

## *Modeling geomechanical system of the Polymetal Company.*

Boris B. Sogrin,  
JSC Polymetal Engineering, Project manager, Ph.D. h.2, prospect Narodnogo Opolcheniya, St. Petersburg, 198216, Russian Federation, +7 911 811 38 75, Sogrin@polymetal.ru

Victor B. Kolpakov,  
JSC Polymetal Engineering, The Head of the Hydrogeology, Rock mechanics and Engineering geology department. Ph.D. h.2, prospect Narodnogo Opolcheniya, St. Petersburg, 198216, Russian Federation, +7 906 241 02 80, KolpakovVB@polymetal.ru

Nikita O. Soluyanov,  
JSC Polymetal Engineering, Senior rock mechanics engineer of the Hydrogeology, Rock mechanics and Engineering geology department. H. 2, prospect Narodnogo Opolcheniya, St. Petersburg, 198216, Russian Federation, +7 981 883 97 12, SoluyanovNO@polymetal.ru

Sergey A. Antonyuk  
JSC Polymetal Engineering, Senior rock mechanics engineer of the Hydrogeology, Rock mechanics and Engineering geology department. Ph.D. h.2, prospect Narodnogo Opolcheniya, St. Petersburg, 198216, Russian Federation, +7 906 923 35 83, AntonyukSA@polymetal.ru

### **Abstract**

Основной целью геомеханической службы предприятия в компании Полиметалл является определение безопасных параметров горных работ с целью предотвращения аварийных ситуаций при освоении недр, повышение безопасности и эффективности открытых и подземных горных работ.

Главным документом для инженеров геомехаников в компании, определяющим основные принципы геомеханического обеспечения горных работ, является Стандарт «Геомеханическое обеспечение горных работ не месторождения», который был разработан в компании Полиметалл. Стандарт определяет методологию мониторинга горного массива, правила и процедуры в части подготовки и получения исходных данных для проектирования горных предприятий и т.д., основные опасности и риски, связанные с обрушением горных пород.

Основным инструментом геомехаников на предприятиях являются геомеханические модели месторождения, разработанные силами АО «Полиметалл Инжиниринг» или подрядных организаций. Применение актуальной геомеханической модели, содержащей базу данных геомеханических характеристик массива пород, рейтинговых классификаций, параметров систем разработки и категорий крепления горных выработок играет важную роль в выборе систем разработки, способов проведения горных выработок, планировании горных работ и рентабельности горнодобывающего предприятия в целом.

С целью увеличения безопасности при отработке месторождения и оптимизации параметров конструктивных элементов систем разработки, был выполнен анализ эффективности применения геомеханической модели в горном планировании. В ходе проведения опытно-промышленных работ на месторождениях была установлена сходимость геомеханического моделирования с фактическими данными в части параметров систем разработки, объемов крепления горных выработок и геомеханических характеристик породного массива.

### **Article**

#### **1. Introduction**

Геомеханическое направление все чаще и чаще становится неотъемлемой частью процессов проектирования, строительства и разработки месторождений. Анализ геомеханических условий на разных этапах жизни месторождения позволяет грамотно оценивать риски, связанные с зонами

неустойчивых горных пород. Для решения вопросов, связанных с управлением массива горных пород, на всех предприятиях Полиметалла была организована геомеханическая служба, целями которой являются:

- выявление сложных геомеханических участков и составление по ним соответствующей горно-графической документации;
- разработка рекомендаций и мероприятий по повышению устойчивости выработанного пространства;
- повышение безопасности и эффективности открытых и подземных горных работ;
- контроль за внедрением разработанных рекомендаций;
- ведение геомеханической документации на объекте и др.

В данной статье приводится методология геомеханического обеспечения горных работ на месторождениях компании Полиметалл.

