© В.В. Бодин, 2006

УДК 550.3

В.В. Бодин

*ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЛНОВОГО ПОЛЯ, ВЫЗВАННЫХ ТЕКТОНИЧЕСКИМ НАРУШЕНИЕМ**

Семинар № 3

Тектонические нарушения, развитые в пределах шахтных полей, существенно осложняют ведение горных работ, что проявляется в виде двух основных факторов. Одним из них является повышенная удароопасность горного массива [1, 2], другим - увеличение степени разрушения вмещающего массива по мере приближения фронта горных работ к разлому [3].

Динамические явления, происходящие в окрестности тектонических нарушений, имеют несомненную связь с участками концентрации напряжений, которые были установлены по результатам натурных наблюдений. Выполненные экспериментальные исследования напряженного состояния породного массива, примыкающего к зоне разлома, показали локальную концентрацию напряжения, достигающую 100 % от уровня нормального поля [4, 5].

То, что концентрация напряжения и дезинтеграция породного массива, может наблюдаться в пределах одного и того же тектонического нарушения, характеризует его как геологическое тело с аномальными значениями физико-механических параметров, закономерность пространственного распределения которых, изучены недостаточно полно. В связи с чем, возникает необходимость более детального изучения характера влияния разлома на параметры вмещающего породного массива. Решение данной задачи выполнимо с помощью сейсмического метода исследований, который позволяет получить информацию о пространственном распределении физико-механи-ческих параметров в широком масштабном диапазоне изучаемого породного массива.

Исследование характера влияния тектонического нарушения на состояние горного массива выполнялось на ряде шахт Урала и Сибири. Регистрация сейсмического волнового поля велась с применением, в основном, двух методик наблюдения, либо сейсмического профилирования вдоль стенок горных выработок, либо сейсмического просвечивания между ними. Наблюдения выполнялись переносными сейсмостанциями с цифровой регистрацией сейсмического сигнала в широком частотном (5-4000 Гц) и динамическом (84 дБ) диапазонах. В качестве приемных устройств использовались горизонтальные преобразователи электродинамического типа, ось максимальной чувствительности, которых была ориентирована по нормали к стенке горной выработки. Интервал размещения сейсмоприемников, в зависимости от масштаба исследований, составлял 1, 2 и 5 м.

Результаты исследований позволили установить, что зоны тектонических нарушений, на порядок и более превышают размеры визуально выделяемых магистральных разрывов, характеризуются уменьшением упругих параметров на 30-

* Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президиума Российской Федерации.

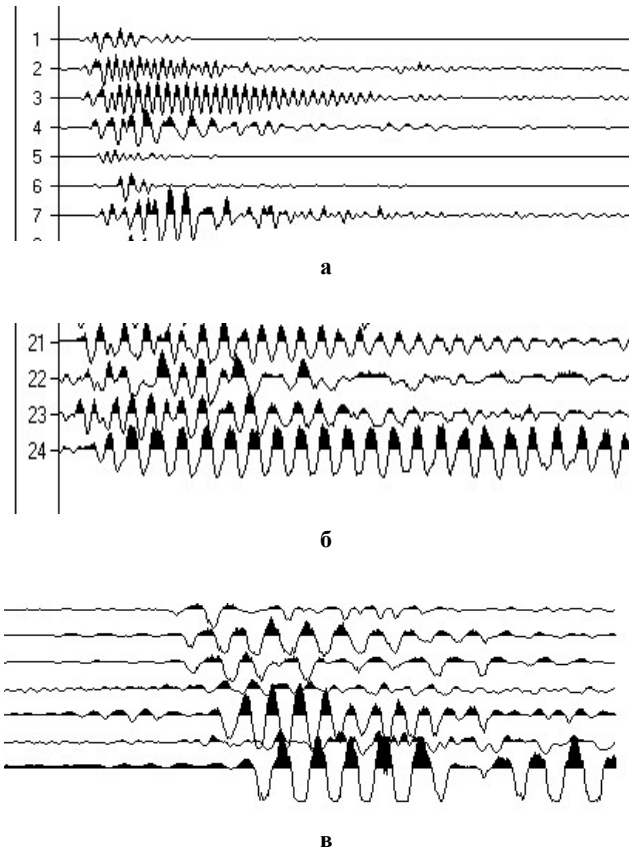


Рис. 1. Примеры записи аномальных колебаний на границах зон тектонических нарушений: а) – шахта «Кальинская» СУБР, б) – шахта «Магнезитовая», г. Сатка, в) – шахта «Естюнинская», г. Н-Тагил

40 % и уменьшением амплитуды колебаний. На границах указанных зон, как правило, образуются дифрагированные и преломленно-отраженные волны, и, практически во всех случаях, регистрируются аномальные колебания, динамические параметры которых, отличаются от параметров колебаний вне зоны тектонического нарушения [6]. На рис. 1, *а, б, в* показаны фрагменты полевых сейсмограмм с записями аномальных колебаний, зарегистрированных на границах зон тектонических нарушений.

Характер колебаний и форма их огибающих указывают на то, что они относятся к нелинейному типу, к так называемым, солитоноподобным [7], однако, регистрируемые в отдельных случаях практически незатухающие колебания (рис. 1, *в*), и их пространственная локализация, вызывают необходимость уточнения природы, формирующихся в окрестности тектонических нарушений сейсмических колебаний.

Анализ амплитудно-частотных спектров показал, что амплитуда аномальных колебаний, в несколько раз превышает амплитуду сейсмического сигнала вне зоны разлома. В то время как, типичные колебания содержат два основных максимума, соответствующих продольным и поперечным волнам, спектры аномальных колебаний представлены, как правило, одним максимумом, частота которого не совпадает с частотой нормального колебания (рис. 2).

Результаты исследований, выполненных на шести шахтах, находящихся в различных геолого-тектонических условиях, позволили установить, что частота и амплитуда основного максимума аномального колебания стабильна относительно условий возбуждения сейсмических волн. Динамические параметры одних и тех же компонент аномальных колебаний определяются условиями приема, т.е. свойствами той среды, в которой расположено приемное устройство.

