частот, так называемых собственных частот данного объёма.

Таблица 3

п	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X	0,5	0,618	0,6823	0,7245	0,7549	0,7781	0,7965	0,8117	0,8243	0,8351	0,8444

Корни уравнения (1)

Связанные отношением объекты своей множественностью способны выражать ряд интенсивностей («степеней») определённых параметров системы, что в действительности воплощено в ряде следующих друг за другом чётко различающихся между собой специфик или состояний качества. Переход от одного уровня организации системы, режима функционирования к другому означает, в частности, смену отношений рассматриваемых параметров (изменение их кратности), соответствующих её отдельным устойчивым состояниям. Выход системы за пределы одного из вариантов свидетельствует о радикальных изменениях в составе её структурных компонентов, о приобретении этой системой нового функционального облика.

Исходя из задачи оценки под- или надработанного горного массива с позиции газопроницаемости, необходимо рассматривать его как единую систему, состоящую из горных пород, находящихся в различном геомеханическом состоянии, в зависимости от удалённости от выработанного пространства. Поэтому горный массив как система также должен подчиняться общему закону, и изменение его структурных состояний должно происходить в последовательности, соответствующей математическому ряду, приведенному в таблице 3. Проверим правомерность применения предложенной концепции для под- и надработанного массивов.

Рассчитаем верхние границы зон геомеханического состояния горного массива над выработанным пространством в соответствии с последовательностью, приведенной в таблице 3. Расчёт производится из предположения, что отношение показателя кратности подработки первой зоны (расстояние до верхней границы этой зоны) к показателю кратности второй зоны должно равняться первому члену последовательности, приведенной в таблице 4, а отношение показателя кратности второй зоны к показателю кратности второй зоны к показателю кратности третьей зоны второму члену последовательности и т. д.:  $K_1 / K_2 = 0.5$ ;  $K_2 / K_3 = 0.618$  и т. д.

При таком подходе достаточно знать верхнюю границу одной из зон, чтобы определить границы остальных зон. Поскольку наиболее полно исследована зона I, то примем среднее значение границы этой зоны из диапазона, приведенного в таблице 1,  $K_1 = 4,5$ . Тогда  $K_2 = 9,0$ ;  $K_3 = 14,5$  и т. д. Результаты проведенных расчётов и их сравнение с результатами, полученными экспериментально, приведены в таблице 4.

Таблица 4

		Верхняя граница	Верхняя граница	От-
N⁰	Vanartenuetura 2011 I	зоны (К), опре-	зоны (К), опреде-	кло-
зоны	Марактеристика зоны	делённая экспе-	лённая расчётным	нение,
		риментально	методом	%
Ι	Зона беспорядочного об-	3–6	4,5	0
	рушения	0 11	0.0	0
11	Зона значительного рас- ширения пород	8-11	9,0	0
III	Зона упорядоченного	12–16	14,5	0
	обрушения			
IV	Зона интенсивного рас- слоения	20	21,3	6,5
V	Зона деформаций с раз-	30–32	29,4	2
	рывом сплошности			
VI	Зона водопроводящих	40	38,9	2,7
	трещин			
VII	Зона единой газопроводя- щей системы	50	50,0	0
VIII	Зона трещин, не создаю-	60–64	62,8	0
	щих единой газопроводя-			
	щей системы			
IX	Зона плавного прогиба	73-80	77,4	0
	пород			
Х	Зона предельного дега-	100	93,9	6,1
	зирующего влияния под-			
	работки			

Сравнительная таблица результатов, полученных экспериментально	
и расчётным методом, для подработанного массива	

Как видно из таблицы 4, результаты, полученные экспериментально и расчётным методом, практически совпадают, что подтверждает предложенную теорию. Мощные и монолитные слои песчаника (породные «мосты») могут оказывать «экранирующее» влияние на последующие слои пород. В этом случае некоторые последующие зоны из полученного ряда могут отсутствовать, но границы последующих зон будут соответствовать одному из членов математической последовательности таблицы 4.

Проверим, как выявленная закономерность проявляется в надработанном массиве. Как видно из таблицы 5, расчётные и экспериментальные данные практически полностью совпадают.

Таблица 5

№ зоны	Характеристика зоны	Нижняя граница зоны, определён- ная эксперимен- тально, м	Нижняя граница зоны, определён- ная расчётным методом, м	Откло- нение, %
Ι	Зона сквозных газопрово- дящих трещин, образую- щих единую газопроводя- щую систему	15–16	15,5	0
II	Зона трещин, не создаю- щих единой газопроводя- щей системы	30-32	31,0	0
III	Зона предельного дегази- рующего влияния надра- ботки	50	50,0	0

# Сравнительная таблица результатов. полученных экспериментально и расчётным методом, для надработанного массива

Таким образом, структура системы горных пород в под- и надработанном массивах подчиняется чёткому математическому закону. Пространственные связи, лежащие в основании системной организации пород, – важнейшие из тех, что создают её реальную значимость, структурную оформленность, обуславливают последовательность изменения состояния этой системы. Их изучение требует обращения к термодинамическим и другим методам научного познания, как способам формирования научных представлений, когда речь идёт о структурах и структурном развитии систем.

#### Библиографический список

1. Петухов И. М. Защитные пласты / И. М. Петухов и др. – Л.: Недра, 1972. – 424 с.

2. Медянцев А. Н. Сдвижение горных пород и земной поверхности под влиянием горных выработок / А. Н. Медянцев. – Новочеркасск: Новочеркасский политехнический ин-т, 1976. – 81 с.

3. Staron Tadeusz. Ocena prawdopodobienstwa wystapienia szkodbiwych wpiywow w podebranym pokladzia // Ochz terenow gorn (IIHP), 1976, 10, N 35. – C. 23–29.

4. Исследовать устойчивость обнажений в очистных забоях шахт Карагандинского бассейна: отчет о НИР // КНИУИ; рук. К. О. Атыгаев. – Караганда, 1973.

5. Разработать рекомендации по применению метода подработки пластов с целью управления горным давлением, борьбы с выбросами, дегазации и осушения: отчет о НИР // КНИУИ; рук. К.О. Атыгаев. — Караганда, 1980. – 127 с. – № ГР 77046861.

6. Айруни А. Т. Теория и практика борьбы с рудничными газами на больших глубинах / А. Т. Айруни. – М.: Недра, 1981. – 335 с.

7. Научно обосновать и разработать эффективные и безопасные способы и параметры ведения горных работ на газоносных, выбросоопасных и пожароопасных пластах Карагандинского бассейна при восходящем и нисходящем порядке отработки свит пластов: отчет о НИР (заключительный) / КНИУИ; рук. К. О. Атыгаев, С. К. Баймухаметов. – Караганда, 1990. – 102 с. –№ ГР 01.89.0040817.

 Лидин Г. Ф. О теории дегазации сближенных пластов / Г. Ф. Лидин. – М.: Госгортехиздат, 1963. – 207 с.

9. Петухов И. М. Горные удары на угольных шахтах / И. М. Петухов. – М.: Недра, 1972. – 217 с.

10. Лис С. Н. Пространственные связи в системной организации пород в земных недрах / С. Н. Лис, Г. В. Казанцева // Наука и образование – ведущий фактор стратегии «Казахстан – 2030» (Сагиновские чтения, № 2), Ч. 3.: труды междунар. науч. конф. – Караганда: КарГТУ, 2010. – С. 254–256.

# ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫЕ КАТАСТРОФЫ В СФЕРЕ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ

УДК 622.868.88:004.9

# К ПРОБЛЕМЕ ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНОЙ ГЕОИНФОРМАЦИОННО-МОНИТОРИНГОВОЙ СИСТЕМЫ ГЕОМЕХАНИКО-ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РОССИИ<sup>\*</sup>

#### В. Н. Опарин

**Введение.** В работах [1, 2] обобщен ныне достигнутый научный потенциал по развитию основ нелинейной геомеханики и геофизики, связанной с динамикой напряженных массивов горных пород блочно-иерархического строения в природных и горнотехнических системах. Большое внимание при этом уделено открытию явления знакопеременной реакции горных пород на динамические (взрывные) воздействия и широкой скоростной гаммы волн маятникового типа. Здесь же отражены фундаментальные теоретические достижения и практическая значимость сделанных открытий для решения проблем безопасной отработки месторождений полезных ископаемых, в том числе создания уникальных комплексов приборов и оборудования для моделирования, регистрации и обработки сейсмических, нелинейных деформационно-волновых процессов и сопутствующей электромагнитной эмиссии в геосредах.

Надо особо отметить, что эти достижения – во многом одновременно и богатый опыт совместных исследований и разработок больших коллективов ученых и инженеров ведущих в России институтов естественнонаучного профиля, проводимых в течение более десяти последних лет в рамках крупных интеграционных проектов РАН, ее региональных отделений и научных центров в направлении наук о Земле [3–7]. Такой опыт для горных наук в современных условиях является уникальным и чрезвычайно полезным для организации и

 <sup>\*</sup> Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-05-00673а), партнерского интеграционного проекта СО РАН № 100 и проекта ОНЗ РАН – 3.1.

реализации крупных и суперкрупных научно-технических и технологических проектов общегосударственной значимости.

Как известно, именно результаты фундаментальных научных исследований обычно закладываются в основу реализации крупномасштабных проектов для решения важных прикладных проблем государственной значимости, в том числе и так называемых критических технологий. В России в качестве одной из них в последние годы рассматривается «Технология предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» [8]. К важнейшим объектам исследований здесь отнесены:

1) разработка методов диагностики состояния природных и опасных техногенных систем;

2) разработка методов оценки и снижения риска потерь для населения, объектов экономики и территорий от техногенных катастроф и стихийных бедствий и разработка мер по уменьшению ущерба от них;

3) разработка методов неразрушающего контроля;

4) разработка комплексов оперативно-диспетчерского управления и различных средств ведения спасательных работ и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций;

5) моделирование (разработка) эффективных сценариев реагирования, обеспечения устойчивости и сейсмостойкости зданий и сооружений при воздействии природных и техногенных катастроф;

6) разработка методов прогноза природных и техногенных катастроф и их последствий на основе данных наблюдений и современных знаний о процессах возникновения и развития указанных катастроф;

7) разработка и актуализация баз данных по природным и техногенным катастрофам, текущим наблюдениям за состоянием атмосферы, сейсмическими и геофизическими полями;

8) разработка новых и развитие существующих сетей сейсмических и геофизических наблюдений;

9) развитие методов дистанционного мониторинга при помощи космических спутниковых систем;

10) разработка баз данных по дизъюнктивным нарушениям различного масштаба;

11) разработка системы мониторинга напряжений по данным натурных индикаторов в верхних горизонтах земной коры в густонаселенных регионах, в местах строительства сложных технических сооружений и районах интенсивной техногенной деятельности (местах строительства атомных электростанций, захоронения радиоактивных отходов, заполнения искусственных водохранилищ, добычи углеводородов, строительства подземных сооружений);

12) разработка системы раннего обнаружения условий, способствующих формированию экстремальных экологических ситуаций природного и техногенного характера;

13) разработка технологий прогноза геокатастроф природного (землетрясения, наводнения, пожары, оползни, сели, лавины, тропические и внетропические циклоны, цунами) и техногенного характера (горные удары, взрывы и подземные пожары в условиях освоения подземного пространства, аварии на магистральных трубопроводах, атомных электростанциях, мостах и в тоннелях);

14) разработка средств мониторинга, контроля риска возникновения, а также уменьшения последствий чрезвычайного и природного характера для здоровья человека и окружающей среды;

15) разработка технологии сбора, обработки и распространения данных о состоянии и местоположении подвижных и стационарных опасных объектов (грузов) с использованием отечественных космических систем (средств);

16) разработка космических информационно-навигационных технологий мониторинга дорожных покрытий и инженерных коммуникаций.

Автор не намерен обсуждать качество приведенного списка «технологических задач» ни с позиций их полноты и логической последовательности, «равновеликости» или дублирования отдельных пунктов, ни с позиций их соответствия внутреннему единству обозначенной «Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера». Во многом такие оценки очевидны, за исключением, пожалуй, «внутреннего единства». Однако именно этот аспект существенно определяет успешность достижения заданной цели.

Относясь с пониманием к тому, что «Технология ...» должна лежать в основе управления и функционирования МЧС России, тем не менее не следует забывать о том, что в основе «чрезвычайных ситуаций» лежат разнородные «катастрофические события». В этом смысле перечисленные выше задачи очевидно разнородны по источникам катастроф (природные, техногенные), и, следовательно, единой технологии для отмеченных целей не существует.

## Современные тенденции развития горнодобывающего комплекса и проблемы обеспечения безопасного освоения минеральных ресурсов

Общей тенденцией развития горной промышленности в мире является увеличение объемов добычи полезных ископаемых, вовлечение в эксплуатацию бедных по содержанию руд, проведение горных работ на глубоких горизонтах и в усложняющихся горно-геологических и природно-климатических условиях. Это приводит к возрастанию техногенных воздействий на окружающую среду и сопутствующим катастрофическим событиям с негативными последствиями для природы.

В России ежегодно возникает около 1000 чрезвычайных ситуаций, вызванных катастрофами природно-техногенного характера, среди которых значительное место занимают катастрофы на объектах недропользования. Всего на территории РФ зарегистрировано 34 удароопасных рудных месторождения (Б. В. Лаптев, А. Н. Минькин, А. И. Перепелицын – Госгортехнадзор России, 2004). В Сибири наиболее удароопасными и выбросоопасными по углю и газу являются месторождения, расположенные на территориях Кузбасса, Норильского промышленного района, Алтае-Саянской области, юга Красноярского края, Якутии. В создавшейся обстановке необходимы разработка специального комплексного подхода к оценке уровня воздействия на окружающую геосреду, непрерывный контроль за ее состоянием, получение своевременных прогнозов и разработка необходимых профилактических мер предотвращения катастрофических событий, таких как внезапные обрушения, выбросы пород, угля и газа, горные удары и др.

Конструктивная позиция в отношении диагностики уровня критичности контролируемых объемов массивов горных пород и прогноза катастрофических событий в горном деле состоит в учете реально существующего взаимодействия между глобальными геодинамическими и локальными геомеханическими полями в верхней части земной коры блочно-иерархического строения, где влияние от техногенной деятельности особенно значительно [4, 7, 9]. Такой учет невозможен без построения нового уровня интеллектуально насыщенных мониторинговых систем, включающих качественный сбор и обработку комплексной горно-геологической и геомеханико-геофизической информации по трем базовым геоинформационным слоям (подземный, наземный и надземный) [2]. В свою очередь, сама структура организации и функционирования геомеханико-геодинамического мониторинга должна учитывать специфику контролируемых объектов геосреды как нелинейных открытых самоорганизующихся систем с формирующимися определенным образом энергонасыщенными очаговыми зонами [10, 11]. При реализации данной стратегии необходимо опираться на глубокие и достоверные знания закономерностей движения породной среды, находящейся в напряженном состоянии и подвергающейся значительным техногенным нагрузкам, и, что особенно важно, – на понимание основного механизма формирования в данных условиях очаговых зон катастрофических событий с энергетических позиций [12]. Здесь ключевая проблема фундаментальной значимости связана с изучением и моделированием процесса трансформации упругой энергии очаговых зон повышенной концентрации напряжений в кинетическую энергию движения составляющих их структурных элементов разного иерархического уровня.

Следовательно, для обеспечения геодинамической безопасности необходимы диагностика стадий критичности в геомеханическом состоянии массива горных пород и последующий прогноз отдельных сильных динамических событий (внезапные разрушения, горные удары и т.п.). Это предполагает выявление энергонасыщенных участков геосреды и текущую оценку уровня их напряженности в первую очередь комплексными сейсмо-деформационными методами [1–7]. Весь круг задач, связанных с интерпретацией данных, прогнозированием регистрируемых (в том числе случайных) процессов и преодолением неопределенности в поведении породного массива с учетом неформализованной качественной информации, экспертным оцениванием результатов обработки данных и т. д., составляет ныне перспективное научное направление, результаты которого могут существенно обогатить и многие смежные дисциплины, такие как теория катастроф, оптимальное управление геотехнологическими процессами в условиях неопределенности, геоэкология и другие.

Поэтому разработка механико-математических моделей формирования и реализации очаговых зон катастрофических событий в геосредах блочно-иерархического строения для взаимодействующих геомеханических и геодинамических полей напряжений и деформаций, поиск и обоснование надежных критериев их прогнозирования (с учетом стадий критичности в состоянии соответствующих объектов контроля) чрезвычайно важны и необходимы для познания природы и параметров современных движений в фундаментальной сфере наук о Земле. Не менее важны результаты этих исследований и для решения практических задач по добыче, переработке и транспортировке полезных ископаемых, освоению подземного пространства и для целей, не обязательно связанных с горным делом, – во всех областях строительства, где массив горных пород выступает в качестве «опоры» или вмещающей среды для сооружаемых и эксплуатируемых объектов разного назначения [4, 7, 13].

В этой связи мне хотелось бы отметить, что один из выдающихся геофизиков-теоретиков минувшего века С.В. Гольдин в последние годы своей жизни стал приверженцем концепции активного геофизического и геодинамического мониторинга породной среды, воплощающей, по его мнению, стратегию среднесрочного прогноза землетрясений. Суть этой стратегии состоит в переносе приоритета исследований с поиска предвестников катастрофических событий на изучение геомеханических и физических процессов, происходящих в конкретных блоковых структурах очаговой зоны [14]. Он дал геодинамическую трактовку физическим процессам, происходящим в очаговой зоне при подготовке динамического события, во время возникновения и после его реализации. Согласно этим представлениям, в очаге будущего разрушения развивается ряд аккомодационных процессов, которые позволяют геосреде приспосабливаться до некоторого предела к увеличивающимся нагрузкам, проявляя такие специфические свойства блочных массивов горных пород, как способность к переупаковке структурных элементов, квазипластическому течению и «дилатансному упрочнению». С.В. Гольдин по существу поменял мнение о доминировавшей в минувшие десятилетия последовательности «приоритетов»: поиска в первую очередь предвестников катастрофических событий, а затем физического их осмысления и механико-математического моделирования с возможным выходом на их прогнозирование. Накопленный к настоящему времени опыт экспериментальных и теоретических исследований в геомеханике и геофизике свидетельствует о том, что необходимость смены отмеченной выше последовательности вполне обоснована. Без фундаментальных знаний по физике и механике очаговых зон динамического или квазистатического проявления горного давления (а по существу – механизмов перехода потенциальной энергии геоблоков в кинетическую энергию движения составляющих их фракталей) никаких надежных с практической точки зрения критериев прогнозирования катастрофических событий не удастся получить ни для краткосрочной, ни для среднесрочной, ни для дальнесрочной перспективы.

В сложившихся условиях явного дефицита необходимых знаний по физике и механике формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в сложных (обычно многофазных) природных и горнотехнических геосистемах ученым, инженерам, персоналу, вовлеченному в горное производство, и обществу в целом необходимо осознать, что техногенные катастрофы в горном деле - это не всегда нарушение «правил техники безопасности», но неотвратимая реальность «подземной стихии», которую надо внимательно и основательно изучать по мере освоения новых горизонтов продуктивных толщ. Роль же современных систем геомониторинга фактически сводится к тому, чтобы сгладить существующее несоответствие между растущими потребностями горного производства, недостаточностью фундаментальных естественнонаучных знаний и технологических возможностей для обеспечения условий безопасного и устойчивого развития горно-промышленного комплекса. Подобного рода «компромисс», как у нас в стране, так и за рубежом, в значительной мере обеспечивается пока весьма упрощенным подходом к использованию мониторинговой информации. Он сводится обычно к выявлению «энергонасыщенных зон» геосреды (повышенных напряжений и деформаций) по разрабатываемым горизонтам и последующему применению технологических операций по разгрузке «проблемных» участков. Понятно, что при функционировании сложной горнотехнической системы временное достижение положительного результата в отдельном составляющем ее блоке не есть гарантия обеспечения безопасного (устойчивого) функционирования такой системы в целом. Ярким примером могут служить наиболее крупные техногенные катастрофические события при отработке полезных ископаемых типа горнотектонических ударов (рудники Кольского полуострова, СУБРа, Таштагола и др.).

Особенности развития сложных деформационно-волновых процессов при ведении горных работ во многом определяются не только физико-механическими свойствами, структурным строением продуктивных толщ и вмещающих их породных массивов на заданных глубинах освоения месторождений полезных ископаемых, но и используемыми при этом технологическими схемами и режимом ведения горных работ (видами источников возмущения как «нетронутого», так и постоянно эволюционирующего напряженно-деформированного состояния). Этот набор информации является, по существу, базовым для «подземного информационного слоя». За его наполнение несут основную ответственность соответствующие службы горнодобывающих предприятий, что предполагает их надлежащее техническое оснащение (например, наличие шахтных систем геомеханического и сейсмического контроля) и, следовательно, привлечение для их разработки профильных научно-исследовательских институтов, а также разработчиков необходимого оборудования. Современный опыт формирования и практического использования «подземного информационного слоя» для России представлен в монографиях [4, 7].

## О взаимодействии между локальными геомеханическими и глобальными геодинамическими процессами и новых требованиях к мониторинговым системам

Одним из важнейших результатов совместных экспериментальных исследований последнего десятилетия геомехаников и геофизиков явилось обнаружение тесной взаимосвязи между глобальными геодинамическими и локальными геомеханическими процессами, обусловленными ведением горных работ, особенно в тектонически активных зонах. Не менее крупным результатом таких исследований явилось также заключение о фундаментальной роли блочноиерархического строения горных пород и массивов для объяснения существования широкой гаммы нелинейных геомеханических эффектов и возникновения сложных самоорганизующихся геосистем [1, 2, 15]. Иерархическая структура характерна для многих систем, особенно для литосферы Земли, где выделяется более 30 иерархических уровней – от тектонических плит протяженностью в тысячи километров до отдельных минеральных зерен миллиметрового размера. Таким образом, земная кора представляет собой не сплошную среду, а дискретную систему блоков и, как любой синергетический дискретный ансамбль, обладает свойствами иерархичности и самоподобия [16, 17].

Крупномасштабное воздействие горнодобывающей промышленности на верхнюю часть литосферы не ограничивается изъятием из земных недр и перемещением больших объемов горной массы, нефти, газа и воды, в результате техногенного воздействия инициируются огромные потоки энергии в геофизической среде. Возникающие при этом диссипативные структуры обусловливают появление неустойчивых состояний в породных массивах, которые реализуются в виде различного рода катастроф, среди которых наиболее опасными для рудных месторождений являются горные удары и техногенные землетрясения [13].

В настоящее время, несмотря на достаточно высокую техническую оснащенность (наземные и космические станции наблюдения, специально созданные высокопроизводительные суперкомпьютеры, спутниковые каналы передачи данных с большой пропускной способностью) в метеорологии, среднесрочный прогноз (2–3 недели) не удается получить. Подобное же положение наблюдается и в сейсмологии (разделе геофизики, родственном по проблематике геомеханическому мониторингу): традиционно для нашей страны геомеханический мониторинг разворачивается на базе сейсмостанции, действующей на контролируемом объекте. В состав базы данных и «знаний» геомониторинга, как правило, включается обработка сейсмической информации. К настоящему времени в мире функционирует около 3000 сейсмостанций. Сотни из них объединяются в сейсмические сети. И тем не менее можно привести солидный список землетрясений, которые не были заранее предсказаны, вследствие чего повлекли за собой большие жертвы и разрушения.

Немногим отличается и прогнозирование горных ударов и других катастрофических событий в горном деле. Однако в научном сообществе, связанном с горной проблематикой, несколько затянулся период, как нам кажется, наивной веры в достижимость достоверного прогноза за счет получения «полного» спектра данных о породном массиве. Объективная причина этого обстоятельства кроется в отсутствии адекватных технических средств телеобработки и в связи с этим – в отсутствии достаточного практического опыта эксплуатации удовлетворительных прототипов полноценного мониторинга.

Как представляется, в настоящее время для реализации геомониторинга по таким параметрам, как быстродействие и пропускная способность сети измерительных каналов, достижение максимальной устойчивости мониторинга, его необходимого быстродействия, ограничений по факторам задержки, по мехозащищенности и живучести технических ограничений не существует.

Возможность реализации геомеханического мониторинга (прежде всего в отношении задачи прогнозирования опасного состояния контролируемых объектов) на самом деле кроется в особенностях поведения иерархически блочного породного массива, геомеханические процессы в котором, как правило, имеют существенно нелинейный характер [1, 2, 17].

Особым свойством нелинейных систем является наличие «горизонта прогноза», за который заглянуть «детерминированно» принципиально невозможно – последний с необходимостью «сценарно-статистический». Динамика таких систем не предполагает полной (однозначной) предсказуемости. Здесь проявление случайности или «непредсказуемости» в поведении системы не есть порождение несовершенства наблюдений (это устойчивое заблуждение), а «бифуркационные» следствия проявлений фундаментальных законов природы.

С целью существенного уменьшения многообразия теоретически возможных сценариев развития нелинейных геомеханических процессов и среди возможного многообразия действующих при этом «законов и закономерностей» мне хотелось бы обратить особое внимание на наиболее важный из них – закон сохранения энергии для консервативных систем – и в силу его универсальности (фундаментальности), и в силу реальной конструктивности. В данном случае
его конструктивность для консервативных геомеханических систем автор связывает с достаточно ясным пониманием возможного реального механизма трансформации упругой энергии в очаговой зоне повышенной концентрации напряжений в кинетическую энергию движения составляющих ее структурных элементов на критической стадии накопления упругой энергии и последующей реализации катастрофического события или разрушения пород очаговой зоны [18, 19]. При этом, конечно, принципиальна значимость вопроса: является контролируемая геомеханическая система консервативной или «квазиконсервативной».

В работе [19] мною высказана гипотеза, что очаговая зона катастрофического события при достижении критической стадии (этапа) ее формирования на определенный период времени становится консервативного типа геомеханической системой. В данном контексте по существу лежит и ответ на практически важный вопрос о масштабности охвата геоинформационным полем контролируемого события (зреющего очага) в зависимости от его возможного энергетического уровня. На проверку этой гипотезы экспериментаторам и теоретикам в области нелинейной геомеханики и геофизики следовало бы обратить пристальное внимание как на одну из ключевых по механике и физике формирования и реализации очаговых зон катастрофических событий, а также как на имеющую непосредственное отношение к формулированию информационных и технических требований для соответствующих мониторинговых систем геомеханико-геодинамической безопасности горнодобывающих предприятий и стратегически важных объектов России.

Сравнительный анализ ряда исследовательских и промышленных систем подобного класса, работающих в США, ЮАР, странах Западной Европы, Японии, показывает: необходимое совмещение наблюдений за множеством процессов различной физической природы, непосредственно и косвенно характеризующих состояние окружающей среды и оценку степени техногенного воздействия; интегрирование в рамках методологического наполнения моделей различной математической природы; разворачивание широкой сети станций наблюдения и т.п. Особенности их построения и работы, как правило, недоступны в открытой печати. Системы имеют высокую стоимость. Их логическая структура привязана к особенностям конкретных объектов и, в силу этого, не может быть заимствована. Существуют прикладные геоинформационные системы, позволяющие вести анализ геомеханических процессов. Однако они не позволяют интегрировать различные методы и модели в единое целое, а также актуализировать соответствующую геоинформацию с учетом ее пространственной неоднородности.

По имеющимся у нас опубликованным данным можно получить представление об архитектуре и, частично, методологической основе ряда действующих систем геомониторинга в мире. Среди них микросейсмическая система контроля на свинцово-цинковом руднике «Галина» фирмы АСАРСО (штат Айдахо, США), на южно-африканской глубокой золотодобывающей шахте Вестерн Дип Лэвэлс, на шведском руднике Луоссаваара в г. Керуна, система на испытательном полигоне в Неваде, ряд разработок немецкой фирмы Lennarts (MARS-88, PCM-5800, SAS-5800). Следует отметить, что выявить общие тенденции в подходах к проектированию систем геомониторинга, используемых в зарубежных фирмах, весьма затруднительно ввиду отсутствия в открытой печати подробных сведений.

При этом прослеживается существенная зависимость качества инструментального контроля от числа точек наблюдения, достигающих в ряде систем нескольких сотен. Здесь основной упор делается на получение качественной шахтной сейсмологической информации. Хорошего уровня разработки в отмеченных направлениях ведутся, например, в Институте шахтной сейсмологии (Institute of Mine Seismology (IMS)) для ряда городов и стран, в частности, в г. Хобарт (Австралия), в г. Стелленбош (ЮАР). В сфере интересов данной организации плановый сейсмологический мониторинг на горнодобывающих предприятиях, который дает возможность количественно оценить сейсмичность и решать задачи предотвращения, контроля и предостережения от потенциальных неустойчивостей породного массива, которые могут привести к горным ударам [20-22]. К лидерам в области разработки систем мониторинга за рубежом можно отнести и ESRÍ UŜA Redlands, Clark labs Clark University USA Worcester, а также международный университет в г. Сэдбери, Канада (Universite Laurentienne Laurentian University).

Среди отечественных выделяются работы ОАО «Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – Межотраслевой научный центр ВНИМИ», ГоИ КНЦ РАН, ГИ УрО РАН, ИГД УрО РАН, ИГД СО РАН и некоторых других [1–7]. Так, например, под методическим руководством ВНИМИ созданы системы сейсмического мониторинга GITS на шахтах «Комсомольская» и «Северная» ОАО «Воркутауголь», на шахте № 1–5 рудника Баренцбург (архипелаг Шпицберген) ФГУП треста «Арктикуголь», в ОАО «Шахта Полысаевская», а также на рудниках «Октябрьский» и «Таймырский» Норильского горно-металлургического комбината [23–25].

Зарубежные и отечественные разработки в ряде случаев обладают серьезными недостатками: отсутствует системный подход и методологическая обоснованность технических решений на стадии проектирования; не предусмотрена возможность непрерывной автоматической регистрации информации о состоянии массива во множестве распределенных по его объему точек; не обеспечивается согласование данных, зарегистрированных различными измерительными средствами, с целью получения достаточно полного описания поведения массива; ограничены возможности использования современных методов теоретической и экспериментальной геомеханики при анализе данных для достоверной оценки напряженно-деформированного состояния породного массива и принятия необходимых решений по предотвращению опасных событий. Следовательно, требуется разработка адаптируемых или достаточно гибких систем геомониторинга в отношении использования существующих и перспективных измерительных станций, ориентированных на исследование различных физических процессов в массиве; возможности учета конкретной технологической обстановки (расположение выработок, уровень технологического шума и электромагнитных помех, интенсивность информационной нагрузки), использования методов экспресс-обработки, ретроспективного анализа и интерпретации данных; совместимости с ныне действующей федеральной системой сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений в России [2, 26]. Использование в такого рода комплексных мониторинговых системах записей мировой сети наземных сейсмических станций по мощным взрывам, землетрясениям и другим крупным динамическим воздействиям с необходимостью способствует разделению влияния в изучаемых процессах глобального геодинамического «фона» и техногенных воздействий на разрабатываемые месторождения полезных ископаемых. Наряду с экспериментальными данными по геодезическому нивелированию поверхностей подработки месторождений в данном случае речь идет о необходимости целенаправленного формирования второго - «наземного информационного слоя» мониторинговой системы [2].

## О геомеханико-геоэкологической безопасности и формировании «надземного геоинформационного слоя»

Роль горнодобывающего комплекса России как минерально-сырьевой «житницы» для практически всей промышленности не только нашей страны общеизвестна, в том числе и на обозримую перспективу по таким направлениям, как стратегическая безопасность, устойчивое развитие и ускорение экономического роста, решение социальных проблем и т.д. Поэтому, как обоснованно подчеркивается в [27], от его долговременных конкурентных на мировом уровне преимуществ во многом зависит и широта спектра возможных практических приложений уже наработанного потенциала Науки и Технологий в целом, равно как их достижения в будущем.

С другой стороны, в связи с возрастающими объемами извлечения полезных ископаемых из недр Земли на ее поверхность, с годами обостряются экологические проблемы вплоть до их катастрофических проявлений. В эпоху глобализации и бурного индустриального развития многих стран с «сырьевой направленностью» окружающая среда становится все более уязвимой с ростом техногенной нагрузки: не только из-за загрязнения речной сети (и увеличивающимся, следовательно, дефицитом качественной воды), но и ее деградации в районах активного недропользования с сопутствующей утратой или существенным изменением былого биоразнообразия. Это, в свою очередь, оказывает в определенной степени влияние на изменения климата.

В известном смысле, имеет место «модуляция» деформационно-волновых процессов от изменяющихся и совместно действующих геомеханических и геодинамических полей структурной эволюции среды обитания растительного и животного мира. Крупномасштабные и сравнительно локальные на поверхности Земли деформационно-волновые процессы и обусловленные ими изменения других физических характеристик (поглощающая способность по электромагнитному спектру, температура, влажность и проч.), в том числе и в атмосферных слоях, в современных условиях с достаточной надежностью можно реализовывать спутниковыми технологиями дистанционного зондирования Земли [28]. Этот, согласно [2], **«надземный информационный слой»**, следовательно, через деформационно-волновые процессы оказывается сопряженным по времени и пространству с двумя предыдущими геоинформационными слоями – **«подземным...»** и **«наземным...»**.

Таким образом, в качестве методологической основы для «сшивания» между собой обозначенных выше трех базовых геоинформационных слоев (подземного, наземного и надземного) может послужить активно развиваемая ныне нелинейная теория волн маятникового типа [1, 2, 29], лежащая в основе описания развития деформационно-волновых процессов в напряженных геосредах блочно-иерархического строения. Применительно к горнодобывающим районам с большими объемами извлекаемых полезных ископаемых, кроме того, как показано мною в [30], при формировании региональных блоков общей многослойной системы геомеханико-геодинамической безопасности России необходимо опираться также на «априорную» феноменологическую информацию по возможному развитию квазистатических крупномасштабных зонально-дезинтеграционных процессов [15, 31].

Заключение. Как справедливо было отмечено на заседании президентского Совета по науке и образованию Российской Федерации 20.12.13 г. (http://www.snto.ru/2013\_g?printable), «наибольший импульс фундаментальной науке дают только масштабные проекты с длительным сроком реализации».

Одним из таких весьма актуальных в области наук о Земле можно рассматривать стратегической значимости мегапроект: **разработ**ка и создание многослойной геоинформационно-мониторинговой системы геомеханико-геодинамической безопасности России. К настоящему времени по этому направлению исследований и разработок накоплен весьма внушительный потенциал научных и технических достижений в ведущих научных организациях России в рамках интеграционных проектов РАН для успешного воплощения этой идеи практически.

Этот мегапроект, безусловно, можно отнести к одному из приоритетных в развитии науки и технологий междисциплинарного вида, способному реально внести наибольший вклад в обеспечение безопасности нашей страны, прогнозирование и предотвращение природных и техногенных катастроф, обусловленных, в том числе, активным развитием одной из базовых для России отраслей ведения хозяйства – ее горнодобывающей промышленности; обеспечение гармонизации разработки минерально-сырьевых богатств недр Земли с возможными экологическими последствиями.

Автор выражает благодарность доктору технических наук А.В. Леонтьеву, оказавшему значительную помощь при подготовке настоящего доклада.

## Библиографический список

1. Адушкин В.В. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия – к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. І / В. В. Адушкин, В. Н. Опарин // ФТПРПИ. – 2012. – № 2.

2. Адушкин В.В. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия – к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. II / В. В. Адушкин, В. Н. Опарин // ФТПРПИ. – 2013. – № 2.

3. Методы и измерительные приборы для моделирования и натурных исследований нелинейных деформационно-волновых процессов в блочных массивах горных пород / В. Н. Опарин и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007.  Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования / В. Н. Опарин и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008.

5. Методы и системы сейсмодеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов. Т. 1 / В. Н. Опарин и др.– Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009.

6. Методы и системы сейсмодеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов. Т. 2 / Опарин В. Н. и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010.

7. Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия / Опарин В. Н. и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012.

8. Постановление Правительства РФ от 24.12.2008 г. № 988 «Об утверждении перечня научных исследований и опытно-конструкторских разработок, расходы налогоплательщика на которые в соответствии с п. 2 ст. 262 ч. Второй Налогового кодекса РФ включаются в состав прочих расходов в размере фактических затрат с коэффициентом 1,5» // Российская газета. – 14 января 2009. – Федеральный выпуск № 9.

9. Адушкин В.В. Техногенные процессы в земной коре [опасности и катастрофы] / В.В. Адушкин, С.Б. Турунтаев. – М.: ИНЭК, 2005.

10. О возможных причинах увеличения сейсмической активности шахтных полей рудников Октябрьский и Таймырский Норильского месторождения в 2003 г. / В. Н. Опарин и др. // ФТПРПИ. – Ч. I. – 2004. – № 4; Ч. II. – 2004. – № 5; Ч. III. – 2004. – № 6; Ч. IV. – 2005. – № 1.

11. О кинетических особенностях развития сейсмоэмиссионных процессов при отработке угольных месторождений Кузбасса / Опарин В. Н. и др. // ФТПРПИ. – 2013. – № 4

12. Опарин В. Н. Волны маятникового типа и «геомеханическая температура» / В. Н. Опарин // Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах: труды 2-й рос.-кит. конф. – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012.

13. Научные и инженерные аспекты хранения и захоронения радиационно опасных материалов на европейском севере России / Н. Н. Мельников и др. – Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2010.

14. Медленные движения – миф или реальность? / Гольдин С. В. и др. // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород: материалы I Междунар. школы-семинара (9 – 15 сент., 2001 г., г. Красноярск). – Красноярск: СибГАУ, 2002.

15. Опарин В. Н. Каноническая шкала иерархических представлений в горном породоведении / В. Н. Опарин, А. С. Танайно. – Новосибирск: Наука, 2011.