## 2. The main geomechanical document

Полиметалл является одной из первых компаний в России, кто организовал специализированную геомеханическую службу на предприятиях. По истечению двух лет со дня организации геомеханических подразделений на предприятиях компании Полиметалл, с целью стандартизации всех работ, выполняемых геомеханиками, внутри компании был разработан документ – «Стандарт геомеханического обеспечения горных работ на месторождениях», который:

- является частью общей нормативно-методической базы АО «Полиметалл» и применяется совместно с другими нормативными документами;
- определяет основные принципы геомеханического обеспечения горных работ на месторождениях компании и порядок взаимодействия служб в компании при разработке предпроектной, проектной документации и оперативной деятельности.

В основу единой методологии стандарта геомеханического обеспечения горных работ заложены современные отечественные и зарубежные методики, позволяющие собрать исходные данные на стадии геологических работ и максимально учесть все горно-геологические особенности месторождений при проектировании разработки месторождения и ведении горных работ. Такой подход позволяет обеспечить эффективную выемку полезного ископаемого и повысить безопасность ведения горных работ.

Одним из базисных документов, для разработки «Стандарта геомеханического обеспечения горных работ на месторождениях», является монография «Руководство по проектированию бортов карьеров» под редакцией Джона Рида и Питера Стейси [1]. Данная монография является первой за многие годы, изданной в России, посвященной проблемам открытых горных работ и рассчитанной на профессионалов. Права на русский перевод монография «Руководство по проектированию бортов карьеров» принадлежат АО «Полиметалл Инжиниринг» (см. Рисунок 1).



Рисунок 1 - Руководство по проектированию бортов карьеров

### 3. The main geomechanical instrument

Согласно «Стандарта геомеханического обеспечения горных работ...», основным инструментом геомехаников на предприятиях являются геомеханические модели месторождения, которые разрабатываются силами АО «Полиметалл Инжиниринг» в ПО Datamine (CAE Inc., Канада).

Геомеханическая модель представляет собой блочную модель, построенную на базе геологической модели, содержащую данные по структурным особенностям, прочностным свойствам и рейтинговым классификациям (Q-Бартона и RMR-Бенявского) породного массива, а также параметрам конструктивных элементов систем разработки, рассчитываемым по широко известным методикам [2, 3], заложенным в модель с помощью специально написанных для моделирования скриптов и макросов.

#### 3.1 Initial date

Основными исходными данными для разработки геомеханической модели являются результаты геомеханического описания керна и картирования горных выработок. Геомеханиками компании Полиметалл были разработаны специальные табличные формы, включающие все показатели массива, необходимые для расчета рейтинговых классификаций и параметров систем разработки.

Формы геомеханического описания керна и картирования выработок приведены на рисунках (см. Рисунок 2 - Рисунок 3). С целью экономии времени на геомеханическое описание керна, для определения таких комплексных показателей как: Ja – сцепление стенок трещин и Jcon – свойства трещин, были разработаны специальные блок-схемы.

ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ КЕРНА																						
Интервалы				Строение			Прочность	Структура		Преобладающая система трещин						Система трещин с наилучшими свойствами						Примечания
Скл. №	От, м	До, м	Длина, м	Сокращенная литология (ROCK)	Выветривание (Ab)	Обводненность (lw)	Категория прочности (A1)	Качество породы (ROD), м	Количество систем трещин (Jr)	Количество трещин (Nt)	Расстояние между трещинами (SD), м	Раскрытие трещин (JS), мм	Шероховатость стенок трещин (Jt)	Сцепление стенок трещин (Ja)	Свойства трещин (JCON76)	Количество трещин (Nt)	Расстояние между трещинами (SD), м	Раскрытие трещин (JS), мм	Шероховатость стенок трещин (Jt)	Сцепление стенок трещин (Ja)	Свойства трещин (JCON76)	Примечания
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23