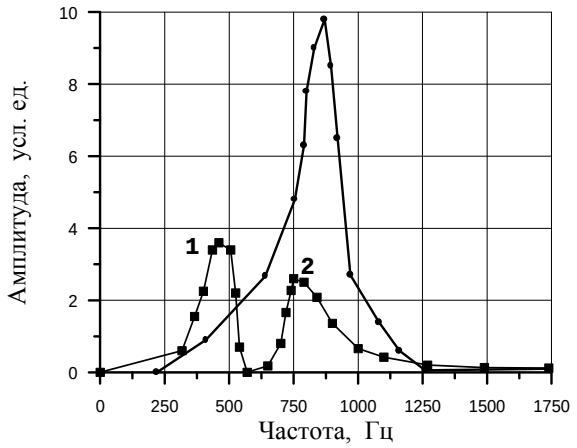
Величины горизонтальных напряжений и частоты аномального колебания на исследуемых рудниках

Название рудника	Напряжения, МПа, $б_x$	Частота основного максимума, Гц
ш. Магнезитовая, г. Н-Тагил	17	547
ш.СевероПесчанская, г. Краснотурьинск	21	705
ш. Магнетитовая, г. Н-Тагил	45	975
Таштагольский, Рудник	52	909
СУБР, г. Североуральск	58	1070
ш. Естюнинская, г. Н-Тагил	72	1120

Необходимо отметить, что для каждой из шахт, на которых проводились исследования, характерен определенный диапазон частот и амплитуд аномальных колебаний. Характер распределения модальных значений частоты максимума по рудникам, указывают на определенную связь параметров аномального колебания с геолого-тектоническими условиями исследуемых шахт. Так, например, для шахты «Магнезитовая» (т. Сатка), которая находится в породах осадочного комплекса, частота основного максимума составляет 547 Гц. Для шахты «Магнетитовая» (г. Н-Тагил), расположенной в породах вулканогенно-осадочного комплекса, частота максимума составляет 975 Гц. Учитывая значительное влияние, которое оказывает на породный массив его напряженное состояние, на каждом руднике было выполнено сопоставление частоты аномальных колебаний с первоначальным напряжением [8]. Для сопоставления выбирались средние значения горизонтальных напряжений, определенных на тех же горизонтах, где выполнялись геофизические наблюдения (таблица).

Оценка корреляционной связи двух параметров показала, что зависимость частоты аномального колебания от величины действующего в массиве напряжения является значимой (коэффициент корреляции равен 0.95, рис. 3)

Локальное распространение аномальных колебаний, их приуроченность к зонам тектонических нарушений, связь ди-



спектр аномального колебания

спектр типичного колебания

1 - амплитудный максимум поперечной волны
2 - амплитудный максимум продольной волны

Рис. 2. Амплитудно-частотные спектры сейсмических волн, зарегистрированных в зоне разлома «Средний» и вне его, шахта «Магнетитовая», гор. -370, г. Нижний Тагил

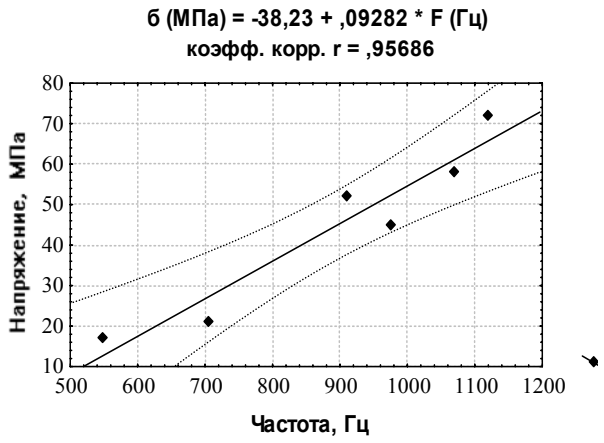


Рис. 3. График корреляционной зависимости частоты аномальных колебаний от величины горизонтальных напряжений, измеренных на рудниках Урала и Сибири по данным работы [8]

намических параметров с напряженным состоянием породного массива и независимость от внешних условий возбуждения, позволяют сделать вывод о том, источником генерирования данных колебаний является при разломная часть породного массива, в которой, согласно работам [4 5], наблюдается концентрация напряжений. Двукратное превышение уровня действующего напряжения приводит к пластической деформации и связанной с ней нелинейностью породного массива. В работе [9] рассматривается механизм возникновения автоколебаний при наличии в среде пластической деформации. С целью определения модели деформирования породного массива в окрестности тектонического нарушения, использовалась ранее установленная зависимость величины отношения скоростей продольной и поперечной волн (Vp/Vs) от характера деформирования горных пород [10]. Увеличению отношения Vp/Vs соответствует пластическая деформация пород, уменьшению – упругая.

Пространственное сопоставление интервальных значений Vp/Vs с визуально выделенными нарушениями, показало, что разломным зонам отвечает повышенная в 1.5-2.0 раза величина Vp/Vs, аномальные колебания регистрируются как в пределах зоны пластической деформации, так и за её пределами. При этом, аномальные колебания могут разделяться по частоте основного амплитудного максимума, так более высокочастотные колебания группируются в пределах лежачего крыла разлома, низкочастотные – в разломной зоне и в пределах висячего крыла.

В качестве примера на рис. 4 приведены интервальные значения Vp/Vs и местоположение аномальных колебаний, зарегистрированных в окрестности сбросо-сдвига «Средний» на горизонте -370 м шахты «Магнетитовая». Высокочастотные колебания (1200 Гц) фиксируются в лежачем крыле нарушения, за пределами зоны пластической деформации, низкочастотные (500-700 Гц) – в висячем крыле и в пределах зоны пластической деформации.

Таким образом, выполненные исследования позволили установить:

- в окрестности тектонических нарушений в сейсмическом волновом поле присутствуют аномальные ко-лебания, динамические параметры которых, отличаются от параметров колебаний за пределами разломных зон;

- выявленные особенности аномальных колебаний, таких как, независимость динамических параметров от внешних условий возбуждения, приуроченность к нелинейным участкам породного массива, дают основание отнести

Рис. 4. Интервальные значения отношения скоростей Vp/Vs в зоне тектонического нарушения и местоположение аномальных колебаний. Шахта «Магнетитовая», гор. -370 м, разлом «Средний»

данные колебания к нелинейным волнам;

- тесная корреляционная связь динамических параметров нелинейных волн и действующих напряжений дают возможность оценивать состояние породного массива в окрестности тектонических нарушений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Рассказов И.Ю., Курсакин Г.А.* Оценка и контроль удароопасности массива горных пород на рудниках.- Владивосток. Дальнаука, 2001.- 169 с.

2. *Ловчиков А.В., Гуменков В.П.* О роли естественных и техногенных факторов в реализации горно-тектонических ударов на рудниках.\ Динамика и напряженное состояние недр Земли. Труды международной конференции.- Новосибирск, СО РАН, 2001. с 243-250.

