УДК 622.831.32.322

**О.В.КОВАЛЕВ, Ю.Г.СИРЕНКО,**
**И.Ю.ТХОРИКОВ, С.Л.БЛОХИН**
*Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)*

# ПРОБЛЕМА ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ОТРАБОТКИ ЗАПАСОВ ШАХТНЫХ ПОЛЕЙ

Изложена методика решения задачи по определению степени взаимовлияния горных работ на различных горизонтах при доработке запасов шахтных полей. На примере отработки трех горизонтов Старобинского месторождения приведены результаты решения горно-геомеханических задач по оценке напряженно-деформированного состояния (НДС) в зонах влияния выработанных пространств соляного массива. Предложены зависимости для расчета коэффициента концентрации напряжений при различных конфигурациях фронта развития очистных работ.

The solution technique of a definition problem of an intercoupling degree of mining operations on different horizons is set up at adaptation of mine fields reserves. On an example of Starobino three horizons mining the outcomes of the mining-geomechanical problems solutionon of stress-deformation state definition, wich perspective to improvement of salt massif segments are adduced and the relations for calculation of a stress-concentration factor are offered at the different configurations of mining front development.

В условиях рыночной экономики минимизация долгосрочных инвестиций в горно-химические предприятия, разрабатывающие свиты пологих калийно-соляных пластов, достигается за счет увеличения коэффициента извлечения добываемой из недр руды. Как свидетельствует опыт эксплуатации таких предприятий, на завершающей стадии их работы планирование развития фронта очистных работ (ФОР) необходимо осуществлять на базе долгосрочной перспективы: пяти и более лет. Это связано с тем, что параметры технологических схем в достаточной мере зависят от горно-геомеханических (включая и временно́й фактор) характеристик выработанных пространств, которые окружают конкретные выемочные столбы, формируемые на завершающей стадии отработки шахтных полей. При отработке свиты пластов необходимо дополнительно учитывать влияние всех отрабатываемых горизонтов. Особенно данные проблемы обостряются при обратном порядке отработки шахтных полей: при стягивании фронта очистной выемки к стволам. Значения напряжений и деформаций в неотработанном массиве в такой ситуации могут в несколько раз превышать параметры НДС соляного массива при выемке пластов на границах шахтного поля. Такая геомеханическая ситуация вызвана влиянием отработанных площадей горизонта на извлекаемый пласт и толщу, вмещающую его, а следовательно, и на другие горизонты отработки. Неучет отмеченных особенностей приводит к снижению устойчивых состояний целиков различного назначения, ухудшению состояния участковых выработок, снижению безопасности горных работ и нагрузок на очистные забои, и, как следствие, снижению технико-экономических показателей работы рудников.

Целью работы являлось выполнение горно-геомеханической оценки, включая исследование НДС соляного массива на текущих и перспективных площадях отработки II и III горизонтов шахтного поля 1-го рудоуправления для выявления геомеханически неблагоприятных зон, оценки устойчивости элементов массива, вмещающего горные выработки: водозащитной толщи (ВЗТ), массива горных пород (МГП) в окре-

стности выработок, а также разработка рекомендаций по управлению состоянием массива в выявленных зонах для обеспечения безопасности проведения горных работ, снижения затрат на поддержание выработок и себестоимости добычи сильвинитовой руды в целом.

В зависимости от горно-геологических ситуаций для решения конкретных задач горного производства управление состоянием массива включает следующие мероприятия:

- выбор оптимальной (по ряду факторов) ориентации выработанного пространства на отрабатываемых (либо предстоящих к отработке) участках шахтного поля;
- регулировка продолжительности остановок временны́х границ выработанных пространств (ВП);
- изменение скоростей развития ФОР;
- закладка выработанных пространств;
- управление степенью извлечения полезного ископаемого из недр (например, за счет корректировки применения тех или иных систем разработки);
- изменение (снижение-увеличение) числа отрабатываемых пластов (горизонтов) на шахтных полях;
- формирование в пределах отрабатываемых участков так называемых зон смягчения, т.е. площадей отработки с переменными параметрами геомеханического воздействия на налегающий массив горных пород и ряд других известных горнотехнических мероприятий.

Методологической базой исследований, позволяющих разработать принципы рационального планирования развития ФОР, являлся интегральный подход к изучению реальных геологических и горно-технических параметров отрабатываемых участков шахтных полей с последующей разработкой (модификацией) метода оценки геомеханического состояния среды, вмещающей подземные объекты. Такое состояние достаточно однозначно определяет уровень технической безопасности подземных горных работ и, соответственно, их технологическую рационализацию.

