

УДК 553.3

ОЦЕНКА И ПРОГНОЗ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ РАЗВЕДКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

© 2013 г. И. В. Абатурова, И. А. Савинцев, В. Б. Писецкий, И. Г. Петрова

Уральский государственный горный университет
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
E-mail:gingeo@mail.ru

Поступила в редакцию 21.09.2012 г.

В статье рассмотрены основные принципы прогноза изменения инженерно-геологических условий разработки месторождений полезных ископаемых в зависимости от стадии их изучения. Представлены и обоснованы методы решения прогнозных задач: сравнительно-геологический, прогнозного инженерно-геологического районирования на базе комплексного показателя и численного моделирования.

Ключевые слова: инженерно-геологические условия, месторождения полезных ископаемых, стадии разведки, методы прогноза.

Логическим завершением инженерно-геологических исследований месторождений полезных ископаемых (МПИ) является оценка и прогноз изменения инженерно-геологических условий (ИГУ), определяющих устойчивость горных выработок. Под инженерно-геологическим прогнозом при разведке МПИ понимается процесс перехода от информации, характеризующей особенности геологической среды (ГС), компоненты и условия ее образования в начальный момент времени, к информации, характеризующей изменение тех же особенностей геологической среды, характер и масштаб возникающих в ней процессов и явлений в результате строительства горнодобывающих сооружений.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований позволили определить следующую последовательность процесса прогнозирования:

1. Составление фоновой модели. Определение цели прогноза с учетом стадии изучения и способа промышленного освоения МПИ.

2. Получение оценочной базовой модели. Изучение и оценка компонентов, характеризующих месторождение, отбор значимых компонентов, установление закономерностей их пространственной изменчивости.

3. Создание базовой модели природно-технической системы “геологическая среда–горнодобывающее сооружение”. Выбор метода прогнозирования, установление аналитическими, специальными или другими методами связей между базовой моделью, характером и интенсивностью воздействия на нее горнодобывающих сооружений, изменения состава, строения, свойств и состояния составляющих ГС и ее реакцией на горные работы.

4. Оценка достоверности прогноза. Сравнительный анализ, полученных прогнозов по результатам различных методов. Получение постоянно действующей модели.

5. Разработка рекомендаций для оптимизации принимаемых решений.

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что разработка постоянно действующих моделей инженерно-геологических условий (ИГУ) целесообразна применительно к конкретным вариантам (схемам) разработки и должна отражать сущность моделей полученных на разных стадиях изучения, строительства и эксплуатации МПИ. Это обусловлено тем, что между прогнозом и выбором вариантов существует связь: уточнение ИГУ сужает число вариантов систем и технологии разработки, одновременно корректируя прогноз. Взаимосвязь прогнозирования с геологоразведочными и горными работами определяет направленность и объем информации, которую необходимо получить при инженерно-геологическом изучении МПИ. Эта информация будет отличаться по объему, объективности и достоверности в зависимости от стадии освоения месторождения (табл. 1).

Максимальная эффективность прогноза должна быть достигнута путем сочетания стадийности изучения и использования комплекса методов прогнозирования. Такой подход при прогнозировании в состоянии учесть весь спектр возможных изменений инженерно-геологических условий, обстоятельств и т.д. Поэтому, по мере проявления этих изменений, переходят от одной стадии к следующей, заменяя один метод прогноза на другой, сохраняя возможность оптимального управления процессом.

Таблица 1. Особенности прогнозирования инженерно-геологических условий на разных стадиях изучения и освоения месторождений полезных ископаемых

Стадии прогнозирования	Характер прогнозирования	Методы прогноза
Поисковая и оценочная	Исходные инженерно-геологические данные для укрупненной проработки технологических решений при составлении проекта временных кондиций	Аналогий, учета и оценки условий факторов, прогнозного инженерно-геологического районирования
Разведка	Предварительный прогноз инженерно-геологических процессов и явлений в массиве горных пород. Расчет устойчивости конструктивных особенностей горных выработок. Выработка рекомендаций для проектирования горнодобывающего предприятия	Аналогий, прогнозного инженерно-геологического районирования на базе комплексной количественной оценки компонентов, аналитические, численного моделирования
Строительство горного предприятия	Оценка достоверности предварительного прогноза инженерно-геологических особенностей вскрытия месторождения. Уточнение проектных решений. Прогноз ИГУ эксплуатации месторождений. Выработка рекомендаций для оптимизации принимаемых решений	Численного моделирования, аналитические, натурно-экспериментальные
Эксплуатационная разведка	Уточнение инженерно-геологических особенностей эксплуатации месторождения для обоснования (или корректировки) оперативных технических решений	Натурно-экспериментальные, аналитические, численного моделирования

Прогноз изменения ИГУ на поисково-оценочной стадии носит, как правило, качественный характер и используется для укрупненной проработки технологических решений и оценки промышленной ценности МПИ.