3. *Курленя М.В., Серяков В.М., Еременко А.А.* Техногенные геомеханические поля напряжений. – Новосибирск. Наука. 2005.- 264 с.

4. *Айтматов И.Г., Ялымов Н.Г., Кожагулов К.Ч., Рогожников О.В., Ялымов Р.Н.* Формирование поля напряжений в районе активных разломов Тянь-Шаня\ Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Труды международной конференции.- Новосибирск, СО РАН, 1999. с 289-294.

5. *Вылекжанин В.Н., Егоров П.В., Мурашов В.И.* Структурные модели горного массива в механизме геомеханических процессов.- Новосибирск. Наука. Сиб. отд-ние. РАН 1990. - 205 с.

6. *Бодин В.В.* Отображение тектонических нарушений в сейсмическом волновом поле.- Москва. Горный информационно- аналитический бюллетень. МТГУ, 2004, №8 с 71-78.

7. *Хаврошкин О.Б.* Некоторые проблемы нелинейной сейсмологии. - М. ОИФЗ РАН, 1999. – 286 с.

8. *Зубков А.В.* Геомеханика и геотехнология. – Екатеринбург. УрО РАН. 2001. – 355 с.

9. *Панин В.Е., Гриняев В.И. и др.* Структурные уровни пластической деформации и разрушения. – Новосибирск. Наука. СО РАН. 1990. – 255 с.

10. *Петров В.А., Звягтнцев Л.И., Полуэктов В.В., Волков А.В.* Изменение упругих и деформационных свойств пород в зависимости от длительности воздействия напряжения. / Вестник Моск. ун-та. Сер. 4. Геология 1998, №6, с 41-51.

Коротко об авторах

Бодин В.В. – ИГД УрО РАН

© Н.А. Мирошниченко, Е.В. Новикова, 2006

УДК 622.831

Н.А. Мирошниченко, Е.В. Новикова

МЕТОД ОБЪЕМНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА НА ОСНОВЕ ПЛАНОВ ГОРИЗОНТОВ

Семинар № 3

Основой для решения задач прогнозирования катастрофических природных и природно-техно-генных явлений, связанных с различного рода геодинамическими процессами, является создание для потенциально опасных регионов такой информационной модели, которая позволяла бы отображать динамику наиболее существенных факторов, определяющих развитие катастрофических процессов.

В первую очередь информационная геодинамическая модель пространства региона предназначена для описания блочной структуры составляющего его массива горных пород, физико-меха-нических свойств массива, а также их динамики, вызванной развивающимися процессами различной физической природы в течение наблюдаемого периода времени.

Учитывая сложность разрабатываемой модели, рационально представить ее в виде иерархической структуры, что обеспечивает, таким образом, распределение функций разработки между несколькими организациями и государственными органами и службами, а в дальнейшем возможность использования модели в процессе управления регионом на разных уровнях при соответствующем распределении прав доступа к ней между различными субъектами.

Один из возможных вариантов построения иерархической структуры геодинамической модели класса ГИС [1] такого крупного промышленного региона, как Кузнецкий угольный бассейн, приведён на рис. 1. В данной структуре верхний уровень иерархии представлен объектами, которые определяются как геологическим и тектоническим строением региона (например, разлом), так и его административным делением (районы).

Важнейшей задачей при создании геодинамической модели региона является моделирование физико-механичес-ких свойств образующего его геомеханического пространства. Реализация данной задачи непосредственно связана с моделированием блочной структуры исследуемого пространства, с задачами моделирования объёмных полей напряжений, деформаций и смещений.

В [2] рассматривается подход к созданию информационной модели как совокупности изменяющихся во времени полей физико-механических свойств геомеханического пространства. Для описания этих полей в модели создаются динамические объекты и события различных типов (классов), которые отображаются на ось времени. Каждому объекту приписываются его геометрические, пространственные и физико-механические свойства.

Любой из объектов информационной модели, как и модель в целом, могут обладать сложной иерархической структурой, т.е. быть образованы некоторыми структурами подобъектов, каждый из которых в свою очередь может быть как элементарным, так и структурированным, и т.д.

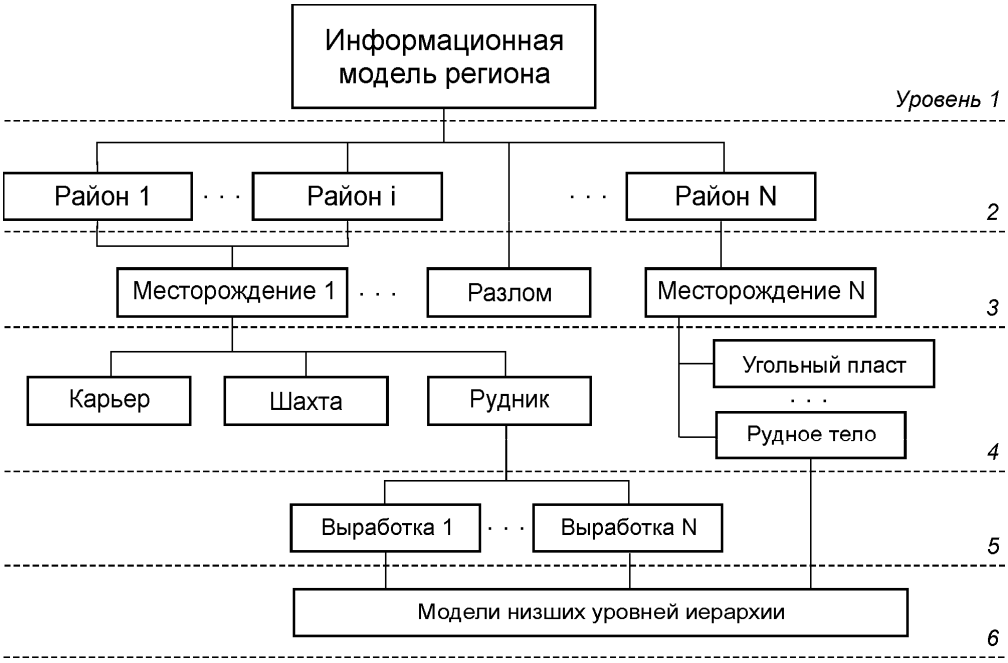


Рис. 1. Иерархическая структура геодинамической модели

Элементарный объект определяется как компакт, все точки которого имеют одинаковые физико-механические свойства. Совокупность всех компактов отображает структуру и свойства геомеханического пространства в целом.