16. Родионов В.Н. Основы геомеханики / В.Н. Родионов, И.А. Сизов, В.М. Цветков. – М.: Недра, 1986.

17. Кочарян Г. Г. Динамика деформирования блочных массивов горных пород / Г. Г. Кочарян, А. А. Спивак. – М.: Академкнига, 2003.

18. Опарин В. Н. Энергетический критерий объемного разрушения горных пород / В. Н. Опарин // Неделя горняка – 2009: труды науч. семинара. – М.: МГГУ, 2009.

19. Опарин В. Н. О нелинейных деформационно-волновых процессах в виброволновых геотехнологиях освоения нефтегазовых месторождений / В. Н. Опарин, Б. Ф. Симонов // ФТПРПИ. – 2010. – № 2.

20. Медецки А. Характеристики сейсмической опасности в рудниках и шахтах / А. Медецки / труды XVIII Междунар. симпозиума по сейсмологии и горным ударам в рудниках и шахтах (RaSim8). – СПб.-М., 1–7 сент. 2013.

21. Потвин Ив. Повышение качества управления сейсмическим риском в шахтах, сложенных крепкими породами / Ив Потвин // Труды XVIII Международного симпозиума по сейсмологии и горным ударам в рудниках и шахтах (RaSim8). – СПб.-М., 1–7 сент. 2013.

22. Герхард ван Асвехен. Судебная механика горных пород, сдвиги Орлеппа и другие индуцированные горными работами структуры / Герхард ван Асвехен // труды XVIII Междунар. симпозиума по сейсмологии и горным ударам в рудниках и шахтах (RaSim8). – СПб.-М., 1–7 сент. 2013.

23. Яковлев Д. В. Природно-техногенная сейсмоактивность Кузбасса / Д. В. Яковлев, Т. И. Лазаревич, С. В. Цирель // ФТПРПИ. – 2013. – № 6.

24. Лазаревич Т. И. Горный мониторинг сейсмической и геодинамической безопасности Кузбасса / Т. И. Лазаревич, А. Н. Поляков / Горная геомеханика и маркшейдерское дело. – СПб.: ВНИМИ, 2009.

25. Мулев С. Н. Опыт внедрения систем сейсмического мониторинга на шахтах и рудниках России / С. Н. Мулев, А. В. Бондарев, С. Ф. Панин // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: труды междунар. конф. – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2013.

26. Федеральная система сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений // Информационно-аналитический бюллетень. Спец. выпуск. –1995. – № 1.

27. Прогноз научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://government.ru/ news/9800.

28. Бычков И. В. Облачные технологии в решении задач горной геоинформатики / И. В. Бычков, В. Н. Опарин, В. П. Потапов // ФТПРПИ. – 2014. – № 1.

29. Геомеханические и технические основы увеличения нефтеотдачи пластов в виброволновых технологиях / В. Н. Опарин и др. – Новосибирск: Наука, 2010.

30. Опарин В. Н. Методологические основы построения многослойных мониторинговых систем геомеханико-геодинамической безопасности для горнодобывающих районов в тектонически активных зонах / В.Н. Опарин // Проблемы и пути инновационного развития горнодобывающей промышленности: материалы Шестой междунар. науч.-практ. конф. (9–11 сентября 2013 г.). – Алматы, 2013.

31. Зональная дезинтеграция горных пород и устойчивость подземных выработок / В. Н. Опарин и др.– Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008.

# НЕСОСТОЯТЕЛЬНОСТЬ КОНЦЕПЦИИ «ЗАЩИТНЫЕ ПЛАСТЫ» В ТЕКТОНИЧЕСКИ НАПРЯЖЕННЫХ МАССИВАХ

### А.В. Ловчиков

В «Инструкции...» [1] понятие «защитное рудное тело» трактуется следующим образом: Защитное рудное тело или его часть (слой) - рудное тело или его часть (слой), при отработке которых обеспечивается защита прилегающего массива пород (руд) от проявления горных ударов, то есть предполагается, что при отработке защитного рудного тела снижается уровень напряжений вблизи основного отрабатываемого рудного тела, за счет чего снижается опасность проявления горных ударов при его отработке. Понятие о защитном рудном теле на рудных месторождениях перекочевало из концепции «защитные пласты», введенной И.М. Петуховым с соавторами [2]. Сущность действия защитных пластов ясна из следующих рассуждений их работы: «Часть массива горных пород, располагающаяся над и под выработанным пространством, величина горного давления в которой ниже величины давления, существовавшего в массиве до проведения выработки, называется зоной разгрузки... Под защищенной зоной понимается такая часть зоны разгрузки, в пределах которой, благодаря снижению горного давления, вследствие отработки защитного пласта, полностью исключается возможность возникновения горного удара или внезапного выброса угля и газа».

Принципиальной основой приведенных понятий служит распределение напряжений горных пород вокруг очистной выработки при отработке угольного пласта, схема которого приведена на рис. 1 [2]. Единственной действующей силой в рассматриваемой схеме является вес пород покрывающей толщи, действующий вертикально, и боковой отпор пород в массиве. Как видно из рис. 1, рассматривается очистная выработка, в поперечном сечении которой ширина значительно превышает ее высоту ( $\ell/h >> 1$ ). Соответствующее распределение вертикальных напряжений вокруг такой выработки представлено на рис. 2 [3]. Вертикальные напряжения на рис. 2 приведены потому, что они являются наибольшими, поскольку горизонтальные напряжения вокруг выработки меньше в несколько раз. Предполагается, что вертикальные напряжения являются главной причиной проявления горных ударов в выработке. А поскольку величина вертикальных напряжений над и под выработкой меньше, чем в окру-



Рис. 1. Схема распределения горного давления около очистной выработки:

1 – границы области влияния выработки; 2 – зона опорного давления; 3 – граница зоны разгрузки; 4 – граница защищенной зоны; 5 – грани ца зоны полных сдвижений; 6 – зона сдвижения пород и земной поверхности



Рис. 2. Принципиальная схема распределения вертикальных напряжений вокруг очистной выработки (ширина выработки 150 м, высота 1,5 м)

жающем массиве, в этих местах меньше и удароопасность пород. В указанном снижении величины напряжений над и под выработкой заключается сущность концепции защитного влияния пластов. Если выработка наклонная, распределение напряжений вокруг нее становится асимметричным, но принципиально распределение напряжений, по сравнению с горизонтальной выработкой, не меняется.

Приведенное на рис. 1 и 2 распределение горного давления и напряжений вокруг очистной выработки свойственно осадочным горным породам (каменным углям, солям), в массивах которых действует гравитационное напряженное состояние пород. Однако в массивах рудных месторождений, которые, как известно, располагаются в крепких магматических породах, в большинстве случаев действует гравитационно-тектоническое поле напряжений. Превалирующую роль здесь играют горизонтальные тектонические напряжения, которые на глубине до 500 м от поверхности в несколько раз (нередко в 5-20 раз) выше гравитационных напряжений от веса пород. В таком случае распределение максимальных напряжений резко отличается от их распределения, представленного на рис. 1, 2. Основное отличие заключается в том, что главную роль в распределении напряжений играют горизонтальные силы, которые по величине в несколько раз больше вертикальных. Горизонтальные напряжения определяют проявления горного давления в тектонически напряженных массивах, в том числе опасность горных и горнотектонических ударов. В частности, на таких высоко тектонически напряженных месторождениях, как Хибинское апатитовое, Ловозерское редкометалльное, Таштагольское железорудное и другие, основная опасность динамических проявлений горного давления (стреляние, шелушение, динамическое заколообразование) наблюдается со стороны кровли (почвы) выработок. Поэтому никакого заметного защитного действия, связанного со снижением уровня напряжений в кровле (почве) рудных залежей, в тектонических напряженных массивах не происходит.

Ярким примером несоответствия концепции защитных пластов условиям тектонически напряженных массивов служит практика эксплуатации рудника «Умбозеро» на Ловозерском редкометалльном месторождении. Рудник «Умбозеро» отрабатывал две пологопадающие (угол падения от 0° до 17° к горизонту) пластообразные согласно залегающие сближенные рудные залежи мощностью 2,5 м (нижняя) и 5,0 м (верхняя), разделенные породным промежутком мощностью 40–60 м по вертикали, в массиве крепких скальных пород. Характеристика свойств руд и пород рудника приведена в табл. 1. В массиве рудника действует гравитационно-тектоническое поле напряжений, характеристики которого приведены в табл. 2, из нее видно, что тектонические напряжения горизонтального направления в 7–10 раз превышают гравитационные напряжения от веса пород на глубине 200–300 м от поверхности. Рудник «Умбозеро» начал эксплуатироваться в 1984 г., но еще на стадии строительства в 1978 г. был отнесен Госгортехнадзором к угрожаемым по горным ударам ввиду многочисленных проявлений горного давления в сооружаемых выработках.

Таблица 1

	Плот	Прочнос	ть, МПа	Модуль	Корффи	Коэф- фициент хрупкости
Порода	ность, т/м <sup>3</sup>	при сжатии	при растяже- нии	упруго- сти, 10 <sup>4</sup> МПа	циент Пуассона	
Фойяит	2,64	$308 \pm 81$	$10 \pm 3,3$	5,3	0,25	30,8
Луяврит лейко- кратовый	2,65	308 ± 94	12 ± 3,0	5,0	0,29	25,6
Луяврит мезократовый	2,72	248 ± 112	13 ± 4,1	3,4	0,19	19,0
Ювит	2,65	231	12	<u> </u>	—	19,2
Ювит-уртит	2,54	208	16	_	—	13,0
Фойяит-ювит	2,60	$313 \pm 56$	$6,6 \pm 1,4$	_	—	16,0
Рудосодержа- щие породы (пласт III-14)	2,70	193 ± 10	7,0 ± 3,5	4,1	0,26	27,6

# Физико-механические свойства руд и пород рудника «Умбозеро»

Таблица 2

#### Характеристика естественного напряженного состояния массива рудника «Умбозеро»

			Вел гл	іичина и іавных н	Соотно-		
Рудная залежь	Глубина Местопо- измерений ложение от поверх- участка из- ности, м мерений	величина, МПа	азимут, град	величина, МПа	наклон, град	шение компо- нент на- пряжений σ <sub>3</sub> : σ <sub>2</sub> : σ <sub>1</sub>	
Залежь III-14 (блок 1ю)	300	Гор. +250 м	50	265	7	90	7:3:1
Залежь III-14 (блок 1с)	200	Штрек гор. +250 м	60	230	6	90	10:5:1

Вскрытие рудного тела на руднике осуществлено двумя транспортно-вентиляционными наклонными стволами, пройденными по рудному телу под углом 17° к горизонту. В первую очередь, в 1984– 1990 гг., осуществлялась эксплуатация нижней рудной залежи мощностью 2,5 м. Отработка проводилась камерно-целиковой системой с камерами шириной 15–20 м и длиной 60–120 м, располагаемыми по падению либо по простиранию рудной залежи. Камеры разделялись поддерживающими ленточными целиками шириной 3–10 м. Выработанное пространство не обрушалось и не закладывалось. Верхняя залежь, которая первоначально считалась некондиционной, стала отрабатываться с 1990 г. над выработанным пространством нижней залежи с такими же параметрами целиков и камер. Глубина отработки нижней залежи 200–420 м от поверхности, верхней 100–200 м.

Сразу после начала отработки верхней залежи над выработанным пространством нижней в руднике произошло несколько горнотектонических ударов с магнитудой  $M = 2,4 \div 2,6$ , в результате которых произошли разрушение выработок и обрушение пород на площади 80000 м<sup>2</sup> [4]. На всем протяжении строительства и эксплуатации рудника процессы проходки выработок и добычи руд сопровождались динамическими проявлениями горного давления во всех формах от начальных до сильнейших горнотектонических ударов.

17.08.1999 г. на руднике произошел сильнейший горнотектонический удар, в результате которого выработки на нижней залежи были разрушены на площади 650000 м<sup>2</sup>. Сейсмический эффект этого события характеризуется магнитудой М<sub>L</sub> = 5,1. По энергии и последствиям этот удар оказался сильнейшим событием такого рода за всю историю рудников и шахт России [5]. Как показал последующий анализ [6, 7], причиной горнотектонического удара оказалась отработка верхней сближенной залежи над выработанным пространством нижней залежи. На рис. 3 приведено распределение минимальных главных напряжений о<sub>1</sub> в поперечном вертикальном сечении рудника при последовательном увеличении числа очистных выработок на верхней залежи над выработанным пространством нижней. В рассматриваемом случае главную роль играют минимальные напряжения σ<sub>1</sub>, поскольку от возникновения первой очистной выработки на верхней залежи в междупластье появляется и, по мере увеличения числа выработок на верхней залежи, начинает расти зона растягивающих напряжений (обозначены на рис. 3 пунктиром). На последнем этапе, перед горнотектоническим ударом, зона растягивающих напряжений охватывает не только междупластье (см. рис. 3, г), но и растет в сторону дневной поверхности. Величина растягивающих





напряжений, как это видно на рис. 3, *г*, превосходит предел прочности пород при растяжении (см. табл. 1).

В результате горнотектонического удара в породах междупластья и далее до дневной поверхности проросла трещина (плоскость сдвига) под углом 40° к горизонту (рис. 4). Протяженность трещины по падению составила около 500 м. Она вышла на поверхность, свидетельством чего стал тот факт, что ручей, текущий по склону поверхности, был сдренирован в горные выработки. Если сопоставить рис. 3, c и рис. 4, то видно, что плоскость сдвига проросла по линии развития растягивающих напряжений  $\sigma_1$  в междупластье и далее в сторону дневной поверхности. Возникновение трещины сопровождалось горнотектоническим ударом в массиве, сейсмический



Рис. 4. Трещина (плоскость сдвига), образовавшаяся после горнотектонического удара 17.08.1999 г.:

*a* – схема расположения трещины в массиве; *б* – схематический вид трещины разрушения в контрольно-наблюдательном квершлаге гор. +290 м (ВП-1, ВП-2 ... – высокоточные пункты наблюдений)

эффект которого оценивается магнитудой  $M_L = 5,1$ . Разрыв пород по трещине произошел при условии  $\sigma_A^M > \sigma_p$ , в котором  $\sigma_A^M$  – действующие напряжения в массиве;  $\sigma_p$  – прочность пород при растяжении. Растягивающие напряжения в междупластье образовались вследствие действия в массиве больших горизонтальных тектонических сил. В одном из квершлагов, соединяющих нижнюю и верхнюю залежи, было измерено смещение пород по трещине, которое составило 16 см (13 см по горизонтали и 9 см по вертикали). Схема расположения трещины в квершлаге и величины смещений пород приведены на рис. 4, *б*. Толщина (мощность) трещины составила 0,1–0,2 м.

Согласно «Инструкции...» [1] выработки верхней залежи находятся в пределах защитной зоны, образованной отработанной нижней залежью. Границы этой зоны, построенные по правилам инструкции, обозначены на рис. 4, а. Однако никакой защиты от горных ударов отработка нижней залежи не обеспечила. Более того, надработка верхней залежью выработанного пространства нижней вызвала сильнейший горнотектонический удар в междупластье и в покрывающей толще пород. Главной причиной удара послужило наличие в массиве горизонтальных тектонических напряжений большой величины. Приведенный пример показывает, что концепция «защитные пласты» или «защитные рудные тела» на рудных месторождениях не работает, так как в их массивах действует гравитационно-тектоническое поле напряжений. При гравитационно-тектоническом напряженном состоянии массива максимальные по абсолютной величине напряжения вокруг выработок действуют в горизонтальном, а не в вертикальном направлении. Для оценки опасности горных ударов в каждом конкретном случае необходимо решать специальную задачу о распределении напряжений вокруг выработок с учетом конкретных геометрических схем и параметров полей напряжений, действующих в массиве.

### Выводы

1. Условия напряженного состояния рудных месторождений существенно отличаются от аналогичных условий осадочных месторождений, поскольку в массивах рудных месторождений действуют гравитационно-тектонические поля напряжений, при которых горизонтальная тектоническая составляющая напряжений в несколько раз превышает вертикальную гравитационную составляющую, обусловленную весом налегающих пород.

2. Критерий удароопасности массива при действии тектонических напряжений может составлять  $\sigma_{d} \ge \sigma_{p}$ , где  $\sigma_{d}$  – действующие напряжения в массиве вокруг выработок,  $\sigma_p$  – прочность пород при растяжении.

3. Понятие «защитные рудные залежи» должно быть исключено из «Инструкции по безопасному ведению горных работ на рудных и нерудных месторождениях...», как правило, механически перенесенное из правил ведения горных работ на угольных месторождениях, условия которых не соответствуют условиям рудных месторождений.

### Библиографический список

1. Инструкция по безопасному ведению горных работ на рудных и нерудных месторождениях, объектах строительства подземных сооружений, склонных и опасных по горным ударам. РД 06-329-99. ГПНТЦ по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.ohranatruda. ru/ot biblio/normativ/5/5438/

2. Защитные пласты / И. М. Петухов и др. – Л.: Недра, 1972. – 424 с.

3. Теория защитных пластов / И. М. Петухов. - М.: Недра, 1976. - 224 с.

4. Ловчиков А.В. Анализ явлений, предшествовавших горно-тектоническим ударам в Ловозерском массиве / А.В. Ловчиков, В.П. Гуменников, В.Я. Ивахно // ФТПРПИ. – 1993. – №1. – С. 13–22.

5. Козырев А. А. Сильнейшее техногенное землетрясение на российских рудниках, 17 августа 1999 г., рудник «Умбозеро» (Кольский полуостров) / А. А. Козырев, А. В. Ловчиков, И. А. Кузьмин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2000. – № 6. – С. 169–173.

6. Савченко С. Н. Ретроспективный анализ очага техногенного землетрясения на руднике «Умбозеро» 17.08.1999 г. / С. Н. Савченко, А. В. Ловчиков, А. А. Козырев // Техногенная сейсмичность при горных работах: модели очагов, прогноз, профилактика: сб. докладов международного совещания. Ч.1. – Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2004. – С. 170–179.

7. Ловчиков А. В. Опасность горно-тектонических ударов при отработке сближенных рудных залежей / А. В. Ловчиков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – Отдельный выпуск № 15. – С. 77–89.

# ГЕОДЕФОРМАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ И ДОЛГОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ Геодинамических явлений на рудниках

### Я.И.Липин

Одним из важных вопросов безопасной и эффективной подземной разработки рудных месторождений в массиве скальных пород является своевременное предупреждение динамических форм проявления горного давления как в элементах системы разработки, так и в горно-капитальных выработках. Своевременность можно обеспечить только тогда, когда меры по профилактике динамических явлений предусматриваются на стадии проектирования или строительства рудников. Меры должны быть необходимыми и достаточными, что может быть обосновано геомеханическими расчетами. Для этих целей в ИГД УрО РАН разработан расчетный геомеханический прогноз (расчетный прогноз) удароопасности [1], с помощью которого можно оценить степень удароопасности того или иного конструктивного элемента системы разработки и выбрать на основе классификации мер предупреждения горных ударов [2] способы борьбы с динамическими явлениями.

Расчетный прогноз учитывает основные геомеханические параметры недр (напряженное состояние массива, прочностные и упругие свойства пород и руд, включая их нарушенность и трещиноватость), а также горно-технические факторы (глубину разработки, мощность рудной залежи, длину залежи или размер выработанного пространства по простиранию). Расчет сводится к определению будущих напряжений в элементах конструкций, возникающих в критические моменты максимального проявления, и сравнению этих нагрузок с прочностными параметрами руд и пород по критериям разрушения (Кулона – Мора).

Применительно к условиям планируемой подземной разработки Сарбайского месторождения геомеханическая расчетная схема представляется в виде каньона, заполненного частично обрушенными породами. Его ширина по дну 100 м (мощность рудной зоны *m*), длина равна длине рудного тела по простиранию ( $L_n$ =2300÷3000), глубина *H*=300 – 600 м.

Подземная разработка Сарбайского месторождения будет осуществляться в комплексе довольно крепких горных пород и руд, свойства которых, по данным испытаний в ИГД МЧМ СССР,

приводятся ниже [3]. Вмещающие породы (альбитофиры) при  $f=11,4\div15,6$  и р = 2,7 т/м<sup>3</sup> имеют:  $[\sigma]_{cm}=90-130$  МПа;  $[\sigma]_p=9-14$  МПа;  $\mu = 0,33$ ;  $E_c = 6,6\times10^4$  МПа;  $V_p = 4900$  м/с; коэффициент хрупкости  $K_{xp} = (90\div130)/(9\div14) = 9,3\div10$ . Это позволяет говорить о возможном динамическом разрушении краевых частей массива горных пород и руд.

Руды месторождения при  $\rho_{cp}=3,76$  т/м<sup>3</sup> и f=10,2-18,9, по данным испытаний образцов, имеют среднюю прочность  $[\sigma_{cm}] = 160$  МПа.

При оценке устойчивости конструкции со сроком службы до 2 лет принят коэффициент запаса прочности  $K_{3n} = 1,3$ ; коэффициент структурного ослабления с учетом обнажений для выработок принят  $K_{co} = 0,8\div0,9$ , а для конструктивных элементов с высокой степенью трещиноватости  $K_{co} = 0,4\div0,5$  [4].

В настоящее время установлено, что напряжения в массиве горных пород, т.е. в верхней части земной коры, подчиняются зависимости [5]:

$$\sigma_z^{n} = \lambda \gamma H + \sigma_{zr}^{n} + \sigma_{zrn}; \ \sigma_z^{n} = \lambda \gamma H + \sigma_{zrn}^{n} + \sigma_{zrn}; \ \sigma_1^{n} = \lambda \gamma H + \sigma_{1r}^{n} + \sigma_{rn}, \ (1)$$

где  $\gamma$  – объемный вес горных пород, Н/м<sup>3</sup>;  $\lambda$  – коэффициент бокового распора; H – глубина, м;  $\sigma_{z\tau}^{n}$ ,  $\sigma_{3\tau}^{n}$ ,  $\sigma_{1\tau}^{n}$  – постоянная тектоническая составляющая, МПа;  $\sigma_{z\tau n}$ ,  $\sigma_{3\tau n}$ ,  $\sigma_{1\tau n}$  – переменная тектоническая составляющая, МПА.

Период изменения  $\sigma_{\text{тп}}$  составляет в среднем 11 лет, что корреспондируется с циклами солнечной активности, и их величина в 1970–2010 гг. достигала 10÷20 МПа (рис. 1).

Представляется целесообразным спрогнозировать напряженное состояние массива горных пород на Сарбайском месторождении, используя результаты измерения напряжений на месторождениях Восточного склона Урала за вычетом переменных  $\sigma_{TH}$  (табл. 1).

Таблица 1

Месторождение	Глиби	Напряжения, МПа						
	на, м	$\sigma^{\pi}_{_3}-\sigma_{_{3T\Pi}}$	$\sigma_{1}^{n}-\sigma_{1\pi\pi}$	$\frac{\sigma_{_{3}}^{^{\Pi}}-\sigma_{_{3\Pi\Pi}}}{H}$	$\frac{\sigma_1^{\pi} - \sigma_{1\pi\pi}}{H}$			
Северопесчанское	300 400 500 540	-10,3 -16,3 -19,0 -18,0	-8,0 -12,5 -15,6 -13,5	0,034 0,038 0,038 0,033	0,027 0,029 0,031 0,025			

Напряжения массива Восточного Урала по показателям месторождений при разной глубине

Березовское	212	-9,0	-6,0	0,042	0,028
	512	-25,0	-19,0	0,048	0,037
	712	-14,0	-10,0	0,020	0,014
Гайское	830	-33,0	-12,0	0,040	0,014
	910	-36,6	-15,0	0,040	0,016
	1070	-40,0	-23,0	0,037	0,021
Средние				$0,037 \pm 0,007$	$0,024 \pm 0,008$

Следовательно, на Сарбайском месторождении можно ожидать

$$\sigma_{z} = \gamma H = 0,028H, \ \sigma_{3} = 0,037H, \ \sigma_{1} = 0,024H.$$

Первоначальное напряженное состояние недр Сарбайского рудника также можно оценить следующим образом. Исследования ИГД УрО РАН на расположенном рядом с Сарбайским Соколовском подземном руднике показали, что в массиве действуют следующие напряжения:

 $\sigma_z = 0,027H, \sigma_1 = 0,016H, \sigma_3 = 0,037H+1,$ 

где  $\sigma_z$ ,  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  – вертикальные, горизонтальные по простиранию и горизонтальные вкрест простирания рудной залежи напряжения нетронутого массива, МПа; *H* – глубина ведения горных работ, м.

Анализ регионального поля напряжений Восточного склона Урала показывает, что общая картина нагрузок в недрах практически совпадает и может быть принята к использованию в геомеханических расчетах на глубине 600 м при выемке первого горизонта (рис. 2):

$$\sigma_z = -16 \text{ MII}a, \sigma_x = -35 \text{ MII}a, \sigma_v = -25 \text{ MII}a.$$

В периоды действия максимальных пульсирующих нагрузок σ<sub>тп</sub> горизонтальные напряжения увеличиваются на 10–20 МПа.

Следует иметь в виду, что при оценке удароопасности во внимание принимаются те напряженные массивы, которые имеют незначительную трещиноватость, т. е. К<sub>ос</sub> ≥ 0,5. Возникающие иногда сомнения относительно возможности динамических форм проявления горного давления на рудниках в комплексе скальных пород и руд могут развеять динамические явления в соляных шахтах при ведении горных работ в периоды действия тах σ<sub>тп</sub> [6].

Представленные выше закономерности формирования первоначальных напряжений массива пород Сарбайского месторождения и данные о прочностных параметрах пород позволяют оценить напряжения вблизи выработок при ведении горных работ и их геодинамическую опасность.

В установленном поле напряжений, характер изменения которого с глубиной вряд ли существенно изменится, наибольшие напряжения следует ожидать вокруг выработок, расположенных вертикально и по простиранию рудной залежи, причем в наихудших условиях окажутся выработки, имеющие большее соотношение высоты к ширине, а из типовых – однопутевые штреки.

Для оценки удароопасности используем известные критерии  $K_{3c}$ , согласно которым при  $\sigma/[\sigma_{cm}] > 0,8$  могут происходить горные удары, а при  $\sigma/[\sigma_{cm}] > 0,5$  интенсивное заколообразование и стреляние пород. Исходя из концентрации напряжений вблизи выработок, критическая глубина начала динамических проявлений горного давления в горнокапитальных выработках вне зоны влияния очистных работ определится из выражения

$$H_{\rm kp} = \frac{K_{\rm sc} \left[\sigma_{\rm cx}\right] - \sigma_{\rm m} K_{\rm \thetam}}{\Delta \sigma_{\rm x} K_{\rm \thetax} + \Delta \sigma_{\rm z(y)} K_{\rm \theta z(y)}},\tag{2}$$

где  $K_{\rm 9c}$  – экспериментально-статистический коэффициент удароопасности,  $\sigma/[\sigma_{\rm cж}]$ ;  $\sigma_{\rm TII}$  – переменная тектоническая составляющая тензора напряжений, МПа;  $\Delta \sigma_x$ ,  $\Delta \sigma_z$  или  $\Delta \sigma_y$  – градиенты изменения напряжений с глубиной, МПа/м;  $K_{\theta x}$ ,  $K_{\theta z(y)}$  – максимальные коэффициенты концентрации напряжений  $\sigma_{xyz}$  на контуре выработок.

Оценочные значения критических глубин для Сарбайского рудника приведены в табл. 2.

Таблица 2

Критические глубины, с которых возможны динамические формы проявления горного давления

Место возможных		Обуславливающие динамические проявления						Глуби	іна, м
динамических проявлений	[σ] <sub>сж</sub> , МПа	$\Delta \sigma_{x},$ ΜΠα	Δσ <sub>y</sub> , ΜΠα	Δσ <sub>z</sub> , МПа	$K_{\theta x}$	$K_{\theta y}$	$K_{\theta z}$	стреляния	горных ударов
<ol> <li>Вертикаль- ные стволы</li> <li>Горизонталь- ные однопуте-</li> </ol>	110	0,037	0,024	_	3,0	-1,0	_	258/632	666/1011
вые выработки: штреки квершлаги	110 110	0,037	- 0.024	0,028 0,028	2,62	_ 2.62	0,17 0.17	282/539 423/809	606/862 909/1294

Таким образом, при производстве горнокапитальных работ незакрепленные горные выработки Сарбайского рудника могут быть подвержены динамическим проявлениям горного давления в следующих случаях:

 вертикальные стволы круглого сечения в слаботрещиноватом массиве – в обычные годы с глубины порядка 1000 м, а в годы (2017– 2019 и 2028–2030) максимального прироста пульсирующих тектонических напряжений  $\sigma_{\text{тп}}$  – с глубин 666 м могут быть подвержены микроударам и горным ударам;

 – горизонтальные выработки за тот же период эти же явления будут испытывать: однопутевые штреки с глубин 860 и 606 м, а однопутевые квершлаги с глубин 1294 и 909 м;

– как в вертикальных стволах, так и в горизонтальных выработках при использовании традиционной технологии проходки при отсутствии крепи стреляния пород проявиться могут с глубин 539– 809 м, а в критические периоды с глубин 258–423 м.

Следовательно, при производстве горно-капитальных работ для обеспечения безопасности необходимы меры по прогнозу и предупреждению динамических проявлений горного давления. Ориентировочной критической глубиной проявления удароопасности следует для данного рудника считать  $H_{\rm kp}$ = 600 м.

При ведении очистных работ независимо от принятой геотехнологии динамические явления в подготовительно-нарезных выработках могут начаться на меньших глубинах.



Рис. 1. Обобщенные результаты геодеформационного мониторинга  $\sigma_{TT}$  и є массива скальных пород на фоне солнечного излучения  $S_0$ 

При выемке прибортовых запасов на глубине 300 м (см. рис.1) напряжения в массиве днищ выемочных блоков будут составлять  $\sigma_{xдH} = -(50 \div 79)$  МПа, а на контуре штреков  $\sigma_{\theta} = 2,5 \times (-50 \div -70) = (-125 \div -175)$  МПа, что практически сравнивается с прочностью руды в пуске.

При выемке подкарьерных запасов на глубинах 500–700 м напряжения значительно превысят предельные прочности и, например, в кровле буровых штреков достигнут  $\sigma_0 = -(250 \div 300)$  МПа. На этих глубинах неустойчивыми оказываются призабойные рудные массивы при использовании этажной отбойки от действия высоких растягивающих напряжений. Целесообразным становится переход на подэтажную отбойку с использованием доставочно-буровых ортов.

Своевременный геомехнический прогноз и ведение горных работ в соответствии с требованиями безопасности помогут без проблем вести отработку месторождения.

Следует также отметить, что динамические проявления горного давления в виде стреляния пород были отмечены при строительстве ж.-д. тоннелей Сарбайского карьера в интервале глубин 200–280 м (гор.  $\pm 0$  м и -80 м) в сопряжениях наклонно-проходимых под углом 36° участков длиной 1080–1200 м при выходе их на горизонтальную вытяжку длиной 300 м [7]. В месте сопряжения верхнего и нижнего тоннелей при увеличении высоты выработки в 1,5–2,0 раза увеличилась концентрация горизонтальных нагрузок, достигших в кровле и подошве предела прочности пород.

Таким образом, результаты долговременного геодеформационного мониторинга (15 лет) дали возможность по-новому предста-



Рис. 2. Схема расчета напряжений в массиве пород Сарбайского подземного рудника

вить структуру поля напряжений и выделить пульсирующие  $\sigma_{\text{тп}}$  как изменяющиеся во времени с точной хронологической привязкой, которую можно использовать в расчетном прогнозе с учетом сроков начала горных работ. При этом впервые определена абсолютная величина  $\sigma_{\text{тп}}$  с привязкой к реальному времени.

Появилась возможность выделять для процесса ведения горных работ наиболее опасные по геодинамическим явлениям периоды и использовать это в проектах разработки залежей, прогнозе и предупреждении геодинамических явлений на рудниках.

#### Библиографический список

1. Влох Н.П. Прогноз удароопасности выработок на стадии проектирования горных работ / Н.П. Влох, А.В. Зубков, Я.И. Липин // Прогноз и предотвращение горных ударов на рудных месторождениях. – Апатиты: КФ АН СССР, 1987. – С. 38–44.

2. Классификация мероприятий по предотвращению горных ударов на рудниках / Н. П. Влох, А. В. Зубков, Г. Ф. Авдеев, Я. И. Липин // Безопасность труда в промышленности. – 1982. – № 2. – С. 53–55.

3. Артемьев Э.П. Обоснование пространственно-временного порядка инициирования скважинных зарядов при массовых взрывах на карьерах / Э.П. Артемьев, А.В. Яковлев, Е.С. Бусаргина // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – Отдельный выпуск № 11. – С. 41–50.

4. Зубков А.В. Геомеханика и геотехнология / А.В. Зубков. – Екатеринбург: УрО РАН, 2001. – 335 с.

5. Закономерности формирования напряженно-деформированного состояния земной коры Урала во времени / А.В. Зубков, О.В. Зотеев и др. – Литосфера. – № 1. – 2010. – С. 84–93.

6. Липин Я.И. Причины аварий на рудниках Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС) и меры по их предупреждению / Я.И. Липин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – Отдельный выпуск № 11. – С. 139–146.

 Обобщение опыта эксплуатации внутрикарьерных ж.-д. тоннелей Сарбайского карьера ССГПО и технико-экономическая оценка эффективности их применения: отчет о НИР / ИГД МЧМ СССР; рук. Сушков В. И. – Екатеринбург, 1988. – 97 с.

# ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЕРТИЗЫ ДОКУМЕНТАЦИИ ДЛЯ РАЙОНОВ РАЗВИТИЯ ОПАСНЫХ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ЗЕМНОЙ Поверхности

### А.Н. Каюмова

Одной из основных задач экспертной деятельности является установление соответствия документации, поступившей на экспертизу, требованиям промышленной безопасности. На фоне изменяющегося законодательства и увеличения ответственности экспертов, а также по результатам уже проведенных экспертиз можно сделать вывод, что предварительная работа на стадии проектирования опасного объекта должна подвергаться более тщательному анализу. Зачастую проекты содержат неполную информацию о проведенных работах или полученная информация не подвергается подробному анализу со всеми вытекающими обстоятельствами. В частности, в большинстве случаев в документации, поступающей на экспертизу, не учитывается влияние современной геодинамики приповерхностной части литосферы и земной поверхности при проектировании опасных производственных объектов. Во многом окончательный результат, а соответственно и учет всех факторов, оказывающих влияние на безопасность, зависит от экспертов [1]. Организации, производящие изыскательные работы, делают акцент на проведении полевых работ и получении результатов измерений. В то же время интерпретационная часть проведенных работ, а именно влияние полученных измерений на динамику развития опасных природного и техноприродного процессов, рекомендации по учету полученных результатов при строительстве, разработка дальнейшей стратегии для наблюдения за опасными процессами, зачастую полностью отсутствует.

В соответствии с требованиями федерального закона от 21.07.97 № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов (ОПО)» [2] определен перечень объектов, подлежащих экспертизе. Это проектная документация на капительный ремонт, техническое перевооружение, консервацию и ликвидацию ОПО, технические устройства, здания и сооружения, декларация промышленной безопасности, обоснование безопасности ОПО. Экспертиза промышленной безопасности предназначена для оценки соответствия объекта предъявляемым к нему требованиям промышленной

безопасности. Требования промышленной безопасности для проектной документации определяются целым комплексом федеральных норм и правил, а также нормативно-технической документацией. Одним из основных нормативных документов является СНиП 11-02-96 Инженерные изыскания для строительства [3]. В развитие его обязательных положений разработан Свод правил СП 11-104-97 [4], а именно глава 10, регламентирующая проведение инженерногеодезических изысканий в районах развития опасных природных и техноприродных процессов. Согласно главе 10 Свода правил к опасным природным и техноприродным процессам, которые исследуются при проведении инженерно-геодезических изысканий, относятся: склоновые процессы, карст, переработка берегов рек, морей, озер и водохранилищ, подвижки земной поверхности в районах разрывных тектонических смещений, деформации (смещения, наклоны) земной поверхности на подрабатываемых территориях (при подземном строительстве, откачке подземных вод, нефти, газа и т.п.) и подтопляемые территории. Опасные природные и техногенные условия территории учитываются уже на подготовительной (начальной) стадии производства работ при подготовке программы инженерно-геодезических изысканий в соответствии с требованиями технического задания заказчика. В СП 11-104-97 есть указания о том, что на стадии предпроектной документации проводятся:

геодезические работы при выполнении наблюдений по изучению опасных природных и техноприродных процессов (карст, склоновые процессы, переработка берегов рек, морей, озер и водохранилищ, подрабатываемые и подтопляемые территории);

 – геодезические наблюдения за деформациями оснований зданий и сооружений;

– специальные геодезические измерения движений земной поверхности в районах развития современных разрывных тектонических смещений при изысканиях для строительства технически особо сложных и уникальных объектов (I уровня ответственности) с высокими требованиями к микродеформациям пород оснований сооружений.

Тем не менее специалисты изыскательных организаций, а тем более заказчики работ, не всегда обладают специальными знаниями для правильной постановки задачи с указанием полного перечня работ для обеспечения промышленной безопасности проектируемого объекта. Следующей наиболее частой причиной замечаний по документации, представленной на экспертизу, является отсутствие интерпретации полученных результатов изысканий. В соответствии с требованиям СНиП 11-02-96 по результатам инженерно-геодезических изысканий в районах развития опасных природных и техноприродных процессов должен составляться технический отчет, в котором приводятся:

 – основные результаты геодезических наблюдений и характеристика динамики опасного процесса – активизация или стабилизация деформаций;

 скорость смещения деформационных геодезических знаков и изменение их положения по сезонам года (во времени) по отдельным участкам территории;

 – влияние выявленных факторов на динамику развития опасного природного и техноприродного процесса;

 – рекомендации по учету полученных результатов при проектировании, строительстве и эксплуатации предприятий, зданий и сооружений;

 предложения по дальнейшему выполнению или прекращению геодезических наблюдений (увеличение или сокращение площади наблюдений, развитие и сгущение геодезической сети и др.).