Геомеханическое изучение неоднородных, многосвязных, квазисплошных массивов горных пород было реализовано с привлечением перспективного метода горной геомеханики – метода граничных элементов (МГЭ). Например, в варианте метода сил подобные задачи, как известно, могут быть сведены к решению матричного уравнения

$$A \times P = R,$$

где $A$ – матрица преобразования вектора единичных усилий в напряжения на участках аппроксимации граничной поверхности; $P$ и $R$ – соответственно векторы искомых усилий и граничных условий на тех же участках.

Поскольку решение вышеописанного матричного уравнения эквивалентно решению системы линейных алгебраических уравнений довольно высокого порядка, что требует значительных затрат компьютерного времени при использовании прямых методов (например, Гауса), то было применено итерационное решение, позволившее исключить указанный недостаток. Использование метода разрывных смещений (МРС) вместо метода сил также позволило несколько повысить мобильность решения поставленных горно-геомеханических задач.

Указанные методологические подходы использовали при решении нетривиальной задачи для одного из рудников, отрабатывающего Старобинское месторождение калийных солей. Выполнена оценка взаимовлияния отработки трех горизонтов 4-го рудоуправления ПО «Беларуськалий» на площадях, предусматриваемых к перспективной отработке запасов для случая, реализованного на горизонтах обратного порядка отработки пластов (рис.1, 2). При решении поставленной задачи (рационализация взаимоувязанного развития ФОР на трех горизонтах) учитывался как временно́й фактор, определенный различными сроками ведения горных работ на горизонтах (1960-1990 гг.), так и специфические механические свойства горных пород данного месторождения, в частности, выраженная их пластичность. Для характерных участков массива, соответствующих оцени-

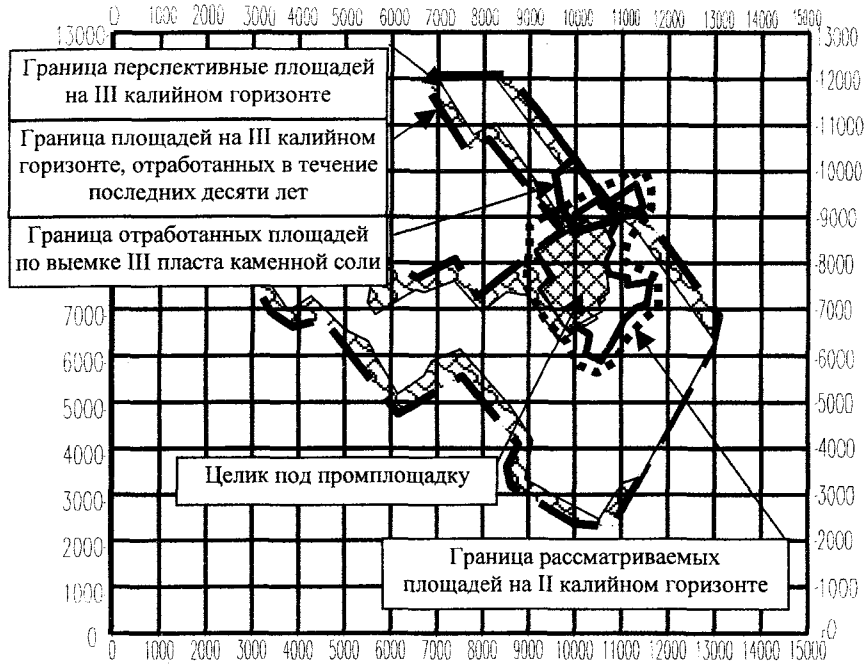



Рис.1. Совмещенная планограмма развития очистных работ
на 4-м рудоуправлении ПО «Беларуськалий»
*(координатная сетка приведена в метрах)*