Подобъекты структурированного объекта полностью заполняют объём, соответствующий их надобъекту (структурированному объекту, в составе которого определён сам объект). При этом объём их пересечений равен нулю, т.е. предполагается, что общими точками пары объектов геомеханического пространства могут быть только их граничные точки.

Разработка информационной модели геомеханического пространства невозможна без решения задачи моделирования геометрии пространства в целом, а также геометрии входящих в его состав отдельных объектов. Для этой цели разработаны следующие классы элементарных геометрических объектов:

1) *опорная точка*, определяемая значениями координат (*x,y,z*) в привязке к некоторой системе координат геомеханического пространства; задает некоторую граничную точку какого-либо компакта,

2) *прямая линия*, определяемая опорной точкой и тремя направляющими косинусами,

3) *отрезок* – множество точек некоторой прямой линии, ограниченное парой опорных точек, принадлежащих данной прямой,

4) *плоскость* – некоторое сечение геомеханического пространства, заданное уравнением вида

$$A \cdot x + B \cdot y + C \cdot z + D = 0,$$

5) *треугольник* – множество точек некоторой плоскости, ограниченной отрезками, образованными тройкой опорных точек данной плоскости,

6) *поверхность*, определяемая некоторой совокупностью прилегающих друг к

другу треугольников; отображает границы объектов геомеханического пространства,

7) *кривая*, определяемая некоторой последовательностью отрезков; задает контуры объектов геомеханического пространства на его сечении, определяемом соответствующей плоскостью или поверхностью,

8) *треугольная пирамида* - элементарный объем, ограниченный треугольниками, образованными четверкой опорных точек; определяет геометрические и пространственные свойства некоторого компакта геомеханического пространства,

9) *объём*, образованный множеством треугольных пирамид; определяет геометрические и пространственные свойства некоторого объекта геомеханического пространства.

Между геометрическими объектами определён ряд соотношений и операций, как например, построение пересечений и объединений геометрических объектов и вычисление расстояний между ними. Геометрические свойства любого объекта геомеханического пространства отображаются, таким образом, соответствующей структурой вышеперечисленных элементарных объектов.

В основе геометрического моделирования лежит дискретизация пространства, результатом которой обычно является некоторая трехмерная сетка – регулярная или нерегулярная [3, 4]. Количество точек в модели геомеханического пространства может исчисляться десятками и сотнями тысяч, поэтому качество и эффективность процедуры дискретизации чрезвычайно важны.

В регулярной сетке все узлы равномерно распределены по моделируемому пространству, что существенно упрощает алгоритм ее построения, однако точность моделирования в сравнении с нерегулярной при одинаковом числе узлов значительно ниже. В качестве элементарных объёмов при регулярной триангуляции используется некоторый правильный многогранник, который размещается в узлах сетки. Использование нерегулярных сеток алгоритмически сложнее, но они обеспечивают значительно более высокую точность аппроксимации геометрических свойств объектов.

По результатам проведенного анализа различных методов дискретизации пространства предпочтение было отдано методу объёмной триангуляции по заданному множеству опорных точек геометрического объекта, основанному на представлении моделируемого объекта в виде множества треугольных пирамид, вершинами которых служат его опорные точки.

Разработанный метод объёмного моделирования произвольного объекта геомеханического пространства на основе планов горизонтов горнодобывающего предприятия и метода триангуляции по опорным точкам позволяет отразить топологию сечения геомеханического объекта, соответствующего некоторому плану горизонтов, выпуклую или невыпуклую его форму, связность точек, наличие в нём дыр и включений. Все сечения моделируемого геомеханического объекта при этом представляются в виде множества замкнутых направленных контуров.

Контур определяется как последовательность опорных точек геомеханического пространства. Последняя точка последовательности контура замыкается с первой. Направление обхода контура определяет принадлежность моделируемому геомеханическому объекту точек по разные стороны границ контура.

Метод объёмного моделирования заключается в последовательном выполнении для каждой пары соседних планов горизонтов следующих шагов:

1) Построение множества треугольных пирамид, образующих выпуклую оболочку, натянутую на множество опорных точек геомеханического пространства, принадлежащих контурам моделируемого объекта на этих горизонтах (триангуляция Делоне).

2) Исключение из триангуляции всех пирамид, три вершины которых при-

надлежат одному контуру, а множество его точек, относящихся к соответствующему сечению (горизонту), моделируемому объекту не принадлежит. Идентификация удаляемой вершины осуществляется по знаку синуса между векторами $\overrightarrow{P_1, P_2}$ и $\overrightarrow{P_1, P_3}$, определяемых вершинами пирамиды и точками соответствующего контура. При этом вершина P_i пирамиды предшествует вершине P_{i+1} в контуре.

3) Исключение из триангуляции всех парных пирамид, таких, что одна пара вершин принадлежит одному контуру, а другая пара принадлежит контуру соседнего горизонта, при этом существуют удалённые на шаге 2 пирамиды, которые имеют общие грани с данными. Обе пары вершин пирамиды при этом не должны быть образованы последовательными точками в соответствующих контурах.

Построение выпуклой оболочки на шаге 1 можно производить разными способами. Один из них полностью комбинаторный, заключающийся в построении всех возможных кортежей из четырёх различных опорных точек, таких, что их пересечения имеют нулевой объём. Второй способ – частично комбинаторный, при котором вначале осуществляется плоская триангуляция сечений рудного тела, а затем так же строится множество всех возможных кортежей, в которых три вершины одного сечения соответствуют триангуляциям сечений, а парные вершины парных пирамид – рёбрам триангуляции сечений.

Помимо комбинаторного метода при построении плоской триангуляции сечения допустимо использовать два нижеследующих рекурсивных алгоритма.