Прогнозные модели разведочной стадии отражают информацию конкретного месторождения, основываются на элементах природно-технических систем (ПТС), условиях их функционирования, компонентах ИГУ, закономерностях их изменения, используются с целью разработки рекомендаций для проектирования горнодобывающего предприятия, и имеют как качественный, так и количественный характер.

Прогнозные модели стадий строительства и эксплуатации месторождений носят количественный характер и строятся для участков или горизонтов, отличающихся различной степенью устойчивости и особенностями развития процессов.

При анализе рекомендуемых стадий прогнозирования ИГУ МПИ предлагается конкретизация методов в зависимости от решаемых задач. К существующим методам прогноза относятся: сравнительно-геологический (метод аналогий), учета и оценки условий и факторов, расчетные (аналитические и графоаналитические), численного моделирования и прогнозного инженерно-геологического районирования на базе комплексной количественной оценки компонентов.

Однако при практическом применении различных методов прогноза чаще всего мы используем комплекс методов, взаимодополняющих друг друга, поэтому границ между методами провести практически невозможно. Например, применяя метод аналогий, учитывают и оценивают не только влияние геологического строения, но и другие особенности ме-

сторождений, а метод комплексной количественной оценки, в какой-то степени использует принцип аналогии. В то же время, применение этих методов не исключает привлечение аналитических (детерминированных) подходов и методов численного моделирования. Доподлинно известно, что расчетные методы и методы численного моделирования могут дать достоверные результаты, только основываясь на особенностях геологического строения месторождения.

Далее рассмотрим решение прогнозных задач разными методами, и их комплексами применительно к стадиям изучения МПИ.

ПОИСКОВАЯ И ОЦЕНОЧНАЯ СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Применительно к данным стадиям исследований используются сравнительно-геологический (метод аналогий) и метод учета и оценки условий и факторов. Основу метода аналогий составляет принцип унаследованности [3]. Точность прогноза по методу аналогий определяется степенью сходности условий изучаемого объекта и аналога. При строительстве и эксплуатации горнодобывающих предприятий в сложных ИГУ трудно подобрать аналоги, размещенные вблизи месторождения. Их следует искать в однотипных геотектонических областях, находящихся иногда на значительном удалении от изучаемого объекта [6].

Процесс прогнозирования методом аналогий выполняется в следующей последовательности: 1) поиск и изучение объекта-аналога; 2) получение критериев геологического подобия; 3) перенос информации с природного аналога на объект прогноза.

В случае прогноза ИГУ разработки МПИ выбор аналога подразумевает нахождение эксплуатируемых месторождений, которые по геологическим признакам сходны с изучаемым. Точность прогноза по методу аналогий определяется степенью сходства условий изучаемого объекта и аналога. При прогнозе ИГУ разработки МПИ метод используется с целью получения информации о поведении геологической среды при использовании той или иной технологии разработки, непосредственный анализ которой сложен.

В качестве показателей оценки подобия месторождений могут быть предложены: геологическая позиция месторождений; тип оруденения; петрографический состав пород; характер изменения пород метасоматическими процессами; тектоническая обстановка и связанные с ней трещиноватость и блочность; модуль трещиноватости; размер среднего элементарного структурного блока; физико-механические свойства пород; способ вскрытия и размеры горнодобывающего сооружения; критерии оползнеобразования, промоинообразования, напряженного состояния, вывалообразования [1].

Метод учета и оценки условий и факторов. Выделен в качестве самостоятельного класса методов инженерно-геологического прогнозирования Г.С. Золотаревым [2]. Применительно к прогнозной оценке ИГУ отработки МПИ, основными условиями и факторами являются внешние признаки (симптомы), свидетельствующие о возможности проявления тех или иных существенных, с точки зрения разработки полезных ископаемых, геологических особенностей породных массивов или возможности возникновения конкретных процессов и явлений, сопутствующих разработке. Симптомы могут фиксироваться в процессе геологической съемки, инженерно-геологического обследования, при бурении и документации разведочных скважин. Так, например, потеря промывочной жидкости в процессе бурения является симптомом повышенной трещиноватости, провалы бурового инструмента в растворимых породах указывают на закарстованность пород. Симптомами повышенного напряженного состояния является дискование керна. Симптомами развития оползневых процессов – образование закольных трещин. Наличие криогенных геологических процессов (бугров пучения, пятен-медальонов) является симптомом промороженности пород.