При проведении экспертизы первое из вышеуказанных положений имеется, а остальные отсутствуют. Изыскательские организации не выполняют работы по диагностике геодинамической активности и сравнению параметров геодинамических движений и деформаций с допустимыми критериями объекта в соответствии с требованиями СП 11-104-97, глава 10 [4]. Зачастую это можно объяснить отсутствием высококвалифицированного персонала для проведения необходимых камеральных работ и интерпретации полученных результатов. В настоящее время на практике для проведения особо важных работ на ответственных и опасных объектах применяется так называемая схема предэкспертизы результатов изысканий, проведенных сторонней экспертной организацией на предмет соответствия требованиям, регламентирующим эту процедуру. Уже после положительного решения предварительной экспертизы документация передается на государственную экспертизу проектной документации и результатов инженерных изысканий.

Комплексная оценка результатов инженерных изысканий современной геодинамики для опасных производственных объектов определяется законодательно, но не всегда учитывается на практике [5]. Есть много примеров нарушения объектов различного назначения, созданных без учета геодинамической безопасности. Это разрушение атомного реактора Чернобыльской АЭС (1986 г.), обрушение кровли аквапарка «Трансвааль» в Москве (2004 г.), затопление калийного рудника в г. Березники (2006 г.), авария на Саяно-Шушенской ГЭС (2009 г.) [6], разрушение моста через Транссибирскую железную дорогу в г. Екатеринбурге (2007 г.) [7]. Несмотря на то что все перечисленные аварии по официальным версиям имеют свои причины, их объединяет одна исходная причина – воздействие современных геодинамических движений, диагностирование которых предусмотрено на стадии проведения проектных работ в соответствии с требованиями нормативных документов.

#### Библиографический список

1. Каюмова А. Н. Роль экспертизы промышленной безопасности в снижении риска техногенных катастроф / А. Н. Каюмова // Геомеханика в горном деле: докл. науч.-техн. конф. с междунар. участием 1–3 октября 2013 г. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2012. – С. 240–243.

2. Федеральный закон от 21.07.97 № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов (ОПО)» (с изменениями на 02.07.13 г.) [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.ohranatruda.ru/ot biblio/normativ/5/5438/

3. СНиП 11-02-96. Инженерные изыскания для строительства / Минстрой России. – М.: ПНИИИС, 1997.

4. СП 11-104-97. Свод правил «Инженерно-геодезические изыскания для строительства». Одобрен Госстроем России 14.10.97 № 9-4/116 [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.ohranatruda.ru/ot biblio/normativ/5/5438/

5. Сашурин А.Д. Современная геодинамика и безопасность объектов недропользования // Горно-информационный бюллетень. – 2010. – №10. – С. 329–332.

6. Сашурин А. Д. Влияние земных разломов на прочностные характеристики зданий и сооружений / А. Д. Сашурин, Н. А. Панжина // Академический вестник УралНИИПроект РААСН. – № 1. – 2010. – С. 69–72.

7. Сашурин А. Д. Почему мост «опустил крылья» / А.Д. Сашурин // Технадзор. – 2009. – № 8. – С. 20–22.

# УДК 622.83:622.023.623

# ОЦЕНКА ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ ТРЕЩИННОЙ И ФИЛЬТРАЦИОННОЙ СТРАТИФИКАЦИИ СКАЛЬНЫХ МАССИВОВ

# С.Н. Тагильцев

Породные массивы в большинстве горноскладчатых регионов находятся под воздействием тектонических напряжений. Максимальное главное напряжение имеет субгоризонтальную ориентировку и в несколько раз превышает вертикальное напряжение от веса столба горных пород. Массивы горных пород чаще всего находятся в предельно напряженном состоянии, т. е. максимальные значения напряжений ограничиваются прочностными характеристиками породных массивов. Состояние предельного равновесия поддерживается разгрузкой напряжений при развитии в массивах процессов хрупкой и хрупкопластичной деформации. В результате деформации образуются тектонические структуры разрушения и предразрушения.

Массовые трещины предразрушения развиваются в приповерхностной зоне хрупкой деформации. Мощность этой зоны в скальных массивах составляет 300÷400 м. Сеть взаимосвязанных открытых трещин предразрушения формирует вблизи земной поверхности водоносный комплекс приповерхностной трещиноватости. Геомеханические закономерности развития процессов хрупкой деформации предопределяют формирование вертикальной трещинной зональности и, соответственно, фильтрационной стратификации скальных массивов.

Изменение напряженного состояния массива горных пород с глубиной описывается паспортом прочности (критерием предельного состояния) [1, 2]. Реологическое состояние скальных пород изменяется в условиях повышения всестороннего давления (смещения круга напряжений на паспорте прочности) от хрупкого состояния до пластичного. Хрупкое состояние твердых пород сохраняется в условиях одноосного сжатия или при относительно небольших значениях по сравнению с максимальным главным напряжением бокового сжатия [1].

Главной особенностью хрупкой деформации является развитие в породах в допредельном состоянии массовых трещин предразрушения. Эти трещины развиваются относительно равномерно во всем объеме материала и образуют взаимосвязанную сеть трещин. При достижении предельного состояния в зоне плоскости с максимальными касательными напряжениями происходит объединение трещин в единый разлом. Материал при этом теряет сплошность, и в ходе возникающих смещений напряжение падает ниже предельного.

Предельное состояние материала на этапе хрупкой деформации может быть описано линейным критерием предельного состояния – законом Кулона – Мора. Линейный критерий предельно напряженно-го состояния (ЛК ПНС) удобно применять в следующем виде [3, 4]:

$$\sigma_1 = R_c + \sigma'_3 / \lambda, \tag{1}$$

где  $\sigma_1$  – максимальное главное напряжение;  $\sigma'_3$  – минимальное (деформационное) главное напряжение;  $R_c$  – предел прочности на сжатие;  $\lambda$  – коэффициент бокового отпора.

Участок паспорта прочности, описываемый ЛК ПНС, ограничивается пределами применимости [3]. Верхний предел (ВП) соответствует границе развития хрупкой деформации (рис. 1). В качестве расчетного параметра, определяющего ВП, применяется величина  $R_{п}$ .



Рис. 1. Характерные точки паспорта прочности

Аналитическая зависимость, связывающая параметры  $R_c$  и  $R_n$ , выведена в работе [5]:

$$R_{\rm c}/R_{\rm m} = 1 - \lambda. \tag{2}$$

В той же работе подтверждена правильность выражения

$$\lambda = tg^2(\pi/4 - \varphi/2). \tag{3}$$

Нижний предел ЛК ПНС определяется переходом вида разрушения от скола к разрыву. Нижний предел (НП) соответствует на паспорте прочности точке, где sh = 0, и реализуется при условии одноосного сжатия [3–5]. Пределы прочности на разрыв (Rp), одноосное сжатие (ROC) и сжатие (Rc) связаны зависимостью

$$R_{\rm p} = -\lambda R_{\rm oc} = -\lambda R_{\rm c}/2. \tag{4}$$

На линейном участке паспорта прочности, кроме точек, соответствующих упомянутым пределам применимости, которые можно обозначить Р и П, необходимо выделить характерную точку С ( $\sigma_1 = R_c$ ).

При описании геомеханических процессов в верхней части земной коры удобно использовать зависимости, где участвует значение глубины от поверхности земли (H). Характерным точкам паспорта прочности (P, П, C) будут соответствовать характерные глубины  $H_{\rm p}$ ,  $H_{\rm n}$ ,  $H_{\rm c}$ .

Опираясь на линейный закон предельного состояния, можно аналитически описать напряженное состояние верхней части земной коры. В рамках общих представлений следует считать, что главное максимальное сжимающее напряжение ( $\sigma_1$ ) ориентировано горизонтально, а минимальное эффективное (деформационное) напряжение ( $\sigma'_3$ ) в пределах определенного приповерхностного слоя имеет вертикальную ориентировку.

В породном массиве действует активная вертикальная сила – вес столба горных пород. В условиях предельного напряженного состояния эффективное вертикальное напряжение (минимальное главное напряжение) складывается из веса горных пород и предела прочности на разрыв [3]:

$$\sigma'_3 = \gamma H + R_{\rm p},\tag{5}$$

где ү – удельный вес горных пород.

Из выражения (6) следует, что если  $\sigma'_3 = R_p$ , то  $H_p = 0$ , т. е. нижний предел применимости ЛК ПНС реализуется на поверхности земли.

Решая уравнение (1) совместно с выражениями (4, 5), получим

$$\sigma_1 = R_{\rm oc} + \gamma H/\lambda. \tag{6}$$

Последнее уравнение описывает зависимость  $\sigma_1$  от глубины (*H*) в условиях предельно напряженного состояния, т. е. является преобразованной формой записи линейного критерия Кулона – Мора. Следовательно, характерным точкам паспорта прочности соответствуют определенные характерные глубины.

Из уравнения (5) следует, что на определенной глубине  $H_c$  (при  $\sigma_1 = R_c$ ) должно выполняться условие  $\sigma'_3 = 0$ , т. е.

$$R_{\rm P} = -\gamma H_{\rm c} \,. \tag{7}$$

Учитывая зависимость (4), получим

$$R_{\rm oc} = \gamma H_{\rm c} / \lambda. \tag{8}$$

Во многих случаях удобнее оперировать понятиями относительной глубины

$$\overline{H} = H/H_{\rm c} \tag{9}$$

и относительного напряжения

$$\overline{\sigma}_1 = \sigma_1 / R_c \,. \tag{10}$$

Исходя из уравнений (6-10) получим

$$\overline{\sigma}_1 = (1 + \overline{H})/2. \tag{11}$$

Если  $\overline{\sigma}_1 = \overline{R}_{\Pi}$ , а  $\overline{H} = \overline{H}_{\Pi}$ , то

$$\overline{R}_{\rm m} = (1 + \overline{H}_{\rm m})/2, \tag{12}$$

$$\overline{H}_{\rm n} = 2\overline{R}_{\rm n} - 1. \tag{13}$$

Заменяя  $\overline{R}_n$  в последнем выражении с помощью зависимости (2), получим

$$\lambda = (\overline{H}_{\Pi} - 1)/(\overline{H}_{\Pi} + 1). \tag{14}$$

Развитие массовых допредельных трещин происходит от поверхности земли до глубины  $H_{\rm n}$  (рис. 2). Интенсивность трещиноватости нарастает к поверхности земли, но не равномерно, а в соответствии с рядом геомеханических закономерностей. Эти закономерности требуют отдельного детального рассмотрения.

Одна из главных особенностей такова: в интервале глубин, находящихся вблизи характерной глубины  $H_c$ , происходит заметное уменьшение интенсивности трещиноватости. Согласно закону Гука, на глубине  $H_c$  должно наблюдаться существенное снижение количества открытых трещин, так как эффективное (деформационное) минимальное напряжение равно нулю ( $\sigma'_3 = 0$ ).

На основании тщательной инженерно-геологической документации скважин можно определить значения характерных глубин  $H_c$ и  $H_{\pi}$ . Характерные глубины достаточно контрастно выделяются на зависимости количества трещин от глубины (см. рис. 2).

Во многих случаях удобнее изучать вертикальную фильтрационную зональность скального массива [4]. Мощность водоносного комплекса приповерхностной трещиноватости ( $H_n$ ) хорошо выявляется на основании данных фильтрационных опробований. Значение характерной глубины  $H_c$  определяется по положению относительного водоупорного горизонта, разделяющего водоносный комплекс [4].

При наличии значений  $\hat{H}_{n}$  и  $H_{c}$  последовательность расчета геомеханических параметров массива может быть представлена в виде ряда последовательных операций:

$$H_{\Pi} = H_{\Pi}/H_{c};$$



Рис. 2. Изменение трещиноватости по глубине. Обобщенная экспериментально-теоретическая зависимость

2. Определяется значение параметра l на основании зависимости (14):

$$\lambda = (\overline{H}_{\rm n} - 1)/(\overline{H}_{\rm n} + 1).$$

3. Рассчитывается значение параметра ф на основании уравнения

$$\lambda = tg^2(\pi/4 - \phi/2).$$

4. Рассчитываются пределы прочности массива (7) и (8):

$$R_{\rm oc} = \gamma H_{\rm c} / \lambda,$$
  
 $R_{\rm p} = \gamma H_{\rm c}.$ 

Значения параметров  $\lambda$  и  $\overline{H}_{\rm n} = H_{\rm n}/H_{\rm c}$  представлены в таблице. В скальных массивах значение угла внутреннего трения обычно варьирует от 30° (известняки) до 40° (кислые породы). Соответственно, соотношение  $\overline{H}_{\rm n} = H_{\rm n}/H_{\rm c}$  обычно находится в пределах от 1,5 до 2,0.

ф, град	10	20	30	40	45
λ	0,7	0,5	0,33	0,22	0,17
$\overline{H}_{\Pi}$	5,7	2,9	2,0	1,6	1,4

Значения расчетных характеристик

Изложенная методика определения геомеханических параметров скальных массивов была применена и проверена на некоторых месторождениях полезных ископаемых Урала, для которых имеются необходимые исходные материалы. В массивах известняков значение  $H_{\rm n}$  составляет 300÷350 м, а  $H_{\rm c}$  варьирует от 150 до 200 м. Значение параметра  $\phi = 30\div33^{\circ}$ . В скальных массивах, сложенных преимущественно вулканогенными породами среднего и кислого состава, значения  $H_{\rm n}$  составляют около 400 м, а величины  $H_{\rm c}$  от 200 до 260 м. Значение угла внутреннего трения  $\phi = 35\div40^{\circ}$ . Значение пределов прочности на сжатие и разрыв составляют, соответственно, первые десятки и единицы МПа. Анализ полученных результатов заставляет считать, что описанная методика дает возможность получить достоверные значения геомеханических параметров скальных массивов.

Таким образом, опираясь на представления о геомеханических закономерностях строения и состояния верхней части земной коры, а также используя соответствующие аналитические зависимости, можно рассчитывать достоверные значения геомеханических параметров породных массивов. При использовании рассмотренной методики важное значение приобретают полевые методы изучения вертикальной трещинной и фильтрационной зональности массивов скальных горных пород.

#### Библиографический список

1. Николаевский В. Н. Механика пористых и трещиноватых сред / В. Н. Николаевский. – М.: Недра, 1984. – 232 с.

2. Петухов И.М. Геодинамика недр / И.М. Петухов, И.М. Батугина. – М.: Недра, 1996. – 217 с.

3. Тагильцев С. Н. Основы гидрогеомеханики скальных массивов: уч. пособ. / С. Н. Тагильцев. – Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2003. – 88 с.

4. Тагильцев С. Н. Деформационный критерий предельно напряженного состояния скальных массивов / С. Н. Тагильцев // Изв. вузов. Горный журнал. – № 1. – 2004. – С. 3–8.

5. Тагильцев С. Н. Пределы линеаризации закона Кулона – Мора при расчетах НДС массивов горных пород / С. Н. Тагильцев // Материалы X Межотраслевого координационного совещания по проблемам геодинамической безопасности. – Екатеринбург: УГГА, 1997. – С. 212–217.

УДК 622.831:517.938

# ЭВОЛЮЦИЯ ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

С. Н. Савченко

Изменение во времени динамической системы, определяемое двумя ведущими параметрами, может быть описано системой дифференциальных уравнений

$$\frac{dN}{dt} = \varphi_1(t)N + \varphi_2(t)S, \\
\frac{dS}{dt} = \varphi_3(t)N + \varphi_4(t)S$$
(1)

где t – время, S, N – величины, характеризующие взаимодействующие явления, которые мы будем называть параметрами,  $\varphi_i$  – коэффициенты, которые могут быть как постоянными, так и зависящими от времени.

В случае постоянных коэффициентов решения системы (1) достаточно хорошо изучены [1, 2]. Система однородных дифференциальных уравнений (1) описывает эволюцию самоорганизующейся динамической системы. Решением системы (1) являются выражения

$$N = \exp\left(\int \left(\phi_1 + \frac{\phi_2}{\psi}\right) dt + C_1\right),$$

$$S = \exp\left(\int \left(\phi_3 \psi + \phi_4\right) dt + C_2\right),$$
(2)

где постоянные интегрирования  $C_1$  и  $C_2$  определяются из начальных условий, а функция  $\psi(t) = N(t)/S(t)$  должна удовлетворять уравнению Риккати

$$\frac{d\Psi}{dt} = -\varphi_3 \Psi^2 + (\varphi_1 - \varphi_4) \Psi + \varphi_2, \qquad (3)$$

это уравнение в общем виде не разрешимо в квадратурах. Как будет показано ниже, для получения частного решения этого уравнения необходимо удовлетворить некоторому условию, осуществляющему взаимосвязь между функциями  $\phi_1$ ,  $\phi_2$ ,  $\phi_3$ ,  $\phi_4$ , которое с математической точки зрения является условием совместности системы (1). По существу же, т.е. с физической точки зрения, эта взаимосвязь есть не что иное, как отражение прямой и обратной связи между параметрами динамической системы. Рассмотрим несколько частных случаев.

**Пример 1.** Пусть  $\phi_1 = \phi_4$ ,  $\phi_2 = \phi_3$ . Система (1) принимает вид

$$\frac{dN}{dt} = \varphi_1 N + \varphi_2 S, 
\frac{dS}{dt} = \varphi_1 S + \varphi_2 N$$
(4)

Решение этой системы представляется следующим образом:

$$N = [N_0 ch(\Phi) + S_0 sh(\Phi)] \exp\left(\int \varphi_1 dt\right),$$
  

$$S = [N_0 sh(\Phi) + S_0 ch(\Phi)] \exp\left(\int \varphi_1 dt\right),$$
(5)

где  $\Phi = \int \varphi_2 dt$ ,  $ch(\Phi)$  и  $sh(\Phi)$  – гиперболические косинус и синус соответствующего аргумента. Полагая, к примеру, в (4)  $\varphi_1 = \frac{2}{(t^2 - t_0^2)}$ ,  $\varphi_2 = \sin^2 t$ , получаем решение

$$N = \frac{|t - t_0|}{|t + t_0|} [N_0 ch\Phi + S_0 sh\Phi],$$
  

$$S = \frac{|t - t_0|}{|t + t_0|} [N_0 sh\Phi + S_0 ch\Phi],$$
(6)

где  $\Phi = \int \sin^2 t dt = \frac{t}{2} - \frac{\sin^2 t}{4}$ . Для конкретности расчета зависимости (6) возьмем  $t_0 = 8$ ;  $N_0 = 1$ ;  $S_0 = 0,5$  (рис. 1). Из этого рисунка видно, что при стремлении к  $t_0$  слева значения параметров N(t) и S(t) стремятся к нулю, а затем резко возрастают. Такой характер изменения параметров N(t) и S(t) аналогичен изменению сейсмичности и деформированию геологической среды перед техногенным землетрясением, или горным ударом, а время  $t_0$  – моменту подготовки динамического события. Фундаментальным свойством эволюции является наличие зон затишья перед катастрофическим событием [3].

**Пример 2.** Пусть  $\phi_2 = 0$ , тогда система (1) принимает вид

$$\frac{dN}{dt} = \varphi_1 N,$$

$$\frac{dS}{dt} = \varphi_3 N + \varphi_4 S$$
(7)

Из первого уравнения (7) получаем решение для *N*, подставив которое во второе уравнение, имеем линейное неоднородное урав-


нение  $\frac{dS}{dt} - \varphi_4 S = N_0 \varphi_3 \exp\left(\int \varphi_1 dt\right)$ , следовательно, решение системы (7) запишется так:

$$N = N_0 \exp\left(\int \varphi_1 dt\right),$$
  

$$S = \exp\left(\int \varphi_4 dt\right) + \left\{S_0 + N_0 \int \varphi_3 \exp\left(\int (\varphi_1 - \varphi_4) dt\right) dt\right\}.$$
(8)

Для конкретности расчета полагаем  $\phi_1 = \cos t$ ;  $\phi_3 = \cos 2t$ ;  $\phi_4 = \cos t + 0,1$ ; тогда (8) принимает следующий вид:

$$N = N_0 \exp(\sin t),$$
  

$$S = \exp(\sin t + 0.1t) \left\{ S_0 + N_0 \left[ \frac{e^{-0.1t} (2\sin 2t - 0.1\cos 2t)}{4.01} \right] \right\}.$$

На рис. 2 приведены графики этих зависимостей для начальных значений  $S_0 = N_0 = 1$ . Этот пример описывает движение колеблющейся динамической системы, причем параметр *S* оказывается резонирующим.

**Пример 3.** Полагаем  $\phi_1 = 0$ , тогда система (1) приобретает вид:

$$\frac{dN}{dt} = \varphi_2 S,$$

$$\frac{dS}{dt} = \varphi_3 N + \varphi_4 S$$
(9)



Отсюда  $S = \frac{1}{\varphi_2} \frac{dN}{dt}; \quad \frac{dS}{dt} = \frac{1}{\varphi_2} \left( \frac{d^2N}{dt^2} - \frac{d\varphi_2}{\varphi_2 dt} S \right).$  С учетом этого

второе уравнение системы (9) представляется следующим образом:

$$\frac{d^2N}{dt^2} = A(t)\frac{dN}{dt} + B(t)N,$$
(10)

где  $A(t) = \varphi_4 + \frac{1}{\varphi_2} \frac{d\varphi_2}{dt}$ ;  $B(t) = \varphi_2 \varphi_3$ . Полагая B(t) = dA/dt, что равносильно условию взаимосвязи функций  $\varphi_2 \varphi_3 = \frac{d\varphi_4}{dt} + \frac{1}{\varphi_2} \cdot \frac{d^2 \varphi_2}{dt^2} - \frac{1}{\varphi_2^2} \left(\frac{d\varphi_2}{dt}\right)^2$ , получаем решение системы (9) в следующем виде:

$$N = N_0 \exp\left(\int A dt\right),$$
  

$$S = S_0 + \frac{AN_0}{\varphi_2} \exp\left(\int A dt\right).$$
(11)

Пусть для конкретности расчетов по формулам (11)  $\varphi_2 = \frac{t}{\sin^2 t}$ ,  $\varphi_4 = \frac{0.01}{\cos^2 t} - \frac{1}{t} + \frac{2\cos t}{\sin t}$ , тогда решение (11) представится в следующем виде:

$$N = N_0 \exp(0.1t \cdot tgt + \ln|\cos t|),$$
  

$$S = S_0 + 0.01N_0 tg^2 t \exp(0.01t \cdot tgt + \ln|\cos t|).$$
(12)

На рис. 3 приведены графики этих зависимостей с начальными значениями  $S_0 = N_0 = 1$ , где график 1 показывает изменение во вре-



мени параметра N, а график 2 – параметра S. В моменты времени  $t_1, t_2, t_3$ , динамическая система находится в состоянии обострения. Очевидно, что такой (или аналогичный) характер изменения параметров N и S можно наблюдать в геологической среде в моменты зарождения и развития трещин в результате внешнего силового воздействия, если трактовать параметры как накопление и диссипацию внутренней энергии и деформирование массива горных пород в некотором объеме.

Пусть  $\varphi_1 \neq \varphi_4, \varphi_2 \neq 0, \varphi_3 \neq 0$ . Введем обозначение  $\mu(t) = \int (\varphi_4 - \varphi_1) dt$ , тогда выражение

$$\psi(t) = e^{-\mu} \sqrt{\int \phi_2 e^{\mu} dt} / \sqrt{\int \phi_3 e^{-\mu} dt}$$
(13)

является частным решением уравнения Риккати (3), в чем нетрудно убедиться при непосредственном дифференцировании (13). При этом должно быть соблюдено условие

$$1 = 2\sqrt{\int \varphi_2 e^{\mu} dt} \sqrt{\int \varphi_3 e^{-\mu} dt}$$
(14)

В соответствии с этим решение исходной системы уравнений (1) таково:

$$N = N_0 \sqrt{\int \varphi_2 e^{\mu} dt} \exp\left(\int \varphi_1 dt\right),$$
  

$$S = S_0 \sqrt{\int \varphi_3 e^{-\mu} dt} \exp\left(\int \varphi_4 dt\right).$$
(15)

Если функции  $\varphi_2(t)$  и  $\varphi_3(t)$  произвольны, то выражение (13) не будет удовлетворять уравнению Риккати, а (15) не будет являться решением системы (1).

**Пример 4.** Пусть 
$$\varphi_1 = \frac{k}{\tau - t}; \varphi_2 = \frac{n}{\tau - t}; \varphi_4 = \frac{m}{\tau - t},$$
где  $\tau$  – время обострения,  $t < \tau$ . Решение (15) представится в виде  $N = N_0 \left| \frac{\tau}{\tau - t} \right|^{\frac{m+k}{2}};$   
 $S = S_0 \left| \frac{\tau}{\tau - t} \right|^{\frac{m+k}{2}}.$  При этом  $\varphi_3 = \frac{(m - k)^2}{4n(t - \tau)},$  $\psi = \frac{2n}{m - k} = \text{const.}$  Для кон-  
кретности расчетов полагаем  $k = 0.5;$  $m = 1;$  $n = 0.5;$  $\tau = 10.$  Вы-  
ражения для значений параметров следующие:  $N = N_0 \left( \frac{10}{10 - t} \right)^{3/4};$   
 $S = S_0 \left( \frac{10}{10 - t} \right)^{3/4}.$  Для принятых значений  $k, m, n$  получаем  $\psi = 2,$ 

следовательно, в качестве начальных условий необходимо положить  $N_0 = 2, S_0 = 1$ . На рис. 4 приведены графики этих зависимостей. Такая взаимосвязь параметров N и S может наблюдаться, например, в геологической среде, когда в результате тектонических процессов в земной коре со временем накапливаются нарушения сплошности, сопровождаемые некоторыми относительными подвижками блоков с выделением определенного количества сейсмической энергии. С течением времени нарушения, соединяясь, увеличиваются в размерах. В некоторый момент времени этот процесс становится лавиноподобным и происходит сильное землетрясение с выделением большого количества энергии и образованием значительных разрывов земной коры.

Выражение (14) не является единственным условием совместности системы (1), т. е. уравнение Риккати (3) может иметь и другие частные решения. Все зависит от того, какая установлена (существует) взаимосвязь между функциями  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$ ,  $\varphi_4$ . Например, полагая

$$(\varphi_1 - \varphi_4) = \varphi_3 \psi \tag{16}$$

и учитывая (3), получаем  $\varphi_2 = \frac{(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_4)\varphi_3 - (\varphi_1 - \varphi_4)\dot{\varphi}_3}{\varphi_3^2}$ , где точка над функцией означает дифференцирование по времени. Отсюда следует, что  $\frac{\varphi_2}{\psi} = \frac{\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_4}{\varphi_1 - \varphi_4} - \frac{\dot{\varphi}_3}{\varphi_3}$ , и тогда имеем  $N = N_0 \exp\left[\int \varphi_1 dt\right] \frac{|\varphi_1 - \varphi_4|}{\varphi_3}$ , (17)  $S = S_0 \exp\left[\int \varphi_1 dt\right]$ .



184

Уравнение Риккати (3) при замене переменной  $\psi = \frac{\dot{u}}{\varphi_3 u}$  сводится к однородному уравнению второго порядка  $\frac{d^2 u}{dt^2} + A \frac{du}{dt} + Bu = 0$ , где  $A = \varphi_4 - \varphi_1 - \frac{\dot{\varphi}_3}{\varphi_3}, B = \varphi_2 \varphi_3$ . Если потребовать  $B = \frac{dA}{dt}$ , что равносильно условию  $\varphi_2 = \frac{\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_4}{\varphi_3} + \frac{\ddot{\varphi}_3}{\varphi_3^2} - \frac{\dot{\varphi}_3^2}{\varphi_3^3}$ , то получим  $\frac{d}{dt} \left( \frac{du}{dt} \right) = -\frac{d}{dt} (Au)$ . Отсюда имеем  $u = \exp\left(-\int A dt\right)$ . После подстановки в исходное представление функции  $\psi$  получаем  $\psi = \frac{\varphi_1 - \varphi_4}{\varphi_3} + \frac{\dot{\varphi}_3}{\varphi_3^2}$ . Решение системы

уравнений (1) в этом случае таково:

$$S = S_{0} |\varphi_{3}| \exp\left(\int \varphi_{1} dt\right),$$

$$N = N_{0} \left|\varphi_{1} - \varphi_{4} + \frac{\dot{\varphi}_{3}}{\varphi_{3}}\right| \exp\left(\int \varphi_{1} dt\right),$$
(18)

На рис. 5 приведены графики зависимостей параметра *S* для системы (1), где  $\varphi_1 = \cos t$ ,  $\varphi_3 = \frac{1}{t - t_0}$ ,  $\varphi_4 = \frac{-1}{t + t_0} + \cos t$ , рассчитанные



Рис. 5. Различные варианты эволюции двухпараметрической динамической системы при одинаковых исходных функциях и с различными связями между ними: 1 – параметр S<sub>1</sub>, 2 – параметр S<sub>2</sub>, 3 – параметр S<sub>3</sub> по формулам (17) – график I, (18) – график 2 и (15) – график 3, где  $t_0$  – некоторый момент времени, для конкретности расчетов полагаем его равным 5. Аналогично выглядят и графики для параметра N.

Анализ этих рисунков свидетельствует о том, что даже при одних и тех же функциях, входящих в (1), эволюция двухпараметрической динамической системы может происходить по любому сценарию не только потому, что в уравнения (1) могут входить различные функции  $\phi_1$ ,  $\phi_2$ ,  $\phi_3$ ,  $\phi_4$ , но и от того, какова взаимосвязь между этими функциями, определяемая решением уравнения Риккати, которое имеет бесконечное число частных решений. Достаточно в какой-то момент времени хотя бы одной из функций по каким-либо внешним причинам изменить свой вид (что равносильно нарушению прежней их взаимосвязи), так сразу же изменится сценарий дальнейшей эволюции параметров.

Таким образом: 1. Взаимосвязь двух явлений, изменяющихся во времени, определяется решением системы дифференциальных уравнений первого порядка с постоянными, или непостоянными, коэффициентами. 2. Решение системы уравнений с непостоянными коэффициентами сводится к определению функции, которая должна удовлетворять уравнению Риккати. Для получения частного решения уравнения Риккати необходимо соблюсти условие, осуществляющее взаимосвязь между функциями – коэффициентами системы дифференциальных уравнений. Эта взаимосвязь с математической точки зрения является условием совместности системы дифференциальных уравнений, а физический смысл ее есть отражение прямой и обратной связи параметров динамической системы. 3. Эволюция двухпараметрической динамической системы в случае описания ее системой дифференциальных уравнений с непостоянными коэффициентами зависит не только от вида исходных функций, но и от их взаимосвязи.

### Библиографический список

1. Степанов В.В. Курс дифференциальных уравнений / В.В. Степанов. – М.: Физматгиз, 1958. – 468 с.

2. Эльсгольц Л. Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление / Л. Э. Эльсгольц. – М.: Наука, 1969. – 424 с.

3. Особенности эволюции горного массива вблизи катастрофического события / П. В. Макаров и др. // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках. – Симферополь: Таврич. нац. ун-т, 2010. – С. 230–235.

## КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ПОРОД ПРИКОНТУРНОГО МАССИВА В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ Геологической аномалии

### В. А. Асанов, В. Н. Токсаров, Н. Л. Бельтюков

Основными задачами при освоении Верхнекамского месторождения калийных солей являются защита рудников от затопления подземными водами, а также охрана подрабатываемых объектов. Безопасные условия ведения горных работ достигаются применением камерной системы разработки с оставлением поддерживающих междукамерных целиков, которые обеспечивают сохранность водозащитной толщи пород (B3T) между кровлей верхнего отрабатываемого пласта и почвой водоносного горизонта в течение всего срока службы рудника. Параметры системы разработки выбираются таким образом, чтобы оседания подработанной толщи происходили плавно, без нарушения сплошности В3T, что требует своевременной и достоверной оценки механических свойств и напряженного состояния породного массива на потенциально опасных участках.

С целью контроля состояния приконтурного массива был разработан аппаратурный комплекс на базе гидродомкрата Гудмана и прибора регистрации сигналов акустической эмиссии [1]. Состав комплекса (рис. 1): *1* – гидродомкрат Гудмана «Durham Geo Slope



Рис. 1. Аппаратурный комплекс для определения напряжений и деформационных свойств горных пород в натурных условиях Indicator»; 2 – высоконапорные шланги; 3 – датчик давления «Метран-55»; 4 – регистратор давления «Метран-901»; 5 – гидравлический насос «Энерпред Р-84»; 6 – регистратор деформаций стенок скважины; 7 – предусилитель импульсов АЭ; 8 – блок регистрации АЭ «AEC-USB-1»; 9 – защищенный ноутбук.

Гидродомкрат Гудмана представляет собой каротажный зонд, предназначенный для оценки деформационных свойств горных пород в скважинах диаметром 76 мм посредством измерения деформаций ее контура под действием нагрузки, приложенной в одной плоскости за счет стальных подвижных пластин. Контроль деформаций стенок скважины осуществляется двумя индуктивными датчиками перемещения на концах гидродомкрата с величиной максимального смещения 11,4 мм. Внутри зонда расположен ряд гидроцилиндров, которые развивают давление до 70 МПа. Благодаря особой конструкции коэффициент передачи давления составляет 0,93.

В процессе проведения натурных испытаний гидродомкратом на первом этапе осуществляется бурение скважины в горной выработке. Затем в каждой точке по всей длине скважины проводятся 2–3 цикла нагружения ее стенок в режиме нагрузка – разгрузка с амплитудой 15–25 МПа. Измерения проводятся либо в вертикальном, либо в горизонтальном направлении с шагом 300 мм в целях исключения взаимного влияния нагруженных участков.

По результатам экспериментов строятся графики зависимости изменения диаметра скважины от давления, развиваемого гидродомкратом (рис. 2). На диаграммах деформирования стенок скважины выделяются три характерных стадии. На первой стадии происходит расширение гидродомкрата до соприкосновения нажимных пластин со стенкой скважины (участок 0А). Вторая стадия приурочена к пе-



Рис. 2. Типичная диаграмма деформирования соляных пород при нагружении стенок скважины

ремятию домкратом неровностей стенок скважины (участок AB). Третья стадия соответствует полному контакту нажимных пластин со стенками скважины (участок BC).

Модуль деформации рассчитывается по касательной, проведенной к нагрузочной части кривой деформирования на участке полного контакта нажимных пластин со стенками скважины по формуле [2]

$$D = 0.86 \times \frac{\Delta Q}{(\Delta \varepsilon_d / d)} \times T,$$

где  $\Delta Q$  – изменение эффективного давления на стенки скважины; d – диаметр скважины;  $\Delta \varepsilon_d$  – изменение абсолютной деформации стенок скважины; T – коэффициент, зависящий от коэффициента Пуассона. Модуль упругости рассчитывается аналогично по разгрузочной части диаграммы деформирования.

Анализ работ [3, 4, 5], посвященных изучению напряженно-деформированного состояния соляных массивов, показал, что измерения напряжений производились, в основном, методами полной разгрузки. Использование данных методов для оценки напряжений в соляных породах, характеризующихся крупнозернистой структурой и тонкослоистой текстурой, когда размеры зерен (0,5–30,0 мм) сопоставимы с размерами тензодатчиков, приводит к большому разбросу частных значений и погрешностям. Существенная нелинейность деформирования соляных пород под нагрузкой также повышает погрешности определения при переходе от измеренных деформаций к



Рис. 3. Зависимости суммарного количества импульсов АЭ (*a*) и активности АЭ (*б*) от нагрузки при нагружении образца каменной соли

напряжениям. Кроме того методы полной разгрузки характеризуются высокой трудоемкостью и низкой оперативностью, что затрудняет их использование при массовых измерениях.

Повышение достоверности и оперативности оценки напряженного состояния соляного массива может быть достигнуто за счет применения методов контроля, исключающих необходимость модельного перехода от деформаций к напряжениям. Одним из направлений развития таких методов является использование акустоэмиссионного эффекта памяти (эффекта Кайзера) в горных породах при оценке напряжений [6, 7]. Эффект Кайзера заключается в отсутствии сигналов акустической эмиссии (АЭ) при нагружении горной породы вплоть до максимального напряжения, действовавшего на породу в предыдущем цикле, при достижении которого параметры АЭ скачкообразно возрастают (рис. 3). В качестве таких параметров могут выступать активность АЭ (количество импульсов в единицу времени), суммарное количество импульсов, интенсивность или *b*-параметр [8]. Способность горных пород сохранять информацию о нагрузках,

Способность горных пород сохранять информацию о нагрузках, действовавших в прошлом, легла в основу метода контроля напряженного состояния породного массива в натурных условиях [8]. Сущность данного метода заключается в следующем. При проведении измерений первоначально производится локальная разгрузка участка массива в результате бурения скважины. Затем осуществляется восстановление исходного напряженного состояния путем нагружения стенок скважины гидродомкратом с одновременной регистрацией импульсов АЭ (рис. 4). По резкому увеличению параметров АЭ (суммарное количество импульсов, количество импульсов в единицу времени и т. д.) можно судить о достижении породами напряженного состояния, в котором они находились до разгрузки.