Первый алгоритм заключается в следующем:

1) выбираются три последовательные точки контура P_{i-1}, P_i, P_{i+1} так, чтобы периметр образованного ими треугольника оказался минимальным;

2) проверяется принадлежность всех точек треугольника контуру посредством анализа знака синуса между векторами $\overrightarrow{P_{i-1}, P_i}$ и $\overrightarrow{P_{i-1}, P_{i+1}}$;

3) если точки треугольника не принадлежат контуру, то производится выбор следующей тройки точек контура;

4) в противном случае треугольник с данными вершинами включается в триангуляцию, вершина P_i удаляется из контура, и повторяется шаг 1 до тех пор, пока в контуре не останется две вершины;

Второй алгоритм реализуется следующим образом:

1) выбираются три точки контура P_1, P_2, P_3 так, чтобы периметр образованного ими треугольника был максимальным, в предположении, что последовательность этих точек в контуре сохранена;

2) проверяется принадлежность всех точек треугольника контуру посредством нахождения точек пересечений всех граней данного треугольника с гранями, образованными соседними точками контура;

3) если точки данного треугольника не принадлежат контуру, то производится выбор следующей тройки точек контура;

4) в противном случае треугольник с данными вершинами включается в триангуляцию, а сам контур разбивается на три начальными и конечными точками, которыми являются вершины включённого треугольника. Далее повторяется шаг 1 для каждого вновь образованного контура до тех пор, пока в контуре не останется две вершины.

Два данных алгоритма можно развить и для случая объёмной триангуляции. При этом на каждом шаге триангуляции осуществляется поиск пересечения пирамиды-кандидата с гранями, образующими граничную поверхность объекта геомеханического пространства. Выбор пирамиды-кандидата определяется наличием общих граней с пирамидами, включёнными в триангуляцию на предшествующих шагах.

Разработанная методика получения опорных точек геомеханического пространства обеспечивает привязку их к выделенным контурам и геодезическим координатам, в которых составлены планы горизонтов, и позволяет учесть возможные искажения, вносимые в электронные копии при сканировании планов горизонтов, представленных на бумажном носителе.

Программная реализация метода объёмного моделирования и визуализация результатов произведены посредством пакетов MatLab 6.5 и Graphis. Результаты моделирования рудного тела Таштагольского месторождения на горизонтах −280 м и −350 м, представленные на рис. 2−3, демонстрируют, соответственно, результаты оцифровки и плоской триангуляции контуров рудного тела на вышеуказанных горизонтах и результаты объёмной триангуляции с учетом триангуляций соответствующих сечений.

По произведенной оценке производительности предложенного метода для геомеханического объекта, образованного контурами более чем из 3000 опорных точек, построение его информационной модели, содержащей порядка 5000 элементарных компактов, занимает менее 1 мин. на ЭВМ Celeron – 434 МГц, 256 МГб, Windows XP Professional. Согласно оценке точности оцифровки карт по разработанной методике абсолютная ошибка в координатах опорной точки составляет не более 0.7−1.5 м на 12 км, а относительная ошибка в расстояниях между опорными точками, принадлежащими одному контуру, − не более 25 см. При этом предполагается, что систематическая ошибка, обусловленная неточностью изготовления планов горизонтов и сечений, равна нулю (для её оценки требуется проведение дополнительных геодезических измерений).

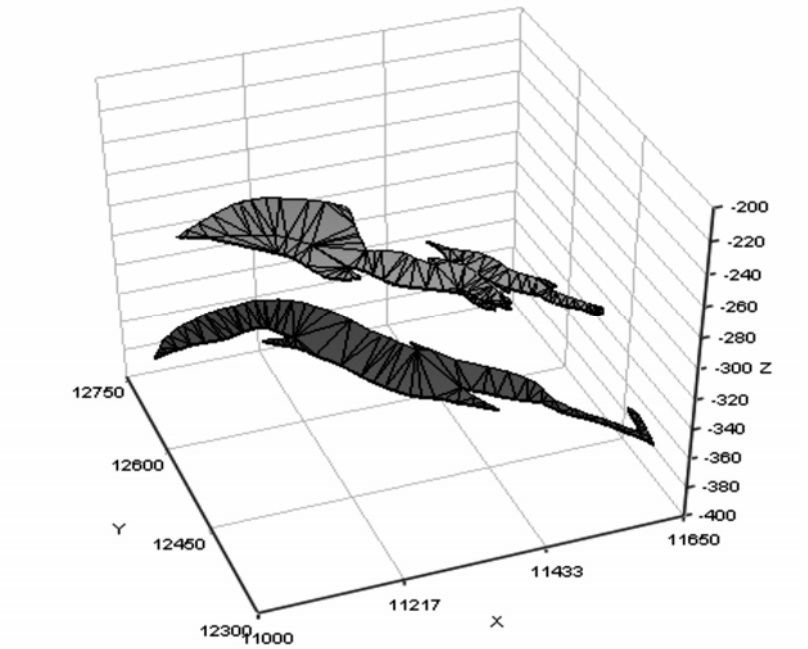


Рис. 2. Результаты оцифровки и триангуляции сечений рудного тела на горизонтах -280 и -350 м Таштагольского рудника

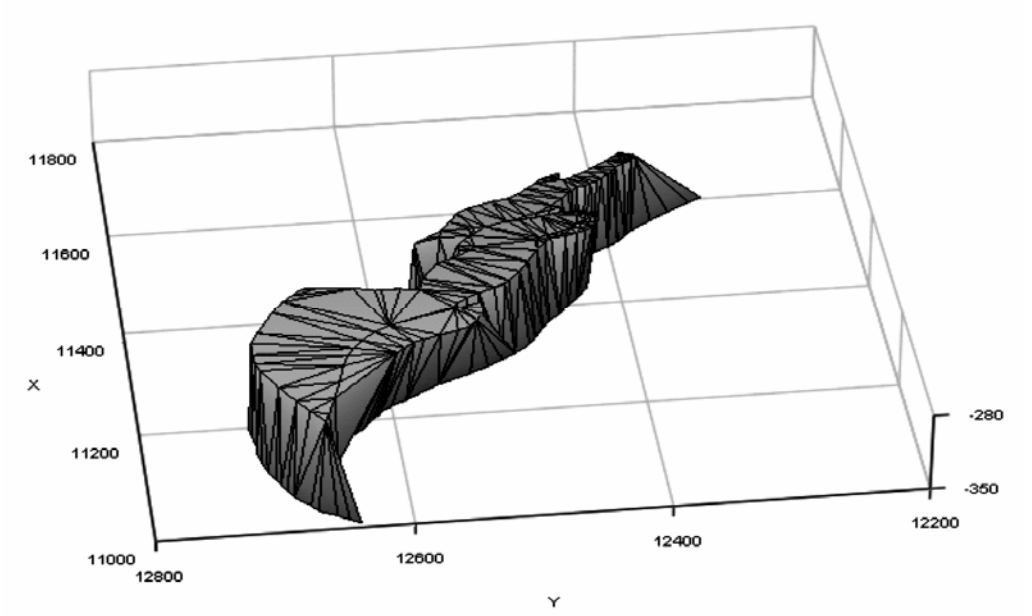


Рис. 3. Результаты объёмной триангуляции фрагмента рудного тела Таштагольского рудника, ограниченного горизонтами -280 и -350 м