Выявление симптомов основывается на внимательном изучении обстановки, а научное объяснение симптомов и их связи с прогнозируемыми показателями могут служить основанием для разработки и использования более детальных и точных методов прогноза.

Таким образом, методы аналогии, учета и оценки условий и факторов являются основными для

решения прогнозных задач на ранних стадиях изучения МПИ, однако использование качественных и полуколичественных критериев подобия позволяет решить эти задачи с некоторой долей условности.

СТАДИЯ РАЗВЕДКИ

Оценка и прогноз ИГУ разработки МПИ, как правило, проводятся на основе содержательного анализа, качественного и количественного методов прогноза взаимодействия горнодобывающего предприятия с геологической средой. Для этой стадии рекомендуется использовать комплекс методов: аналогий, прогнозного инженерно-геологического районирования на базе комплексной количественной оценки компонентов, аналитических, численного моделирования.

Прогнозное инженерно-геологическое районирование на базе комплексной количественной оценки. На необходимость комплексной количественной оценки инженерно-геологических условий указывали многие специалисты: "...инженерно-геологическая информация может быть представлена в качественной и количественной форме. Сложность геологических процессов настоятельно диктует необходимость использования математических методов. В силу неразрывности и взаимосвязи важнейших философских категорий качества и количества, математические методы в науке имеют огромное познавательное значение" [4, 5].

Комплексную оценку ИГУ МПИ и решение прогнозных задач, рекомендуется давать по следующей логической схеме (рис. 1).

Итак, оценку ПТС МПИ начинают с составления концептуальной содержательной модели, состоящей из ряда компонентов ПТС, определяющих технологию и технику строительства и эксплуатации горнодобывающего предприятия. Для месторождений полезных ископаемых такими компонентами являются: литолого-петрографический состав пород, физико-механические свойства, генезис и возраст пород, условия залегания, тектонические особенности, фазовое состояние подземных вод, характер распространения многолетнемерзлых пород (ММП), развитие экзогенных и инженерно-геологических процессов.

На следующем этапе выбираются количественные параметры, наиболее точно и полно отражающие компоненты. Например, для месторождений сложенных скальными горными породами такими параметрами могут являться: плотность, предел прочности на одноосное сжатие, коэффициент крепости, размер элементарного структурного блока, модуль трещиноватости. Наличие экзогенных изменений горных пород для карстуемых массивов может выражаться через коэффициент закарстованности (табл. 2).



Рис. 1. Логическая схема оценки инженерно-геологических условий месторождений полезных ископаемых

Следующий этап посвящен изучению системообразующих связей и установлению закономерностей пространственной изменчивости компонентов ИГУ. Для этого с помощью пакетов программ *Surfer* и *ArcGIS* строятся экспериментальные модели полей геологических параметров. Причем поля строятся либо в вертикальном сечении (разрезы), либо в горизонтальном (погоризонтные планы). При построении модели поля территорию разбивают на квазиод-

нородные участки (квадраты грида), каждый из которых можно охарактеризовать одним значением количественного показателя компонента ПТС. Размер квазиоднородного участка определяется по степени изменчивости компонентов. Аппроксимацию выполняют с помощью компонентов различных порядков. В процессе интерпретации выполняется содержательный анализ, устанавливается структура полей, их общие и локальные закономерности.

Таблица 2. Параметры ИГУ, учитываемые при комплексной количественной оценке

Компоненты ИГУ	Талая зона			Мерзлая зона		
	простые	средней сложности	сложные	простые	средней сложности	сложные
Петрографический состав пород	+	+	+	+	+	+
Модуль трещиноватости	+	+	+	+	+	+
Модуль кусковатости	–	+	+	–	+	+
Показатель качества пород	–	+	+	–	+	+
Блочность	+	+	+	+	+	+
Коэффициент зон дробления	–	+	+	–	+	+
Мощность зон дробления	–	–	+	–	–	+
Степень вторичных изменений	–	+	+	–	+	+
Коэффициент закарстованности	–	+	+	–	+	+
Мощность кор выветривания	–	+	+	–	+	+
Физико-механические свойства	+	+	+	+	+	+
Температура пород	–	–	–	–	+	+
Льдистость пород	–	–	–	–	–	+
Мощность мерзлых пород	–	–	–	–	–	+
Обводненность	–	+	+	–	–	–