Рисунок 2 - Форма геомеханического описания керна

КАРТИРОВАНИЕ ВЫРАБОТОК																										
Координаты			Строение			Прочность	Структура		Свойства трещин			Разлом			Ориентация трещиноватости										Примечания	
Координаты точек замеров	Сокращенная литология	Выветривание	Обводненность	Категория прочности пород	Качество породы, %	Количество систем трещин	Шероховатость стенок трещин	Сцепление стенок трещин	Расстояние между трещинами, м	Раскрытие трещин, мм	Свойства трещин	Длина трещин	Угол падения разлома, град.	Амплитуда падения разлома, град.	Мощность разлома, м	Угол падения 1-й системы трещин, град.	Амплитуда падения 1-й системы трещин, град.	Угол падения 2-й системы трещин, град.	Амплитуда падения 2-й системы трещин, град.	Угол падения 3-й системы трещин, град.	Амплитуда падения 3-й системы трещин, град.	Угол падения 4-й системы трещин, град.	Амплитуда падения 4-й системы трещин, град.	Угол падения 5-й системы трещин, град.	Амплитуда падения 5-й системы трещин, град.	Примечания
X	Y	Z	ROCK	A4	J	A1	RQ	J	J	J	J	A4	F_DI	F_AZ	F_TH	J_DIP_1	J_AZI_1	J_DIP_2	J_AZI_2	J_DIP_3	J_AZI_3	J_DIP_4	J_AZI_4	J_DIP_5	J_AZI_5	Примечания

Рисунок 3 - Форма геомеханического картирования выработок

Разработанные табличные формы описания керна и картирования выработок позволяют максимально комплексно оценивать геомеханические свойства горного массива, что тем самым экономит время, потраченное на обработку исходных данных, необходимых для расчета рейтинговых классификаций Q-Бартона и RMR-Бенявского.

### 3.2 Development methodology

Методика разработки геомеханической модели выглядит следующим образом:

1. Анализ исходных данных, переданных от смежных служб и подрядных организаций:

- оценка качества литологической модели;
- проверка документирования керна;
- выделение основных систем трещин на месторождении;
- определение характеристик зон разломов;
- определение границ разработки и актуализации геомеханической модели.

2. Подготовительные работы.

Разделение литологической модели на литотипы и основные структуры месторождения (руда, дайки, разломы).

3. Интерполяция данных геомеханического документирования керна и картирования выработок в границах разделенных литологических и структурных зонах.

Все геомеханические характеристики массива горных пород интерполируются в модель методами вариографии [4], которые выбираются в зависимости от назначения и достаточности статистических свойств того или иного геомеханического показателя:

- категориальные показатели, которые образуют случайный набор данных, не подчиняющийся ни одному из законов распределения, интерполировались с помощью метода ближайшего соседа;
- параметры, которые подчинялись теоретическому закону распределения, интерполировались методом вариографии;
- все остальные числовые параметры, не относящиеся к категориальным и не подчиняющиеся теоретическим законам, интерполировались при помощи метода обратных расстояний.

4. Объединение разделенных литотипов и основных структур месторождения, включающих проинтерполированные исходные данные, в общую модель.

5. Расчет рейтинговых показателей и параметров систем разработки из проинтерполированных геомеханических параметров:

- рейтинг RMR-Бенявского;
- рейтинг Q-Бартона;
- GSI – geological strength index;
- показатель устойчивости N Мэтьюза-Потвина.

6. Расчёт параметров конструктивных элементов систем разработки:

- Устойчивый пролёт очистных обнажений;
- Шаг обрушения очистных обнажений;
- Толщина междуэтажного целика;
- Ширина междукammerного целика.

7. Определение типа крепления горных выработок:

- Тип крепи по рейтингу RMR;
- Тип крепи по рейтингу Q для капитальных горных выработок;
- Тип крепи по рейтингу Q для подготовительных горных выработок;
- Тип крепи по рейтингу Q для нарезных горных выработок.

8. Калибровка геомеханической модели.