В настоящее время ведётся разработка базы данных региональной информационной модели. На текущий момент она содержит семь следующих таблиц:

1) Таблица исходных документов (перечень документов, используемых для построения информационной модели геомеханического пространства, с указанием источников и даты создания);

2) Таблица электронных документов (перечень файлов различных типов, составляющих информационную модель геомеханического пространства, с указанием их назначения и документов, на основе которых они созданы);

3) Таблица геомеханических объектов (дескриптивное описание моделируемых объектов, а также их координаты);

4) Таблица горизонтов (описание имеющихся планов горизонтов геомеханического пространства и их электронные копии; образует информационные модели горизонтов);

5) Таблица опорных точек (содержит координаты опорных точек геомеханического пространства, отношения их принадлежности к горизонтам и контурам);

6) Таблица контуров (дескриптивное описание контуров, отношения принадлежности их к горизонтам и геомеханическим объектам);

7) Таблица элементарных компактов (содержит номера вершин, задающих компакты, а также отношения их принадлежности геомеханическим объектам).

База данных размещена на лабораторном сервере. Из 13 имеющихся в распоряжении горизонтов произведена оцифровка рудного тела на четырёх. Построено около 250 контуров, которые в совокупности содержат более 6000 опорных точек. Организован удалённый доступ к данной БД с компьютеров лабораторной локальной сети. Разрабатываются клиентские приложения для организации доступа к базе данных с целью её пополнения, проведения информационного моделирования и представления результатов моделирования в виде, необходимом для интерпретации результатов моделирования, в том числе и графическом.

Результаты проведенного опытного моделирования рудного тела Таштагольского месторождения позволяют говорить о возможности реализации разработанных принципов и методов в практике горнорудных предприятий. К числу потенциальных пользователей описываемой модели можно отнести различные административные и хозяйственные субъекты, ведущие свою деятельность на соответствующих территориях регионов. В соответствии с поставленными задачами и предоставленными полномочиями, они осуществляют непрерывный мониторинг и обеспечивают решение вопросов планирования и оперативного управления.

Работа выполнена в рамках интеграционных проектов № 134 «Разработка информационной геодинамической модели строения Кузнецкого угольного бассейна для целей прогнозирования катастрофических природных и техногенных явлений» и № 73 «Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования».

Опытная эксплуатация информационной модели геомеханического пространства планируется на Таштагольском горнорудном предприятии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Цветков В.Я.* Геоинформационные системы и технологии. – М.: Финансы и статистика, 1998.
2. *Мирошниченко Н.А., Рубцова Е.В.* Об одном подходе к информационному моделированию геодинамических процессов в массиве горных пород. // Горный информационно-аналитический бюллетень.– М.: Изд. МГГУ.– 2005.– №7. – С.114-118.
3. *Ласло М.* Вычислительная геометрия и компьютерная графика на С++ – М.: "Издательство БИНОМ", 1997. – 304 с.
4. *Скворцов А.В.* Обзор алгоритмов построения триангуляции Делоне // Вычислительные методы и программирование. – 2002. – Т.3. – с. 14-39.

Коротко об авторах

Мирошниченко Н.А., Новикова Е.В. – Институт горного дела СО РАН, г. Новосибирск.

© С.А. Константинова, Н.П. Крамсков, А.С. Кульминский, В.П. Соловьев, А.Н. Черепнов, 2006

УДК 622.831

С.А. Константинова, Н.П. Крамсков, А.С. Кульминский, В.П. Соловьев, А.Н. Черепнов

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ СОЛЕНОСНЫХ ПОРОД ВОКРУГ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК НА РУДНИКЕ «ИНТЕРНАЦИОНАЛЬНЫЙ» АК «АЛРОСА»

Семинар № 3

Строительство подземного рудника «Интернациональный» АК «Алроса» началось в 1976 году. С 1999 года рудник эксплуатирует подкарьерные запасы трубки «Интернациональная». В диапазоне глубин 558÷863 м вмещающими рудное тело породами являются соленосные породы Чарской свиты, которые включают слои каменной соли мощностью 2,8÷30,4 м и прослои известняков и доломитов мощностью 0,8÷15,0 м.

По соленосным породам Чарской свиты пройдены горнокапитальные и горноподготовительные выработки достаточно большой протяженности на горизонтах №4 (H = 600 м), №5 (H = 690 м) и №6 (H = 780 м). В качестве крепи горных выработок использованы: бетонная крепь с податливым внешним слоем и без него; металлические арки с железобетонной затяжкой; анкеры натяжного типа, установленные в кровле и в боковых частях выработок; комбинированная облегченная крепь, состоящая из анкеров, металлической сетки и набрызг-бетона.

В 2001-2002 годах *проблема охраны горнокапитальных и горноподготовительных выработок* на руднике «Интернациональный» *в течение всего срока его дальнейшей работы* приобрела серьезную актуальность. В результате визуального осмотра состояния выработок и их крепи комиссией, в которую входили представители рудника «Интернациональный», институтов «Якутнипроалмаз» и ОАО «Галургия», было установлено, что все горные выработки спроектированы и построены без учета уникальных свойств соляных и соленосных пород. Поэтому практически повсеместно имеют место негативные проявления горного давления, выражающиеся в разрушении бетонной и железобетонной крепи выработок, деформациях несущих конструкций, пучении почвы с нарушениями рельсовых путей.

С 2003 года по настоящее время на руднике «Интернациональный» проводится *геомеханический мониторинг*, включающий

- *визуальные и инструментальные наблюдения* за геодинамической эволюцией геологической (природной) среды, а также крепи подземных сооружений;
- *оценку* в лабораторных (на образцах) и натурных условиях *прочностных*, *деформационных и реологических показателей соленосных пород* Чарской свиты;

*Работы проводятся при финансовой поддержке АК «Алроса», института «Якутнипроалмаз» и частично поддерживаются РФФИ (проект 04-01-97511).