После того, как были установлены основные закономерности пространственной изменчивости, необходимо рассчитать и проинтерпретировать корреляционную матрицу количественных параметров компонентов ПТС и целевого предиката. Целевой предикат при оценке ИГУ МПИ может быть представлен углом наклона откосов уступов бортов проектируемого карьера.

$$\alpha = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n),$$

где α – угол наклона откосов уступов бортов проектируемого карьера;

$$X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$$

– количественная характеристика компонентов ПТС.

Используемые в формуле количественные характеристики должны быть взвешенными.

Параметры, характеризующие компоненты ПТС выражены в различных единицах, поэтому их необходимо перевести в относительные величины, которые получают путем деления частных значений параметров на максимально известное в пределах региона. После завершения всех вышеописанных операций строится модель поля интегрального показателя и выполняется его геологическая интерпретация. Последующее построение прогнозных инженерно-геологических карт с использованием интегрального показателя, позволит принимать более достоверные и экономичные проектные решения.

К этим картам, как к модели горного массива, предъявляются принципиально новые тре-

бования. Прежде всего, модель должна: 1) отражать массив пород с наиболее характерными свойствами и выражаться как в графической, так и в математической форме с учетом возможности проведения математических операций; 2) содержать показатели и параметры, отражающие ИГУ месторождений; 3) учитывать изменения инженерно-геологических особенностей массива пород по площади, глубине и их статистическую природу.

Примером может являться выполненное инженерно-геологическое районирование на базе комплексной количественной оценки Светлинского месторождения (рис. 2).

Аналитические методы, используемые для оценки устойчивости механических моделей и расчетных схем, обеспечивают получение детерминированных решений, но анализ устойчивости с точным учетом всех свойств массива пород на основе этих методов является принципиально невозможным, поэтому эти методы являются необходимым дополнением вышеперечисленных.

Метод численного моделирования. Вокруг горных выработок формируется новое напряженно-деформированное состояние (НДС) массива пород, которое наиболее существенно отличается от начального вблизи контура выработок и практически не отличается вдали от контура.

В наиболее полном объеме метод численного моделирования параметров НДС для различного типа упругих и неупругих моделей горных массивов может быть реализован в программном ком-

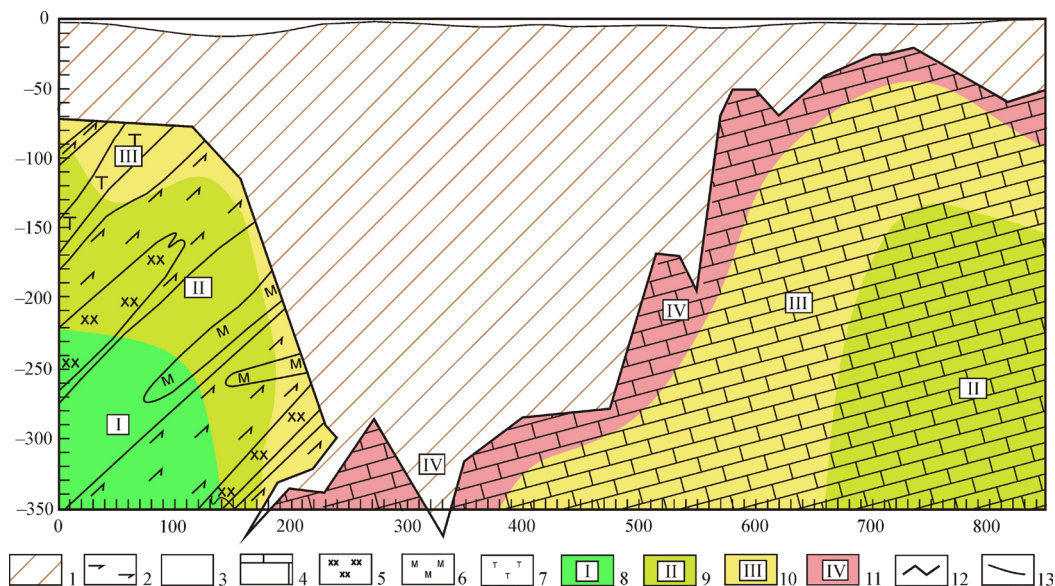


Рис. 2. Фрагмент разреза с прогнозным инженерно-геологическим районированием (месторождение Светлинское).