Калибровка производится с целью уточнения зависимостей категорий и параметров крепления от рейтинговых классификаций. Калибровка модели осуществляется в 3 этапа:

8.1 В разработанную геомеханическую модель заносятся данные фактического крепления горных выработок.

8.2 Анализируется зависимость фактических параметров крепления от уже имеющихся в модели рейтинговых классификаций и производится корректировка номограмм выбора параметров крепления.

8.3 При помощи скорректированных номограмм, пересчитываются и заносятся в модель откалиброванные параметры крепления.

### 3.3 Composition of geomechanical model

Блок данных геомеханической модели в части определения параметров систем подземной отработки, включая исходные данные и расчетные параметры, приведен на рисунке (см. Рисунок 4).

Исходная литологическая модель		Рейтинговые классификации	
X, Y, Z	Координаты ячейки блочной модели	RMR76	Рейтинг Беняевского '76
ROCK	Код литотипа горной породы	RMR89	Рейтинг Беняевского '89
DENSITY	Плотность породы, т/м <sup>3</sup>	Q	Рейтинг Бартона
ORE	Номер рудного тела	GSI	Геологический индекс прочности
ORE_DIP	Угол падения рудного тела, град.	N	Показатель устойчивости Мэтьюза-Потвина
ORE_AZI	Азимут падения рудного тела, град.	<b>Параметры систем разработки</b>	
ORE_THI	Мощность рудного тела, м	HL	Высота этажа, м
<b>Геомеханическая характеристика массива</b>		L	Предельный пролёт, м
DEPTH	Глубина разработки, м	LO	Шаг обрушения, м
UCS	Предел прочности на одноосное сжатие в образце, МПа	LEV_PIL	Толщина междуэтажного целика, м
RQD	Показатель качества пород	RIB_PIL	Ширина междукамерного целика, м
JN	Параметр, характеризующий количество систем трещин	SUP	Тип крепления по рейтингу RMR
JR	Параметр, характеризующий шероховатость трещин	QSUP1	Тип крепления по рейтингу Q для квершлагов
JA	Параметр, характеризующий наполнитель трещин	QSUP2	Тип крепления по рейтингу Q для полевых штреков
JW	Параметр, характеризующий обводнённость выработки	QSUP3	Тип крепления по рейтингу Q для рудных штреков
A	Параметр, характеризующий прочность и напряжённое состояние пород		
B	Параметр, характеризующий ориентацию трещин		
C	Параметр, характеризующий угол падения (наклон) обнажения		
SD	Расстояние между трещинами, м		
JS	Раскрытие трещин, мм		
A1	Категория прочности породы		
A42	Параметр, характеризующий длину трещин		
A45	Выветривание стенок трещин		
JCON76	Параметр, характеризующий свойства трещин по Беняевскому '76		
JCON89	Параметр, характеризующий свойства трещин по Беняевскому '89		
A2, A3, A5, JB	Коэффициенты для определения рейтинга RMR		
MI	Параметр, характеризующий хрупкость породы		

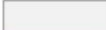



	– Данные исходной геологической модели
	– Исходные задаваемые геомеханические параметры
	– Результаты расчета рейтингов
	– Результаты расчета параметров системы разработки

Рисунок 4 - Содержание геомеханической модели

### 3.4 Application of geomechanical model

Геомеханическая модель используется:

1. Для определения параметров конструктивных элементов систем разработки при долгосрочном, среднесрочном и краткосрочном горном планировании.
2. Для выполнения геомеханических расчетов устойчивости фактических откосов карьера и всячего бока и остальных граней очистного пространства в ПО Rocscience.
3. Как общая база данных всего месторождения, предназначенная для хранения геомеханических характеристик и параметров рейтинговых классификаций.