Рис. 4. Схема проведения эксперимента по измерению напряжений в приконтурном массиве: *1* – нагружающее устройство (гидродомкрат или прессиометр); 2 – прибор для регистрации деформаций стенок скважины; *3* – высоконапорные шланги; *4* – манометр; *5* – ручной насос

Одноосное нагружение стенок скважины гидродомкратом в различных направлениях позволяет оценить уровень вертикальных и горизонтальных напряжений, действующих в плоскости ее поперечного сечения, в то время как прессиометр создает равностороннее давление на стенки скважины. В последнем случае можно судить лишь о некоторой сложной комбинации вертикальных и горизонтальных напряжений.

Для приема импульсов акустической эмиссии на гидродомкрате установлен пьезокерамический датчик с частотным диапазоном 0,2–0,5 МГц. По графикам временных зависимостей параметров АЭ определяют момент резкого скачка значений и соответствующую ему величину давления гидродомкрата на стенки скважины, которая численно равна напряжению, действующему в данном направлении оси нагружения (рис. 5).

В качестве практической реализации предложенного метода контроля состояния приконтурного массива ниже представлены результаты исследований по оценке влияния аномальных особенностей строения ВЗТ на механические свойства соляных пород. Экспериментальные работы производились на панели 12 рудника СКРУ-3 ОАО «Уралкалий». При проведении горноподготовительных работ в северо-западной части данной панели были встречены открытые трещины в пласте АБ. Данные трещины являются продолжением обширной зоны трещиноватости, вскрытой и достаточно хорошо изученной на панели 4. Данный участок отнесен к геологической аномалии I группы с введением ограничений на параметры системы разработки [9].

С целью сравнения деформационных параметров соляных пород и напряжений в зоне влияния геологической аномалии, приуроченной к району открытой трещиноватости соляных пород пласта АБ,



Рис. 5. Характерные временные графики зависимости активности АЭ и давления

со значениями данных параметров на участке, где аномальные особенности строения ВЗТ отсутствуют, был проведен комплекс скважинных измерений с использованием гидродомкрата Гудмана. Исследования выполнялись в 5 скважинах глубиной 3 м на панельном транспортном штреке, пройденном по пласту КрII. В зоне влияния аномального строения ВЗТ I группы было пробурено 2 скважины, остальные 3 скважины – в районе, расположенном вне зоны влияния геологических аномалий. На рис. 6 и рис. 7 представлены графики изменения средних значений деформационных параметров и вертикальных напряжений, соответственно, с увеличением расстояния от контура выработки.

По результатам скважинных исследований деформационных свойств пород пласта КрII установлено, что модуль деформации на обоих экспериментальных участках изменяется в диапазоне 1,5–1,9 ГПа. Максимумы значений в зоне влияния аномалии I группы установлены на глубине 0,9 и 2,2 м (рис. 6, *a*). Распределение фоновых значений модуля деформации характеризуется локальным возмущением с экстремумом на глубине 1,5 м.

Модуль упругости соляных пород вблизи контура выработки (глубина 0,3 м) на обоих экспериментальных участках принимает повышенные значения (рис. 6,  $\delta$ ). Максимум локального возмущения фоновых значений находится на глубине 1,5 м и совпадает с возмущением модуля деформации, что свидетельствует о наличии на данной глубине зоны опорного давления. В зоне аномального строения ВЗТ также наблюдаются два локальных максимума, которые совпа-



Рис. 6. Характер распределения средних значений деформационных параметров соляных пород пласта КрII с удалением от контура выработки: *а* – модуль деформации; *б* – модуль упругости

дают по глубине с экстремумами модуля деформации: первый – на глубине 0,9 м, второй – на глубине 2,4 м. Первый максимум можно соотнести с зоной действия опорного давления, об этом свидетельствуют резкие перепады значений деформационных показателей в данной области, а также их высокие абсолютные величины. Второй максимум относительно небольшой по величине и характеризуется плавным изменением деформационных параметров, что говорит о возможном наличии в данной области пород, обладающих более жесткими деформационными свойствами.

Анализ результатов оценки напряженного состояния приконтурного массива на участках различного строения ВЗТ показал, что вертикальные напряжения, действующие в зоне влияния геологической аномалии, меньше фоновых значений (см. рис. 7). Максимум опор-



Рис. 7. Характер распределения средних значений вертикальных напряжений в приконтурном массиве соляных пород пласта КрII с удалением от стенки выработки

ного давления расположен на глубине 0,6 м от контура выработки и составляет 13,1 МПа. Наибольшее значение вертикальных напряжений фона установлено на глубине 1,2 м и составляет 18,7 МПа. С увеличением расстояния от стенки выработки напряжения на данном участке снижаются до уровня 7,3 МПа, что примерно соответствует величине  $\gamma H$ .

Таким образом, в результате выполненных исследований разработана методика комплексной оценки геомеханического состояния приконтурной части породного массива, определены деформационные свойства пород и напряжения в приконтурном слое пород в зоне влияния открытых трещин.

#### Библиографический список

1. Опыт изучения акустоэмиссионных эффектов памяти в соляных породах с использованием скважинного гидродомкрата Гудмана / В. А. Асанов и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 10.

2. Heuze F. E. Plate-Bearing and Borehole-Jack Tests in Rock: A Finite Element Analysis / F. E. Heuze, A. Salem // Proceedings 17<sup>th</sup> Symposium on Rock Mechanics, Salt Lake City, Utah, August 25-27, 1976.

3. Борейко Ф.И. О некоторых особенностях применения метода разгрузки на соляных месторождениях / Ф.И. Борейко, А.К. Черников // Измерение напряжений в массиве горных пород. – Новосибирск: ИГД СО РАН, 1972. – С. 111–113.

4. Габдрахимов И. Х. Исследование напряженности целиков методом разгрузки / И. Х. Габдрахимов, Г. А. Лапин // Горный журнал. – 1967. – № 5. – С. 54–56.

5. Некоторые методические вопросы и результаты определения напряжений в калийных рудниках методом разгрузки / Н. М. Проскуряков и др. // Напряженное состояние породных массивов. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1978. – С. 20 – 27.

6. Оценка напряженного состояния массива на основе эмиссионных эффектов памяти горных пород околоскважинного пространства / В.С. Ямщиков и др. // ФТПРПИ. – 1991. – № 2. – С. 26 – 29.

7. Токсаров В. Н. Определение исходных напряжений в соляном массиве по образцам керна / В.Н. Токсаров // Проблемы горного недроведения и системологии: материалы науч. сессии Горного ин-та УрО РАН. – Пермь, 1999. – С. 66 – 68.

 Лавров А. В. Акустоэмиссионный эффект памяти в горных породах / А. В. Лавров, В. Л. Шкуратник, Ю. Л. Филимонов. – М.: Изд-во МГГУ, 2004. – 456 с.

9. Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей (технологический регламент). – СПб.: ВНИИГ, 2008. – 95 с.

# СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТАТИЧЕСКОГО МОДУЛЯ УПРУГОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА ГОРНЫХ ПОРОД В ТАЛОМ И МЕРЗЛОМ Состоянии\*

#### С.В. Сукнёв

В 2004-2010 гг. в США, Германии и России были приняты новые редакции стандартов определения упругих свойств горных пород при одноосном сжатии [1]. В России для определения упругих свойств горных пород в настоящее время используют ГОСТ 28985-91 [2]. Введенный в действие в 1992 г. стандарт был переиздан без изменений в 2004 г. и получил статус межгосударственного стандарта для стран СНГ. В соответствии с ГОСТ 28985-91 упругие характеристики материала определяют при разгрузке образца после его нагружения до максимального уровня  $\sigma_m$ , который должен быть не ниже 50 % от предела прочности материала при одноосном сжатии о. Поскольку для большинства горных пород необратимые структурные изменения, связанные с процессами образования микротрещин, начинаются при напряжениях, составляющих 30–50 % от  $\sigma$ , то определенные по диаграммам нагружения и разгрузки деформационные характеристики, строго говоря, упругими не являются. Поэтому определение модуля упругости (модуля Юнга) и коэффициента Пуассона по ГОСТ 28985-91 физически некорректно.

Кроме того, из-за необратимых структурных изменений невозможно повторное испытание образца. Это не позволяет проследить за изменением упругих характеристик материала при изменении условий нагружения, например, при изменении температуры образца, что важно знать для проектирования горных сооружений в условиях криолитозоны. При каждой температуре необходимо проводить испытание нового образца, что не только трудоемко, поскольку связано с дополнительными затратами на изготовление образцов, но и просто некорректно с точки зрения постановки экспериментального исследования. Необходимо также отметить, что стандарт не распространяется на мерзлые горные породы.

<sup>\*</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-05-98503).

За рубежом упругие свойства горных пород определяют, как правило, по стандартам ASTM D7012-10 [3] или DIN EN 14580 [4]. Согласно стандарту ASTM D7012–10 (последняя редакция принята в 2010 г.) модуль Юнга (модуль упругости) определяют по диаграмме деформирования образца, построенной в координатах «напряжение – осевая деформация». Осевую (продольную) деформацию є рассчитывают по данным измерения перемещения образца вдоль оси нагружения с помощью установленного на нем датчика деформаций:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L},$$

где L – начальная (недеформированная) база датчика;  $\Delta L$  – измеренное изменение базы датчика в результате деформирования. Аналогичным образом рассчитывают поперечную деформацию  $\varepsilon_l$ .

Модуль Юнга определяют по наклону диаграммы деформирования одним из трех способов:

1. По тангенсу угла наклона диаграммы в определенной точке (обычно при уровне напряжений, составляющем 50% от предела прочности материала при одноосном сжатии).

2. По наклону более-менее линейного участка диаграммы, для аппроксимации которого используют, при необходимости, метод наименьших квадратов.

3. По наклону секущей, которую проводят из ноля до определенной точки диаграммы.

Применение первых двух способов требует предварительной математической обработки (сглаживания и аппроксимации) исходных данных, что существенно усложняет процедуру вычислений. Более практичным является третий способ. Для его применения необходимо знать только значение измеренной деформации при определенном уровне нагружения образца.

Для определения коэффициента Пуассона необходимо тем же способом вычислить наклон диаграммы поперечных деформаций и рассчитать (со знаком «минус») отношение наклона диаграммы продольных деформаций к наклону диаграммы поперечных деформаций.

Главным недостатком метода определения упругих свойств горных пород по ASTM D7012–10 является неучет нелинейного характера диаграммы деформирования. В стандарте содержится, например, замечание о том, что на измеренную величину коэффициента Пуассона значительное влияние оказывает нелинейность диаграмм (продольной и поперечной) деформирования при низких уровнях нагружения, но конкретные рекомендации по ее учету не приводятся. Также не указывается, до какой точки диаграммы следует проводить секущую, чтобы не попасть в область нелинейных деформаций при высоких уровнях нагружения. Таким образом, стандарт предоставляет большую свободу выбора способа и диапазона измерения деформаций, что может привести к неоднозначному и некорректному определению упругих свойств горных пород.

В наибольшей степени требованиям физической корректности отвечает немецкий стандарт DIN EN 14580, принятый в 2005 г. и имеющий статус межгосударственного стандарта для стран EC. В отличие от американского стандарта DIN EN 14580 содержит четкие указания по поводу диапазона измерения деформаций для определения статического модуля упругости (модуля Юнга). Нижнее напряжение  $\sigma_u$  составляет 2%, а верхнее  $\sigma_o - 33\%$  от предела прочности материала при одноосном сжатии. Модуль упругости вычисляется следующим образом:

$$E = \frac{\sigma_o - \sigma_u}{\varepsilon_o - \varepsilon_u},$$

где  $\varepsilon_u$  и  $\varepsilon_o$  – измеренные деформации при нижнем и верхнем напряжении, соответственно.

Еще одним существенным отличием стандарта DIN EN 14580 является обязательное уплотнение образца перед проведением измерений. Для этого образец дважды подвергается нагружению до верхнего напряжения  $\sigma_o$  с последующей разгрузкой до нижнего на-



Рис. 1. Диаграмма «нагрузка – время»

пряжения  $\sigma_u$ . Только на третьем цикле нагружения в точках *A* и *B* (рис. 1) производится измерение деформаций  $\varepsilon_u$  и  $\varepsilon_o$ . Предварительное уплотнение образца необходимо для получения стабильных деформационных характеристик материала.

Соблюдение этих требований обеспечивает обратимое упругое деформирование образца во время испытания. Однако стандарт DIN EN 14580 разработан только с целью определения модуля упругости. Для определения коэффициента Пуассона методика должна быть доработана с учетом необходимости обеспечить обратимое линейноупругое деформирование образца как в продольном, так и в поперечном направлении. Опыт показывает, что соблюдение (с необходимой для расчетов точностью) линейности и обратимости деформирования в продольном направлении не всегда автоматически обеспечивает такой же характер деформирования в поперечном направлении. Нижняя граница линейного участка, установленная DIN EN 14580  $(2\% \text{ от } \sigma)$  для диаграммы продольных деформаций, находится, как правило, значительно ниже, чем нижняя граница линейного участка диаграммы поперечных деформаций. Поэтому верхнюю и нижнюю границы диапазона нагружения, на которых производится измерение деформационных перемещений образца, необходимо выбирать исходя из характера диаграммы поперечных, а не продольных деформаций.

Но главная проблема при определении коэффициента Пуассона состоит в необходимости измерения с достаточной точностью малых перемещений в диапазоне 1...10 мкм. Были проведены многочисленные испытания образцов горных пород с использованием штатных датчиков поперечных деформаций, поставляемых с испытательным оборудованием фирм MTS, Instron и Toni Technik. Результаты испытаний показали, что, хотя чувствительность современных сенсоров (например, DD1 фирмы HBM, Германия) позволяет измерять малые перемещения, конструкция окружных и диаметральных датчиков, используемых в настоящее время для определения поперечных деформаций геоматериалов и горных пород, не обеспечивает надежную регистрацию перемещений в указанном диапазоне [5]. Эти датчики могут использоваться для определения перемещений величиной 10 мкм и выше. На практике это означает, что образцы для испытаний должны иметь достаточно большие размеры (диаметром от 100 мм) при соблюдении необходимых требований к качеству поверхности образцов. Изготовление таких образцов трудоемко и не всегла возможно.

Единственная возможность измерения малых поперечных деформаций – использовать датчики, в которых перемещения образца передаются непосредственно на чувствительный элемент (прямой способ измерения перемещений). Датчики такой конструкции, как правило, используются для определения продольных деформаций. Примером может служить датчик 0712.004 фирмы Toni Technik, Германия [6], в котором используется магнитное крепление к плоскости призматического образца, тип сенсора – DD1.

С использованием продольного датчика 0712.001 и поперечного датчика 0712.004 фирмы Toni Technik были проведены испытания и получены диаграммы деформирования вмещающих пород алмазных месторождений Якутии (доломит, известняк, песчаник, алевролит) в диапазоне нагружения до 30% от предела прочности материала при сжатии. На основе анализа полученных данных предложено для определения упругих свойств пород брать нижнюю границу участка  $\sigma_u = 0.5\sigma_o$ . При этом верхняя граница  $\sigma_o$  не должна превышать одной трети от предела прочности материала при одноосном сжатии.

Процедура определения упругих свойств выглядит следующим образом. Образец несколько раз подвергают циклическому нагружению со скоростью 1 МПа/с до уровня напряжений  $\sigma_o$ . Первые 1–2 цикла необходимы для предварительного уплотнения образца перед измерением деформаций  $\varepsilon_u$  и  $\varepsilon_o$ . На последующих циклах производится проверка условия обратимости и линейности деформаций и их измерение. Для расчета модуля Юнга и коэффициента Пуассона используют средние значения деформаций  $\varepsilon_u$  и  $\varepsilon_o$ , измеренные на последующих циклах нагружения, что позволяет повысить точность измерения малых деформаций и, соответственно, определения упругих свойств материала.

В процессе испытания регистрируют изменение баз  $\Delta L_1$  и  $\Delta L_2$  продольного и поперечного датчиков в результате деформирования, которое соответствует деформационному перемещению образца в продольном направлении на базе датчика  $L_1$  и деформационному перемещению образца в поперечном направлении на базе датчика  $L_2$ .

Продольные деформации рассчитывают по формуле  $\varepsilon_1 = \frac{\Delta L_1}{L_1}$ , а поперечные – по формуле  $\varepsilon_2 = \frac{\Delta L_2}{L_2}$ . Модуль упругости *E* определяют по формуле

$$E = \frac{\sigma_o - \sigma_u}{\varepsilon_{1o} - \varepsilon_{1u}}$$

а коэффициент Пуассона v – по формуле

$$v = \frac{\varepsilon_{2u} - \varepsilon_{2o}}{\varepsilon_{1o} - \varepsilon_{1u}}.$$

Проиллюстрируем методику на примере испытания образца доломита, представлявшего собой призму квадратного сечения  $50 \times 50$  мм высотой 150 мм. Продольные и поперечные деформации определяли с помощью датчиков фирмы Toni Technik, которые закрепляли на образце. База продольного датчика  $L_1$  составляла 80 мм, а поперечного датчика  $L_2$  45 мм. Испытания проводили на прессе ToniNORM. Результаты измерений регистрировали с интервалом 0,1 с. Работа пресса и регистрация результатов измерений осуществлялись под управлением компьютера с помощью программы testXpert. Прочность исследованного материала при одноосном сжатии – 125 МПа.

На рис. 2, *а* приведены диаграммы  $\sigma - \Delta L_1$  при нагружении образца до 40 МПа. Продольные деформации в 1-м цикле нагружения заметно превышают деформации во 2–4 циклах. Диаграммы деформирования во 2–4 циклах практически совпадают. После уплотнения материала на 1-м цикле дальнейший процесс деформирования образца до уровня нагружения 40 МПа можно считать обратимым, линейно-упругим. Величина модуля упругости на участке от 20 до 40 МПа составила 39,4 ГПа.

На рис. 2, б приведены диаграммы  $\sigma - \Delta L_2$  при нагружении образца до 40 МПа. Поперечные деформации, как и продольные, в 1-м цикле нагружения заметно превышают деформации во 2–4 циклах. Диаграммы для циклов 2, 3, 4 в диапазоне от 20 до 40 МПа имеют линейный характер и практически совпадают. Как видно из рис. 2, *a*, *б*, нижняя граница линейного участка диаграммы поперечных дефор-



Рис. 2. Диаграммы продольных (*a*) и поперечных (*б*) деформаций образца доломита

маций находится заметно выше, чем на диаграмме продольных деформаций, о чем говорилось выше. Величина коэффициента Пуассона составила 0,20.

Разработанная методика была использована для определения упругих свойств вмещающих пород алмазных месторождений Якутии при изменении температуры образца. Такие данные необходимы для проектирования горных сооружений в условиях криолитозоны, в которой располагаются указанные месторождения.

В качестве примера приведем результаты испытаний образца известняка в диапазоне температур от +17 °C до -40 °C. На рис. 3 приведены диаграммы продольных и поперечных деформаций образца при различных температурах, по которым были определены значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона.



Рис. 3. Диаграммы продольных (*a*) и поперечных (*б*) деформаций образца известняка при различной температуре, °С



Рис. 4. Зависимость модуля Юнга (*a*) и коэффициента Пуассона (б) известняка от температуры

Графики изменения модуля Юнга и коэффициента Пуассона в зависимости от температуры представлены на рис. 4. Видно, что с понижением температуры, при переходе образца из талого в мерзлое состояние, его модуль упругости линейно возрастает, в то время как коэффициент Пуассона остается постоянным.

#### Библиографический список

1. Сукнёв С. В. Стандартные методы определения упругих свойств горных пород / С. В. Сукнёв, С. П. Фёдоров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 12. – С. 17–21.

2. ГОСТ 28985–91. Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004. – 10 с.

3. ASTM D7012–10. Standard test method for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures. – West Conshohocken: ASTM International, 2010.

4. DIN EN 14580. Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls. – Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., 2005.

5. Сукнёв С. В. Использование окружных и диаметральных датчиков деформаций для определения коэффициента Пуассона при сжатии / С. В. Сукнёв // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 12. – С. 22–27.

6. Сукнёв С. В. Использование датчиков деформаций фирмы Toni Technik для определения коэффициента Пуассона при сжатии / С. В. Сукнёв // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 8. – С. 97–100.

УДК 622.831.001.57

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ Образцов соляных пород

#### А.О. Ермашов

Моделирование процесса деформирования и разрушения горных пород всегда занимало центральное место в механике горных пород. Адекватность принятой математической модели деформирования проверяется прежде всего на образцах пород. В том случае, если модель реально отражает полученную в эксперименте кривую деформирования, то принято считать, что в первом приближении данная модель реально отражает процессы деформирования всего горного массива. Особое место в данных экспериментах и модельных представлениях занимают численные модели деформирования соляных пород, которые, в силу реологических свойств данного вида геоматериала, являются наиболее сложными и комплексными [1–6].

В рамках данной работы представлены модернизированные замыкающие уравнения модели деформирования соляных пород, представленные в работах [5–8], численная реализация которых была выполнена в конечноэлементном программном комплексе «ANSYS» [9].

Как известно, характерной особенностью соляных пород являются их ярко выраженные реологические свойства. Для практики горного дела весьма важным является возможность учета разрушения пород и их деформирования на стадии разупрочнения и остаточной прочности. Совместный учет всех этих факторов можно выполнить на основе теории вязкопластичности. Приращения вязкопластических деформаций определяются по аналогии с теорией пластичности через производную скалярной величины Q – пластического потенциала:

$$\left\{\frac{d\varepsilon^{\rm vp}}{dt}\right\} = \left\{ \begin{array}{c} \bullet^{\rm vp} \\ \varepsilon \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} 0 & \text{при } F \leq 0 \\ \\ \frac{1}{\eta} \cdot F \cdot \frac{\partial Q}{\partial \{\sigma\}} & \text{при } F > 0, \end{array} \right.$$
(1)

где F – функция течения, { $\varepsilon$ } – скорость вязкопластических деформаций.

Выражение (1) широко используется в механике горных пород и называется уравнением вязкопластичности. Оно решается для случаев F > 0, т.е. когда превышен предел прочности и появляются необратимые деформации. При ассоциированном законе пластического течения Q = F величина  $\eta$  обозначает вязкость породы.

В разрабатываемой модели деформирования и разрушения соляных пород предполагается, что общие деформации тела можно представить в виде суммы отдельных составляющих

$$\varepsilon = \varepsilon^{\rm el} + \varepsilon^{\rm p} + \varepsilon^{\rm s} + \varepsilon^{\rm t},$$

где  $\varepsilon^{el}$  – упругие деформации,  $\varepsilon^{p}$ ,  $\varepsilon^{s}$ ,  $\varepsilon^{t}$  – первичные, вторичные и третичные деформации ползучести.

Если действующие напряжения  $\sigma$  меньше некоторой границы течения (предела прочности)  $\sigma_F$ , то возникают только первичные и вторичные деформации ползучести

$$\varepsilon = \varepsilon^{\rm el} + \varepsilon^{\rm p} + \varepsilon^{\rm s}.$$

Если же  $\sigma > \sigma_F$ , то появляются ускоряющиеся третичные деформации ползучести, приводящие со временем к разрушению материала.

Далее рассмотрим определение всех составляющих деформации. Скорость упругих деформаций в соответствии с законом Гука пропорциональна скоростям напряжений:

$$\begin{cases} \mathbf{\epsilon}^{\text{el}} \\ \mathbf{\epsilon} \end{cases} = [\mathbf{D}]^{-1} \{ \mathbf{\sigma} \},$$
 (2)

где [D] – матрица упругих констант,  $\{\sigma\}$  – скорость напряжений.

Скорость первичных { $\epsilon$  }, вторичных { $\epsilon$  } и третичных { $\epsilon$  } деформаций ползучести определяется по теории вязкопластичности (1).

Для случая первичной ползучести функция течения  $F_{\rm p}$  и пластический потенциал  $Q_{\rm p}$  имеют следующий вид:

$$F_{\rm p} = E_{\rm p} \left[ \left( \frac{\sigma_{\rm eff}}{E_{\rm p}} \right)^m - \varepsilon_{\rm eff}^{\rm p} \right], \quad Q_{\rm p} = \sigma_{\rm eff} , \qquad (3)$$

где  $\sigma_{eff}$  – инвариант девиатора напряжений,  $\epsilon_{eff}^{p}$  – инвариант девиатора деформаций.

С учетом (3) для первичной ползучести получается следующий закон течения:

$$\begin{cases} \bullet^{\mathbf{p}} \\ \varepsilon \end{cases} = \frac{1}{\eta_{\mathbf{p}}} \cdot E_{\mathbf{p}} \left[ \left( \frac{\sigma_{\text{eff}}}{E_{\mathbf{p}}} \right)^{m} - \varepsilon_{\text{eff}}^{\mathbf{p}} \right] \cdot \frac{\partial \sigma_{\text{eff}}}{\partial \{\sigma\}}. \tag{4}$$

Для описания первичной ползучести необходимы три параметра: вязкость  $\eta_p$ , модуль упрочнения  $E_p$  и степень *m* при напряжениях.

При описании вторичной ползучести функция течения  $F_s$ , пластический потенциал  $Q_s$  и вязкость  $\eta_s$  имеют следующий вид:

$$F_{\rm S} = p_0 \cdot \left(\frac{\sigma_{\rm eff}}{p_0}\right)^n, \quad Q_s = \sigma_{\rm eff}, \quad \eta_s = \frac{p_0}{a}, \tag{5}$$

где *а* и *n* – параметры ползучести, p<sub>0</sub> – константа.

С учетом (5) для вторичной ползучести можно написать следующий закон течения:

$$\begin{cases} \bullet^{\bullet^{s}} \\ \varepsilon \end{cases} = a \left( \frac{\sigma_{\text{eff}}}{p_{0}} \right)^{n} \frac{\partial \sigma_{\text{eff}}}{\partial \{\sigma\}}.$$
 (6)

Для описания вторичной ползучести достаточны два параметра: *а* и *n*.

Третичная ползучесть описывается через функцию течения  $F_t$  и пластический потенциал  $Q_t$  следующего вида:

$$F_{t} = \frac{1}{3} \cdot \frac{3 - \sin \varphi_{F}}{1 - \sin \varphi_{F}} \cdot q - \frac{2 \cdot \sin \varphi_{F}}{1 - \sin \varphi_{F}} \cdot p - \varphi_{F}^{*},$$
  
$$\sigma_{F}^{*} = \varphi_{F} + M \varepsilon_{v}^{t}, \quad Q_{t} = \frac{1}{6} \cdot (3 - \sin \psi) \cdot q - \sin \psi p, \qquad (7)$$
  
$$p = \frac{1}{3} (\varphi_{x} + \varphi_{y} + \varphi_{z}), \quad q = \varphi_{\text{eff}},$$

где  $\sigma_F$  – одноосная граница ечения,  $\phi_F$  – угол внутреннего трения, М – модуль разупрочнения,  $\psi$  – угол дилатансии.

С учетом этих соотношений третичная ползучесть описывается следующим законом течения:

$$\begin{cases} \mathbf{e}^{\mathbf{t}} \\ \mathbf{e} \end{cases} = \frac{1}{\eta_{t}} \left( \frac{1}{3} \cdot \frac{3 - \sin \varphi_{F}}{1 - \sin \varphi_{F}} q - \frac{2 \cdot \sin \varphi_{F}}{1 - \sin \varphi_{F}} p - \varphi_{F}^{*} \right) \cdot \frac{\partial Q_{t}}{\partial \{ \sigma \}}.$$
 (8)

Для описания третичной ползучести требуется пять параметров. Это вязкость  $\eta_t$  для третичной ползучести, одноосная граница течения  $\sigma_F$  для ненарушенной породы, угол внутреннего трения  $\phi_F$ , модуль разупрочнения M и угол дилатансии  $\psi$ . Уравнение (7) содержит переменную границу течения  $\sigma_F^*$ , уменьшение которой определяется с помощью модуля разупрочнения M [6,7,8].

Для описания разрушения от сдвига выбирается критерий разрушения  $F_{\rm SB}$ , аналогичный функции течения  $F_{\rm t}$ .

$$F_{\rm SB} = \frac{1}{3} \cdot \frac{3 - \sin\varphi_{\rm D}}{1 - \sin\varphi_{\rm D}} q - \frac{2 \cdot \sin\varphi_{\rm D}}{1 - \sin\varphi_{\rm D}} p - {\sigma_{\rm D}}^*,$$

$$\sigma_{\rm D}^* = \sigma_{\rm D} + N\varepsilon_{\rm v}^t.$$
(9)

В формуле (9)  $\sigma_D$  – прочность на одноосное сжатие и  $\phi_D$  – угол внутреннего трения. Для  $\sigma_D^*$  принимается, что она зависит от величины объемных третичных деформаций, возникающих перед разрушением. Верхнее граничное значение  $\sigma_D^*$  соответствует  $\sigma_D$  и представляет собой прочность на сжатие при мгновенном приложении нагрузки.

Вязкопластические скорости после разрушения от сдвига рассчитываются по закону течения Друкера – Прагера.

$$F_{\rm SB,R} = \frac{1}{3} \cdot \frac{3 - \sin\varphi_{\rm R}}{1 - \sin\varphi_{\rm R}} q - \frac{2 \cdot \sin\varphi_{\rm R}}{1 - \sin\varphi_{\rm R}} p - \sigma_{\rm R},$$

$$Q_{\rm SB} = \frac{1}{2} \cdot q,$$

$$\left\{ \varepsilon^{\rm NS} \right\} = \frac{1}{\eta_{\rm N}} \left( \frac{1}{3} \cdot \frac{3 - \sin\varphi_{\rm R}}{1 - \sin\varphi_{\rm R}} q - \frac{2 \cdot \sin\varphi_{\rm R}}{1 - \sin\varphi_{\rm R}} p - \sigma_{\rm R} \right) \cdot \frac{\partial Q_{\rm SB}}{\partial \{\sigma\}}.$$
(10)

В формуле (10) параметр  $\eta_N$  обозначает вязкость породы после разрушения. Пластический потенциал  $Q_{SB}$  аналогичен пластическому потенциалу при третичной ползучести  $Q_t$ , но угол дилатансии  $\psi$  принимается равным нулю.

Разрушение от растяжения возникает, если наименьшее главное напряжение превосходит прочность на растяжение  $\sigma_t$ :

$$F_{ZB} = \sigma_3 - \sigma_t > 0. \tag{11}$$

Скорости деформаций, возникающих при достижении прочности на разрыв (*F*<sub>ZB</sub>>0), вычисляются следующим образом:

$$\begin{cases} \bullet^{NZ} \\ \varepsilon \end{cases} = \frac{1}{\eta_{Z,R}} \left[ < F_{Z,R} > \cdot \frac{\partial F_{Z,R}}{\partial \{\sigma\}} + < F_{S,R} > \cdot \frac{\partial F_{S,R}}{\partial \{\sigma\}} \right], \\ F_{Z,R} = -\sigma_3, F_{S,R} = q. \end{cases}$$
(12)

Для вязкости используется то же значение  $\eta_N$ , что и в формуле (12). Функции течения  $F_{S,R}$  и  $F_{ZR}$  зависят только от напряженного состояния и отражают тот факт, что порода в разрушенном состоянии не воспринимает ни растягивающие, ни сдвигающие нагрузки.

Изложенная выше модель соляных пород была реализована методом конечных элементов в программном комплексе «ANSYS». Достоинством пакета «ANSYS» является его открытая архитектура, т. е. возможность создания и внедрения в программу собственных приложений пользователя [9].

Для проверки адекватности и правильности работы разработанной модели деформирования и разрушения соляных пород были произведены тестовые расчеты. Моделировались кривые ползучести при стабилометрических испытаниях образцов соляных пород, взятые из работы [6] (рис.1). Из рис. 1 видно довольно хорошее совпадение кривой ползучести, рассчитанной в «ANSYS» на основе представленной модели, с кривой, полученной из эксперимента. Полученные параметры модели приведены в табл. 1.

Таблица 1

<i>Е</i> , МПа	v	<i>Е</i> <sub>р</sub> , МПа	η <sub>р</sub> , МПа <sup>.</sup> сут	т	<i>а</i> , 1/сут	п	η <sub>t</sub> , МПа <sup>.</sup> сут	σ <sub><i>F</i></sub> , МПа	ф <sub><i>F</i></sub> , град	<i>М</i> , МПа	ψ, град
30000	0,25	110	550	2,2	1,7.10-10	5	2500	5,7	20	400	20

Параметры разработанной реологической модели

Для сравнения изложенной выше модели с существующими моделями приведена кривая ползучести, рассчитанная в «ANSYS» на основе Абелева ядра ползучести,

$$K(t) = \frac{\delta t^{1-\alpha}}{1-\alpha},\tag{13}$$

где б, а – параметры ядра ползучести.

На рис. 1 видно, что результаты моделирования с применением Абелева ядра значительно отличаются от результатов эксперимента.



Рис. 1. Экспериментальная и расчетная кривые ползучести при стабилометрических испытаниях соляных образцов

Более простые модельные эксперименты при одноосных испытаниях образцов пестрого сильвинита при различных степенях нагружения были проведены в Горном институте УрО РАН. Результа-



Рис. 2. Экспериментальная и расчетная кривые ползучести при испытаниях на одноосное сжатие образцов пестрого сильвинита (*h*/*d* = 2,0): а – при степени нагружения 0,2σ<sub>пр</sub> (4,2 МПа); б – при степени нагружения 0,4σ<sub>пр</sub> (8,4 МПа); в – при степени нагружения 0,6σ<sub>пр</sub> (12,6 МПа)

ты моделирования с помощью разработанной реологической модели показаны на рис. 2, а в табл. 2 приведены параметры данной модели. Таблица 2

Образец	<i>E</i> <sub>p</sub> , МПа	η <sub>р</sub> , МПа·сутки	т	а, 1/сутки	п
а	185	500	2.2	1.45.10-8	5
б	185	500	2.4	9·10 <sup>-10</sup>	5
в	75	200	2.1	3.9.10-9	5

#### Параметры разработанной реологической модели

Хорошее совпадение экспериментальных и расчетных кривых ползучести говорит о том, что разработанная численная модель может быть использована для анализа напряжений и деформаций в соляных породах.

#### Библиографический список

1. Константинова С.А. Об одной феноменологической модели деформирования и разрушения соляных пород при длительном действии сжимающих нагрузок / С.А. Константинова // Физ.-техн. пробл. разраб. полезных ископаемых. – 1983. – № 3. – С. 8–13.

2. Барях А. А. Деформирование соляных пород / А. А. Барях, С. А. Константинова, В. А. Асанов. – Екатеринбург: УрО РАН, 1996. – С. 91–107.

3. Вялов С. С. Реологические основы механики грунтов / С. С. Вялов. – М.: Высшая школа, 1978. – 317 с.

4. Ползучесть осадочных горных пород / Ж. С. Ержанов и др.; АН КазССР. Ин-т математики и механики. – Алма-Ата: Наука, 1970. – 208с.

5. Wallner. M.: Standsicherheitsberechnungen fuer Pfeilerdimensionienmg im Salzbergbau. Proc. 5th ISRM Congress, Melbourne, 1983. D8-D14.

6. Wittke, B.: Permesbilitaet von Steinsalz. Theorie und Exsperiment. Geotechnik in Forschung und Praxis. WBI-Print 4. Verlag Glueckauf GmbH. Essen, 1999.

7. Doering, T; Kiehl, J.R. Das primaeren. sekudaeren und tertiaeren Kreichen von Steinsalz -ein dreidimensionales rheonomes Stoffgesetz. . Geotechnik 19. – 1996. – Nr. 3. – S. 194–199.

8. Kiehl. J.R.; Doering. T; Erichsen, C: Ein raeumliches Stoffgesetz fuer Steinsalz unter Beruecksichtigung von primaeren. sekudaeren und tertiaeren Kreichen. Dilatanz. Kriech- und Zugbruch sowie Nachbruchverhalten. Geotechnik 21. – 1998. – Nr. 3. – S. 254–258.

9. «ANSYS». Online Manuals. Release 11. User Programmable Features. – 2007.

# ИЗМЕРЕНИЕ НДС КРЕПИ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАГНИТОУПРУГИХ ДАТЧИКОВ

### Д.В.Григорьев

В настоящее время актуальным остается вопрос о получении надежной информации о напряженно-деформированном состоянии (НДС) массива горных пород. Связано это с обеспечением безопасного ведения горных работ и устойчивости выработок при сложных горно-геологических условиях и увеличении глубины ведения работ. Несмотря на развитие расчетных методов построения полей напряжений на основе геомеханических моделей с использованием ЭВМ, исходя из сложности изучаемых объектов отказ от проведения натурных экспериментов невозможен.

Существующие методы определения главных напряжений (геологические, механические, геофизические) не универсальны, обладают рядом достоинств и недостатков, имеют границы применимости и информативных возможностей [1]; основные недостатки: трудоемкость, невысокая стабильность измерений во времени.

По существующим представлениям, деформационные процессы массивов скальных пород происходят медленно, имеют циклический характер и могут продолжаться длительный промежуток времени, приводя в итоге к катастрофическим последствиям в виде техногенных землетрясений и горнотектонических ударов. Поэтому для выявления тенденций их изменения необходимо использовать высокочувствительные и стабильные во времени системы наблюдений. В статье [2] одним из элементов системы наблюдений в качестве стабильных во времени и высокочувствительных датчиков применяются кварцевые деформометры и наклономеры разработки Института физики Земли РАН (рис. 1) с погрешностью 0,1 мкм. Эти датчики точны, но узка область их применения.

В настоящее время широко распространены струнные тензометры (рис. 2) с относительной погрешностью в 1 микрострейн [3], но необходимо учитывать влияние температуры на датчик.