1 – кора выветривания; 2 – амфиболиты, амфибол-биотитовые породы; 3 – сланцы кварц-слюдистые; 4 – мраморизованные известняки и мрамора; 5 – кварциты; 6 – метасоматически измененные вулканогенные и вулканогенно-терригенные породы; 7 – туфогенно-осадочные породы; 8 – I класс: относительно устойчивые породы; 9 – II класс: породы средней устойчивости; 10 – III класс: породы низкой устойчивости; 11 – IV класс: неустойчивые породы; 12 – граница коры выветривания; 13 – границы литологических разностей.

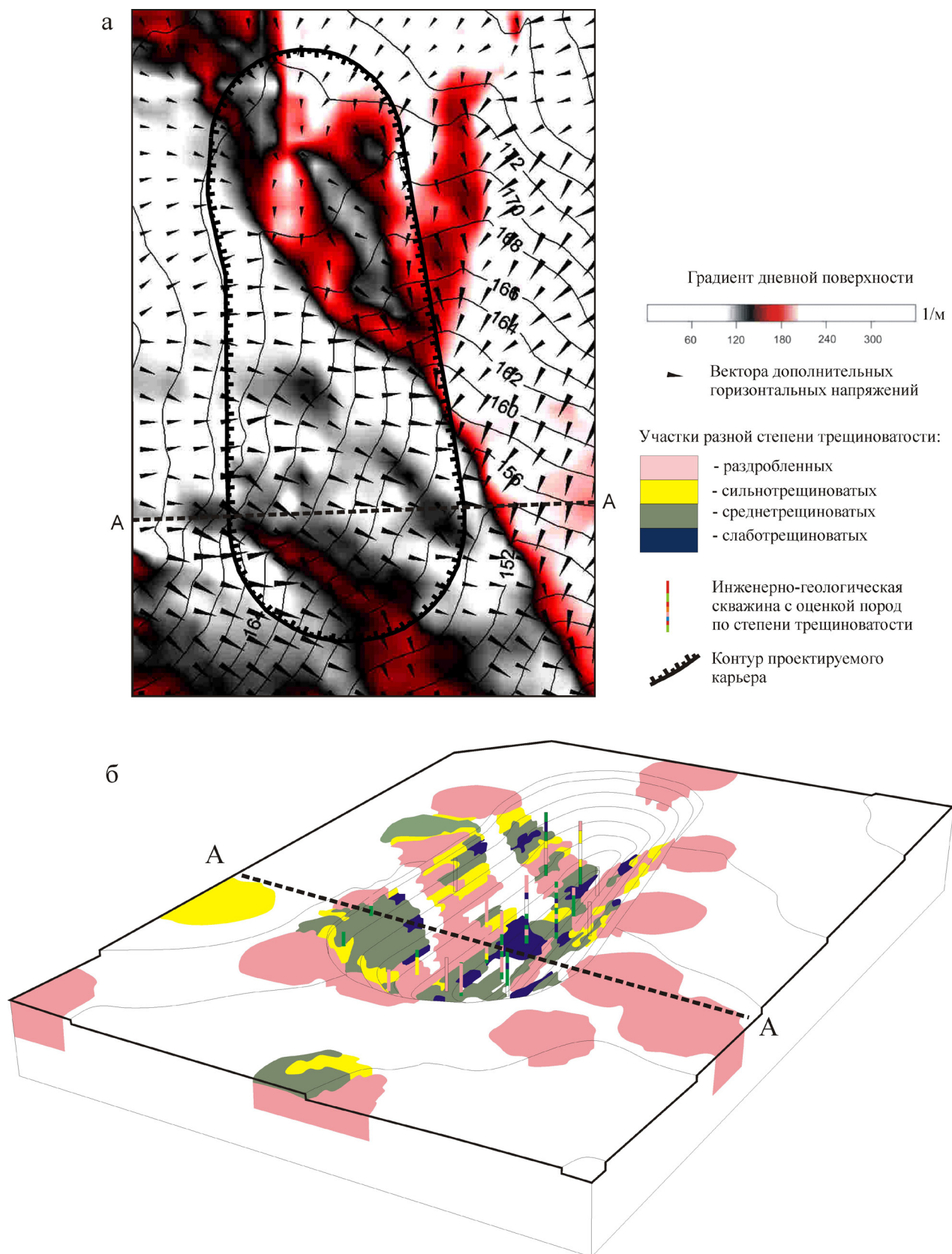
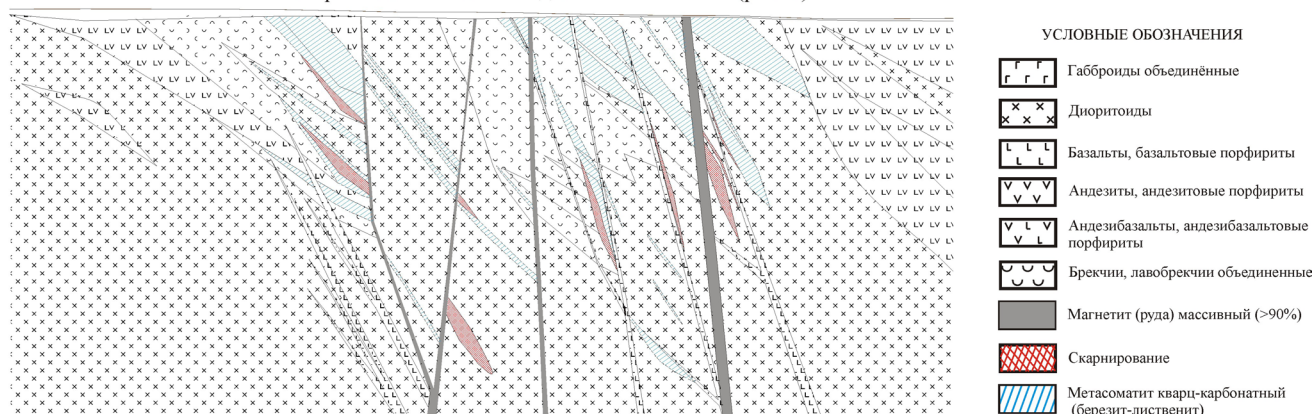