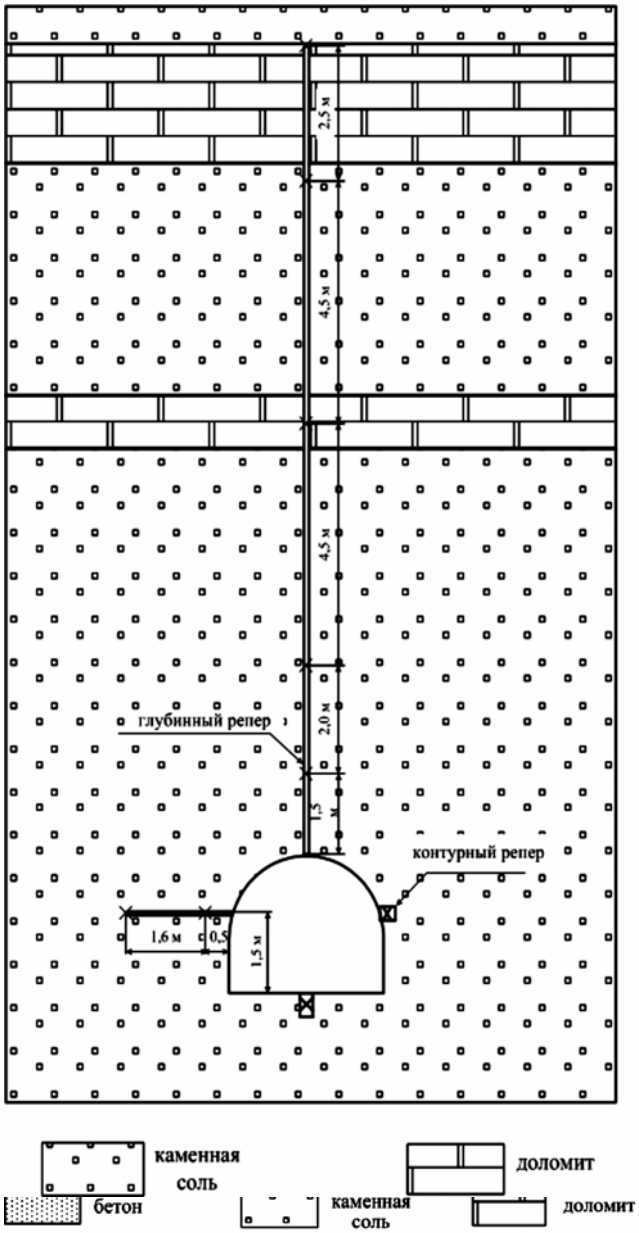


Рис. 1. Геологическое строение породного массива и схема замерной станции № 4 на горизонте № 4 (Н = 600 м)

- *математическое моделирование* процессов деформирования и разрушения пород, окружающих незакрепленные и закрепленные выработки.

Цель геомеханического мониторинга состоит в том, чтобы *на основе актуальных данных* о свойствах и состоянии пород, вмещающие горные выработки, а также крепи подземных сооружений, оперативно *выдавать заключения* о возможности дальнейшей безаварийной эксплуатации горно-капитальных и горно-подготовительных выработок в течение необходимого по условиям эксплуатации (технологического) срока службы или *рекомендации* по мерам охраны (включая ремонт), позволяющие сохранить выработки в устойчивом (эксплуатационном) состоянии.

Для проведения геомеханического мониторинга в горно-капитальных и горно-подготовительных выработках подземного рудника «Интернациональный» контурными и глубинными реперами конструкции ОАО «Галургия» были оборудованы 8 замерных станций, размещенные

- в одиночных выработках, расположенных в массиве каменной соли, горизонтов № 4 и № 6 на глубине соответственно 620 и 780 м (станции № 1 и № 2);
- в однопутевом квершлаге вблизи сопряжения со сбойкой горизонта № 6 (станция № 3);
- на сопряжении клетевого ствола с горизонтальной выработкой горизонта № 4 на глубине 600 м (станция № 4);
- в камере ожидания клетевого ствола на горизонте № 6 на расстоянии 12 м от ствола на глубине 780 м;

- в конвейерном штреке и дозаторной камере, сопрягающихся со скиповым стволом, на глубинах соответственно 801 и 803 м (станция № 6);
- в камере обслуживания самоходного оборудования (КОСО) и в трансформаторной камере (РПП) на горизонте № 5 на глубине 690 м (станции № 7 и № 8).

Глубина заложения реперов в породы, окружающие горные выработки, составляла от 0,25 м (контурные реперы) до 15,0 м (глубинные реперы).

Период инструментальных наблюдений составил к настоящему времени 554÷905 суток. Измерения производятся с использованием рулетки ВНИМИ, оснащенной конусом, с периодичностью 3÷4 раза в год.

На рис. 1 и 2 в качестве примеров показаны геологическое строение породного массива и схема глубинных и контурных реперов на станциях № 4 и № 5.

Рис.2. Геологическое строение породного массива и схема замерной станции № 5 на горизонте № 6 (Н = 780 м)

Станция № 4 расположена в 2-х метрах от клетевого ствола на его сопряжении с горизонтальной горнокапитальной выработкой горизонта № 4 (H = 600 м). Сопряжение закреплено монолитной бетонной крепью толщиной 0,6 м с круговыми поясами из швеллера № 24 и стальной арматурой. В процессе бурения вертикальной скважины наблюдали интенсивное дискование керна, около 70 % которого было разбито на диски толщиной от 0,5 до 3,0 см (реже до 7,0 см). Средняя скорость вертикальных смещений приконтурных пород за период наблюдения 2,5 года не превысила 5,0 мм/год.