Академик Михаил Иванович Эпов предложил при построении подобной системы использовать магнитоупругие датчики, так как мы собираемся создавать подобную систему для контроля проходки стволов, в которых используются в том числе чугунные тюбинги. Принципиальная схема магнитоупругого датчика показана на рис. 3. В.В. Королев в своей работе «Система измерений и контроля напряжений в корпусе судна с магнитоупругими преобразователями» [4] дает следующее описание. В датчике использована аморфная лента состава Fe78B13Si9 толщиной 30 мкм. Датчик состоит из двух взаимно перпендикулярно расположенных над поверхностью изделия (1) U-образных сердечников (2 и 3), изготовленных из



Рис. 1. Деформометры сдвига (*сверху*) и сжатия/растяжения (*снизу*), база датчика 200 мм



Рис. 2. Накладной струнный тензометр

45 %-ного пермаллоя в виде стержней диаметром 2 мм. Расстояние между полюсами каждого сердечника составляет 10 мм, а между каждым полюсом и изделием 0,5 мм. На обмотку первого сердечника (800 витков) подается переменный ток возбуждения частотой 400 Гц, а выходное напряжение снимается с обмотки (1200 витков) второго сердечники. Сердечники 2 и 3 вместе со стальным изделием образуют магнитный мост, благодаря чему выходное напряжение датчика  $U_{\rm B}$  пропорционально разности магнитной проницаемости изделия в двух взаимно перпендикулярных направлениях, являющейся функцией величины и направления приложенного к изделию напряжения. Для указанной конструкции при токе возбуждения  $U_{\rm B}$  от продольного напряжения сжатия и растяжения в пределах от 0 до ±200 МПа. Соответствующие изменения  $U_{\rm B}$  составляли ±1 В. Масса такого бесконтактного датчика составляет 17 г.

Магнитоупругие датчики можно закреплять на чугунных тюбингах, осуществляя измерения неразрушающим способом. Такие датчики обладают высокой чувствительностью, а также простотой и надежностью конструкции. Принцип действия мугнитоупругих датчиков основан на использовании открытого более ста лет назад магнитоупругого эффекта – физического явления, заключающегося в изменении магнитных свойств ферромагнитных материалов под воздействием механических сил [5].



Рис. 3. Принципиальная схема магнитоупругого датчика

Магнитоупругие датчики как элемент системы мониторинга НДС массива горных пород расширят сферу применения такой системы, что позволит получить более полные и надежные данные о НДС массива горных пород и изменении его во времени, это в конечном итоге положительно скажется на безопасности ведения горных работ. Проверке этих предположений будет посвящена моя квалификационная работа.

### Библиографический список

1. Шкуратник В. Л. Методы определения напряженно-деформированного состояния массива горных пород / В. Л. Шкуратник, П. В. Николенко. – М.: МГГУ, 2012. – 111 с.

2. Результаты мониторинга напряжений и деформаций блоковых структур массива горных пород по данным деформационных измерений на геодинамическом полигоне Кировского рудника ОАО «Апатит» / А. А. Козырев// Вестник Кольского научного центра РАН. – 2013. – № 1(12). – С. 11 – 15.

3. Спрут 10101-М-5-01.11.12. Накладной струнный тензометр. Руководство по эксплуатации. Редакция 5. – Екатеринбург, 2012. – С. 31.

4. Королев В.В. Система измерений и контроля напряжений в корпусе судна с магнитоупругими преобразователями: дис. ... канд. техн. наук / В.В. Королев. – СПб., 2010.

5. Гинзбург В. Б. Магнитоупругие датчики / В. Б. Гинзбург. – М.: Энергия, 1970. – 72 с.

### УДК 622.023.23

## ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ Горных пород

### Б. А. Храмцов, А. А. Ростовцева, О. А. Лубенская

В настоящее время актуальны вопросы управления устойчивостью откосов уступов, бортов карьеров и ярусов отвалов при разработке железорудных месторождений КМА открытым способом в связи с тем, что за последние 20 лет производительность горнообогатительных комбинатов возросла в 2 раза и в 2013 г. превысила 110 млн т в год. В связи с этим существенно изменились инженерно-геологические и инженерно-технологические условия формирования бортов карьеров и ярусов отвалов, увеличились глубина и параметры карьеров, высота внешних отвалов пород вскрыши, что привело к росту площадей обнажения откосов и, как следствие, к обрушениям уступов и бортов карьеров и ярусов отвалов со случаями гибели рабочих. Параметры нарушений устойчивости откосов уступов, бортов карьеров и ярусов отвалов в регионе КМА за последние 20 лет приведены в табл. 1.

Таблица 1

	Пара	аметры дефор			
Местоположение деформации	высота откоса <i>H</i> , м	ширина призмы обрушения <i>В</i> <sub>о</sub> , м	угол наклона откоса α, град	Объем, млн м <sup>3</sup>	Год
Восточный борт карьера ОАО «Стойленский ГОК»	24	7	41,5	_	1996
Внешний отвал № 7 ОАО «Михайловский ГОК»	-	_	-	20,0	1997
Восточный борт карьера ОАО «Михайловский ГОК»	-	_	-	0,7	2003
Восточный борт карьера ОАО «Стойленский ГОК»	27–30	10–27	40–50	_	2005
Северный борт карьера ОАО «Стойленский ГОК»	17,5	20	57	-	2010
Внешний отвал № 7 ОАО «Михайловский ГОК»	14	40	60	-	2011

Деформации бортов карьеров и ярусов отвалов

При определении параметров откосов уступов, бортов карьеров и ярусов отвалов в качестве исходных данных используются физико-механические свойства пород: плотность р и показатели сопротивления сдвигу – угол внутреннего трения ф и сцепление *с*. Точность определения этих показателей влияет на конечный результат при выборе безопасных параметров откосов и потому большое значение имеет надежная оценка прочностных свойств горных пород, которая в практике горного дела основывается на обратных расчетах оползней по фактическим поверхностям скольжения.

В НИУ «БелГУ» для определения прочностных свойств горных пород разработан графоаналитический метод, основу которого составляют аналитические зависимости между условной высотой откоса H' и углом наклона откоса  $\alpha$  (рис. 1); между условной шириной призмы возможного обрушения  $B'_{0}$  и условной высотой откоса H' (рис. 2), полученные для 3 типов оползней при коэффициенте



Рис. 1. Графики зависимости условной высоты откоса *H*′ от угла наклона откоса *α*: I – область надподошвенного оползня; II – область подошвенного оползня; III – область подподошвенного оползня

запаса устойчивости n = 1 по круглоцилиндрической поверхности скольжения<sup>\*</sup>. С помощью полученных графических зависимостей можно определить фактическое значение высоты откоса и ширины призмы возможного обрушения по формулам:

$$H = H'\frac{c}{\rho},\tag{1}$$

$$B_{\rm o} = B_{\rm o}' \frac{c}{\rho},\tag{2}$$

где H – фактическая высота откоса; H' – условная высота откоса;  $B_0$  – фактическая ширина призмы обрушения;  $B'_0$  – условная ширина призмы обрушения; c – сцепление пород, слагающих откос;  $\rho$  – плотность пород, слагающих откос.

<sup>\*</sup> Храмцов Б.А. Разработка и совершенствование методов расчета устойчивости откосов / Б.А. Храмцов, Абдул Батен, Абдул Захир, А.А. Ростовцева // Материалы XII национальной конференции с международным участием по открытой и подводной добыче полезных ископаемых, 26– 30 июня, Варна, Болгария, 2013. – С. 297–301.

Для определения физико-механических свойств пород в массиве достаточно иметь данные о параметрах откоса до его обрушения (высота откоса, угол наклона откоса) и результаты маркшейдерской съемки после его обрушения, позволяющие определить положение трещины отрыва на момент обрушения.

В состоянии предельного равновесия в приоткосном массиве формируется поверхность скольжения, по которой при высоте откоса H и угле наклона откоса  $\alpha$  происходит его обрушение. На верхней горизонтальной площадке откоса образуется трещина отрыва, которая расположена от верхней бровки откоса на расстоянии, равном ширине призмы обрушения  $B_0$ .

После обрушения откоса выполняется маркшейдерская съемка, по результатам которой определяем высоту откоса H, ширину призмы обрушения  $B_0$  и значение коэффициента k, который на основании формул (1), (2) равен

$$k = \frac{H}{B_{o}} = \frac{H'}{B'_{o}}.$$
(3)



Рис. 2. Графики зависимости условной ширины призмы возможного обрушения B'<sub>o</sub> от условной высоты откоса H'
С помощью графиков зависимости условной высоты откоса H'от угла наклона откоса  $\alpha$  определяем величины условной высоты откосов H' для различных значений угла внутреннего трения  $\varphi$  (см. рис. 1, точки 1–7) для угла наклона откоса  $\alpha$ , при котором произошло обрушение. На график зависимости условной высоты откоса от условной ширины призмы возможного обрушения наносим точки 1–7, соответствующие определенным величинам H' для соответствующих значений углов внутреннего трения  $\varphi$ , и соединяем их между собой (см. рис. 2).

Для определения значения угла внутреннего трения ф в массиве горных пород на график (см. рис. 2) наносим линию, удовлетворяющую условию

$$H' = kB'_{o}.$$
 (4)

Углу внутреннего трения  $\varphi$  в массиве горных пород будет соответствовать точка A, находящаяся на пересечении двух линий. Положение точки A позволяет с помощью графиков, представленных на рис. 2, определить значения условной высоты откоса H' и угла внутреннего трения  $\varphi$ .

Сцепление горных пород в массиве определяется по формуле

$$c = H\rho / H'. \tag{5}$$

В качестве примера рассмотрим определение физико-механических свойств откоса уступа гор. +166 м восточного борта карьера ОАО «Стойленский ГОК», который обрушился 13 октября 2005 г. (табл. 2) и имел следующие параметры: высота уступа 28,3 м; угол наклона откоса уступа 53,4°; ширина призмы обрушения 15 м.

С учетом вышеуказанных параметров значение коэффициента *k*, вычисленное по формуле (3), равно

$$k = \frac{H}{B_0} = \frac{28,3}{15} = 1,89$$

При угле наклона откоса уступа 53,4° на графике (см. рис. 1) были определены значения условной высоты откоса для различных значений угла внутреннего трения (точки 1-7), которые были перенесены на график зависимости условной ширины призмы возможного обрушения от условной высоты откоса (см. рис. 2) и соединены между собой. На этот же график была нанесена прямая, соответствующая условию формулы (4)  $H' = 1,89B'_{0}$ .

С учетом положения точки A (см. рис. 2) было определено значение угла внутреннего трения  $\varphi = 23^{\circ}$  и условная высота откоса H' = 12.9.

Сцепление пород обрушившегося откоса при плотности пород  $\rho=1,82{\cdot}10^{-3}~{\rm кr/m^3}$  согласно формуле (5) будет равно

$$c = \frac{H\rho}{H'_{o}} = \frac{28,3M \cdot 1,82 \cdot 10^{3} \text{ K}\Gamma/\text{M}^{3}}{12,9} = 3,8 \cdot 10^{3} \text{ K}\Gamma/\text{M}^{2}.$$

Графоаналитическим методом были определены физико-механические свойства мело-мергельных пород (см. табл. 2), которые использовались для разработки инженерно-технических решений по обеспечению устойчивости откосов уступов и борта карьера ОАО «Стойленский ГОК», формируемого в техногенном массиве отвала «Стрелица».

Таблица 2

			· ·			
Объект деформации	Дата обрушения	Высота уступа, м	Угол наклона уступа, град	Ширина призмы об- рушения, м	Угол внутреннего трения ф, град	Сцепле- ние <i>с</i> , МПа
Уступ гори- зонта +166 м восточного борта	13.10.05	28,3	53,4	15	23,0	0,038
Уступ гори- зонта +162 м восточного борта	13.10.05	31,6	60,5	17	26,5	0,051
Средние значен	24,8	0,044				
Уступ гори- зонта +150 м восточного борта	12.08.05	30	50	20	18,0	0,053
Уступ гори- зонта +150 м восточного борта	3.11.05	30	50	21	16,0	0,054
Средние значен	16,3	0,054				

Физико-механические свойства мело-мергельных пород отвала «Стрелица»

# УДК 622.271.333:624.131.537.001.57

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ КАРЬЕРНОГО ОТКОСА, СЛОЖЕННОГО ПЛАСТИЧНЫМИ ГЛИНИСТЫМИ ПОРОДАМИ

#### 3. Р. Рахимов

Лабораторное моделирование процессов деформирования откосов позволяет при корректно подготовленных и проведенных испытаниях определить условия возникновения, механизм и очертания поверхности разрушения массива горных пород. Техника моделирования, используемые смеси, приборы и методы наблюдения к настоящему времени хорошо изучены. Моделирование деформаций массива горных пород, как правило, осуществляется на стендах для испытаний плоских и объемных моделей; используются неподвижные, реже поворотные стенды [1, 2, 3]. Для приложения внешней нагрузки на массив применяются различные пригрузочные приспособления, в том числе центрифуги с моделью, располагаемой в каретке ограниченных объемов [4].

Наблюдение за абсолютными смещениями, происходящими в моделях, осуществляется кино-, видео- и фотофиксацией расположения марок или тензосеток, фотофиксацией с использованием теневого метода, измерением с помощью блочных тензометров, шкаловых микроскопов, зеркальных тензометров [5], оптических тензометров [6], индикаторов часового типа, прецизионных координатомеров, профилемеров.

Свойства материала, имитирующего горные породы откоса, имеют определяющее значение для достижения максимально возможного подобия деформирования реального откоса и откоса модели. При моделировании проявлений горного давления широкое распространение получили разнообразные смеси эквивалентных материалов, в состав которых входят наполнитель и связующее вещество [3, 7]. В некоторых моделях, особенно при моделировании слоистых массивов, где определяющая роль отводится хрупким свойствам, используют твердеющие растворы песка со связующим материалом, например, цементом, гипсом, парафином [8]. Поверхности ослабления имитируются при помощи раздробленной слюды, солидола и т. п. Из известных материалов для рассматриваемого случая наиболее подходящим является смесь чеганской выветренной глины, подвергаемая внешнему силовому воздействию. Такая практика применяется при моделировании откосов открытых горных выработок, насыпей гидротехнических сооружений, железных, автомобильных дорог, оползневых склонов [9].

Сложной задачей является исследование влияния физико-механических свойств горных пород на механизм деформирования, форму и размеры наиболее напряженной поверхности скольжения. Лабораторными исследованиями прочностных свойств чеганской выветренной глины установлено, что ее прочность в значительной степени зависит от влажности  $\omega$ , о чем свидетельствуют данные, представленные на рис. 1. Паспорт прочности выветренной чеганской глины (см. рис. 1) относится к состоянию реальной породы, но с нарушенной структурой из-за многократного использования ее в процессе моделирования.

Использование известного метода Н. Н. Маслова «плотность – влажность» для глинистых пород позволяет достичь требуемой влажности образцов за счет изменения плотности, которая варьируется соответствующим изменением уплотняющей нагрузки в компрессионно-фильтрационном приборе. После подготовки образцов они испытываются на сдвиговом приборе ПСГ-1. В сухом состоянии чеганская выветренная глина дезинтегрируется практически с полным расслоением структуры, поэтому для испытания ее прочности при влажности  $\omega = 4$ % расслоенная порода уплотняется в течение 30 мин в матрице прибора ПСГ-1 и сдвигается.



Рис. 1. Паспорт прочности выветренной чеганской глины нарушенной структуры при различной влажности

Из паспорта прочности видно (см. рис. 1), что с увеличением влажности угол внутреннего трения при небольшой величине нормального напряжения ( $\sigma < 0,05 \div 0,1$  МПа) плавно уменьшается от  $\phi_{\text{max}} = 45^{\circ}$  до  $\phi_{\text{min}} = 20^{\circ}$ . Сцепление выветренной чеганской глины *C*, имея некоторый максимум в диапазоне влажности от 18 до 22 %, с ее возрастанием или уменьшением снижается. С возрастанием влажности от 4 до 17% глина практически из линейно-упругого состояния переходит в упругопластическое. Увеличение влажности до уровня, превышающего 17%, приводит в процессе сдвига к преодолению прочности слагающих ее обломков осадочных пород с последующим снижением и стабилизацией сопротивления сдвигу [3]. Соответствующая этому состоянию величина касательного напряжения называется сцеплением пластического течения (С<sub>пт</sub>). С увеличением влажности предел разрушения структуры глины снижается. Прочность связей обломков тем ниже, чем выше влажность выветренной чеганской глины. При уровне влажности выше 27 % испытания на сдвиг становятся невозможны, так как еще в процессе приложения нормальной нагрузки более 0.15 МПа глина переходит в состояние вязкой жидкости и отдавливается в срезной зазор прибора ПСГ-1.

После испытания устойчивости откоса на моделях из плоскости поверхности скольжения отбираются пробы глин для определения влажности и образцы для одноплоскостного среза, сжатия и растяжения. Испытания проводятся по методике, аналогичной испытаниям образцов естественного сложения и влажности. Полученные результаты сходны с результатами лабораторных испытаний выветренных чеганских глин естественного сложения (рис. 1, 2).

Таким образом, поведение материала, используемого при моделировании, по определяющим критериям подобия соответствует натурному объекту [7, 8].

Анализируя все достоинства и недостатки стендов, применяемых при моделировании, учитывая свойства материала, простоту





получения и обработки информации о возникающих деформациях, а также используя первоначальные предположения о процессах, протекающих в массиве горных пород, можно прийти к выводу, что исследования лучшее всего проводить на стенде для плоских моделей.

Конструкция стенда, позволяющая испытывать модели плоских откосов с размерами 1,00×1,16×0,16 м, показана на рис. 3. Стенд изготовлен методом сварки и разъемных болтовых соединений катаных специальных профилей.

Для обеспечения устойчивости моделируемого откоса после снятия опалубки в процессе формирования массива модели в нее закладываются тяжи, состоящие из металлических стержней и ограничителей бокового распора, которые представляют собой парные круги из органического стекла. Стержни в количестве 65 штук изготовлены



Рис. 3. Общий вид стенда для моделирования:

1 – каркас стенда; 2 – откос; 3 – рычаг системы задатчика внешней нагрузки; 4 – штамп имитации давления внешнего отвала; 5 – тяж компенсации бокового распора; 6 – опорные марки; 7 – выравнивающие упоры; 8 – площадка выравнивания штампа; 9 – тяга для грузов; 10 – стальной шарик; 11 – фотоаппарат на штативе; 12 – снимок модели

из прутка диаметром 5 мм и имеют длину 158 мм. На краях стержней длиной 5÷6 мм нарезана резьба М5, на которую завинчиваются ограничители из органического стекла толщиной 5 и диаметром 45 мм.

С целью оперативного контроля над процессом деформаций в откосе модели конструкция предусматривает наличие датчиков горизонтальных и вертикальных смещений, в качестве которых используются индикаторы часового типа, размещаемые в специальных кронштейнах.

Стенд снабжается рычажным механизмом нагружения, что позволяет за счет рычага создавать более высокую нагрузку и повышает безопасность проведения испытаний. Для обеспечения вертикальности нагружения испытываемой модели разрабатывается конструкция центрирующей площадки.

Сложное напряженно-деформированное состояние в массиве модели создается за счет передачи нагрузки от рычажной системы через слой увлажненного песка. Данный подход позволяет более плавно и правдоподобно имитировать воздействие внешнего отвала на массив модели, чем жесткий штамп.

Подготовка материала для моделирования заключается в том, что вначале определяется влажность доставленной из карьера выветренной чеганской глины. Затем ее влажность доводится до необходимого уровня добавлением воды. После подготовки материал укладывается в стенд слоями по 0,1 м. Для обеспечения стабильной плотности массива модели каждый слой уплотняется 20-кратным прокатыванием 10-килограммового ролика по полосе линолеума, уложенного поверх глинистого материала. После изготовления массива модели со стенда снимается опалубка, модель выдерживается 24 ч без нагрузки для стабилизации в ней напряжений и деформаций. В этот же период очищаются круги оргстекла тяжей, компенсирующих боковой распор от глины для обеспечения визуального наблюдения и измерений смещений центров тяжей, в качестве которых выступают резьбовые отверстия в кругах оргстекла.

Уступ в массиве модели формируется удалением глины, после чего на ее горизонтальную площадку устанавливается форма для отсыпки модели отвала из влажного песка высотой 0,08 м, шириной 0,17 м и длиной 0,17÷0,34 м, которая имитирует внешний отвал. На верхней части модели отвала песок уплотняется и на верхнюю поверхность укладывается металлический штамп толщиной 4 мм. Нагрузка на тягу рычага передается ступенчато разновесами от 0,2 до 4,0 кг.

Результаты исследований, зафиксированные в ходе лабораторного моделирования нагруженных откосов, изложены в работах [10, 11].

Проведенные исследования на более чем 40 моделях позволяют условно процесс деформирования нагруженного откоса модели из физически подобных материалов подразделить на несколько стадий. Первую стадию можно охарактеризовать как состояние нетронутого массива до начала горных работ, когда наблюдаются только микродеформации усадки в течение 24 ч, отводимых для стабилизации напряжений в сформированном массиве. Данная стадия аналогична длительному периоду формирования отложений.

Вторую стадию, в течение которой формируется откос, можно охарактеризовать как период разуплотнения и упругого восстановления за счет разгрузки. В течение второй стадии наблюдаются микродеформации упругого восстановления материала моделирования после удаления части объема (рис. 4, *a*). В результате массив, находящийся в равновесии до начала проведения горных работ, претерпевает воздействие различных факторов, за счет чего начинают развиваться деформационные и реологические процессы, что приводит к снижению устойчивости откоса. Данную стадию характеризует устойчивость откоса, которая обеспечивается равновесием призмы упора и призмы активного давления. В качестве последней высту-



Рис. 4. Стадии деформирования откоса модели при внешнем нагружении: *a* – вторая стадия испытания модели – разуплотнение и упругое восстановление за счет разгрузки; *б* – третья стадия – равномерное уплотнение пород модели откоса под действием нагрузки; *в* – четвертая стадия – смещения в сторону выработанного пространства; *г* – пятая стадия – оконтуривание и сдвиг оползневого тела в сторону выработанного пространства

пает вес пород, слагающих верхнюю часть откоса. Силы, удерживающие откос в равновесии, связаны с силами сцепления и трения нижней части откоса. Таким образом, данная стадия характеризует устойчивость ненагруженного откоса.

Для третьей стадии, в течение которой для реализации гравитационного подобия прилагается внешняя нагрузка, характерно равномерное уплотнение пород модели откоса (рис. 4, *б*). При этом наблюдаются незначительные деформации (1–4 мм), достигающие поверхности откосной части уступа, что фиксируется индикатором часового типа ИЧ–10МН. Данные деформации напрямую увязываются с выполнением условия гравитационного подобия. Третья стадия аналогична процессу формирования внешнего отвала на незначительном удалении от верхней бровки откоса. В процессе нагружения модели вначале придается удельный вес глинистому материалу, соответствующий масштабу моделирования, а затем формированию внешних отвалов на незначительном удалении от верхней бровки откоса борта карьера для нагрузок более 1,0÷1,5 кПа.

Четвертая стадия характерна тем, что при нагрузках, вызывающих деформации, легко обнаруживается разделение оползневого тела на призмы активного давления и упора, так как в период четвертой стадии доминируют смещения в сторону выработанного пространства (рис. 4, *в*). Стадия аналогична завершению формирования внешнего отвала и началу процессов ползучести и релаксации при неизменной нагрузке от отсыпанных отвалов.

Пятая стадия является завершающей, так как при ней происходит оконтуривание и сдвиг оползневого тела в сторону выработанного пространства на расстояние, достигающее 20 мм, а в отдельных случаях и 150 мм (рис. 4, г). Пятая стадия аналогична финальной стадии оползня, когда происходят значительные стремительные деформации.

На основании исследования поведения моделей из физически подобных материалов механизм обрушения нагруженного внешним отвалом откоса пластичных горных пород происходит однотипно. Вначале под нагрузкой имитирующего давление пород отвала штампа влажный песок вдавливается в поверхность верхней площадки откоса. В момент, когда вдавливание достигает максимальных значений под центром штампа, оно симметрично снижается по его краям. Породы откоса сжимаются в большей степени в вертикальном, чем в боковых направлениях, смещения не достигают поверхности откоса. С увеличением давления точка максимального вдавливания начинает смещаться от центра внедряемого штампа в сторону откоса, при этом горизонтальные смещения величиной в несколько мм достигают его поверхности.

При определенном значении вертикального давления наблюдается незначительное, от 8 до 24 мм, выпучивание вверх части оползневого тела, располагаемого между штампом и поверхностью откоса, с одновременным увеличением смещения в сторону откоса. Первоначально предполагается, что это сопряжено с отсутствием гравитационного подобия на участках, примыкающих к штампу, но даже при искусственной их пригрузке эффект выпучивания сохраняется. Именно в этот момент оползневое тело оказывается оконтуренным видимыми трещинами.

Дальнейшего увеличения проседания имитирующего отвальную массу песка и смещения оползня в сторону выработанного пространства можно достичь как увеличением давления на штамп, так и при постоянной нагрузке в течение продолжительного времени за счет реализации эффекта идеальной пластичности чеганской выветренной глины.

На рис. 5 проиллюстрирована заключительная стадия деформирования модели нагруженного откоса. На него нанесены смещения марок всех предыдущих циклов нагружения и показана поверхность скольжения, которая начинается на удаленном от откоса конце штампа (точка А) под углом  $\psi = \pi/4 + \varphi_{max}/2$ . По круглоцилиндрической поверхности она достигает глубины, на которой  $\varphi=0^{\circ}$  (В), под углом  $\pi/4$  к горизонтальной линии. Поверхность скольжения из точки В продолжается горизонтально до точки D. Линия BD соответству-



Рис. 5. Механизм деформирования нагруженного откоса пластичных пород: *1*- контур исходного откоса, 2 - смещение марки, 3 - наиболее напряженная поверхность скольжения

ет состоянию пластического течения материала моделирования. От точки D, лежащей практически на одной вертикали с верхней бровкой откоса (E), поверхность скольжения выходит в точку поверхности откоса F под углом  $\theta = \pi/4 - \varphi_{max}/2$ . Геометрические параметры полученной наиболее напряженной поверхности скольжения хорошо согласуются с положениями статики сыпучей среды [12], в соответствии с которой площадки скольжения образуются при нагрузках, создаваемых столбом породы высотой  $H_{90}$ . В модели площадки скольжения начинаются сразу под штампом, так как он имитирует давление отвальных пород. Величина угла  $\psi$  также соответствует значениям статики сыпучей среды, как и угол между линиями 1-го и 2-го семейств скольжения, составляющий  $\pi/2$  при  $\varphi=0^{\circ}$ .

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что схема деформирования нагруженного откоса, сложенного пластичными глинистыми породами, аналогична схеме, представленной на рис. 6.

Для рассматриваемого случая оползня карьерного откоса берма между нижним основанием отвала и верхней бровкой карьера составляла r = 45 м ( $\alpha = 30^{\circ}$ , H = 15 м,  $\gamma = 1.93$  г/см<sup>3</sup>,  $C_{\text{max}} = 0.122$  МПа,  $C_{\text{min}} = 0.065$  МПа,  $\phi_{\text{max}} = 24^{\circ}$ ). Расчет с использованием предлагаемой схемы и снижением физико-механических свойств с учетом коэффициента запаса, равного двум, доказывает, что берма безопасности должна быть увеличена до 100–120 м.

Проведенные лабораторные исследования позволили установить, что деформирование откосов карьера № 6 Восточно-Аятского месторождения бокситов происходит из-за низкой несущей способности слагающей их пластичной горной породы. При разработке способа оценки устойчивости нагруженных откосов, сложенных



Рис. 6. Схема для расчета устойчивости нагруженного откоса, сложенного пластичными глинистыми породами

пластичными глинистыми породами, необходимо учитывать механизм деформирования открытой горной выработки, форму и размеры наиболее напряженной поверхности скольжения методом моделирования физически подобными материалами. Проведенные исследования доказывают, что при внешнем нагружении откоса, сложенного пластичными глинистыми породами, деформирование происходит по схеме, представленной на рис. 6.

#### Библиографический список

1. Насонов И. Д. Моделирование горных процессов / И. Д. Насонов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1978. – 256 с.

2. Пяткова Э.П. Исследование деформаций основания отвалов на моделях из эквивалентных материалов / Э.П. Пяткова, П.С. Шпаков, Ф.К. Низаметдинов // Исследование новых технологических схем при разработке и охране угольных и калийных месторождений: сб. статей. – Караганда: Изд-во КарПТИ, 1979. – С. 138–141.

3. Фисенко Г. Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов / Г. Л. Фисенко. – М.: Недра, 1965. – 378 с.

4. Покровский Г.И. Центробежное моделирование в строительном деле / Г.И. Покровский, И.С. Федоров. – М.: Стройиздат, 1968. – 247 с.

5. Зоря Н. М. Об измерении смещений точек модели из эквивалентных материалов / Н. М. Зоря // Труды ДИИ, секция маркшейдерско-геодезическая. – Харьков: Изд-во Харьковского ГУ, 1959. – Т. 25, вып. 5. – С. 152–164.

6. Земисев В.Н. Определение сдвижения точек модели методом оптических тензометров / В.Н. Земисев // Сборник статей по вопросам исследования горного давления и сдвижения горных пород: труды ВНИМИ.– Л.: ВНИМИ, 1959. – Сб. 36. – С. 61–67.

7. Козлов Ю.С. Подбор и определение физико-механических и деформационных характеристик искусственных смесей для моделирования откосов / Ю.С. Козлов, А.М. Мочалов // Труды ВНИМИ.– Л.: ВНИМИ, 1966. – Сб. 60. – С. 104–108.

8. Козлов Ю.С. Определение параметров призмы возможного обрушения в откосах уступов, бортов карьеров и отвалов / Ю.С. Козлов // ФТПРПИ. – 1972. – № 4. – С. 73–76.

9. Демин А. М. Устойчивость открытых горных выработок и отвалов / А. М. Демин. – М.: Недра, 1973. – 232 с.

10. Барулин А.И. Моделирование нагруженных откосов в массиве пластичных горных пород / А.И. Барулин, З.Р. Рахимов // Вестник НИА РК. – 2007. – № 4. – С. 94–99.

11. Рахимов З.Р. Исследование влияния жесткости испытательного стенда на точность моделирования откосов / З.Р. Рахимов, А.И. Барулин // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2007. – № 4 (20). – С. 5–9.

12. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды / В.В. Соколовский. – М.: Наука, 1990. – 272 с.

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА «РЕПЕРНЫЕ ЛИНИИ – ФОТОУПРУГИЕ ДАТЧИКИ» Для оперативного прогноза геомеханических явлений

### А.В. Крутиков, Д.А. Менгель

Горные работы в АО Соколовско-Сарбайское горно-обогатительное производственное объединение «ССГПО» (РК, г. Рудный) включают открытый и подземный способы разработки. Проблема геомеханического обеспечения горных работ возникла при освоении подземного способа разработки, связанного с вводом в эксплуатацию в 1975 г. Соколовского подземного рудника (СПР), ныне шахта «Соколовская». В то время предполагалось, что переход на подземные работы будет осуществлен одновременно на двух рудниках – Соколовском (СПР) и Южно-Сарбайском (ЮСПР). Однако в связи с тем, что горно-технические условия разработки оказались гораздо сложнее ожидаемых, было принято решение временно законсервировать ЮСПР и только после наработки производственного опыта на базе СПР принять окончательное решение о дальнейшем расширении подземных работ. Геомеханическое обеспечение горных работ на АО «ССГПО» до 1992 г. выполнял ИГД МЧМ СССР (ныне ИГД УрО РАН) как головной отраслевой НИИ.

В то время горная науќа в области механики горных работ стремительно развивалась. Отчасти этому способствовало то, что экспериментально были установлены так называемые природные тектонические напряжения, которые научились количественно определять в натурных условиях. И оказалось, что на каждом месторождении они разные, т. е. в мире нет даже двух месторождений, где первоначальные напряжения абсолютно одинаковые. Выявление тектонических напряжений имело решающее значение для технологии горных работ.

Главное заключалось в том, что, например, для подземной разработки эмпирические методики с коэффициентами запаса прочности в 2–5 частично устарели. Появилась возможность существенно повысить точность расчетов устойчивости конструктивных элементов системы разработки за счет применения новых экспериментальноаналитических методов. Например, горизонтальные составляющие первоначальных напряжений, действующие на Соколовском месторождении в субширотном направлении, т.е. вкрест простирания рудных тел (запад-восток), оказались в 2–2,5 раза больше, чем вес налегающих пород. Геомеханические исследования на СПР позволили объяснить природу самообрушений при относительно небольших обнажениях горных пород: при камерно-целиковой выемке с твердеющей закладкой такие явления возникали даже на начальных стадиях отработки камер, когда площадь горизонтальных и наклонных обнажений была менее 20–30 м<sup>2</sup>. Исследования показали, что скальный горный массив СПР на начальной стадии (незапредельного) деформирования ведет себя как линейно деформируемый. И значит, к нему можно было применять законы механики сплошных сред, в частности теорию упругости. Это позволило определить количественно первоначальное напряженное состояние массива и прочностные характеристики разных типов горных пород.

В качестве технического обеспечения были применены системы наблюдательных станций (HC) «фотоупругие датчики – реперные линии». Суть заключалась в том, что около будущих выработанных пространств в горных выработках в двух взаимно перпендикулярных направлениях устанавливались HC. При изменении конфигурации выемки одновременно снимались показания по смещениям с помощью реперов и изменения нагрузок по фотоупругим датчикам. Далее по специально разработанной методике с применением обратной задачи теории упругости определялись первоначальные напряжения, действующие в массиве горных пород еще до того, как горные работы были начаты.

Это было существенным достижением, поскольку удалось:

 во-первых, определить количественно прочность массива и его интегральные деформационные характеристики на базах, соизмеримых с параметрами системы разработки;

 во-вторых, выполнить классификацию реального массива разных пород по устойчивости.

Все это повышало достоверность инженерных расчетов по устойчивости и доказало, что лабораторные испытания горных пород информативно очень мало что дают без натурных замеров. Полученные результаты в области геомеханических исследований на СПР выявили еще одну проблему: отдельные участки и типы горных пород на глубине 300 м оказались склонными к динамическим проявлениям горного давления – горным ударам, т. е. некоторые породы были способны к мгновенному разрушению. Данный краткий обзор сделан, чтобы представить более полно ситуацию, сформировавшуюся в данном направлении на АО «ССГПО».

В 1998 г. на СПР была изменена система разработки: рудник перешел от закладки к системе с обрушением, при этом существенно изменились конструктивные параметры системы. Объемы выемочных единиц и техногенное воздействие на массив выросли в 3–5 и более раз, соответственно. До 2005 г. темпы годового прироста объемов добычи возрастали на 10–15 % ежегодно. Но в 2005 г. случилась авария: после очередного массового взрыва произошел прорыв воды и песчано-глинистых отложений в горные выработки в объеме не менее 100–150 тыс. м<sup>3</sup>. Процесс ликвидации последствий составил около 6 месяцев. Тогда было принято решение о создании службы геомеханики с целью прогноза и предотвращения подобных техно-генных явлений. Встала задача: выбрать методику и технические средства оперативного прогноза неблагоприятных геомеханических событий, связанных с внезапными обрушениями больших объемов горных пород.

На первом этапе службой геомеханики было решено использовать уже наработанный ИГД опыт 80–90-х годов.

Как уже упоминалось, в период с 1975 по 1992 г. на СПР хорошо зарекомендовал себя экспериментально-аналитический метод определения первоначального напряженного состояния массива горных пород и его механических свойств с использованием системы наблюдательных станций типа «фотоупругие датчики – реперные линии» [1, 2]. По данной методике на верхних горизонтах (до глубины H = 300 м) было определено первоначальное НДС массива пород, а также его прочностные и деформационные характеристики на базах, соизмеримые с параметрами выемочных единиц при системах с закладкой (до 20–50 м) [3].

В 2006–2007 гг. службой геомеханики было оборудовано 3 наблюдательных станции – в центре, на южном и северном участках шахтного поля на глубине около 400 м. Например, НС «Центр» была оборудована в центральном участке шахтного поля, в районе отработки выемочного блока 2/5, гор. –210 м (глубина 390 м). Расположение НС показано на рис. 1.

Применялась следующая периодичность измерений: до и после очередного массового взрыва по выемочным блокам; дополнительные контрольные замеры, если период времени между массовыми взрывами превышал 2–3 недели. По НС «Центр» сделано 38 серий измерений. Фиксировалась динамика изменения следующих параметров НДС массива (разность между последним измерением и начальным):

- приращения деформаций (смещения) по реперным линиям;

– приращения вертикальных  $\Delta \sigma_z$  и горизонтальных напряжений по каждому фотоупругому датчику (ФД)  $\Delta \sigma_x$  и  $\Delta \sigma_y$  МПа; ( $\Delta \sigma_x$  – в направлении вкрест простирания месторождения;  $\Delta \sigma_y$  – по простиранию месторождения; знак «–» означает сжатие, «+» – растяжение);

– направление главных напряжений в фотоупругом датчике,  $\alpha$  (угол между горизонталью и алгебраически меньшим главным нормальным напряжением  $\sigma_1$ , отсчитываемый против часовой стрелки), град.



Рис. 1. Наблюдательная станция «Центр». Местонахождение станции в районе горных работ

Динамика изменения представленных параметров показана в виде графиков на рис. 2, 3.

Анализ полученных данных показал следующее:

1. Показания по фотоупругим датчикам оказались весьма чувствительными к резким изменениям геомеханического состояния массива горных пород в районе предполагаемого выхода воронок обрушения на поверхность. Так, в период 3.11.06 – 12.12.06 фотоупругие датчики начали показывать горизонтальную и вертикальную разгрузки, а 23.12.06 воронка обрушения Блока 1/9, находящегося над HC «Центр», вышла на поверхность.