Рис. 3. Поле дополнительных напряжений, обусловленное дневной поверхностью рельефа (а) и трехмерная инженерно-геологическая модель (б) с выбором расчетного вертикального сечения по линии А–А.

Инженерно-геологическая модель по линии А–А (рис. 3)



Сетка векторов полной деформации в модели исходного состояния

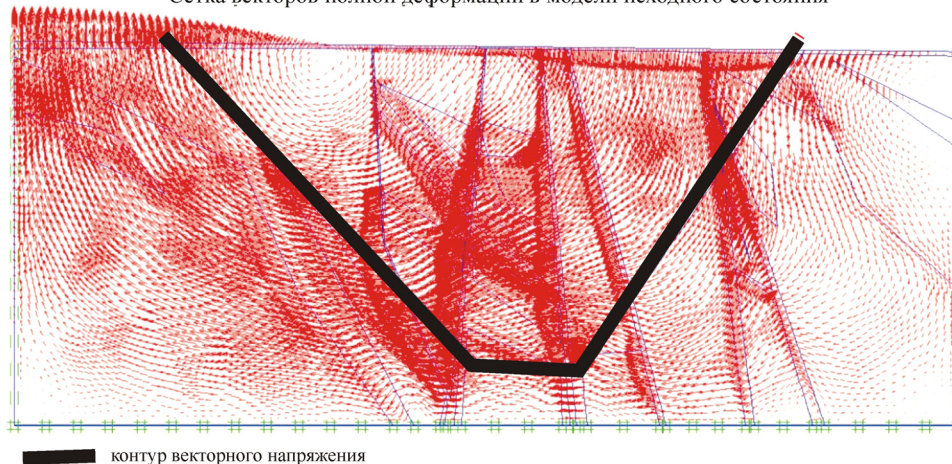


Рис. 4. Инженерно-геологическая модель по линии А–А и результат расчета сетки полных деформаций с учетом рельефа дневной поверхности и зон дробления массива.

плексе PLAXIS различных версий (2–3D), разработанного специально для анализа деформации и устойчивости горнодобывающих сооружений.

Для каждого проекта расчета создается геометрическая модель, которая включает типовое разделение горного массива по отдельным слоям (кластерам), структурным объектам, этапам строительства, структуры водонасыщения и нагрузкам. Модель должна быть достаточно крупномасштабной, с тем, чтобы ее внешние кромки не влияли на результаты расчета компонент НДС.