Таблица 1

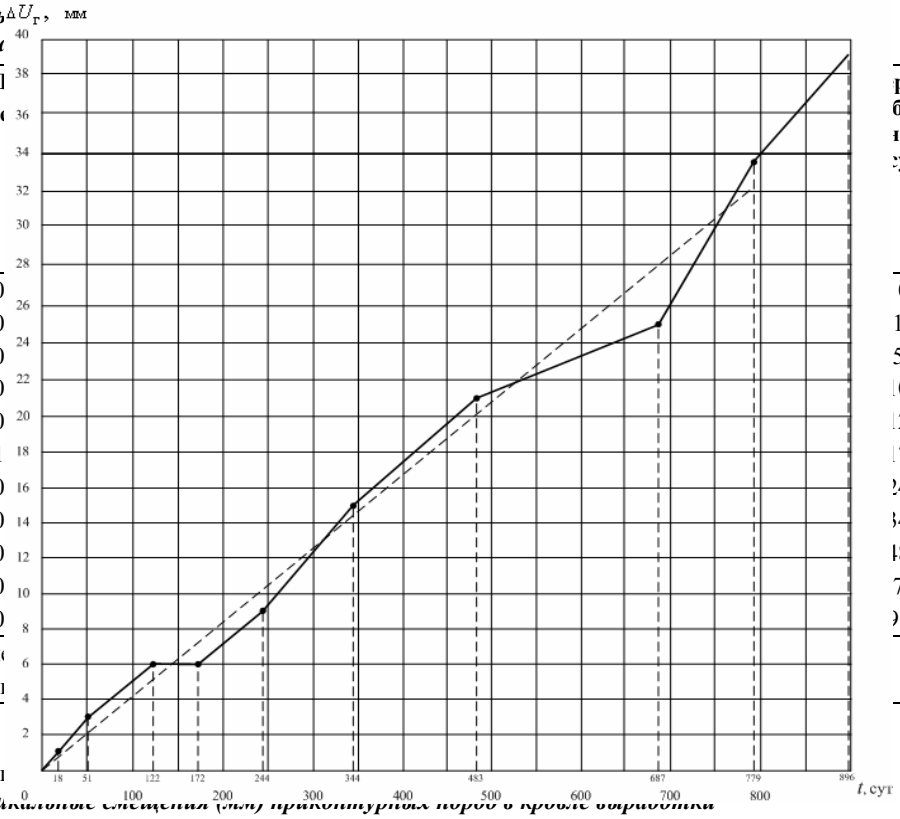
Резуль

на ст

Д		**риод**
изм		**блю-**
		ний *t*,
		сут
07.0		0
25.0		18
28.0		51
19.0		106
07.0		122
26.1		172
04.0		244
14.0		344
29.0		483
22.0		7 (0)*
21.0		9 (92)*

*Реп

**Ре



Таблиц

Верти

на станции № 5 (Н = 780 м) – рис. 2

Рис. 3. График зависимости конвергенции ΔU, стенок камеры ожидания на горизонте № 6 (станция № 5, Н = 780 м) от времени t

Период наблюдений *t*, сут	**Расстояние точки от устья скважины**				
	1,5 м	**3,5 м**	**8,0 м**	**12,5 м**	**15,0 м**
18	1,5	0,5	1,0	-3,0*	6,5
51	2,5	2,0	0,0	3,0	3,0
122	7,5	3,0	4,0	4,5	4,25
172	16,5	7,5	4,0	5,5	3,0
244	14,5	8,5	6,0	7,5	4,5
344	18,0	12,0	8,5	12,5	9,0
483	24,0	19,0	18,0	14,5	17,0

Станция № 5 расположена в камере ожидания на горизонте № 6 (*Н* = 780 м) в 10-ти метрах от клетевого ствола в зоне влияния других околоствольных выработок. Камера ожидания закреплена податливой арочной металлической крепью с железобетонной затяжкой.

Результаты измерений смещений приконтурного массива вокруг выработки на станции № 5 приведены в табл. 1÷2 и на рис. 3.

В рамках геомеханического мониторинга проводили периодические визуальные наблюдения за состоянием горнокапитальных и горноподготовительных выработок на руднике «Интернациональный» с фотографированием наиболее характерных мест негативного проявления горного давления.

В целом по результатам инструментальных наблюдений за смещениями соленосных пород Чарской свиты в окрестности горнокапитальных и горноподготовительных выработок на руднике «Интернациональных» можно сделать следующие выводы.

- На всех наблюденных подземных станциях *продолжаются смещения* приконтурных соленосных пород, *обусловленные их незатухающей во времени ползучестью*.
- Скорость вертикальных смещений пород *в кровле одиночной протяженной* горный *выработки* в массиве каменной соли находится в диапазоне 2,57÷8,09 мм/год и нелинейно зависит от глубины расположения выработки. Так при H = 780 м значение скорости в 3 раза больше, чем при H = 620 м (станции №№ 1,2 и 3).
- Если сечение одиночной протяженной выработки полностью расположено в массиве каменной соли, то смещения приконтурных пород в вертикальном и горизонтальном направлениях одинаковы, что свидетельствует *о близости поля напряжений в ненарушенном породном массиве к гидростатическому* (станция № 1).
- Если в боковой части сечения выработки находится достаточно мощный пласт доломитов, которые в образце не склонны к ползучести, то смещения точек породного массиве в боках выработки тем не менее происходят с незатухающей во времени скоростью, примерно в 2 раза меньшей, чем в кровле выработки (станция № 2). Таким образом, *доломитовые породы «выдавливаются»* текущей во все стороны *каменной солью*.
- Если выработка пройдена *в слоистом породном массиве*, когда слои каменной соли переслаиваются со слоями и прослоями доломитов, то *скорость вертикальных смещений пород* в кровле выработки в 1,5÷2,0 раза *превышает скорость горизонтальных смещений пород* в боковой части выработки (станции №№ 2,5,6 и 8).
- Если выработка находится *в зоне влияния близрасположенных выработок*, то *скорость смещений* приконтурных пород в ее кровле *возрастает в 2 раза и более*, изменяется в диапазоне 5,17÷18,14 мм/год и возрастает с увеличением глубины расположения выработки.
- *Наиболее интенсивно смещения* приконтурных пород с незатухающей во времени скоростью *происходят* в *камере ожидания* вблизи клетевого ствола на горизонте № 6 (H = 780 м) – станция № 5; *конвейерном* заглубленном *штреке* вблизи скипового ствола на горизонте № 6 (H = 801 м) – станция № 6;
- *Наибольшую опасность представляет* значительная *горизонтальная конвергенция стенок* закрепленной бетоном *дозаторной камеры* (H = 805 м) – станция № 6'. За 535 суток наблюдений горизонтальная конвергенция бетонных стенок дозаторной камеры на расстоянии 1,0 м от чугунно-тюбинговой крепи ствола составила 2,5 см.

В настоящее время Уральским научно-исследовательским и проектным институтом галургии (ОАО «Галургия») созданы *электронная база данных* инструментального и визуального *геомеханического мониторинга* состояния приконтурных пород и крепи горно-капитальных и горноподготовительных выработок на руднике «Интернациональный» и *компьютерная программа*, позволяющая осуществлять накопление и оперативную обработку результатов мониторинга.

Коротко об авторах

Константинова С.А. – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией ОАО «Галургия», г. Пермь,
Крамсков Н.П. – доктор технических наук, заместитель директора по науке института «Якутнипроалмаз», г. Мирный,
Кульминский А.С. – главный инженер рудника «Интернациональный», г. Мирный,
Соловьев В.А. – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ОАО «Галургия», г Пермь,
Черепнов А.Н. – главный маркшейдер АК «Алроса», г. Мирный.