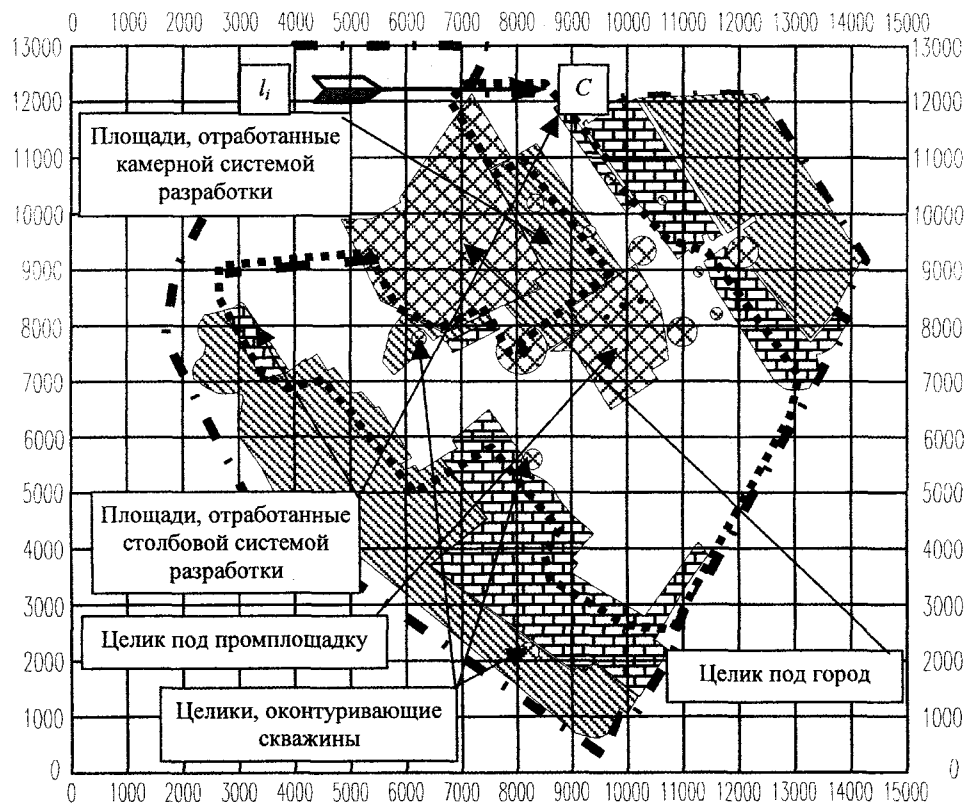



Рис.2. Планограмма развития очистных работ на III калийном горизонте
на 4-м рудоуправлении ПО «Беларуськалий»
(координатная сетка приведена в метрах)

ваемой по геомеханическому фактору зоне перспективной отработки запасов II и III калийных горизонтов (с учетом влияния III каменносолевого горизонта), были разработаны горно-геомеханические модели (ГГМ) и соответствующие им расчетные схемы (РС). На их базе исследованы параметры НДС неоднородных квазисплошных сред в зонах предстоящей отработки запасов.

В качестве граничных условий принимались статические формирующие поля компонентов $\sigma_{ij}$ $\varepsilon_{ij}$ $\delta_{ij}$ в невесомой полуплоскости и отвечающие значениям гравитационных нагрузок в МГП на уровне (глубине) III калийного горизонта. Рассматривались условия сдвижения налегающей толщи пород как фактора, определяющего формирование механических свойств горных пород в выработанных пространствах II и III калийных и III каменносолевого горизонтов. Отмеченный фактор рассматривался во взаимосвязи с параметрами систем разработки, принятыми ранее в окрестности (по контуру) оставшихся для отработки участков II и III калийных горизонтов (в центральной части шахтного поля). Механические характеристики горных пород в контурных зонах выработанных пространств оценивались в связи с влиянием на них подработанного массива в пределах краевых частей мульд сдвижения – вплоть до внутренней границы краевой части (ВГКЧ) соответствующих мульд. При выполнении оценок механических свойств учитывался фактор времени.

Для варьируемых параметров выработанных пространств (деформационных – в функции времени их существования, и геометрических), окружающих перспективные площади отработки калийных горизонтов, по разработанным ГГМ и РС рассчитаны числовые поля компонент соответствующих тензоров напряжений, деформаций и вектора перемещений. Затем была построена графическая интерпретация указанных полей,

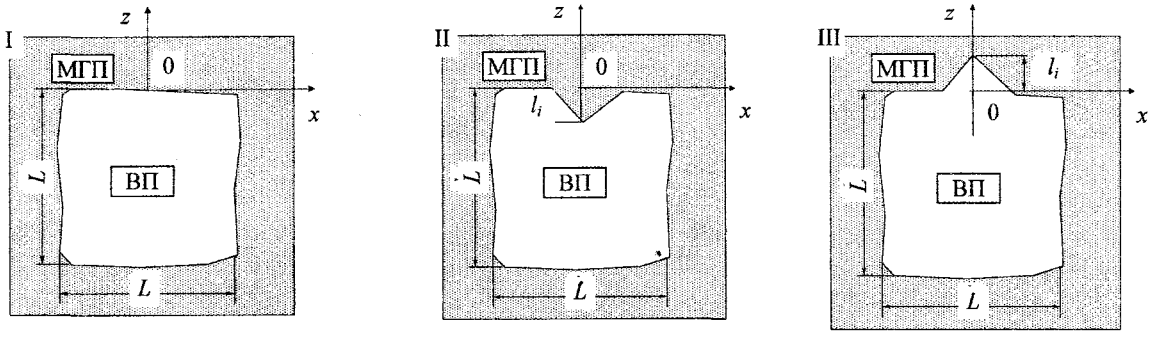



Рис.3. Возможные варианты конфигурации ФОР
I – прямолинейный; II – отстающий; III – опережающий