Принцип генерации модели и расчета компонент НДС для проектирования карьера рассмотрен на одном из золоторудных месторождений (Петропавловское) и показан на рис. 3–5. На первом этапе моделирования по цифровой модели рельефа дневной поверхности (в данном примере – существенно расчлененном) рассчитаны дополнительные напряжения, обусловленные перепадами высот. На рис. 3 показаны вектора дополнительных напряжений (верхний фрагмент), гра-

диенты горизонтальной компоненты напряжений и контур проектного положения карьера. На нижнем фрагменте этого рисунка приведена 3D модель зон дробления массива, выявленная по анализу керна разведочных скважин. Анализ этой информации позволяет выбрать наиболее опасные по уровню устойчивости вертикальные сечения, для которых необходимо выполнить расчет компонент НДС (на нижнем фрагменте рис. 3 показана линия А–А).

На рис. 4 приведена инженерно-геологическая модель по линии А–А и результат расчета сетки полных деформаций с учетом рельефа дневной поверхности и зон дробления массива. Этот результат представляет собой вполне понятную картину особенностей распределения компонент НДС до строительства карьера.

На следующем рис. 5 приведены результаты расчета компонент НДС после выборки породы из контура проектного карьера (сетка полных деформаций и сетка горизонтальной компоненты деформаций). Анализ представленных

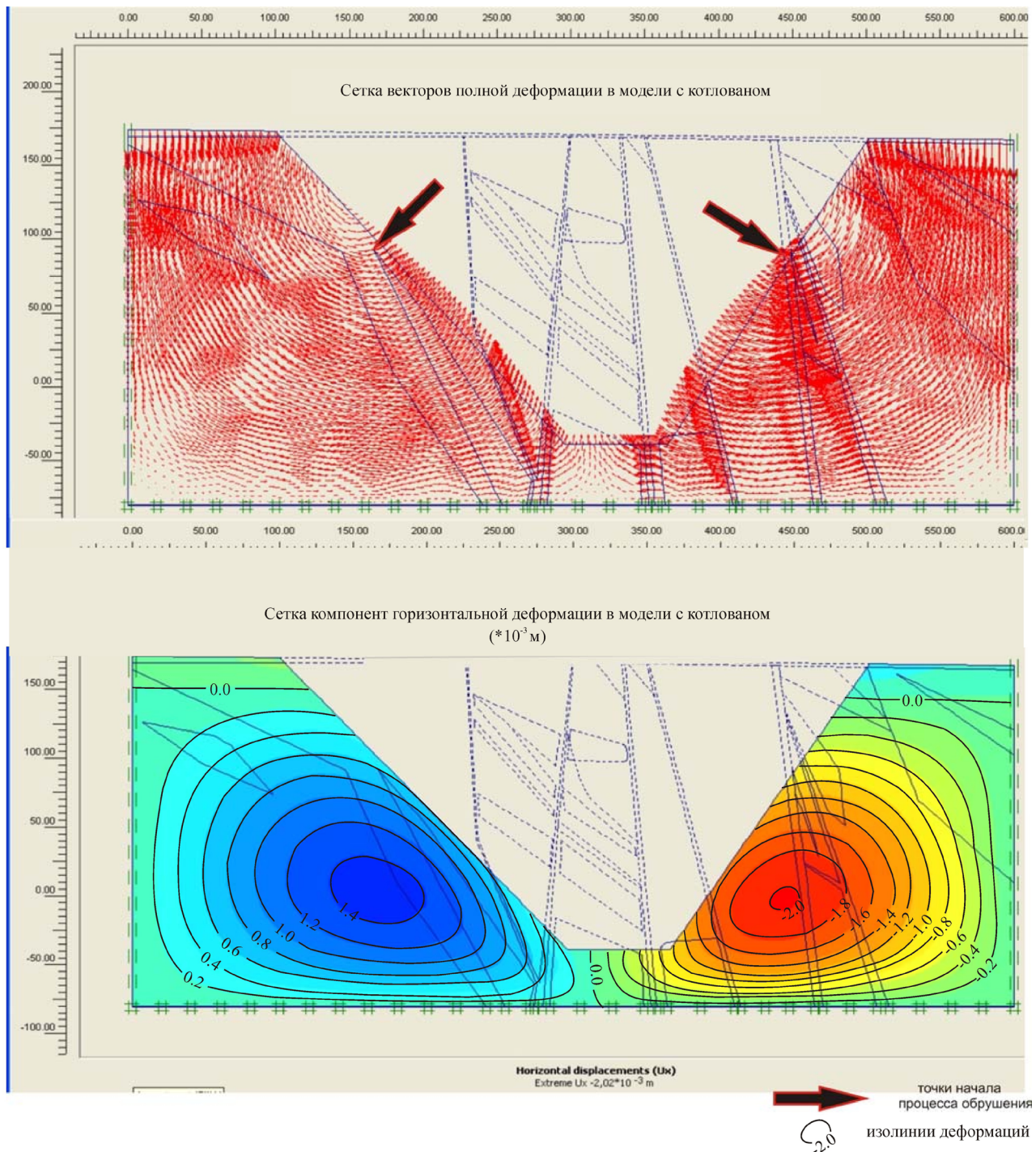


Рис. 5. Расчет компонент НДС после выборки породы из контура проектного карьера.