2. Второй период разгрузки по датчикам зафиксирован в интервале 14.02.07 – 13.03.07. А 14.03.07 объединенная воронка Блоков 9/17 и 17/25 вышла на поверхность. Причем в обоих случаях синхронно с датчиками разгрузка была зафиксирована и по реперным линиям, расположенным на одних базах с датчиками (ФД № 1–6 на реперной линии 1–2 в ВХШ-21, ФД № 7–9 на реперной линии 3–4 в БО-7).

3. Примерно с 12.04.07 по датчикам был зафиксирован 3-й случай разгрузки. С 20.04.07 разгрузка была зафиксирована и по реперным линиям. Тогда было высказано предположение о формировании очередного геомеханического события. Предположительно, это мог быть процесс разрушения целика между 2-мя воронками в коренных породах и формирования объединенной зоны обрушения. Стимули-



Рис. 2. «Поворот» главных нормальных напряжений в датчике в период геомеханического события, НС «Центр»

ровало это явление продолжение отработки блоков 2/5 и 17/25. Расстояние между ними составляло в среднем около 100 м. Примерный выход зоны обрушения ожидался на стыке 3-х воронок (с юго-востока).

4. С 9 на 10 августа 2007 г. в подтверждение предположения (см. п. 3), произошел третий случай образования воронки над центральным участком блока 2/5. Причем характер проседания поверхности имел существенные отличия от воронок 1/9 и 9/17. Центр прогиба (провала) поверхности был в виде небольшой воронки диаметром и глубиной 12–15 м, а находился примерно на пересечении маркшейдерских линий I и XX. Далее наблюдалось плавное оседание поверхности с начальным диаметром 100–120 м без резкого нарушения ее сплошности, но с круговыми трещинами разрыва. Некоторые из них имели смещение по высоте. Ширина трещин в среднем от 0,2 до 0,5–0,7 м. Такое проседание поверхности характерно, когда самообрушение развивается продолжительных пустот. Диаметр площадного оседания постепенно увеличивался и через 2–3 недели составил примерно 120–140 м. Объем провала в центре составил примерно 40–60 тыс. м<sup>3</sup>.

При системе с закладкой «возмущения» массива происходили, как правило, после очередного массового взрыва, а между взрывами



Рис. 3. «Всплески» смещений в период геомеханических событий, НС «Центр»

измеряемые данные оставались стабильными. То же происходило и при системах с обрушением, но только на первом этапе отработки блока. Примерно через 3–4 месяца с момента начальных замеров было отмечено: направления главных напряжений довольно резко менялись (иногда на 180°), причем массовых взрывов перед замерами не производилось. Оказалось, это связано с развитием зоны обрушения по высоте.

На рис. 2 приведены графики изменения направления главных напряжений по фотоупругим датчикам при отработке блока во времени. При регистрации «поворота» главных напряжений происходит выход зоны обрушения на поверхность. По упомянутым станциям это было зафиксировано три раза. Причем разрыв во времени между фиксированием «поворота» напряжений и выходом зоны обрушения на поверхность составлял от трех месяцев до одного дня. После этого направление главных напряжений возвращалось примерно к исходному состоянию, хотя и с несколько иным уровнем напряженного состояния.

В момент просадки поверхности над блоком 2/5 (10 августа 2006 г. в 4 ч 20 мин) ощущались незначительные колебания почвы. Выход пустот на поверхность (процесс воронкообразования) может сопровождаться динамическими явлениями, что происходит из-за быстрого перераспределения горного давления на соседние опорные и охранные целики.

В связи с указанными явлениями 16.08.07 были сделаны замеры по HC «Север» (гор. –210 м), которые показали прирост напряжений в этом районе на 2–3 МПа по сравнению с замером от 03.07.07. А замеры, проведенные через неделю (23.08.07) по этим станциям, показали уже разгрузку массива.

Данные факты указывают на то, что проседание поверхности произошло в результате быстротечного разрушения породного целика на уровне коренных пород, находящегося между зонами обрушения блоков 1/9, 9/17 и 2/5. Из опыта эксплуатации других месторождений, отрабатываемых системами с обрушением руды и вмещающих пород, известно, что такой характер проседания поверхности (так называемое «плоское дно») обычно возникает при отсутствии явных пустот при резком разрушении породных целиков, что имеет место и на Соколовском подземном руднике. Произошло подобное событие с перераспределением опорного давления частично на северный фланг, в район охранного целика откаточного орта 6 (ОО-6). Часть нагрузки перераспределилась в сторону юга на массив в район ОО-3. Для проверки данного предположения по HC «ЮГ» (гор. –240 м) выполнены замеры напряжений и деформаций. Они показали небольшое вертикальное сжатие в пределах 0,8–1,0 МПа до начала отработки Блока 6/1, в районе которого находились НС «ЮГ». Причина «пригрузки» та же, что и на станции «Север».

Таким образом, комплексное использование фотоупругих датчиков и реперных линий на Соколовском подземном руднике позволило, наряду с выполненной ранее количественной оценкой НДС массива, получать еще и оперативную информацию о геомеханических процессах при ведении горных работ системами с обрушением руды и вмещающих пород. Данный подход позволяет прогнозировать опасные явления, связанные с развитием зон обрушения, образованием провалов и воронок на поверхности.

#### Библиографический список

1. Влох Н. П. Методические рекомендации по измерению напряжений с помощью фотоупругих датчиков / Н. П. Влох, А. Д. Сашурин, А. В. Зубков; ИГД МЧМ СССР. – Свердловск, 1972. – 51 с.

2. Влох Н. П. Экспериментально-аналитическое исследование НДС массива на Соколовском подземном руднике / Н. П. Влох, А. В. Крутиков, Ю. П. Шуплецов // Исследование напряжений в горных породах: сб. науч. тр. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1985. – С. 39–42.

3. Влох Н.П. Геомеханический анализ тектонически нарушенных массивов на Соколовском подземном руднике / Н.П. Влох, А.В. Крутиков, Ю.П. Шуплецов // Проблемы механики горных пород: сб. науч. тр. – М.: Наука, 1987. – С.181–189.

4. Турдахунов М. М. Геомеханическое обеспечение горных работ на Соколовском подземном руднике АО «ССГПО» / М. М. Турдахунов, А. В. Крутиков // Горный журнал Казахстана. – 2008. – № 2. – С. 25–27.

# ПРАКТИКА РЕШЕНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ЗАДАЧ В РАЗЛИЧНЫХ ОБЛАСТЯХ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ

УДК 004.9:624.131.1

## ПРИМЕНЕНИЕ GIS-ТЕХНОЛОГИЙ В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ НА ПРИМЕРЕ ТЭО Шурабской гэс

### Ф. Сидиков, А. Ходжиев

XXI век называют веком компьютеризации (информатизации) всех сфер жизнедеятельности человека: управления, образования, здравоохранения, сельского хозяйства и т. д. Одним из бурно развивающихся направлений компьютеризации является использование геоинформационной системы GIS. В данной статье речь идет о GIS-технологии, программы которой используются в геологии, где она применяется в разнообразных формах.

## Геоинформационная система GIS: понятие, программы

Геоинформационная система GIS - это программно-аппаратный комплекс, при помощи которого решается совокупность задач по хранению, отображению, обновлению и анализу пространственной и атрибутивной информации по объектам территории. Одна из основных функций GIS - создание и использование компьютерных (электронных) карт, атласов и других картографических произведений. Основой любой информационной системы служат данные, которые в GIS подразделяются на пространственные, семантические и метаданные. Пространственные данные описывают местоположение объекта в пространстве, например, координаты угловых точек здания, представленные в местной или любой другой системе координат. Семантические (атрибутивные) –это данные о свойствах объекта: геологический индекс, условные обозначения, возраст и прочие характеристики грунта. Метаданные – данные о данных, например, информация о том, кем, когда и с использованием какого исходного материала получены данные. Первые GIS были созданы в Канаде, США и Швеции для изучения природных ресурсов в середине 1960-х годов, а сейчас в промышленно развитых странах существуют тысячи GIS, используемых в экономике, политике, экологии, управлении, охране природных ресурсов, кадастре, науке, образовании и т. д. Они интегрируют картографическую информацию, данные дистанционного зондирования и геолого-экологического мониторинга, статистику и переписи, гидрометеорологические наблюдения, экспедиционные материалы, результаты бурения и т.п. GIS представляет собой централизованную базу данных пространственных объектов и инструмент, который предоставляет возможности хранения, анализа и обработки любой информации, связанной с тем или иным объектом GIS, что сильно упрощает процесс использования информации об объектах заинтересованными службами и лицами. GIS предназначена для решения научных и прикладных задач анализа, оценки, прогноза и управления окружающей средой и территориальной организацией общества. Основу GIS составляют автоматизированные картографические системы, а главными источниками информации служат различные данные. GIS – наука, технология и производственная деятельность по научному обоснованию. проектированию, созданию, эксплуатации и использованию геоинформационных систем; по разработке геоинформационных технологий; по прикладным аспектам или приложениям GIS для практических или геологических научных целей.

# Программное обеспечение GIS

Инструментальная GIS может быть предназначена для самых разнообразных задач: для организации ввода информации (как картографической, так и атрибутивной), ее хранения (в том числе и распределенного, поддерживающего сетевую работу), отработки сложных информационных запросов, решения пространственных аналитических задач (коридоры, окружения, сетевые задачи и т. д.), построения производных карт и схем и, наконец, для подготовки к выводу на твердый носитель оригинал-макетов картографической и схематической продукции. Картографические системы сочетают в себе хранение и большинство возможных видов визуализации пространственно распределенной информации, содержат механизмы запросов по картографической и атрибутивной информации, но при этом существенно ограничивают возможности пользователя по дополнению встроенных баз данных. Программное обеспечение средства пространственного моделирования, задача которых моделировать пространственное распределение различных параметров (рельефа, зон экологического загрязнения, участков затопления при строительстве плотин и др.).

К специальным средствам обработки и дешифрирования данных зондирований земли относятся пакеты обработки изображений, снабженные различным математическим аппаратом, позволяющим проводить операции со сканированными или записанными в цифровой форме снимками поверхности земли. Это довольно широкий набор операций, начиная со всех видов коррекций (оптической, геометрической) через географическую привязку снимков и др. Мировая тенденция такова: по данным исследовательской фирмы Daratech (США), мировой рынок GIS для персональных компьютеров в настоящий момент в 121,5 раза опережает общий рост рынка GIS-решений. Так, для ведущих поставщиков инструментальных GIS стало уже правилом поставлять, вместе с системой, цифровую картографическую основу того региона, где распространяется товар.

Современные геоинформационные системы с их развитыми аналитическими возможностями позволяют наглядно отобразить и осмыслить информацию о конкретных объектах, процессах и явлениях в их совокупности, выявить взаимосвязи и пространственные отношения; поддерживают коллективное использование данных и их интеграцию в единый информационный массив. К цифровым картам, или цифровой картографической основе с тематическими слоями, являющимися геопространственным базисом GIS, могут подключаться базы данных недвижимости, земельных участков организаций, денежной оценки земель, инженерных сооружений, памятников градостроения и архитектуры, сведений по геологии и т. д. В базе данных также можно организовать хранение как графической, так и всей технической, справочной и иной документации. В современных GIS появилась возможность трехмерного представления территории. Трехмерные модели объектов, внедряемые в 3-мерный ландшафт, спроектированный на основе цифровых картографических данных и материалов дистанционного зондирования, позволяют повысить качество визуального анализа территории и обеспечивают принятие взвешенных решений с большей эффективностью (рис. 1–4).



Рис. 1. Трехмерная модель рельефа, созданная на основе ArcGIS в НИПИ «Нурофар»

GIS помогает создать базовую структуру для совместной работы и общения, предоставляя общее поле ссылки на данные на основе их пространственного местоположения. То есть появляется возможность привязать к этому местоположению (или к находящемуся в данном месте объекту) любую связанную с ним информацию, легко извлекать ее и наладить удобный и быстрый обмен этой информацией. До недавних пор использовали модель GIS, основанную на



Рис. 2. Цифровая инженерно-геологическая карта



Рис. 3. Карта высот

файловой структуре хранения и обращения к данным. В результате отдельные GIS-пользователи или небольшие группы, выполняющие частные проекты, создавали и поддерживали свои собственные наборы данных, хранящиеся в их персональных компьютерах. Такой способ работы часто приводил к быстрому росту объемов избыточных данных и приложений, которые, по сути, были недоступны для других пользователей даже в той же самой организации. Цель создания корпоративной GIS заключается во внедрении технологий, стандартов и методов, обеспечивающих более тесное взаимодействие, взаимообмен данными и услугами и, следовательно, повышающих производительность и эффективность работы и GIS-пользователей, и всей организации. В случае, когда организация координирует свою деятельность на основе GIS, все сотрудники, использующие пространственные данные, получают возможность обращаться к общим данным, затрачивая меньше времени на их поиск, обновление и обобщение. У них появляется значительно больше времени и возможностей в полной мере использовать в своей работе мощные аналитические средства, которые предоставляет GIS-технология. Сама по себе информация в цифровом виде, несомненно, имеет ряд преимуществ перед бумажными носителями.

При использовании GIS-технологий процесс обновления информации становится менее трудоемким, появляется возможность структурной организации и классификации данных на момент их ввода в систему. После анализа мирового рынка программного обеспечения, которое может стать основой проектирования, разработки и запуска проекта GIS, выбор был остановлен на решениях компании



Рис. 4. Карта углов наклона

ESRI, которая при создании программных продуктов ориентируется на удовлетворение современных потребностей пользователей GIS. По каждому из программных продуктов семейства ArcGIS имеется подробная документация, примеры использования, инструментарий для разработчиков, обеспечивается техническая поддержка, активно работают форумы пользователей.

### Заключение

Таким образом, использование GIS-технологий показало, какое значение они имеют в сфере развития геологии и других специальностей. В настоящее время GIS – фундамент информационной системы, поскольку она является источником всех пространственных данных по объектам, территориям и может служить мощнейшим средством для обработки этих данных, решать сложнейшие аналитические задачи в области моделирования процессов в геологической среде.

Программа ArcGIS была использована при составлении проекта на стадии ТЭО «Разработка и корректировка Шуробской ГЭС на реке Вахш» в НИПИ «Нурофар». Данная программа показала очень большие возможности как при составлении графических материалов, так и при составлении базы данных, что существенно облегчает работу при проектировании. Не стоит недооценивать роль данных систем при решении управленческих задач высшего уровня и использовании GIS-технологий на рабочих местах высшего звена геологического мониторинга. При реализации программ информатизации важных проектов проблемам разработки и развития геологического контроля GIS-технологиям должно быть уделено особое место.

#### Библиографический список

1. Берлянт А. М. Картография: учебник для вузов / А. М. Берлянт. – М.: Аспект Пресс, 2001. – 336 с.

2. Баранов Ю.Б. Геоинформационные технологии в геологии и недропользовании / Ю.Б. Баранов, Р.В. Грушин // Геопрофи. – 2006. – № 2. – С. 4 – 7.

3. Дьяченко Н.В. Использование ГИС-технологий в решении задач управления [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.nocnit.ru/2st/materials/Diachenko.html

4. Данные журнала «ArcReview», труды А.М. Берлянта, данные Интернет-сайта [Электронный ресурс] – Режим доступа: www. dataplus. ru, www. gis. su.http:// stepnoy-sledopyt.narod.ru/geologia/gis.htm УДК 622.1: 622.271

## МЕХАНИЗМ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ГЛИНИСТЫХ КАРЬЕРНЫХ ОТКОСОВ Под действием внешней нагрузки

А.И. Олейник, З.Р. Рахимов, В.А. Моисеев

Оползни и натурные наблюдения за деформированием бортов карьеров бокситовых месторождений, расположенных в Костанайской области, доказывают, что потеря устойчивости откосов и склонов, сложенных слабыми упругопластичными породами, происходит практически по горизонтальным плоскостям скольжения. Как правило, такая ситуация имеет место при наличии в основаниях откосов слабых горизонтальных линз, слоев или водонасыщения блоков скольжения [1]. Причиной возникновения и развития оползней является структурная неустойчивость, проявляющаяся в переуплотненных породах в условиях сложного напряженно-деформированного состояния. Подобная структурная неустойчивость чеганских выветренных глин определена в экспериментальных исследованиях при построении паспорта прочности пород, формирующих карьерные откосы [2]. Исследования позволили выявить, что в условиях сложного напряженного состояния (совместное действие сжатия и сдвига) прочностные характеристики и модуль упругости пород вначале возрастают, а затем при достижении некоторого предельного значения резко снижаются. Это иллюстрирует ниспадающая ветвь построенного на основе лабораторных исследований паспорта прочности чеганских выветренных глин (рис. 1). Штриховой линией на рис. 1 показана характеристика прочности при условии, что порода не проявляет свойств структурной неустойчивости.



Рис. 1. Паспорт прочности четвертичных и чеганских выветренных глин

С точки зрения классической механики существует потеря устойчивости первого и второго рода. Явление структурной неустойчивости породы можно рассматривать как потерю устойчивости первого рода (изменение физических свойств материала). В дальнейшем происходит отрыв и скольжение слоя, теряющего устойчивость. Эту стадию можно рассматривать как вариант потери устойчивости второго рода (потеря устойчивости формы). В рассматриваемой ситуации имеет место смешанный механизм потери устойчивости, который выражается первоначально в резком уменьшении физико-механических свойств в переуплотненных породах, а затем, как следствие, физическая нестабильность и потеря устойчивости формы. В соответствии с [1] ограничимся рассмотрением плоской задачи и введем в рассмотрение только одну функцию перемещений *и* вдоль оси *OX*.

Применение классических подходов [1] для исследования данной ситуации находится в противоречии с натурными данными. Основным условием и предпосылкой потери устойчивости в классических случаях является наличие уже существующего контактного горизонтального жесткого подстилающего слоя или сильно увлажненного тонкого глинистого слоя, структура и физико-механические свойства которого напоминают тонкий вязкий смазывающий слой. Подобная ситуация отмечается в [3], где предполагается, что в предельной ситуации пластические деформации распределены по всему слабому слою, а контактные напряжения на поверхностях скольжения постоянны  $(\tau_{max} = c)$  и не зависят от функций перемещения, что не совсем точно отражает контактное взаимодействие слоев для протяженной конструкции. В моделях Jambu и Bishop [1], базирующихся на принципе «отвердения», в качестве основной причины, реализующей данный механизм потери устойчивости, выступают проекции вертикальных сил от собственного веса недеформируемых блоков на наклонные плоскости скольжения. Недостатком модели является то, что при таком подходе в протяженном слое не учитывается собственно деформирование самого слабого слоя, а также обусловленное принципом Сен-Венана слабое влияние краевых сил на потерю устойчивости.

В настоящей работе предполагается, что формирование слабого слоя является результатом структурной неустойчивости слабых глинистых пород, проявляющейся в разрушении жесткого скелета породы, высвобождении и выдавливании поровой воды из породы, придающей породам свойства вязкой жидкости. В исследовании рассматривается уточненное совместное поведение массива, теряющего устойчивость, и вязкого слоя. Кроме того, целесообразно использование динамической модели потери устойчивости, в которой учитываются не только кинетические процессы в вязком слое, но и упругие и инерционные свойства пород откоса. С точки зрения теории малых возмущений слабые динамические инерционные силы в системе, находящейся в критическом состоянии (так как именно такое состояние исследуется), провоцируют начало горизонтального скольжения откоса, то есть собственно потерю устойчивости.

Для исследования поставленной задачи первоначально используется численное моделирование на основе метода конечных элементов [4, 5], которое доказывает возможность реализации указанного механизма потери устойчивости и дает обоснование целесообразности решения задачи в плоской постановке. В исследуемом случае целесообразно остановиться на аналитическом решении проблемы, что максимально упростит постановку задачи и позволит выявить наиболее важные критерии для потери устойчивости откоса.

Учитывая протяженность слоя, теряющего устойчивость по оси *OX*, т. е. считая, что толщина слоя существенно меньше его длины, для учета перемещений по оси *OX* с достаточной точностью можно ввести только одну функцию перемещений *и* и рассмотреть задачу в рамках одноосного напряженного состояния.

На рис. 2 показан участок отвала, создающий дополнительную вертикальную нагрузку *q* на слой. Под действием этой нагрузки в предотвальной области создается область критических напряжений, предшествующих образованию наклонной трещины.

Следует отметить, что если для наклонной области первоначального накопления трещин поведение материала соответствует модели Кулона – Мора (см. рис. 2) или уточненным нелинейным моделям [6], то для тонкого слоя, по которому происходит сдвиг верхнего слоя откоса, такое представление является неточным. Для описания данного слоя целесообразнее использовать модели идеально-пластичного тела, материала со ступенчато-переменным модулем упру-



Рис. 2. Механизм потери устойчивости

гости или используемую в гидродинамике модель смазочного слоя. Наиболее удачной для описания механики потери устойчивости в данном случае является модель скольжения двух плит, между которыми расположен тонкий несжимаемый вязкий слой [7] с учетом явлений динамики (рис. 3).

Для решения задачи устойчивости откоса используется динамический метод [8]. По границе контакта верхнего слоя толщиной H с вязким слоем толщиной h действуют касательные напряжения, определяемые законом жидкостного трения Ньютона [7], в соответствии с которым касательные напряжения в вязком слое пропорциональны угловой скорости деформаций сдвига. Считается, что горизонтальные перемещения подстилающего слоя близки к нулю. В таком случае

$$\tau = \pm \mu \frac{\dot{u}}{h},\tag{1}$$

где µ — коэффициент динамической вязкости контактного слоя (Па·с); *h* — толщина контактного слоя; точкой обозначена операция дифференцирования функции *u* по времени.

Дифференциальное уравнение движения верхнего слоя с учетом контактных касательных напряжений т по нижней границе принимает следующий вид:

$$EAu'' - \rho A\ddot{u} + \mu \frac{\dot{u}}{h} = 0, \qquad (2)$$



Рис. 3. Контактное взаимодействие слоев в массиве пород

где E,  $\rho$ , A – соответственно, модуль упругости, плотность породы и площадь поперечного сечения верхнего слоя ( $A = 1, 0 \cdot H$ ); H – толщина верхнего слоя.

После деления уравнения (2) на произведение  $A\rho$  и введения обозначения  $c^2 = E/\rho$ ,  $\beta = \mu/Hh\rho$  получается дифференциальное уравнение:

$$c^{2}u'' - \ddot{u} + \beta u = 0.$$
 (3)

В соответствии с динамическим методом расчета устойчивости рассматривается возможное отклоненное состояние системы, которому соответствует отрыв верхнего слоя по наклонной трещине основного массива пород и начало колебательного движения. В начальный момент по внутренней и внешней границам по оси *OX* нормальные напряжения близки к нулю. С учетом этого осуществляется решение дифференциального уравнения (3) в виде

$$u = B\cos\lambda_k x \cdot \sin p_k t, \tag{4}$$

где  $p_k$  – частота собственных колебаний, соответствующая *k*-й собственной форме;  $\lambda_k = k\pi/l$ ; l – критическая длина слоя, теряющего устойчивость.

Подставляя (4) в дифференциальное уравнение (3), получаем уравнение частот:

$$\rho_k^2 + \beta \rho_k + \lambda_k^2 c^2 = 0.$$
 (5)

Дискриминантом этого уравнения является выражение

$$\Delta = \frac{\beta^2}{4} - \lambda_k^2 c^2. \tag{6}$$

Если дискриминант уравнения (5) близок к нулю, тогда наблюдается апериодическое движение, которое рассматривается как колебание с бесконечно большим периодом, что соответствует моменту потери устойчивости. Если приравнять к нулю дискриминант (6), получается выражение для определения критической длины слоя, теряющего устойчивость:

$$l = \frac{2\pi k H h \sqrt{E\rho}}{\mu}.$$
 (7)

Значение l достигает наиболее опасного значения при k=1,0:

$$l = \frac{2\pi H h \sqrt{E\rho}}{\mu}.$$
 (8)

В частности, при E = 10 МПа,  $\rho = 2$  т/м<sup>3</sup>, H = 10 м, h = 1,0 м и  $\mu = 0,01 \cdot E$  Па·с (как доля от модуля Юнга), используя (8), определяется критическое значение *l*, равное 80 м, которое хорошо согласуется с результатами натурных наблюдений.

Развиваемая методика на основе модели динамического трения Ньютона более корректно описывает деформации сдвига в протяженном вязком слое. В этой модели деформации сдвига в вязко-пластичном слое, сформировавшемся в результате структурной неустойчивости глинистых пород при сложном напряженном состоянии, определяются более дифференцированно и пропорциональны скорости горизонтальных перемещений верхнего слоя, в то время как при использовании модели Кулона – Мора в предельном состоянии деформации сдвига постоянны и равны коэффициенту сцепления породы. В отличие от статических подходов динамический метод расчета устойчивости откосов и склонов позволяет получать решения при отсутствии внешних нагрузок, имеющих проекции в горизонтальном направлении. С точки зрения динамического расчета устойчивости откосов и склонов эти нагрузки играют роль начальных возмущений.

#### Библиографический список

1. Naresh C. Samtani, Edward F. Nowatzki. Soils and foundations. – Volume I. Testing. Theory. Experience. National Highway Institute. US. 2006. – Chapter 6.– P. 6–59.

2. Барулин А. И. Учет нелинейности паспорта прочности слабых горных пород при оценке устойчивости откосов / А. И. Барулин, З. Р. Рахимов // Наука и образование – ведущий фактор стратегии «Казахстан – 2030»: сб. статей XI междунар. науч. конф. – Караганда: КарГТУ, 2006. – С. 10–12.

3. Бабков В.Ф. Основы грунтоведения и механики грунтов / В.Ф. Бабков, В.М. Безрук. – М.: Высшая школа, 1976. – 328 с.

4. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике / А.Б. Фадеев. – М.: Недра, 1987. – 221 с.

5. Олейник А. И. Определение предельной высоты карьерных откосов, сложенных пластичными породами / А. И. Олейник, З. Р. Рахимов, В. А. Моисеев / Наука и образование – ведущие факторы стратегии «Казахстан – 2050» (Сагиновские чтения № 5), 20 – 21 июня 2013 г. Ч. 4.: труды междунар. научно-практической конф. – Караганда: КарГТУ, 2013. – С. 337–339.

6. Шашкин А. Г. Вязко-упруго-пластическая модель поведения глинистого грунта / А. Г. Шашкин // Развитие городов и геотехническое строительство. – 2011. – Вып. № 2. – С. 15–25.

7. Емцев Б. Г. Техническая гидродинамика / Б. Г. Емцев. – М.: Наука, 1981. – 342 с.

8. Безухов П. И. Устойчивость и динамика сооружений в примерах и задачах / П. И. Безухов, О. В. Лужин, Н. В. Колкунов. – М.: Высшая школа, 1987. – 264 с.

## ОЦЕНКА ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ВОЛЬФРАМОВЫХ РУД «СКРЫТОЕ»

#### М.И. Потапчук

В последнее время на Дальнем Востоке России наблюдается vвеличение объемов добычи полезных ископаемых как за счет отработки действующих предприятий, так и освоения новых месторождений. Планируемое к отработке месторождение вольфрамовых руд «Скрытое» расположено в Приморском крае в пределах тектонически активного Амурского геоблока, где уже эксплуатируется ряд удароопасных рудников (Южный, Николаевский, Глубокий и др.), на которых наблюдается весь спектр динамических форм горного давления [1]. Вследствие этого большое значение имеет точная оценка геомеханического состояния массива горных пород, позволяющая еще на стадии проектирования выделить потенциально удароопасные участки горного массива и определить рациональный порядок вскрытия и отработки рудных тел, что обеспечивает наиболее эффективные и безопасные условия освоения месторождения. Для исследования напряженно-деформированного состояния горного массива применялся численный метод (метод конечных элементов) [2,3].

На месторождении выделяются рудные тела – шеелит-карбонатные в слабо метаморфизированных известняках с тонкими (0,2 м) прослоями кремней и с шеелит-кварц-амфиболовым типом оруденения. Границы данных рудных тел устанавливаются по содержанию триоксида вольфрама 0,15%. Поэтому в пределах единого литологического массива формируются сложно построенные рудные тела, имеющие струйчатый, часто прерывистый характер. Количество струй (ветвей) в зависимости от общей мощности метасоматитов разнится и составляет от 3 до10 для одного рудного тела. Таким образом, все выявленные на месторождении рудные тела представляют собой пластообразные, субгоризонтальные залежи, залегающие согласно со слоистостью и сланцеватостью пород. Сплошность оруденения нарушается естественными выклиниваниями, наличием безрудных участков и тектонических зон. Рудные пласты разобщены между собой по вертикали (до сотен метров). Мощность их варьирует от 2,3 до 4,75 м. Оруденение прослежено до глубины 400 м.

Горно-геологические условия залегания рудных тел с углами падения 10–15°, располагаемых одно над другим, предопределили целесообразность отработки комбинированным способом: нагорную часть открытым способом с высотой уступа на конечном контуре 20 м, а глубинную часть ниже гор. 100 м подземным способом.

При обосновании граничных условий для численного моделирования НДС был выполнен анализ региональной геодинамики и экспериментальных данных по оценке напряженного состояния массивов горных пород ряда месторождений дальневосточного региона, который показал, что современное поле тектонических напряжений в районе месторождения «Скрытое» определяется его позицией в пределах Тихоокеанского орогенного пояса в полосе влияния Восточно-Азиатской глобальной сдвиговой зоны. Считается, что сдвиговая зона заложилась в мезозое на окраине Азиатского континента [4]. Для подобных условий характерен эффект весьма неравномерного напряженного состояния участков массива горных пород, который находится под воздействием неотектонических и техногенных процессов. Упомянутое накладывает отпечаток на локальную геодинамическую систему, а следовательно, на характер динамических проявлений горного давления. Повышение достоверности прогноза негативных геодинамических явлений требует учета этого обстоятельства.

С привлечением данных GPS-наблюдений, согласно которым современное перемещение данного участка земной коры имеет отчетливое субширотное направление и составляет 7–10 мм/год, и метода аналогий было реконструировано поле тектонических напряжений в районе месторождения «Скрытое». В нем преобладают субгоризонтальные сжимающие напряжения, ориентированные в субширотном направлении и в 1,8–2,5 раза превышающие гравитационную составляющую. При этом принималось, что тектонические горизонтальные напряжения начинают действовать в нижней (глубинной) части месторождения, а в верхней (нагорной) части массива параметры напряженного состояния определяются действием гравитационных сил и влиянием современного рельефа земной поверхности [1,5].

Использованные для моделирования значения физико-механических свойств пород и руд месторождения «Скрытое» были получены в результате детальной разведки и лабораторных исследований, выполненных в ГИ ДВТГУ. Результаты исследований показали, что вмещающие породы и руды характеризуются средней прочностью (их предел прочности на одноосное сжатие изменяется от 60 до 85 МПа), но различаются по своим упругим характеристикам. По сравнению с вмещающими породами, модуль Юнга у которых составляет в среднем 30 ГПа, а коэффициент удароопасности не превышает 0,7, руды месторождения являются высокоупругими (модуль Юнга изменяется от 53 до 90 ГПа). В результате породы месторождения можно охарактеризовать как *потенциально неудароопасные*. На разных участках профиля учитывались различия физико-механических свойств горных пород (табл. 1).

Таблица 1

Шлотность, кг/м <sup>3</sup>	Модуль упруго- сти, МПа	Коэффициент Пуассона	Прочность на растяжение, МПа	Угол внутреннего трения, град	Сцепление, МПа						
Вмещающие породы											
3140	10500	0,26	12,2	34	10,2						
2670	27000	0,2	13,3	33,8	11,1						
Руда											
2700	53000	0,29	14	34,5	11,8						
3300	90000	0,18	6,8	42,7	6,5						
	<sup>с</sup> W/II), YII) ещающи 3140 2670 22700 3300	<ul> <li><sup>с</sup>, W,IX, ч, U,IV, W, W,IV, W, W,IV, W, W,IV, W, W,IV, W, W,IV, W, W,IV, W,IV,IV, W,IV,IV, W,IV,IV,W,IV,WIV,W</li></ul>	<ul> <li><sup>с.</sup> М.Н., Ч.С., К.К., М., Ч.С., К.К., М., Ч.С., М., К.К., М., Ч.С., К.К., К.К</li></ul>	с.         -о.         ц.         в <td>с.         -о.         л.         в.         с.         и.         в.         с.         г.          г.         г.         г</td>	с.         -о.         л.         в.         с.         и.         в.         с.         г.          г.         г.         г						

Свойства пород, используемые при моделировании

Для оценки геомеханических условий открытой разработки месторождения с позиции удароопасности были промоделированы вариант до начала отработки карьера (исходное поле напряжений) и стадия полной отработки рудных тел открытым способом (до гор. 100 м). Результаты расчетов представлялись в виде изолиний средних нормальных напряжений  $\sigma_{cp} = (\sigma_1 + \sigma_2)/2$  и интенсивности касательных напряжений  $\tau_{uhr} = (\sigma_1 - \sigma_2)/2$ .

Анализ результатов моделирования показал, что до начала ведения горных работ в горном массиве области повышенных сжимающих напряжений наблюдаются преимущественно в северо-восточной части месторождения ниже горизонта 100 м, величина среднего давления и интенсивность максимальных касательных напряжений здесь достигают 15 и 6 МПа, соответственно. Области растягивающих напряжений локализуются в центральной части месторождения на участке породного массива (метасоматиты) ниже горизонта 200 м (до 0,5 МПа), при этом зона их влияния составляет до 100 м. Кроме этого по всему рудному полю прослеживаются значительные зоны разгрузки между залегающими рудными телами.

Картина распределения нормальных напряжений в горном массиве месторождения «Скрытое» на стадии полной отработки карьерных запасов изображена на рис. 1. Установлено, что полная отработка приводит к незначительному росту напряжений в отдельных участках рудного поля. Ниже дна карьера и в бортах наблюдаются минимальные напряжения (до 0,05 МПа), величина которых далека от пределов прочности на сжатие горных пород, что свидетельствует о высокой устойчивости элементов системы разработки. Область невысоких растягивающих напряжений в центральной части месторождения в северо-восточном борту карьера сохраняется, величина касательных напряжений на этом участке составляет 0,25 МПа.

Обобщение всех вышеизложенных данных дает основание считать возможным вести отработку верхней (нагорной) части месторождения «Скрытое» выше горизонта 100 м открытым способом без специальных противоударных мероприятий. Из результатов моделирования следует, что относительно низкий уровень действующего в верхней части месторождения (карьер) гравитационного поля напря-



Рис. 1. Распределение среднего давления  $\sigma_{cp}$  после полной отработки карьерных запасов:

1 – рудные тела с шеелит-кварц-амфиболовым типом оруденения; 2 – рудные тела с шеелит-карбонатным типом оруденения; 3 – метасоматиты по лавам и туфам основного и среднего состава, тофогенным породам; 4 – глинистые, кремнисто-глинистые сланцы, кремнистые глинисто-кремнистые породы, филлиты
жений, повышающийся в отдельных участках массива при ведении горных работ, не может привести к разрушению элементов системы разработки. Кроме того, при относительно высоких значениях пределов прочности слагающих месторождение пород наблюдающиеся области напряжений не являются потенциально удароопасными.

Вместе с тем, учитывая тот факт, что отработка глубоких горизонтов приведет к неизбежному образованию различного вида целиков, являющихся концентраторами высоких напряжений, в результате резкого роста исходных напряжений под действием тектонических сил прогнозируется усложнение геомеханической ситуации с переходом горных работ на нижележащие (ниже гор. 100 м) горизонты. Учитывая это обстоятельство и в соответствии с п. 3 «Инструкции ...» [6], следует отнести шахтные горизонты месторождения «Скрытое» к категории склонных к горным ударам.

### Библиографический список

1. Рассказов И. Ю. Контроль и управление горным давлением на рудниках Дальневосточного региона / И. Ю. Рассказов. – М.: Изд-во «Горная книга», 2008. – 329 с.

2. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике / А.Б. Фадеев. – М.: Недра, 1987. – 224 с.

3. Расчетные методы в механике горных ударов и выбросов: справочное пособие / И. М. Петухов и др.– М.: Недра, 1992.

4. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России: в 2 кн. / под ред. чл.-корр. РАН А. И. Ханчука. — Владивосток: Дальнаука, 2006. – 572 с.

5. Современные движения земной коры по данным GPS-наблюдений в Приморье / В. Я. Тимофеев и др. // Тектоника и металлогения циркум-пацифики и восточной Азии. – Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2007. – С. 340–343.

6. Инструкция по безопасному ведению горных работ на рудниках и нерудных месторождениях, объектах строительства подземных сооружений, склонных и опасных по горным ударам (РД 06-329-99). — М.: ГП НТЦ по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2000. – 66 с.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ МАССИВА ПРИ ОТРАБОТКЕ РУДНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ Системой с самообрушением

### Л. Н. Жеребко, М. М. Аймбетов, Г. К. Джангулова, А. А. Алтаева

Донской горно-обогатительный комбинат разрабатывает месторождения хромитов Южно-Кемпирсайского массива западного Казахстана, по запасам занимающие второе место в мире, а по качеству не имеющие себе равных, обеспечивая полностью как собственные потребности республики в хромитовом сырье, так и страны постсоветского пространства, одновременно экспортируя руду и концентрат в страны дальнего зарубежья. В настоящее время на Донском горно-обогатительном комбинате основной объем добычи руды осуществляется подземным способом на шахтах «Молодежная» и «10 лет независимости Казахстана» («ДНК»), сданной в эксплуатацию в 2001 г. В поле шахты «ДНК» сосредоточено 84 % хромитовой руды Донского ГОКа, лишь незначительная часть которой залегает на глубине 250–400 м от поверхности. Основной объем располагается по существующей классификации на средних (до 600 м) и больших (от 600 до 1500 м) глубинах.