На примере одного из месторождений кампании, на рисунках (см. Рисунок 5 - Рисунок 6) приведены результаты определения параметров системы разработки при помощи геомеханической модели:

- определение пролета устойчивого обнажения (L, м) очистной камеры осуществляется следующим образом: в всячем боку планируемой очистной камеры строится каркас толщиной равной двукратной мощности отработки и при помощи определенной команды, из модели вырезаются ячейки, соответствующие построенному каркасу (см. Рисунок 5). Высота этажа очистной камеры равняется 15 м. По результатам расчета в модели, средневзвешенное значения пролета очистной камеры равняется 13,2 м.

- определение типа крепления выработок осуществляется аналогичным образом. Из геомеханической модели вырезаются ячейки, соответствующие каркасам планируемых выработок,

и при помощи категория крепления по рейтингам RMR и Q, имеющимся в геомеханической модели, определяется тип крепления выработок (см. Рисунок 6).

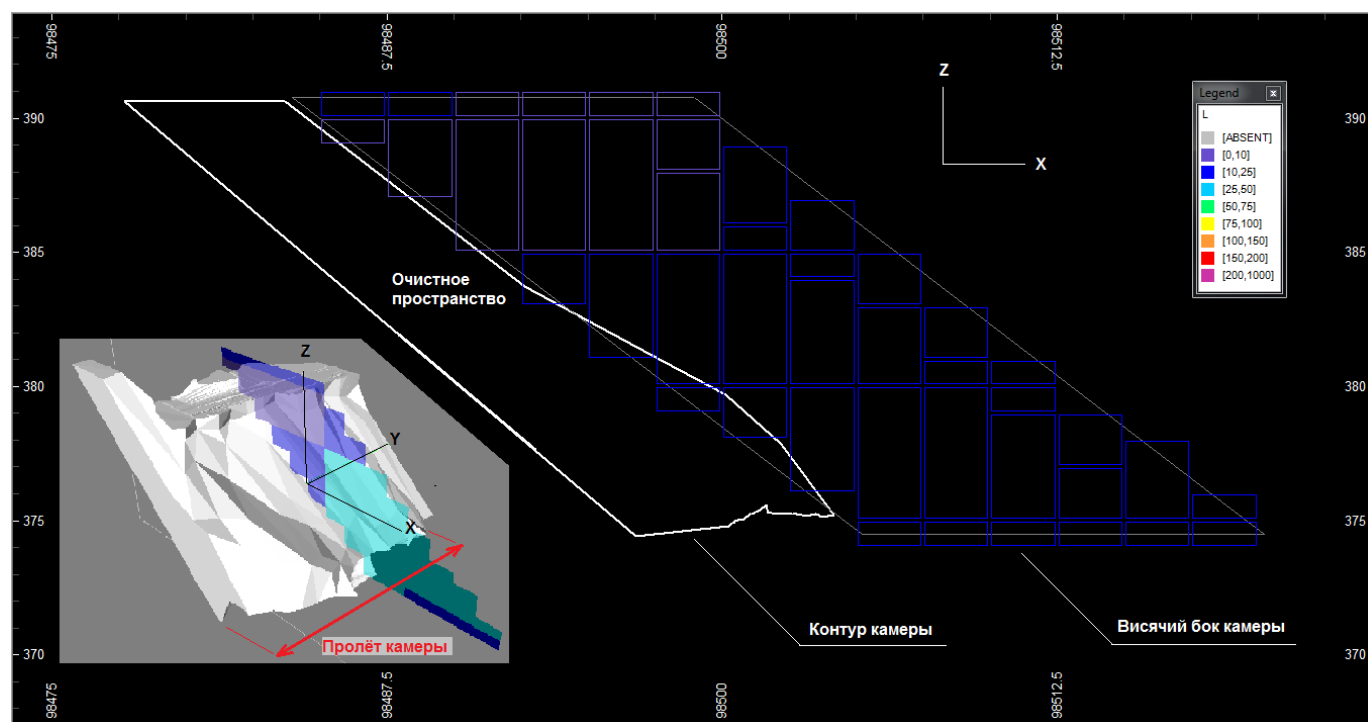


Рисунок 5 - Пример определения пролёта устойчивого обнажения очистной камеры

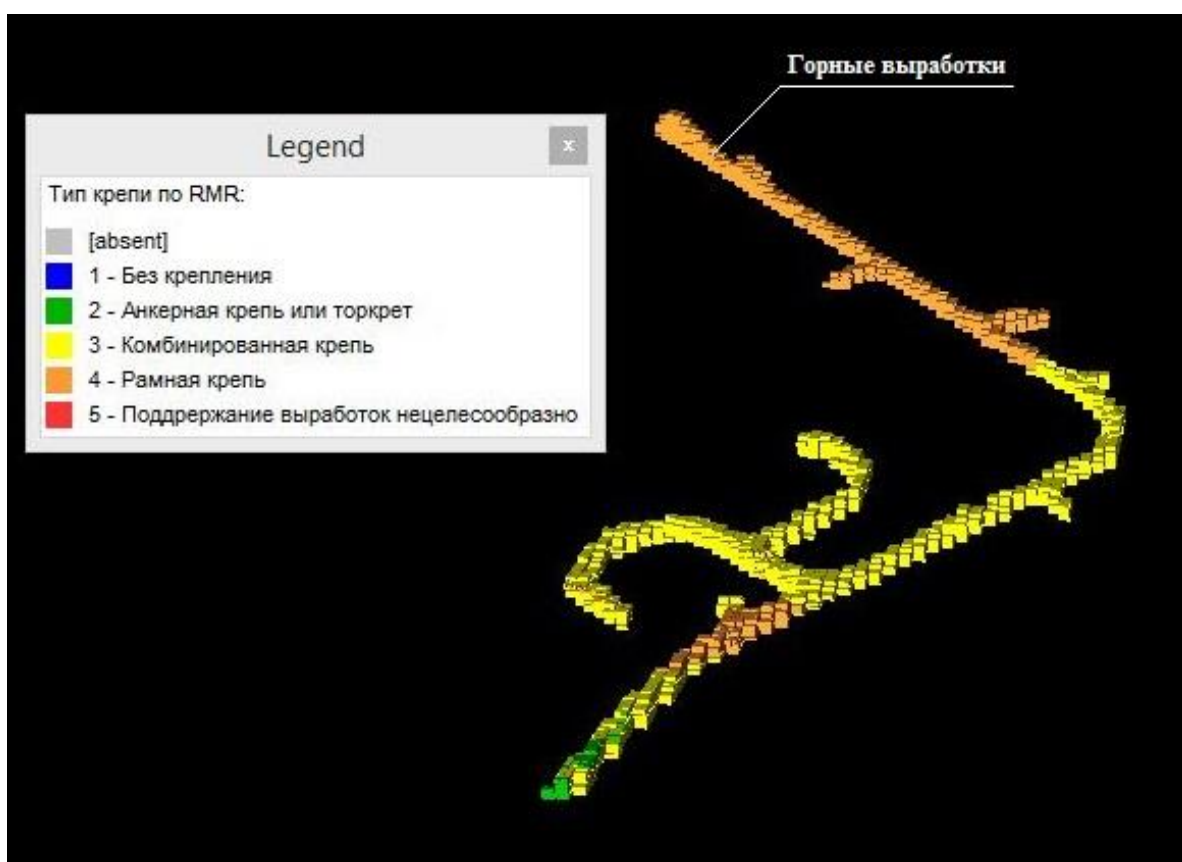


Рисунок 6 - Пример определения рекомендуемых типов крепления подземных горных выработок по рейтингу RMR

В марте 2016 г. на месторождении Албазино, которое расположено в Хабаровском крае, в условиях подземного рудника Ольгинской рудной зоны, проводились опытно-промышленные работы (ОПР) по определению устойчивого пролета обнажения при получении открытого очистного пространства. Основной целью проведенных работ, являлось сравнение результатов ОПР с анализом, выполненным по геомеханической модели месторождения. Результаты сравнения приведены на рисунке (см. Рисунок 7).