Объяснения в тексте.

результатов моделирования позволяет сделать два принципиальных вывода: характер распределения векторов деформации по бортам карьера позволяет определить точки начала возможного развития процессов обрушения массива по бортам карьера; левый борт карьера находится в состоянии разгрузки по горизонтальной компо-

ненте деформации, что означает его более устойчивое состояние.

Соответственно, в результате моделирования компонент НДС при различных углах наклона откосов и профиля бортов возможен подбор такой геометрии карьера, при которой гарантируется устойчивость всего сооружения.

СТАДИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ГОРНОДОБЫВАЮЩЕГО СООРУЖЕНИЯ, ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ РАЗВЕДКА

Особенностью данных стадий изучения и прогноза является формирование ПТС МПИ, когда при прогнозной оценке ИГУ необходимо учитывать не только геологические особенности, но и системы отработки месторождений и основные конструктивные их особенности. Поэтому решение прогнозных задач также должно основываться на комплексе методов: натурно-экспериментальные, аналитические, численного моделирования.

Натурно-экспериментальные методы. Маркшейдерско-геодезические наблюдения позволяют систематически оценивать устойчивость откосов, подземных горных выработок, а также деформаций земной поверхности.

Геофизические методы позволяют оценивать и контролировать изменение напряженно-деформированного состояния массива горных пород при проходке подземных горных выработок. К таким методам, прежде всего, относится метод 3D-сейсмолокации. Как показала практика, применение этого метода при строительстве транспортных тоннелей и отработке угольных месторождений подземным способом позволяет с достаточной степенью достоверности (подтверждаемость прогноза – 70–80%) осуществлять опережающий прогноз устойчивости подземного сооружения на дистанцию в несколько десятков и сотен метров от текущего положения его проходки.

Таким образом, прогноз изменения ИГУ и оценка интегральных параметров устойчивости горного массива на стадиях разведки, строительства и эксплуатации горнодобывающих сооружений с достаточной надежностью могут быть выполнены методами аналогий, аналитическими и численного моделирования. Такая схема прогноза обеспечивает принятие обоснованных решений, в максимальной степени соответствующих принципам корректности количественных и качественных оценок устойчивости всех элементов ПТС от начала ее формирования до заключительных стадий завершения горных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абатурова И.В., Грязнов О.Н.* Оценка инженерно-геологических условий золоторудных месторождений Полярного Урала // Известия вузов. Горный журнал. 2009. № 6. С. 97–106.
2. *Золотарев Г.С.* Современные задачи инженерно-геологических процессов и кор выветривания // Вопросы инженерно-геологического изучения процессов и кор выветривания. М.: МГУ, 1971. С. 4–25.
3. *Каган А.А.* Инженерно-геологическое прогнозирование. М.: Недра, 1984. 196 с.
4. *Пендин В.В.* К вопросу оценки сложности инженерно-геологических условий // Инженерная геология. 1991. № 4. С. 133–138.
5. *Пендин В.В., Черняковская Н.М.* К методике количественной оценки сложности инженерно-геологических условий территории // Геология и разведка. 1980. № 7. С. 146–148.
6. *Розовский Л.Б., Зелинский И.П.* Инженерно-геологические прогнозы и моделирование. Одесса: ОГУ, 1980. 200 с.

Рецензент Ю.К. Иванов

Estimation and forecast of geotechnical conditions at different stages of mineral exploration

I. V. Abaturova, I. A. Savintsev, V. B. Pisetsky, I. G. Petrova

Ural State Mining University

The article deals with the basic principles of forecasting in geotechnical conditions at different stages of mineral exploration. The methods of solving of the forecasting problems: a comparative geological, predictive engineering zoning on the basis of a comprehensive index, a numerical simulation are presented and substantiated.

Key words: *geotechnical conditions, mineral deposits, the exploration stage, the methods of forecasting.*