Учитывая геомеханические и геотехнические особенности отработки рудных залежей на глубоких горизонтах и особенно рудных тел месторождений «Миллионное» и «Алмаз – Жемчужина» шахты «ДНК», изучение поведения массива в процессе очистных работ, характера формирования зон обрушения, развития геомеханических процессов, формирования давления на крепь горных выработок, а также выбор наиболее рациональных технологических схем отработки рудных залежей являются важными факторами. Большая мощность рудных тел месторождений хромитов, разрабатываемых подземным способом, и слабая устойчивость рудного массива и вмещающих пород обусловили в свое время выбор системы с самообрушением руды и налегающего массива. В настоящее время она применяется на обеих шахтах. Однако основные запасы шахты «ДНК» залегают на более глубоких горизонтах, чем на «Молодежной», и отработка их сопровождается большим давлением в менее устойчивых породах.

При отработке рудных залежей системой с самообрушением над очистной камерой формируется зона разрыхленных пород налегающего массива. Данное явление рассматривается как процесс, развивающийся во времени с учетом геотехнических особенностей налегающих пород и массива в целом.

С развитием очистных работ при отработке мощных рудных залежей формируется обширная область обрушения, где характер проявления основных геотехнических процессов выравнивается и будет практически однозначным по всей площади [1].

Рассмотрим отдельный элемент, когда высота очистной камеры равна  $h_{k}$ , а коэффициент разрыхления пород налегающей толщи  $k_{p}$ :

$$h_{\rm of} = h_{\rm cb} + h_k$$
 или  $h_{\rm of} = h_{\rm cb} k_{\rm p}$ . (1)

Предложенная выше зависимость дает расчетную величину обрушенных пород для условий, когда степень их разрыхления соответствует значению  $V \cdot k_p$ , где V – объем обрушенных пород в массиве. В реальных условиях в процессе сводообразования происходит уплотнение обрушенных пород под действием сил собственного веса, влияния шахтной воздушной среды и сопутствующих геохимических процессов. В результате уплотнения пород обрушенной массы над сводом образуется свободное пространство, заполняемое последующими обрушениями, что приводит к постепенному росту высоты свода обрушений до возможного предела воздействий геотехнических процессов, обусловленных преимущественно силовыми факторами.

Расчет процесса сводообразования обрушенных пород производится поэтапно, начиная с определения первоначального свода обрушения  $h_{\rm cB}$  для конкретных параметров очистного пространства, в частности высоты камеры  $h_{\rm k}$  и степени разрыхляемости пород налегающей толщи, выраженной коэффициентом разрыхления  $k_{\rm p}$ , для чего используется соотношение (1).

Обрушенная масса пород под действием собственного веса уплотняется, образуя свободное пространство, которое заполняется последующим обрушением. Среднее значение уплотнения *D* определяется по следующей аналитической схеме. Величина напряжения по среднему сечению свода обрушенных пород будет равна

$$\sigma_{\rm cx} = \frac{\gamma h_{\rm o6}}{2k_{\rm p}},\tag{2}$$

где ү – объемный вес пород в массиве.

Далее по графику (рис. 1) определяется относительное сжатие (уплотнения) *D* в процентах [2]. В этом случае величина усадки обрушенных пород определяется следующим образом:

$$h_{\rm vc} = h_{\rm of} + D. \tag{3}$$

На следующем этапе исследований находим величину свода обрушений  $h'_{\rm cв}$ , образующегося в результате заполнения пространства за счет усадки обрушенных пород  $h_{\rm yc}$ :

$$h_{\rm cB}' = \frac{h_{\rm yc}}{k_{\rm p} - 1}$$
(4)

В результате суммарная высота обрушенных пород будет равна

$$h'_{\rm ob} = h_{\rm ob} + h'_{\rm CB}.$$
 (5)

Далее по изложенной выше методической схеме находим относительное сжатие слоя обрушенных пород  $h'_{\rm o6}$  при степени его разрыхления  $k_{\rm p}$ .

По графику (см. рис. 1) находим относительное уплотнение с учетом действия дополнительных сил вторичного обрушения, обозначив его D'. Используя полученные данные, определяем дополнительное уплотнение обрушенных пород  $D_{\text{доп}}$  за счет последующего обрушения, которое будет равно

$$D_{\text{доп}} = D' - D. \tag{6}$$

Используя соотношение (6), находим величину усадки  $h'_{yc}$  слоя обрушенных пород  $h'_{o6}$  под действием вторичного обрушения:



$$h'_{\rm yc} = h'_{\rm ob} D_{\rm gon}.$$
 (7)

Рис. 1. График относительного сжатия в зависимости от величины напряжений

Последующие этапы формирования свода обрушенных пород с учетом усадки решаются по аналогичной схеме до установления минимальных значений  $h_{\rm yc}$ . При выполнении практических расчетов минимальное значение  $h_{\rm yc}$  вполне допустимо в пределах 1–2 м, так как ошибка в этом случае будет менее одного процента, что значительно меньше точности исходных расчетных данных.

В соответствии с разработанной методической схемой развития процесса формирования свода обрушения пород налегающего массива проводятся численные расчеты по определению его величины для различных технологических условий, а именно для очистных камер различной высоты. Полученные данные представлены в графической форме на рис. 2, 3. На рис. 2 показана динамика роста свода обрушений в зависимости от параметров очистных камер для начального этапа, когда степень разрыхленности горных пород соответствует расчетному геотехническому показателю пород  $k_p$ , т. е. без уплотнения, и на заключительном этапе, когда процесс подбучивания на уплотненную массу обрушенных пород приостанавливается. Представленные на рис. 2 графические зависимости достаточно наглядно показывают высокую степень влияния процесса уплотнения на формирование свода и зоны обрушений над очистным пространством [3].

На рис. 3 представлен график зависимости общей высоты обрушенных пород от высоты камер в процессе завершения в них очистной выемки.



Рис. 2. График зависимости формирования свода обрушения от высоты камеры и степени уплотнения

Как видно из рис. 3, динамика развития и возрастания зоны обрушенных пород  $h_{of}$  находится в прямой функциональной зависимости от высоты очистного пространства  $h_k$ . Данную зависимость предлагается оценивать коэффициентом  $k_{of}$  (отношения высоты обрушения и высоты очистной камеры), который выражается соотношением:

$$k_{\rm of} = \frac{h_{\rm of}}{h_{\rm v}}.$$
(8)

Используя выражение (8) и расчетные значения функциональной связи  $h_{of} = f(h_{of})$ , представленные в графической форме на рис. 4, можно получить аналитические зависимости по определению коэффициента обрушения  $k_{of}$  и полной высоты зоны обрушенных пород  $h_{of}$  в процессе развития очистных работ и уплотнения разрыхленной горной массы для различной высоты очистного пространства  $h_k$ :

$$k_{00} = 0,0618 \cdot h_k^{0,7186} + 2,409; \tag{9}$$

$$h_{\rm ob} = k_{\rm ob} h_k$$
 или  $h_{\rm ob} = h_k (0.0618 h_k^{0.7186} + 2.409).$  (10)

Полученные аналитические зависимости (9) и (10) позволяют уже на начальном этапе, в процессе проектирования отработки рудных залежей, определять и прогнозировать величину и характер сводообразования обрушенных пород в процессе развития очистных работ [4].

При проведении исследований по оценке состояния и поведения нетронутого массива пород над зоной обрушения, а в итоге и состояния поверхности возможности развития негативных геотехнических



Рис. 3. График зависимости зоны обрушения от высоты камеры

процессов и вероятности возникновения техногенных катастроф, особый интерес представляет знание степени уплотнения обрушенных пород под действием собственного веса в зависимости от высоты зоны обрушения  $h_{o6}$ . Используя разработанную выше схему развития процесса формирования свода обрушений пород налегающего массива и последующие исследования, можно установить аналитическую зависимость определения коэффициента уплотнения  $k_{ynn}$ , характеризующего степень разрыхленности объема уплотненной обрушенной массы  $V_{ynn}$  по отношению к объему в нетронутом массиве  $V_{\rm M}$ . В результате проведенных численных расчетов для очистных камер различной высоты  $h_k$  получена графическая зависимость определения коэффициента уплотнения  $k_{ynn}$  от высоты обрушенных пород (рис. 5), которая аппроксимируется следующей эмпирической зависимостью:

$$k_{\rm yng} = 0.329 \cdot e^{-0.0035h_{\rm o6}} + 1.238. \tag{11}$$

Формирование свода обрушений и зоны обрушенных пород над выработанным пространством рассматривается как процесс, протекающий с учетом временного фактора и геотехнических особенностей налегающих пород. Это относится, в первую очередь, к условиям отработки мощных рудных залежей с образованием больших объемов выработанных пространств. При этом обрушенная масса пород в три и более раз превышает высоту выработанного пространства.



Рис. 4. Зависимость коэффициента обрушения от высоты камеры

Процесс формирования свода самообрушения породы, происходящий в период очистной выемки и по мере продвижения фронта очистных работ, является практически непрерывным и обусловлен наличием образующихся пустот при выпуске руды, которые затем заполняются обрушенной породой.

В этом случае процесс развития и формирования свода обрушений происходит относительно равномерно по всему фронту ведения очистных работ. В связи с этим расчет параметров сводообразования необходимо проводить по классической схеме, рассматривая отдельный элемент обширной зоны обрушения, а именно расчетную схему с прямоугольными формами очистной камеры и свода обрушенных пород, что вполне допустимо принципами геомеханики.

Как уже было отмечено, процесс формирования зоны обрушенных пород и его параметры находятся в прямой зависимости от высоты очистного пространства и геотехнических характеристик массива вмещающих пород и, в первую очередь, от характера обрушаемости налегающих пород, определяемого коэффициентом разрыхления  $k_p$ . Для условий, когда налегающие породы представлены относительно изотропным в геомеханическом отношении массивом, где степень разрыхляемости может быть выражена единым коэффициентом  $k_p$ , вопрос сводообразования не представляет особых трудностей. Однако в практике отработки месторождений имеют место случаи, когда налегающий массив представлен слоями пород различной мощности и различными геотехническими характеристиками, что несколько усложняет задачу.



Рис. 5. Зависимость коэффициента уплотнения от высоты обрушения

Для решения поставленного вопроса разработана общая методическая схема для расчета сводообразования при отработке рудных залежей под слоистым массивом, когда налегающие слои пород имеют различные мощности  $h_{\rm cn}$  и геотехнические характеристики, в частности  $k_{\rm p}$  (рис. 6).

В итоге проведенных исследований получена аналитическая зависимость по определению высоты свода обрушений  $h_{\rm cB}$  и суммарной высоты обрушенных пород  $h_{\rm oB}$ . Высота свода обрушений  $h_{\rm cB}$  находится из соотношения

$$h_{\rm cB} = h'_{\rm c\Pi} + h''_{\rm c\Pi} + h'''_{\rm c\Pi} + \dots + h^i_{\rm cB}, \tag{12}$$

$$h_{\rm cB}^{i} = \frac{h_{\kappa} - \left[h_{\rm cn}^{\prime}\left(k_{\rm p}^{\prime} - 1\right) + h_{\rm cn}^{\prime\prime}\left(k_{\rm p}^{\prime\prime\prime} - 1\right) + h_{\rm cn}^{\prime\prime\prime}\left(k_{\rm cn}^{\prime\prime\prime\prime} - 1\right) + \dots + h_{\rm cn}^{i-1}\left(k_{\rm p}^{i-1} - 1\right)\right]}{k_{\rm p}^{i} - 1}.$$
 (13)

При большом количестве слоев в налегающей толще уравнение (12) решается при выполнении следующего условия:

$$h_{k} \ge \sum_{n=1}^{i-1} h_{\text{сп.п}}(k_{\text{р.п}} - 1), \qquad (14)$$

где *n* – количество слоев, вовлекаемых в обрушение.





Иными словами, исследуется расчетное количество слоев, вовлекаемых в зону обрушения, и определяется уровень расположения граничного слоя или сплошного массива, на котором формируется остаточная часть свода обрушения.

Как уже было отмечено выше, данная картина возникает при поэтапной отработке мощных рудных залежей в две очереди. На первом этапе в результате проведения очистных работ в налегающем массиве формируется зона обрушенных, разрыхленных пород с определенной степенью уплотнения. На втором этапе горные работы проводятся под слоистым массивом, где нижний слой представлен обрушенными породами, а последующие слои нетронутым массивом с соответствующими геотехническими характеристиками.

Для данной методической схемы при решении вопроса развития и формирования свода обрушения в процессе отработки очистной камеры второй очереди  $h_{k2}$  необходимо установить коэффициент разрыхления  $k'_{p}$  пород первого слоя  $h'_{cn}$ , который находится в прямой функциональной зависимости от степени уплотнения  $k_{ynn}$  обрушенных пород  $h'_{cn}$ . Для решения поставленной задачи первоначально определяем высоту слоя  $h'_{cn}$  для заданных значений параметров очистных камер первой очереди  $h_{k1}$ , в результате отработки которых и сформировался слой обрушенных пород. Используя выражения (9) и (10), находим:

$$h_{\rm cn}' = h_{k,1}(0,0618h_{k,1}^{0,7186} + 2,409); \tag{15}$$

$$k_{\rm ynn} = 0.329 e^{-0.0035 h_{\rm cn}'} + 1.238.$$
 (16)

Как уже было сказано выше, коэффициент уплотнения  $k_{ynn}$  характеризуется степенью разрыхленности объема уплотненной обрушенной горной массы  $V_{ynn}$  по отношению к объему в нетронутом массиве  $V_{\rm M}$ . Аналитически это выражается соотношением:

$$k_{\rm ynn} = \frac{V_{\rm ynn}}{V_{\rm M}}$$
 или  $V_{\rm ynn} = k_{\rm ynn}.V_{\rm M}.$  (17)

В общем виде определением коэффициента разрыхления горных пород  $k_{\rm p}$  является отношение объема породы в разрыхленном (насыпном) виде $V_{\rm pasp}$  к ее объему в массиве  $V_{\rm M}$ :

$$k_{\rm p} = \frac{V_{\rm pasp}}{V_{\rm M}}$$
или  $V_{\rm pasp} = k_{\rm p} V_{\rm M}.$  (18)

В рассматриваемой схеме значение объема уплотненной обрушенной горной массы  $V_{ynn}$  является объемом в массиве первого слоя  $h'_{on}$ :

$$k'_{\rm p} = \frac{V_{\rm pasp}}{V_{\rm ynn}} = \frac{k_{\rm p}V_{\rm M}}{k_{\rm ynn}V_{\rm M}} = \frac{k_{\rm p}}{k_{\rm ynn}}.$$
 (19)

Здесь  $k_p$  – коэффициент разрыхления горных пород массива при формировании свода (слоя  $h'_{cn}$ ) в процессе отработки камер первой очереди.

Таким образом, определив все необходимые геометрические и геотехнические параметры, можно произвести расчет высоты свода обрушения при отработке камер второй очереди, используя для этого выражения (12) и (13), где  $h_k$  принимает значение  $h_{k2}$ , т. е. высоты камер при проведении очистных работ второй очереди.

Разработанная методическая схема является исходным положением для решения вопросов сводообразования при отработке очистных камер под обрушенным массивом.

#### Библиографический список

1. Жеребко Л. Н. Формирование свода обрушений в налегающем массиве, представленном слоями различной мощности / Л. Н. Жеребко, Г. К. Джангулова, Л. М. Пивоварова // Научно-техническое обеспечение горного производства: сб. науч. трудов ИГД им. Д. А. Кунаева. – 2008. – Т. 75. – С. 18–21.

2. Жеребко Л. Н. Формирование горного давления в массиве под обрушенными породами / Л. Н. Жеребко, Г. К. Джангулова, Л. М. Пивоварова // Труды международной конференции, Бишкек 14–15 июня 2006. – Бишкек: Изд-во Института физики и механики горных пород НАН КР, 2006. – С. 265–267.

3. Теоретические основы управления геомеханическим состоянием массива при формировании горных конструкций и прогноз его поведения под влиянием горных работ: отчет о НИР // Фонды ИГД им. Д.А. Кунаева. – Алматы, 2009. – 95 с.

4. Прогноз вероятности техногенных катастроф с позиции геомеханических процессов в массиве горных пород при разработке рудных месторождений в сложных горно-геологических условиях на больших глубинах: отчет о НИР // Фонды ИГД им. Д. А. Кунаева. – Алматы, 2008. – 98 с.

# К ОБОСНОВАНИЮ ПАРАМЕТРОВ КРЕПИ СТВОЛОВ В УСЛОВИЯХ IV КАТЕГОРИИ Устойчивости осадочных пород

## Ю.Г. Феклистов, А.Д. Голотвин, М.А. Широков

Важным условием высокоэффективной и безопасной работы угольных шахт является обеспечение рабочего состояния стволов с минимальными затратами на их проведение и поддержание. Условия поддержания шахтных стволов определяются степенью сложности механических, структурных и гидрогеологических свойств толщи, взаимным расположением стволов относительно очистных работ и других выработок, процессами водопонижения и дренирования.

Оценка степени сложности поддержания стволов производится в соответствии с категориями устойчивости, определяемыми по величине критерия устойчивости С [1, 2]:

$$C = k_{\rm r} k_{\rm cd} k_{\rm u} k_t H_{\rm p} / [2,63 + k_{\alpha} \sigma_{\rm cmm} (5,25 + 0,0056 k_{\alpha} \sigma_{\rm cmm})], \qquad (1)$$

где  $\sigma_{\text{сжм}}$  – расчетное сопротивление пород массива сжатию, МПа;  $k_{\Gamma}$  – коэффициент, учитывающий взвешивающее действие воды; для участков вне водоносных горизонтов равен 1;

 $k_{co}$  – коэффициент, учитывающий влияние других выработок; для протяженных участков ствола  $k_{co} = 1,0$ , для сопряжений  $k_{co} = 1,5$ ;

 $k_{\rm u}$  – коэффициенты воздействия на ствол очистных работ; для участков, не испытывающих влияния,  $k_{\rm u} = 1,0;$ 

 $k_{\alpha}$  – коэффициенты влияния угла залегания пород  $\alpha$ ,  $k_{\alpha} = 1/(1+0.5 \sin \alpha);$ 

 $k_t$  – коэффициенты влияния времени эксплуатации выработки; для шахтных стволов  $k_t$ =1, для других выработок  $k_t$ =0,9;

 $H_{\rm p}$  – расчетная глубина расположения выработки, м.  $H_{\rm p}$  = kH, где H – проектная глубина, k – коэффициент, учитывающий влияние тектонических напряжений, который для нарушений при отсутствии экспериментальных данных принимается равным 1,5.

При значении критерия *C* : до 3 – устойчивое состояние, I категория; от 3 до 6 – среднеустойчивое, II категория; от 6 до 10 – неустойчивое, III категория; более 10 – очень неустойчивое, IV категория.

Для определения параметров крепи стволов в условиях IV категории в общем случае основываются на расчетах радиуса  $R_L$  зоны предельного состояния пород [1–3]. При естественном напряженном состоянии, близком к гидростатическому, радиус  $R_L$  определяется по формуле

$$R_L = R_0 \left[ (2\gamma H + b_1 \,\sigma_{\rm cmm}) / (b_2 \,\sigma_{\rm cmm} + b_3 P_{\rm K}) \right]^C, \,\rm M,$$
(2)

где  $\sigma_{cжм}$  – расчетное сопротивление пород массива сжатию, МПа;  $R_0$  – радиус выработки вчерне, м;  $P_{\kappa}$  – отпор крепи, МПа;  $\gamma$  – объемный вес пород, МН/м<sup>3</sup>;  $b_1 = 1/(1/\sin\rho - 1); b_2 = 1/\sin\rho; b_3 = 1+tg^2(45+\rho/2);$   $C = 0,5 \text{ ctg } (45+\rho/2) \text{ ctg } \rho;$  $\rho$  – угол внутреннего трения пород, град.

Перемещение породного контура ствола  $U_L$  в зависимости от  $R_O$  и  $R_I$  определяется так:

$$U_L = (R_L^2 - R_O^2) (k_L - 1) / 2R_O,$$
(3)

где  $k_L$  – коэффициент разрыхления пород в зоне предельного состояния с учетом отпора крепи.





I – нагрузочно-деформационная характеристика пород. контура ствола на момент начала его строительства при  $\sigma_{\text{сжм}} \approx 0$ ;  $I^*$  – нагрузочно-деформационная характеристика пород контура ствола при  $\sigma_{\text{сжм}} = \sigma_{\text{сжмo}}$  (ориентировочно через 2–5 лет); 2 и  $2^*$  – нагрузочно-деформационные характеристики крепи ствола

Упругое перемещение пород не следует учитывать, поскольку оно возникает сразу после обнажения и в условиях IV категории сравнительно мало.

Обычно при расчетах параметров крепи определяют нагрузочно-деформационную характеристику пород контура ствола как функцию  $U_L = F(\gamma H, \sigma_{\text{сжм}}, \rho, P_{\kappa})$ , исходя из уравнений (2) и (3). Затем, принимая ту или иную функцию нагрузочно-деформационной характеристики крепи  $U_{\kappa} = F(P_{\kappa})$  и решая эти уравнения совместно, находят отпор крепи и ее перемещение.

На рис.1 показана диаграмма взаимодействия крепи с контуром пород ствола при решении задач такого рода. При этом нагрузочно-деформационную характеристику пород контура ствола определяют без детального учета фактора времени. В конкретных решениях на практике чаще принимают прочность массива пород на основе испытания прочности образцов породы в лабораторных условиях и коэффициента структурного ослабления без учета длительной прочности (решение т. А) или, что реже, принимают ее во внимание, но упрощенно (решение т. В). Так, например, согласно обширным исследованиям, приведенным в работе [4], длительная прочность  $\sigma_{cж t \approx 0}$  при среднем значении  $\sigma_{\infty} = 0,65 \, \delta_{cж t \approx 0}$ .

По нашему мнению, в условиях IV категории устойчивости пород следует нагрузочно-деформационную характеристику пород контура ствола определять на момент начала строительства ствола при  $\sigma_{\text{сжм}} = \delta_{\text{сжм}}$  ориентировочно через 2–5 лет [4, 5] (решение т. С).

### Библиографический список

1. Руководство по проектированию подземных горных выработок и расчету крепи. – М.: ВНИИОМШС, 1983. – 272 с.

2. Указания по рациональному расположению, охране и поддержанию горных выработок на угольных шахтах СССР. – Л.: ВНИМИ, 1986. – 222 с.

3. Фисенко Г. Л. Предельные состояния горных пород вокруг выработок / Г. Л Фисенко. – М.: Недра, 1976. – 272 с.

4. Прочность и деформируемость горных пород / Ю.М. Карташов и др. – М.: Недра, 1979. – 269 с.

5. Громов Ю. В. Управление горным давлением при разработке мощных пологих пластов угля / Ю. В. Громов, Ю. Н. Бычков, В. П. Кругликов. – М.: Недра, 1985. – 239 с.

6. Строительная механика / Ю. М. Бурчаков и др. – М.: Высшая школа, 1983. – 255 с.

7. СНИП II-21-75. Бетонные и железобетонные конструкции: гл. 21, Ч. II / Госстрой СССР. – М.: Стройиздат, 1976. – 89 с.

8. Беляев Н. М. Сопротивление материалов / Н. М. Беляев. – М.: Гостехиздат, 1953. – 856 с.

УДК [622.271.46:622.271.6]:622.831.2

# ВЛИЯНИЕ ПОРОВОГО ДАВЛЕНИЯ ВОДОНАСЫЩЕННОГО ПОРОДНОГО ОСНОВАНИЯ На скорость деформаций сухого отвала

Ю. И. Кутепов, Н. А. Кутепова, Е. В. Сергина

В водонасыщенных горных породах под воздействием природных и техногенных нагрузок формируется специфическое напряженно-деформированное состояние (НДС), изменяющееся во времени и пространстве за счет трансформации гидродинамических полей. Наличие воды в них свидетельствует о потенциальной предрасположенности при внешнем нагружении к образованию избыточного порового давления, которое снижает эффективные напряжения в скелете горной породы и, как следствие, уменьшает их прочность и отражается на деформационном поведении. При этом интенсивность формирования гидродинамического поля, величина и время существования для различных по проницаемости породных разновидностей неодинаковы. Наибольшее влияние поровое давление оказывает на механическую прочность глинистых слабопроница-емых отложений, способных его накапливать и длительное время сохранять. Наличие глинистых пород в телах и основаниях горнотехнических сооружений предопределяет постановку различных научно-технических задач, связанных с изучением формирования порового давления во времени и в пространстве нагружаемого массива, с оценкой его влияния на прочность и деформируемость пород, а также с разработкой методик его учета в гидрогеомеханических расчетах и контроля непосредственно в сооружении.

В соответствии с теорией фильтрационной консолидации при нагружении основания рассредоточенной нагрузкой его породы подвергаются интенсивному силовому воздействию, которое в водонасыщенных грунтах полностью передается на воду, вызывая мгновенное повышение порового давления в породах, залегающих в некоторой области, непосредственно под контуром нагружения. Однако при проведении опытных отсыпок отвалов на гидроотвалах [1–3] установлены новые закономерности формирования порового давления в основании насыпи, отличные от классических представлений теории фильтрационной консолидации. Фактически возмущение в поровой воде, возникшее первоначально лишь в ограниченной области основания, в дальнейшем распространяется в глубь массива благодаря упругим свойствам воды, инициируя повышение порового давления во все более удаленных от места нагружения частях массива. Одновременно с этим в силу создавшейся разности напоров, вызванной неравномерным увеличением гидростатического давления в массиве основания, начинается фильтрационный процесс, направленный на выравнивание поля нейтральных напряжений. Характер изменения порового давления в ходе этого процесса определяет фильтрационная неоднородность массива основания. В той его части, которая попадает под воздействие дополнительных сжимающих напряжений от внешней нагрузки (в зоне сжатия), отток поровой жидкости связан с пластическими деформациями скелета пород. Поэтому здесь изменение порового давления определяется интенсивностью развития процесса фильтрационной консолидации. В другой части основания, где поровое давление образовалось как реакция на возмущение в зоне сжатия, фильтрационный процесс осуществляется без нарушения структуры и свойств пород.

Условия фильтрации в массиве нагруженного основания неоднородны по проницаемости из-за различной степени деформированности пород в разных частях толщи и изменяются во времени в связи с постепенным снижением фильтрационной способности пород в зоне сжатия. По мере уплотнения пород, уменьшения их пористости возможность фильтрации воды к верхней границе зоны сжатия становится все более затрудненной, что создает преимущества для разгрузки массива через ненарушенную его часть (распространение порового давления и деформаций на 200–500 м от зоны нагружения) [1–3].

Изучение закономерностей порового давления в основании формируемых отвальных насыпей выполнялось на гидроотвале № 3 разреза «Кедровский». Исследования включали изучение механизма гидрогеомеханического процесса в основании насыпи, отсыпаемой в виде нескольких узкопрофильных грунтовых сооружений, оценку влияния порового давления на физическое состояние, свойства намывных пород в ЗВО «зоне влияния отсыпки (отвала)» [2] и деформационное поведение насыпей на консолидационном основании.

Гидроотвал № 3 намывался в период с 1958 по 1990 г. в емкость, сформированную в логу отсыпкой нескольких дамб по схеме многоярусного гидроотвалообразования. На момент завершения эксплуатации он представлял собой сооружение овражно-балочного типа с односторонним обвалованием максимальной высотой 53 га, площадью 280 га и емкостью 48 млн м<sup>3</sup>. Доразведкой участка в районе гидроотвала установлены запасы угля, пригодные к отработке открытым способом, при этом для их добычи необходимо выполнить вскрышные работы, включающие также удаление части гидроотвала. Для обеспечения устойчивости остающейся части намывного массива, который к тому же планируют использовать под отвалы сухих пород, необходимо создать новую подпорную конструкцию.

Решение данной научно-технической задачи осуществлено обоснованием рекомендаций по созданию нового откосного сооружения, включающего последовательную отсыпку трех насыпей различной высоты с обеспечением устойчивости внешнего откоса, обращенного в сторону удаляемой части гидроотвала (рис. 1). Отличительной особенностью формирования второго и третьего ярусов разделительной насыпи являются условия отсыпки внутренних откосов (обращенных в сторону остающейся части гидроотвала) в режиме постоянного оползневого смещения с захватом основания. Такая технологическая схема отсыпки обеспечивает выдавливание «слабых» намывных пород из-под насыпей и замещение их более прочными отвальными массами. С другой стороны, насыпи второго и третьего ярусов, кроме выдавливающе-заместительных функций, служат внешней нагрузкой, уплотняющей оставшиеся в основании намывные породы.

Другими особенностями условий формирования разделительных насыпей на намывном основании является нестабильное НДС



Рис. 1. Трехъярусная разделительная насыпь: 2-07 и 2-02 – пункты гидрогеомеханического контроля; рР31 и р28 – реперы маркшейдерской наблюдательной станции

намывного массива вследствие образования и рассеивания избыточного порового давления, а также изменение состояния, физико-механических свойств намывных пород и деформационного поведения насыпей. Реализация разработанного предложения может пойти по неблагоприятному сценарию и при определенных гидрогеомеханических условиях привести к возникновению аварийной ситуации на внешнем откосе, связанной с образованием оползня подподошвенного типа, что представляет серьезную угрозу для работающих на гидровскрышном и горном участках механизмов и людей.

Для обеспечения безопасности формирования системы разделительных насыпей организован мониторинг устойчивости [4], включающий наблюдения за деформациями маркшейдерских реперов, установленных на первом ярусе; за поровым давлением по датчикам, заложенным на различные глубины намывного массива в скважинах, пробуренных с насыпи первого яруса. Кроме того, из скважин, пробуренных для установки датчиков и для изучения намывной толщи после оползня, отбирались образцы для определения физико-механических свойств пород.

Создание нового откосного сооружения осуществлялось на участке гидроотвала, приуроченного к глинистой зоне, где мощность намывных отложений изменялась от сантиметров на бортах лога до 45 м в его тальвеге. Первый ярус отсыпался на поверхности гидроотвала пионерным способом в виде насыпи с отметками 235–240 м при изменяющихся высотах от 5 до 12 м. При такой высоте насыпи нарушения устойчивости откосов были редки, внедрение насыпных пород в намывные незначительны, поэтому она в итоге получилась, по сути, «плавающей» и вряд ли может выполнять подпорные функции. Одновременно с первым ярусом, но с отставанием по фронту



Рис. 2. Оползень двухъярусной разделительной насыпи

на 100 м, производилось формирование второго яруса в виде насыпи шириной по верху 70 м, высотой 40 м (отметки +275 м) и углами откосов 30–35°. Поскольку ее отсыпка осуществляется частично на поверхности и откосах первого яруса, частично на намывных породах, то на внутренних откосах происходили подподошвенные оползни, сопровождающиеся отжатием намывных пород и внедрением насыпных пород в намывной массив, а также развитием избыточного порового давления в основании насыпи и в непригруженной части намывного массива (рис. 2).

Летом 2009 г., когда отсыпка первого яруса была завершена полностью, а фронт второго яруса пересек центр намывного массива, произошла нежелательная деформация внешнего откоса в виде подподошвенного оползня на участке шириной по фронту 60 м и протяженностью 250 м в глубь удаляемой части гидроотвала. Оползневое тело хорошо выделялось на поверхности гидроотвала трещинами и образовавшимся валом выпирания высотой 4–6 м. Первоначальная мощность намывных пород на участке развития оползня составляла 25 м, а после произошедшей деформации 12 м, т. е. 13-метровая намывная толща была выдавлена из-под отвала.

Рассмотрим причины образования оползня на основе выполненных мониторинговых наблюдений и исследований (рис. 3 и 4).



Рис. 3. Результаты гидрогеомеханических и геодезических наблюдений при формировании разделительной насыпи до оползня (I и II ярусы)

Первая стадия – подготовка оползня – длилась около полутора месяцев. За это время отмечено появление первых трещин и постепенное возрастание порового давления до значений критериев, при которых рассчитанные коэффициенты запаса устойчивости равнялись 1,2 и 1, при этом на поверхности гидроотвала рядом с насыпью отмечено образование выходов воды в виде грифонов, сопровождающихся, кроме фильтрации воды, выносом пылеватого и глинистого материала. Давление по датчикам, достигнув предельно допустимых значений, продолжало нарастать вплоть до возникновения оползня, который сопровождался достаточно быстрым опусканием верхней площадки с отметок 270–275 м до отметок 255,0 м и сдвижением насыпи первого яруса в горизонтальном направлении на 21 м в сторону удаляемой части гидроотвала.

Маркшейдерские наблюдения по реперам станции зафиксировали смещение от появления первых признаков деформаций до основ-



Рис. 4. Результаты гидрогеомеханических и геодезических наблюдений при формировании разделительной насыпи после оползня (II и III ярусы)

ного смещения 5,8 м. Скорость смещения реперов при этом постепенно возрастала с 0,001до 2,3 м/сут, достигнув своего максимума непосредственно перед оползнем. После основного оползневого смещения скорость деформаций в первые сутки продолжала оставаться достаточно высокой 3,8 м/сут, а затем в течение 3 суток постепенно снизилась до 0,2 м/сут и далее до 0,01 м/сут. Общая величина смещения с начала отсыпки яруса до остановки оползня составила 31 м, а поровое давление выросло на 0,08÷0,18 МПа.

Отвальные работы по формированию разделительной насыпи были продолжены только через 8 месяцев после оползня. За это время поровое давление в намывных грунтах снизилось на 0,03– 0,04 МПа, а деформации практически прекратились. Было принято техническое решение о разделении верхней насыпи на две в двухъярусной системе, каждая из которых отсыпается, соответственно, по отметкам 255 и 275 м. Общий результирующий угол внешнего откоса при этом предложено снизить с 14 до 9°.

После возобновления отвальных работ в новой конструкции при соблюдении условий формирования двух насыпей с опережением одной относительно другой на 100 м и вплоть до их окончания наблюдения показали дальнейшее постепенное нарастание избыточного порового давления (по разным датчикам) на 0,2÷0,39 МПа и деформирование насыпей примерно с постоянной скоростью 0,8–0,9 м/сут. На момент завершения формирования разделительной насыпи основное смещение реперов достигло 30 м, а в дальнейшем деформации в течение 3 дней снизились до 0,01 м/сут и далее прекратились практически полностью.

Важнейшей научно-технической задачей при проектировании отвальных насыпей на консолидационном основании является изучение влияния порового давления на прочностные свойства намывных пород в ЗВО. Обратные расчеты, выполненные по геометрии оползневого склона до и после деформирования, а также с учетом развивавшегося в намывных породах порового давления, позволили обосновать следующие параметры прочности: угол внутреннего трения 2° и сцепление 0,008 МПа. Следует отметить, что лабораторные сдвиговые испытания по образцам, отобранным из намывных пород до отсыпки разделительных насыпей, охарактеризовали намывной массив двумя слоями из мягкопластичных и тугопластичных пород с углами внутреннего трения 9–14° и сцеплением 0,022–0,036 МПа, что значительно выше параметров обратных расчетов. Моделирование условий работы намывных пород в условиях трехосного сжатия в стабилометре с возможностью создания и контроля порового давления внутри образца обеспечило получение прочности от эффективных напряжений, близких к параметрам обратных расчетов: угол внутреннего трения 2° и сцепление 0,012 МПа.

В заключение отметим, что при формировании на гидроотвале новых упорных конструкций из насыпей возрастающей высоты под различными углами (например, 9 и 14°) возникают гидрогеомеханические условия, отличные по величинам порового давления и скорости деформационного процесса. Также следует отметить эффект снижения параметров прочности при увеличении порового давления в нагружаемых породах.

#### Библиографический список

1. Кутепов Ю. И. Изучение и прогноз гидрогеомеханических процессов при гидроотвалообразовании / Ю. И. Кутепов, Н. А. Кутепова, В. А. Подольский // Вопросы гидрогеологии и гидрогеомеханики горного производства: сб. науч. тр. // ВНИ-МИ. – СПб., 1998. – С. 65–77.

2. Кутепов Ю. И. Изучение порового давления в намывных массивах / Ю. И. Кутепов, Н. А. Кутепова // Геоэкология. – 2006. – № 2. – С. 205–215.

3. Кутепов Ю. И. Закономерности формирования порового давления при гидроотвалообразовании и отсыпке «сухих» отвалов / Ю. И. Кутепов, Н. А. Кутепова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 11. – С. 212–220.

4. Сергина Е.В. Принципы организации и проведения мониторинга безопасности ПТС при открытой разработке угля на разрезе «Кедровский» в Кузбассе / Е.В. Сергина // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 9.

УДК 622.83

# АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ УГЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ Процесса сдвижения

А.В. Жабко

Светлой памяти коллеги и товарища доц., к.т.н. Антона Владимировича Самарина

Еще более полвека назад С. Г. Авершин говорил, что теория сдвижения пород под влиянием горных разработок остается недостаточно развитой по сравнению с результатами экспериментальных исследований в этой области. Сложность же и важность задач, связанных с явлением сдвижения горных пород, требует не меньшей теоретической их разработки.