Параметр	Камера				
	К-325	К-370	К-310	К-355	К-385
Периметр очистного пространства, м	100	80	52	52	52
Площадь очистного пространства, м <sup>2</sup>	504	364	168	168	168
Гидравлический радиус, м	5,04	4,55	3,23	3,23	3,23
<b>Показатель устойчивости Мэтьюза-Потвина (N)</b>	<b>3,1</b>	<b>2,6</b>	<b>2,2</b>	<b>2,4</b>	<b>2,8</b>
Фактический пролет очистной камеры, м	36	26	12	12	12
<b>Предельный устойчивый пролет очистной камеры по геомеханической модели, м</b>	<b>14,7</b>	<b>13,2</b>	<b>12,0</b>	<b>12,5</b>	<b>13,7</b>
<b>Общая геомеханическая оценка по результатам ОПР</b>	<b>Неустойчиво</b>	<b>Неустойчиво</b>	<b>Устойчиво</b>	<b>Устойчиво</b>	<b>Устойчиво</b>

Рисунок 7 - Результаты сравнения ОПР и геомеханической модели

Из результатов анализа видно, что при превышении допустимого пролёта, определённого с использованием геомеханической модели, камеры становились неустойчивыми и в конечном итоге происходило их обрушение.

### 3.5 Development of geomechanics in the company

В связи с тем, что специалистов геомехаников в области горного производства в высших учебных заведениях России практически не готовят, у геомехаников компании Полиметалл возникают различные профильные вопросы и трудности. Поэтому, ежегодно, с привлечением иностранного специалиста геомеханика, работающего в Канадской компании Golder Consulting, имеющего большой опыт по численному моделированию и являющегося одним из авторов расчетных алгоритмов в компьютерных специализированных геомеханических программах, компания Полиметалл, проводит курсы повышения квалификации для своих инженеров геомехаников. Курсы направлены на повышение квалификации геомехаников на предприятиях и последующего обеспечения безопасности при проектировании подземных и открытых горных работ.

### 3.6 Conclusion

Опыт работы показал, что наличие геомеханической службы на предприятиях компании, позволяет:

- повысить безопасность отработки месторождения открытым и подземным способом;
- предсказать развитие процессов напряженно-деформированного состояния горного массива при проходке выработок;
- предотвратить аварийные ситуации при освоении недр;
- повысить экономический эффект от добычи руды, путем детального планирования затрат на крепление, и путем оптимизации размеров очистного пространства на участках устойчивых пород и т.д.

В заключение следует отметить, что дальнейшее качественное развитие геомеханического обеспечения компании Полиметалл планируется по следующим направлениям:

- приобретением нового оборудования и новых расчетных комплексов;

- проведением специализированных научно-исследовательских работ, уточняющих геомеханические условия месторождений;
- ежегодным проведением курсов повышения квалификации для инженеров геомехаников;
- регулярным пополнением геомеханической базы данных, полученных при помощи бурения геомеханических скважин;
- ежемесячным проведением опытно-промышленных работ по использованию новых методов и способов поддержания очистного пространства или откосов карьера в устойчивом состоянии и т.д.

### ***Bibliography***

1. Руководство по проектированию бортов карьеров, под редакцией: Джон Рид, Питер Стейси. Пер. с англ. – Екатеринбург: Правовед, 2015.
2. C. Mawdesley, R. Trueman, W.J. Whiten. Extending the Mathews stability graph for open-stope design.: Mining Technology: Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy: Section A, 2013.
3. В.Н.Г. Brady, Е.Т. Brown. Rock Mechanics for underground mining. Third edition, 2004.
4. Матерон Ж. Основы прикладной геостатистики. Изд.: Институт компьютерных исследований. Ижевск, 2009 г.