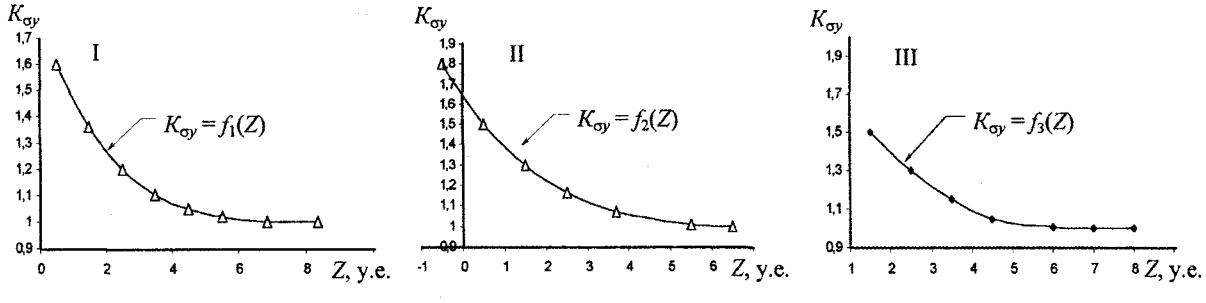



Рис.4. Зависимость коэффициента концентрации напряжений $K_\sigma$ от параметра $Z$
I – прямолинейный; II – отстающий; III – опережающий

показывающая интенсивность протекания геомеханических процессов в техногенно возмущенном соляном массиве.

Выполненное моделирование позволило оценить по горно-геомеханическому фактору возможные условия отработки запасов и требования к управлению состоянием соляного массива с учетом развития фронта очистной выемки на рассматриваемых горизонтах.

По обобщенным результатам моделирования был предложен коэффициент концентрации напряжений в функции геометрических параметров сформированного контура ВП для трех наиболее обобщенных типов конфигураций развития ФОР. Отмеченные типы схематично представлены на рис.3.

Приведенные параметры представлены в условных единицах (у.е.). Так, в решении было принято: $0 \le l_i$, у.е. $\le 4$; $L_i = 10$ у.е. Отметим, что параметр вынимаемой мощности пласта $h = 0{,}2$ у.е. (или in situ $h = 4$ м). Коэффициент концентрации напряжений $K_{(\sigma y)} = \sigma y/(\gamma H)$ зависит от расстояния по оси $Z$ в МГП (рис.4).

Изменение напряженно-деформированного состояния МГП применительно к вариантам развития ФОР, характеризуемое соответствующими изменениями коэффициентов концентрации напряжений по компоненте $\sigma_y$ тензора $\sigma_{ij}$, приведено на рис.4. Приведенные данные соответствуют результатам при $l_i \approx 1$ у.е.

На основе выполненных исследований разработаны предложения по управлению состоянием массива на рассматриваемых горизонтах отработки запасов сильвинита. С целью повышения безопасности горных работ предложения рекомендованы к использованию в проектных проработках развития горных работ на указанных участках (в основном на наиболее перспективном III калийном горизонте).

## Выводы

1. Порядок отработки запасов III калийного горизонта по геомеханическому фактору может быть принят в двух вариантах: от существующего контура горных работ и в направлении к нему (оба варианта достаточно идентичны).

2. При принятии к проектным проработкам первого варианта целесообразно учитывать время формирования ВП и развивать отработку запасов сначала на участках, где геомеханические параметры (коэффициент концентрации напряжений и протяженность зоны опорного давления) между ВП и МГП будет наименьшим, т.е. с тех участков, на которых выработанные пространства достаточно уплотнены, кроме того, необходима и специальная проработка условий выемки руды (оценка геомеханического и технологического факторов).

3. При проектировании схем отработки оставшихся на III калийном горизонте запасов (подготовительные и очистные работы) целесообразно учитывать геометрию развития ФОР. Предпочтительной – по геомеханическому фактору – будет являться такая форма развития ФОР, при которой очистное пространство опережает некоторую квазипрямолинейную ее конфигурацию. Интегральные преимущества (в геомеханическом плане) схемы развития ФОР характеризуются параметром $K_{\sigma y}$. Следует отметить, что конфигурация ФОР может влиять на вид и интенсивность проявлений горного давления как в подготовительных, так и в очистных выработках в зоне доработки запасов в центральной части шахтного поля.