Основной проблемой в развитии теоретического направления науки, на взгляд автора, помимо многофакторности протекания самого процесса сдвижения, является сугубо прикладной и эмпирический характер используемых параметров процесса сдвижения. Так, например, один из главных параметров процесса сдвижения – угол сдвижения определяется без всякой физической привязки к геометрии и механике явления, а его значение устанавливается по величинам вертикальных и горизонтальных (критических) деформаций на дневной поверхности, опасных для инженерных сооружений. Таким образом, уже сама постановка задачи по определению параметров процесса сдвижения требует привлечения тех или иных средств измерений (инструментальные наблюдения и т. д.). Однако следует признать, что выбор параметров процесса сдвижения оправдан ввиду прикладного характера проблемы. Пожалуй, единственным параметром процесса сдвижения, имеющим вполне понятный физический смысл, является угол разрыва – внешний относительно выработанного пространства угол, образованный на главных сечениях мульды сдвижения горизонтальной линией и линией, соединяющей границу выработанного пространства с наиболее удаленной от него видимой трещиной на дневной поверхности. Трещины на дневной поверхности появляются в результате действия растягивающих напряжений и являются следствием формирования в массиве призмы смещения. Из последнего утверждения очевидно, что многие разработки в области устойчивости откосов будут справедливы также для условий подземной разработки.

При расчете устойчивости карьерных откосов в качестве механических характеристик используются показатели паспорта прочности Кулона – Мора. В условиях же подземной разработки зависимости параметров процесса сдвижения от прочностных характеристик пород исследованы недостаточно, поэтому пользуются преимущественно одним показателем – коэффициентом крепости по шкале М. М. Протодьяконова. В отношении углов разрыва можно сказать следующее:

1) значения углов разрыва, как и углов сдвижения, достаточно стабильны с изменением глубины разработки, именно данный факт позволяет использовать их в качестве параметров процесса сдвижения;

 по поводу влияния глубины разработки на значение углов разрыва имеется противоречивая информация, по одним сведениям, углы разрыва с глубиной уменьшаются, по другим – увеличиваются; 3) на величину углов разрыва большое влияние оказывает слоистость и трещиноватость, в тех случаях, когда в массиве имеются системы трещин с падением в сторону выработанного пространства и угол падения превышает угол трения, значение углов разрыва стремится к значению угла падения системы трещин;

4) численные значения углов разрыва колеблются в широких пределах: 40–90 градусов, для однородных и изотропных массивов они могут достигать 70–85 градусов.

Д. М. Казикаев [1] проводит аналогию между процессом сдвижения и оползневыми явлениями на открытых горных работах, а главным связующим звеном считает криволинейную поверхность скольжения (рис. 1, [1]), отмечая, что ее аналитическое описание не представляется возможным.

Поверхность скольжения в массиве отделяет зоны обрушения и сдвижения от зоны плавных сдвижений или деформаций без разрыва сплошности. Определение формы и положения этой границы (поверхности скольжения) является важнейшей фундаментальной задачей геомеханики, однако в литературе за редким исключением такая задача не ставится в принципе. Аналитическому описанию геометрии поверхности скольжения в условиях сдвижения пород под влиянием подземной разработки препятствуют, по меньшей мере, две объективные проблемы: 1) отсутствие теоретического способа обоснования геометрии поверхности скольжения, впрочем, как и статически обоснованного критерия устойчивости, при расчете устойчивости карьерных откосов; 2) согласно теории предельных напряженных состояний, максимальный угол наклона поверхности скольжения не может превышать значения  $\pi/4 + \phi/2$  ( $\phi$  – угол внутреннего трения), однако углы разрывов могут заметно превышать



Рис. 1. Зоны и области процесса сдвижения

276

данную величину. Дело в том, что при расчете устойчивости откосов большинство исследователей не считают целесообразным математически строго обосновывать геометрию поверхности скольжения, уповая на относительно небольшую погрешность при оценке коэффициента запаса устойчивости. В действительности же геометрия поверхности разрушения в массиве представляет не только прикладной, но и научный интерес.

Как показано в работах [2, 3] условие равновесия призмы смещения в общем виде определяется уравнением

$$\int \left[ \gamma(\hat{y} - y)(y' - f) - C(1 + {y'}^2) + (T' + fE')y' \right] dx + (E_1 - E_0) - f(T_1 - T_0) = 0,$$
(1)

где  $\gamma$  – объемный вес горных пород;  $\hat{y}, y$  – функции линий откоса и поверхности скольжения, соответственно; y' – производная функции поверхности скольжения;  $T_0, E_0, T_1, E_1$  – внешние касательные и нормальные реакции на вертикальных гранях призмы смещения, соответственно, слева и справа;  $f = tg\phi$  – коэффициент внутреннего трения (тангенс угла внутреннего трения); C – сцепление массива горных пород; E', T' – соответственно, производные функций нормальной и касательной составляющих межблоковой реакции.

Далее показано, что в однородных массивах при углах наклона поверхности скольжения, превышающих угол внутреннего трения ( $\vartheta_i \ge \varphi$ ), условие равновесия призмы смещения определяется уравнением

$$\int \left[ \frac{\gamma(\hat{y} - y)(y' - f) - C(1 + {y'}^2)}{1 + {y'}^2} \right] dx + (E_1 - E_0) - f(T_1 - T_0) = 0, \quad (2)$$

а для участков с углами наклона поверхности скольжения  $(\vartheta_i \ge \varphi)$  условие равновесия имеет вид

$$\int \left[ \frac{\gamma(\hat{y} - y)(y' - f) - C(1 + {y'}^2)}{1 + fy'} \right] dx + (E_1 - E_0) - f(T_1 - T_0) = 0.$$
(3)

Уравнения (2) и (3) получены из уравнения (1). Причем условие (2) подразумевает присутствие и касательной и нормальной составляющих межблоковой реакции, а уравнение (3) – только нормальной составляющей [2, 3].

Если призма смещения находится в равновесии, то каждый ее отсек также уравновешен. Это в частности означает, что на возможном перемещении всей призмы смещения работы внутренних и внешних сил, действующих на отсек, равны по модулю. Удельная обобщенная внутренняя сила равна подинтегральному выражению (2) с обратным знаком, таким образом,

$$F^{i}(x) = -F^{e}(x) = -\frac{\gamma(\hat{y} - y)(y' - f) - C(1 + {y'}^{2})}{1 + {y'}^{2}},$$
(4)

где  $F^{i}(x)$ ,  $F^{e}(x)$  – обобщенная внутренняя и внешняя силы на возможном (горизонтальном) перемещении всей механической системы (призмы смещения), соответственно.

Заметим, что функция обобщенной внутренней силы (4) должна убывать, в противном случае работа межблоковых реакций на возможном перемещении системы станет положительной, что, в свою очередь, невозможно. Другими словами, межблоковые реакции станут отрицательно влиять на устойчивость. И действительно, когда межблоковые реакции постоянны (не зависят от x), они не совершают работу на возможном перемещении, а производная функции межблоковых реакций равна нулю. Таким образом, нулевое значение работы межблоковых реакций является ее экстремальным значением (максимальным), превысить которое она не может. В общем случае работа межблоковых реакций представляет собой сумму работ нормальных и касательных составляющих, которые не зависимы между собой и являются заведомо отрицательными. Поэтому равенство нулю работы внутренних сил на возможном перемещении системы означает E' = T' = 0. Положим в уравнении (1) E' = T' = 0, получим следующее условие равновесия:

$$\int \left[ \gamma (\hat{y} - y)(y' - f) - C(1 + {y'}^2) \right] dx + (E_1 - E_0) - f(T_1 - T_0) = 0.$$
 (5)

Таким образом, уравнения (2, 3, 5) позволяют оценить устойчивость откосов по произвольной поверхности скольжения.

Определим условия применения функционалов (2, 3) в качестве критериев устойчивости. Для этого продифференцируем уравнение (4) по *x* и составим неравенство

$$\frac{dF^{e}}{dx} = \frac{\partial F}{\partial y'} \frac{dy'}{dx} + \frac{\partial F}{\partial (\hat{y} - y)} \frac{d(\hat{y} - y)}{dx} = 
= \gamma \left[ y''(\hat{y} - y) \frac{1 + 2fy' - {y'}^{2}}{\left(1 + {y'}^{2}\right)^{2}} + \frac{(\hat{y}' - y')(y' - f)}{1 + {y'}^{2}} \right] > 0,$$
(6)

где у" – вторая производная функции поверхности скольжения по х.

Неравенство (6) имеет очень большой смысл. Его использование позволяет выбрать то или иное условие устойчивости в случае пре-

допределенной поверхности скольжения (поверхности ослабления в массиве). В случае, когда поверхность скольжения зарождается под действием гравитационных сил, например в однородных откосах, первое слагаемое не может быть меньше нуля. Произведем предварительный анализ условия (6). Первое слагаемое положительно при вогнутой форме поверхности скольжения и угле ее наклона, не превышающем значения  $\pi/4 + \varphi/2$ , или же при выпуклой форме поверхности скольжения  $\pi/4 + \varphi/2$ .

Для плоских однородных откосов наиболее опасная поверхность скольжения под откосом (откос включает верхнюю берму и собственно откос) определяется дифференциальными уравнениями [2, 3]

$$\begin{aligned} x - y_1 &= \lambda \frac{(kf - 1)y_1'^2 + 2(k + f)y_1' + 1 - kf}{fy_1'^2 - 2f^2y_1' + k - f + kf^2}, \\ &- tg \bigg(\frac{\pi}{4} - \frac{\alpha + \varphi}{2}\bigg) \leq y_1' \leq tg\varphi, \text{откос}, \\ kx - y_2 &= \lambda \frac{1 + kf}{1 + f^2} \frac{(1 + y_2'^2)^2}{2y_2'^3 - (k + 3f)y_2'^2 + 2kfy_2' + k - f} \end{aligned}$$

$$y'_2 > tg\phi, откос,$$

$$H - y_3 = \left(\lambda + C_1\right) \frac{\left(1 + {y'_3}^2\right)}{2{y'_3}^3 - 3f{y'_3}^2 - f}, \quad \text{tg}\varphi < y'_3, \text{берма}, \tag{7}$$

где  $C_1$  – произвольная постоянная;  $\lambda = \frac{C}{\gamma n} > 0$  – постоянная, завися-

щая от формы откоса, физико-механических свойств горных пород, и определяет предельную высоту откоса; n – постоянная, обеспечивающая выполнение условия предельного равновесия в пределах каждого отсека;  $k = tg\alpha$  – тангенс угла наклона откоса.

Продифференцируем второе уравнение (7) по *х* и подставим оба уравнения в выражение (6). Приравняем его нулю, откуда получим условие для определения предельного угла поверхности скольжения под откосом.

$$(f+k)s^{4} + 4(1-kf)s^{3} + 2(kf^{2} - 3f - 2k)s^{2} + 4f(f+k)s + f - k - 2kf^{2} = 0,$$
(8)

где *s* – предельное значение тангенса угла наклона наиболее опасной поверхности скольжения, описываемой функционалом (2).

Предположим, что смена уравнений поверхности скольжения может произойти под горизонтальной площадкой (верхней бермой). Для этого проделаем подобную операцию с третьим уравнением (7). Однако, как показывают расчеты, выполнение условия (6) под бермой с поверхностью скольжения, описываемой третьим уравнением (7), невозможно, то есть излом поверхности скольжения под бермой невозможен. С другой стороны, решение уравнения (8) показывает, что при  $\alpha = \pi/4 + \varphi/2$  предельный угол наклона поверхности скольжения для второго уравнения (7) также равен  $\pi/4 + \varphi/2$ . Это говорит о том, что при  $\alpha < \pi/4 + \varphi/2$  излом поверхности скольжения (переход с функционала (2) на функционал (5)) возможен под откосом, а при  $\alpha \ge \pi/4 + \varphi/2$  – на границе откоса и бермы.

Для определения наиболее опасной части поверхности скольжения для функционала (5) необходимо решить следующую вариационную задачу:

$$\int \left[\gamma(\hat{y}-y)(y'-f)-C(1+{y'}^2)\right]dx \to \max.$$

Для участка откоса  $\hat{y} = kx$  дифференциальное уравнение поверхности скольжения (уравнение Л. Эйлера) имеет вид:

$$(kx - y_4) = \frac{C_2 - \frac{C}{\gamma} (y_4'^2 - 2ky_4' - 1)}{k - f},$$

где *C*<sub>2</sub> – произвольная постоянная.

Для участка верхней бермы  $\hat{y} = H$  дифференциальное уравнение поверхности скольжения имеет вид:

$$(H - y_5) = -\frac{C_3 - \frac{C}{\gamma}({y'_5}^2 - 1)}{f},$$
(9)

где  $C_3$  – произвольная постоянная.

Для определения произвольной постоянной в уравнении (9) воспользуемся вполне очевидным граничным условием

$$y'_{5}(x_{0}) = f + \sqrt{1 + f^{2}} = \operatorname{tg}\omega = \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right), H - y_{5} = H_{90} =$$
$$= \frac{2C}{\gamma}\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right), \implies C_{3} = 0.$$

Таким образом, уравнение поверхности скольжения под верхней бермой имеет вид:

$$(H-y_5) = \frac{C(y_5'^2-1)}{\gamma t g \varphi}.$$

С методикой построения поверхности скольжения и определения предельных параметров откосов (высоты) можно ознакомиться в работах [2, 3].

Применим рассмотренную выше теорию для определения угловых параметров процесса сдвижения. Пусть имеется залежь полезного ископаемого с углом падения  $\alpha = 60^{\circ}$ . Физико-механические характеристики массива горных пород  $\varphi = 30^{\circ}$ ;  $C = 10 \text{ т}/\text{m}^2$ ;  $\gamma = 2.5 \text{ т/m}^3$ . Формализация приводит к задаче построения поверхностей скольжения для различных глубин разработки. Предельная высота свободного откоса для рассматриваемых условий H = 52.4 м, то есть начиная с этой глубины для равновесия призмы смещения необходимы дополнительные внешние удерживающие силы. Их роль выполняют междуэтажные и междукамерные целики или обрушенные в выработанное пространство горные породы. Вследствие их податливости возникают деформации земной поверхности в виде уступов и раскрытых трещин. На рис. 2 представлены поверхности скольжения со стороны лежачего бока залежи для высоты H = 230.3 м и H = 639.1 м,



Рис. 2. Определение углов разрыва

что соответствует нагрузкам на целики, равные 10 000 т и 100 000 т, соответственно.

Углы разрывов, полученные для рассматриваемых поверхностей скольжения со стороны лежачего бока залежи, составили  $\beta_1'' = 54,8^{\circ}$  и  $\beta_1'' = 55,9^{\circ}$  (см. рис. 2). Дальнейшее увеличение глубины не приводит к заметному увеличению угла разрыва, а причиной его незначительного увеличения с глубиной является наличие вертикальной трещины отрыва. Таким образом, аналитически продемонстрирована стабильность угла разрыва с увеличением глубины разработки.

Если нависающие над выработанным пространством породы со стороны висячего бока залежи будут отделяться от массива, образовывая вертикальный откос (см. рис. 2), поверхность скольжения будет целиком выпуклой, а угол разрыва составит  $\beta'' = 80.3^{\circ}$ .

Породы, расположенные за пределами поверхности скольжения, находятся в зажатой среде и деформируются без разрыва сплошности. Их деформации могут быть изучены с использованием геомеханических моделей сплошных сред методом конечных элементов. Граничными условиями для определения углов сдвижения и размеров мульды являются напряжения, действующие вдоль поверхности скольжения, которые без труда могут быть определены [2, 3] (рис. 3). Следует отметить, что нормальная составляющая реакции вдоль поверхности скольжения вычисляется по-разному для различных



Рис. 3. Определение граничных углов и углов сдвижения

частей поверхности скольжения – в зависимости от используемых функционалов. Для достоверного определения деформаций массива и земной поверхности к полю смещений, полученному в результате формирования призмы, необходимо прибавить поле, вызванное первичной разгрузкой массива, а также вычесть поле перемещений от действия начальных гравитационных напряжений.

Рассмотренный выше пример относится к однородным и изотропным массивам и в этом смысле является идеализированным. Однако для случая анизотропных и неоднородных массивов методика прогнозирования сдвижений и деформаций, а также определения параметров сдвижения остается неизменной. Разница будет состоять в геометрии (форме и положении) наиболее опасной поверхности скольжения, с теорией определения которой для анизотропных и неоднородных массивов можно ознакомиться в работе [4].

В случае, если на месторождении поставлены инструментальные наблюдения за сдвижением земной поверхности, появляется возможность определения прочностных и деформационных характеристик горного массива методом обратных расчетов. По значениям углов разрыва (ширины призмы обрушения) оцениваются параметры паспорта прочности, прежде всего – величина сцепления массива, а по деформациям в периферийных частях мульды сдвижения могут быть установлены деформационные параметры.

### Библиографический список

1. Казикаев Д. М. Геомеханика подземной разработки руд / Д. М. Казикаев. – М.: МГГУ, 2009. – 544 с.

2. Жабко А.В. Основы общей теории расчета устойчивости откосов / А.В. Жабко // Известия Уральского государственного горного университета. – 2013. – № 4(32). – С. 47–58.

3. Zhabko A.V. Calculation theory of stability of foundations and slopes / A.V. Zhabko // Proceedings XV International ISM Congress 2013. 16–20 September 2013. – Aachen, Germany. – S. 85–97.

 Жабко А. В. Расчет устойчивости неоднородных и анизотропных откосов / А. В. Жабко // Известия вузов. Горный журнал. – 2014. – № 3. – С. 22–29.

# АНИМАЦИЯ СДВИЖЕНИЙ В ГОРНОМ МАССИВЕ

## П.И. Зуев

Для более полного представления процессов сдвижения в горных массивах необходимо применять новые методы их отображения в электронном виде. Вполне очевидно, что логичным для разработчика визуализации сдвижения будет являться математический аппарат, основой для расчетов которого берется база данных геодезического измерения сдвижений в массиве исследуемого участка или территории. В свою очередь полученные вычисления функционально визуализируются, представляя собой графическую карту сдвижений во временном отрезке. Интерактивную карту можно строить не только по данным геодезии, но и по данным глубинных геофизических методов - сейсмометрии, электрометрии, спектрального сейсмопрофилирования и георадарного зондирования. После интерпретации данных, полученных этими методами, наглядно и численно можно оценить изменения в горном массиве. Применение на предприятиях и в научной среде подобных графических построений перспективно, они вполне могут быть частью геоинформационных систем.

Особая роль в изучении сдвижения в горном массиве отведена процессам техногенного характера. Разработка месторождений полезных ископаемых сопряжена с безусловным нарушением равновесия в массиве горных пород, которое в зависимости от параметров и технологии разработки может либо локализоваться внутри массива, либо проявиться на земной поверхности в виде провалов, террас, трещин и зон плавных деформаций. Актуальность проблем сдвижения горных пород сохраняется на протяжении всей истории развития горного дела и обусловлена опасностью разрушения от воздействия процесса сдвижения как сооружений горных предприятий, так и окружающих промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений, а также природных объектов, попадающих в зону влияния подземных разработок. При углублении горных работ геомеханические проблемы, связанные со сдвижением горных пород, приобретают особую актуальность в связи с увеличением масштабов происходящих процессов.

Одним из объектов изучения геомеханической активности является Сарановская шахта «Рудная», где добывается хромовая руда. Объем добычи составляет 120000 т в год. Используется камерная система. Отбойка руды производится буровзрывным способом. Разработка месторождения сопровождается сдвижением пород,

Разработка месторождения сопровождается сдвижением пород, их обрушением, воронкообразными провалами дневной поверхности (рис. 1). На дальнейшей стадии образования воронок на подработанной территории образуются провалы, распространяющиеся по геометрическим краям тектонических блоков, составляющих крутопадающий (80–85°) габбро-гипербазитовый массив, что определяется тектоническими нарушениями. Интенсивное сдвижение пород также связано с тем, что месторождение находится на активизированном краю Русской платформы.

Для получения геомеханических данных об участке месторождения сотрудниками отдела геомеханики Института горного дела УрО РАН на протяжении определенного отрезка времени проводятся изыскания традиционными технологиями геодезии (нивелирование) и технологиями спутниковой навигации GPS (с недавнего времени в совокупности с ГЛОНАСС). Полученные данные о смещениях геодезических пунктов в соответствии с математическими методами механики сплошной среды переводятся в поля деформаций с представлением в графическом виде значений главных горизонтальных деформаций растяжения или сжатия и наклонов – параметров сдви-



Рис. 1. Типичное разломное обрушение на Сарановском месторождении

жения, которые регламентируются требованиями нормативных документов о безопасности. Параметры объединяются в электронный массив данных, это можно сделать в любом стандартном текстовом редакторе операционной системы персонального компьютера, инструменте баз данных или табличном инструменте - вполне подойдут средства MS Office – Acsess или Excel. Возможно использование специализированных средств построения поверхностей и изолиний, таких как Golden software Surfer, это приложение позволяет представить массив данных в табличной форме и отобразить эти данные в виде градиентного поля или изолиний. В нашем случае используется математическое приложение РТС MathCAD, здесь необходимый нам массив данных можно подключить либо скопировать в рабочую область. Выбор среды MathCAD определяется задачей и удобством использования, здесь на рабочем листе размещаем данные и алгоритм построения графика, затем задаем условия анимации, таким образом в ходе работы можно корректировать параметры, алгоритмы расчета и построения.

Для расчета брались наблюдения сети геодезических пунктов за 2000, 2004 и 2006-й годы. Первый и второй массивы  $x_1$ ,  $y_1$  – относительные координаты геодезических пунктов, отображающие их реальное расположение в MathCAD. Третий массив  $z_1$  – горизон-

	(2902.688236)		(2902.688236)	3	( 0.222382832045243 )		( -0.22238283204544 )
	2866.601106		2866.601106		0.594664424713504		0.205056698177151
	2822.14584		2822.14584		0.678039651758989		0.189851102492609
	2791.027214		2791.027214	z <sub>1</sub> :=	-0.347756967559138	z <sub>2</sub> :=	-1.04327090267759
	2771.937628		2771.937628		1.42681426814268		-0.442804428044297
	2750.494554		2750.494554		0.0422475707647327		0.253485424588096
	2728.528348		2728.528348		1.3979496738118		-0.419384902143539
	2708.392824		2708.392824		0.478290907158439		-0.0531434341287783
x <sub>1</sub> :=	2674.397598	x <sub>2</sub> :=	2674.397598		0.769467528470328		0.205191340925481
12	2665.04654	-	2665.04654		0.605185978306488		0.0931055351241769
	2634.649542		2634.649542		2.46591913646291		0.139580328479045
	2615.559866		2615.559866		0		0
	2511.51092		2511.51092		0.663502271219399		0.0510386362477018
	2492.653476		2492.653476		0.286927579478882		-0.17215654768737
	2477.846848		2477.846848		1.02728731942215		0.192616372391661
	2460.945068		2460.945068		-0.376081233546524		-0.376081233546524
	2446.138464		2446.138464		-0.411120818130383		0.205560409065283

Рис. 2. Массивы данных - координаты и значения горизонтальных деформаций

тальные деформации, полученные разницей между 2000-м и 2004-м годами, четвертая матрица  $z_2$  – горизонтальные деформации, полученные разницей между 2004-м и 2006-м годами (рис. 2).

Далее задается цикл построения графика, для одной переменной вводятся координаты геодезических пунктов, по ним определяется форма графика, шаг построения и конечный вид отображения. В итоге получаем поле разницы горизонтальных деформаций за 2000–2004 гг.

Для того чтобы отобразить поле деформаций за 2000–2006 гг., используем тот же алгоритм. Для отображения общей деформации между разницами 2000–2004 гг. и 2004–2006 гг. используем встроенную переменную FRAME, предназначенную для создания анимационных клипов. FRAME принимает целочисленные значения от 0 до *n* и должна быть включена в расчетные выражения так, чтобы с изменением FRAME изменялся вид соответствующего графика, фактически FRAME – это номер кадра. Для создания анимации необходимо ввести переменную FRAME в математическое выражение, определяющее вид графика. В диалоговом окне анимации задается общее число кадров и частота воспроизведения, размер кадра и скорость воспроизведения. В итоге получаем анимацию приращения горизонтальных деформаций (рис. 3 и 4).

Возможно использование любой математической среды, обеспеченной подобными функциями. Так же можно применять различные типы анимации для конкретных случаев. Анимация процесса позво-



Рис. 3. Изменение поля горизонтальных деформаций

120		Анимироват
C:		
По:	100	Отмена
Частота:	10	Сохранить как
кадров/сен	2	Параметры.
	FRA	ME= 98

Рис. 4. Окно записи анимации MathCAD

ляет нам анализировать характер сдвижений, получать закономерности, это важный аспект геомеханики, особенно для инженерных изысканий, направленных на диагностику площадок строительства опасных объектов.

#### Библиографический список

1. Электронный курс MathCAD [Электронный ресурс] – Режим доступа: http:// detc.ls.urfu.ru/assets/amath0021/l6.htm

2. Образовательный ресурс [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www. exponenta.ru/

3. Сашурин А.Д. Современная геодинамика и безопасность объектов недропользования / А.Д. Сашурин // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2010. – № 10.

4. Мельник В. В. Исследование и создание геолого-структурной и геомеханической модели участка недропользования / В. В. Мельник, А. Л. Замятин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – № 4. – С. 226–230.

5. Пустуев А. Л. Исследование трендовых геодинамических деформаций при выборе площадок для строительства атомных станций / А. Л. Пустуев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 1. – С. 282–290.

6. Сашурин А. Д. Сдвижение горных пород на рудниках черной металлургии / А. Д. Сашурин. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 1999. – 268 с.
#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Аймбетов М. М., Донской горно-обогатительный комбинат, филиал АО ТНК «Казхром», г. Хромтау, Казахстан

Алибаев А.П., д.т.н., проф., декан, Жалал-Абадский государственный университет, г. Жалал-Абад, Кыргызстан

Аллабердин А.Б., асп., Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия

Алтаева А. А., инж., РГП «НЦ КПМС РК» МИНТ РК, Институт горного дела им. Д. А. Кунаева, г. Алматы, Казахстан

Асанов В. А., д. т. н., проф. каф., ПНИПУ, г. Пермь, Россия

Бейдин А.В., ст. препод., Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия

Бельтюков Н.Л., инж., Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Россия

Васильев Ю.В., с. н. с., к. г.-м. н., доц., рук. лаб., Западно-Сибирский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, г. Тюмень, Россия

Волков П.В., к.т.н., ст. препод., Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия

**Голотвин А. Д.**, к.т.н., ст.н.с., Всероссийский научно-исследовательский институт маркшейдерского дела и геомеханики, г. Екатеринбург, Россия

**Григорьев** Д. В., м.н.с., Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

**Демин В. Ф.**, д.т.н., проф. каф., Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, Казахстан

Демина Т.В., к.т.н., ст. препод., Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, Казахстан

**Джангулова Г. К.**, к.т.н., с.н. с., РГП «НЦ КПМС РК» МИНТ РК, Институт горного дела им. Д. А. Кунаева, г. Алматы, Казахстан

El Said A. El Sayed, PhD, National Research Institute of Astronomy and Geophysics, Helwan, Egypt

Ермашов А.О., асп., Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия

Жабко А.В., к.т.н., доц., Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия Желтышева О.Д., м.н.с., Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

Жеребко Л. Н., к. т. н., вед. н. с., РГП «НЦ КПМС РК» МИНТ РК, Институт горного дела им. Д. А. Кунаева, г. Алматы, Казахстан

Зуев П.И., м.н.с., Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

**Калмыков В. Н.**, проф., д.т.н., зав. каф., Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, Россия

Каюмова А.Н., к.т.н., н.с., Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

**Кожогулов К. Ч.**, чл.-корр. НАН КР, д.т.н., проф., дир. Института геомеханики и освоения недр НАН КР, г. Бишкек, Кыргызстан

Козырев А.А., д.т.н., проф., зам. дир. по научной работе, Горный институт Кольского научного центра РАН, г. Апатиты, Россия

**Крутиков А.В.**, к.т.н., нач. службы геомеханики, АО «Соколовско-Сарбайское горно-обогатительное производственное объединение», г. Рудный, Казахстан

**Куваков С. Ж.**, инж., Институт геомеханики и освоения недр НАН КР, г. Бишкек, Кыргызстан

**Кульсаитов Р. В.**, асп., Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, Россия

**Кутепов Ю. И.**, Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», г. Санкт-Петербург, Россия

**Кутепова Н.А.**, Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», г. Санкт-Петербург, Россия

**Khachay Oleg**, Assistant, PhD, Ural Federal University, Institute of Mathematics and Computer Sciences, Ekaterinburg, Russia

**Лизункин М. В.**, к.т.н., доц. каф., Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия

Липин Я.И., к.т.н., ст.н.с., Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

Лис С.Н., ст.н.с., Институт проблем комплексного освоения недр, г. Караганда, Казахстан

**Ловчиков А. В.**, д.т.н., гл.н.с., Горный институт Кольского научного центра РАН, г. Апатиты, Россия

Лубенская О. А., инж., ОАО «ВИОГЕМ», г. Белгород, Россия

Magdy A. Atya, prof., PhD, National Research Institute of Astronomy and Geophysics, Helwan, Egypt

**Менгель Д. А.**, инж.-технолог 1-й кат., АО «Соколовско-Сарбайское горно-обогатительное производственное объединение», г. Рудный, Казахстан

Мещеряков Э.Ю., к.т.н., доц., Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия

Моисеев В. А., ст. препод. каф., РГП ПХВ «Рудненский индустриальный институт» Министерства образования и науки РК, г. Рудный, Казахстан

**Неугомонов С.С.**, к.т.н., доц., Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия

Олейник А.И., проф. каф., д.т.н., доц., РГП ПХВ «Рудненский индустриальный институт» МОН РК, г. Рудный, Казахстан

**Опарин В. Н.**, чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., проф., Институт горного дела СО РАН, г. Новосибирск, Россия

**Потапчук М. И.**, к.т.н., ст.н.с., Институт горного дела ДВО РАН, г. Хабаровск, Россия

Рахимов З. Р., к.т.н., и.о. доц. каф., РГП ПХВ «Рудненский индустриальный институт» Министерства образования и науки РК, г. Рудный, Казахстан

Ростовцева А.А., к.т.н., доц. каф., Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

**Ручкин В. И.**, н. с., Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

Савченко С. Н., д.т.н., ст.н.с., вед.н.с., Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Россия

Самойленко Д. П., асп., Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия

Сашурин А.Д., д.т.н., проф., зав. отделом, Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

Сентябов С.В., м.н.с., Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

Сергина Е. В., асп., зам. гл. маркшейдера ОАО УК «Кузбассразрезуголь», г. Кемерово, Россия

Сидиков Ф., гл. геолог, РГУП НИПИ «Нурофар», г. Душанбе, Таджикистан

Сукнёв С.В., д.т.н., зав. лаб., Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, г. Якутск, Россия

**Тагильцев С. Н.**, д.т.н., проф., Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

**Тажибаев Д.К.**, Институт геомеханики и освоения недр НАН КР, г. Бишкек, Кыргызстан

**Тажибаев К. Т.**, д.т.н., зав. лаб., Институт геомеханики и освоения недр НАН КР, г. Бишкек, Кыргызстан.

**Токсаров В. Н.**, к.т.н., доц., ст. н. с., Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Россия

Ударцев А. А., инж., Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Россия Усенов К. Ж., д.т.н., проф., проректор, Жалал-Абадский государственный университет, г. Жалал-Абад, Кыргызстан

Феклистов Ю.Г., к.т.н., доц., зав. лаб., Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

Хачай О. А. (Olga Hachay), д.ф.-м.н., с.н.с., Институт геофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

Ходжиев А., уч. секр., Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии АН РТ, г. Душанбе, Таджикистан

**Храмцов Б. А.**, доц., к.т.н., проф. каф., Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Шамганова Л.С., д.т.н., зам. дир., РГП НЦ КПМС РК, Институт горного дела им. Д.А. Кунаева, г. Алматы, Казахстан

Широков М. А., инженер ПТО ЗАО Чукотская горно-геологическая компания, рудник «Купол», г. Екатеринбург, Россия

Эфендиева З. Дж., к.т.н., доц., Азербайджанская Государственная Нефтяная Академия, г. Баку, Азербайджан

**Юрьев М.Л.**, инж., Западно-Сибирский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, г. Тюмень, Россия

**Яковлев С.И.**, вед. инж., Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Россия

### СОДЕРЖАНИЕ

### ПРИРОДА И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД В ЕСТЕСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Сашурин А.Д. Современные геодинамические движения и их	
роль в формировании напряженно-деформированного состояния массива горных пород	3
Тагильцев С. Н. Закономерности распределения тектонических напряжений в верхней части геологического разреза горноскладчатых регионов	2
<b>Тажибаев К. Т., Тажибаев Д. К.</b> Остаточные напряжения – фактор неоднородности напряженного состояния сейсмоактивных участков массива горных пород	7
<b>Токсаров В. Н., Асанов В. А., Шамганова Л. С., Ударцев А. А.</b> Исследование напряженного состояния пород ненарушенного массива на руднике Жомарт	7
Лизункин М. В., Бейдин А. В. Оценка напряженно- деформированного состояния массива горных пород стрельцовского рудного поля	)

# НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД В ОБЛАСТЯХ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОГЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Козырев А.А. Современные результаты экспериментального	
изучения природных напряжений в верхней части земной коры и проблемы горного давления	39
Хачай О.А. Проблема мониторинга активизированных зон геологической среды с использованием контролируемых источников	54
Magdy A. Atya, Olga Hachay, Oleg Khachay,	
El Said A. El Sayed. Estimating the geotechnical parameters from csem monitoring data at the city of 15th May, Egypt (Определение	
геотехнических параметров среды по данным активного	
электромагнитного индукционного мониторинга в районе	
«15 Мая» г. Каира, Египет)	67

<b>Кожогулов К. Ч., Куваков С. Ж., Усенов К. Ж., Алибаев А. П.</b> Напряженно-деформированное состояние дна карьеров при
комоинированной разработке крутопадающих месторождений
Васильев Ю. В., Юрьев М. Л., Яковлев С. И. Результаты
мониторинга современных деформационных процессов
методами высокоточнои геодезии и гравиметрии на
Самотлорском геодинамическом полигоне
Эфендиева З. Дж. Увеличение надежности и долговечности
горных выработок путем регулирования напряженного
состояния горных пород 90
Калмыков В. Н., Кульсаитов Р. В., Самойленко Д. П.,
Волков П.В., Неугомонов С.С. Исследование напряженно-
деформированного состояния массива горных пород глубоких
горизонтов Кочкарского золоторудного месторождения
Лемин В. Ф., Лемина Т. В. Геомеханические принципы
управления напряженно-деформированным состоянием
приконтурного массива горных выработок на угольных шахтах
Феклистов Ю. Г., Голотвин А. Л. Оценка параметров
лавления на целики 103
исщеряков Э. Ю., Аллаоердин А. Б. Оценка напряженно-
деформированного состояния искусственного целика при
извлечении запасов рудного тела этажно-камерной системой
разработки с комоинированной закладкой выработанного
Сентябов С. В. Исследование процесса формирования
напряжений в бетонной крепи шахтных стволов Гайского ГОКа 115
Ручкин В.И., Желтышева О.Д. Влияние техногенной нагрузки
на динамику напряженно-деформированного состояния массива
горных пород
Лис С. Н. Закономерности зональной дезинтеграции горного
массива при его подработке (надработке) 128

# ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫЕ КАТАСТРОФЫ В СФЕРЕ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ

Опарин В. Н. К проблеме формирования многослойной	
геоинформационно-мониторинговой системы геомеханико-	
геодинамической безопасности России	136
Ловчиков А. В. Несостоятельность концепции «защитные	
пласты» в тектонически напряженных массивах	152

Липин Я.И. Геодеформационный мониторинг и долгосрочный	
прогноз геодинамических явлений на рудниках	161
Каюмова А. Н. Особенности экспертизы документации для	
районов развития опасных природных и техноприродных	
процессов на земной поверхности	168

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

<b>Тагильцев С. Н.</b> Оценка геомеханических характеристик на основе изучения трещинной и фильтрационной стратификации	
скальных массивов	172
Савченко С. Н. Эволюция двухпараметрической	1 -
динамической системы	178
Асанов В. А., Токсаров В. Н., Бельтюков Н. Л. Контроль состояния пород приконтурного массива в зоне влияния	197
	10/
Сукнев С. В. Современные методы определения статического модуля упругости и коэффициента Пуассона горных пород	
в талом и мерзлом состоянии	195
<b>Ермашов А. О.</b> Численное моделирование деформирования и разрушения образцов соляных пород	202
<b>Григорьев Д. В.</b> Измерение НДС крепи подземных сооружений с применением магнитоупругих датчиков	210
Храмцов Б. А., Ростовцева А. А., Лубенская О. А.	
Графоаналитический метод определения прочностных свойств горных пород	213
Рахимов З. Р. Моделирование потери устойчивости карьерного откоса, сложенного пластичными глинистыми породами	219
<b>Крутиков А. В., Менгель Д. А.</b> Применение метода «Реперные линии – фотоупругие датчики» для оперативного прогноза	
геомеханических явлений	229

### ПРАКТИКА РЕШЕНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ЗАДАЧ В РАЗЛИЧНЫХ ОБЛАСТЯХ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ

Сидиков Ф., Ходжиев А. Применение GIS-технологий в	
инженерной геологии на примере ТЭО Шурабской ГЭС	237

Научное издание

# ГЕОМЕХАНИКА В ГОРНОМ ДЕЛЕ

Доклады научно-технической конференции 4-5 июня 2014 г.

Рекомендовано к изданию Ученым советом Института горного дела



Редакторы Н. У. Макарова и О. А. Истомина Компьютерная верстка Л. В. Митина Корректор Н. А. Попова

> Подписано в печать 27.02.2015. Формат 60х84/16 Усл. печ. л. 17,21 Тираж 120 экз. Заказ № 314

ИГД УрО РАН 620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58

Отпечатано в ООО «Типография Для Вас» 620026, г. Екатеринбург, ул. Сони Морозовой, д. 180, оф. 100 Тел.: (343) 297-42-13, www.tdvas.ru