

дой сопровождается химическим преобразованием мышьяксодержащих соединений кека, приводящим к повышению доли водорастворимых форм, причем более активно данный процесс происходит в раздробленных образцах с пониженным содержанием цемента. Существенную роль играет также формируемая рН водных растворов (11,03-11,48): отмечено, что в щелочной среде растворимость сульфидов мышьяка при длительном контакте возрастает [5].

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют, что закладочный материал с добавлением мышьяксодержащих кеков не является стабильным и разрушается при длительном взаимодействии с водной средой. Этому способствует то, что вводимые закладочную смесь частицы кека в большинстве своем не образуют каких-либо соединений, а представляют механические взвеси в образующейся массе.

Как показывает анализ опыта работ [3], снижение масштабов выщелачивания мышьяка из бетонных смесей может быть достигнуто введением в их состав различных добавок (соли трехвалентного железа, сульфид аммония, фосфаты и др.), переводящих мышьяк в относительно стабильные соединения (скородит, ферригидрит). Возможно также введение в состав смесей различных стабилизирующих добавок (нефтеуглеродные и другие органические жидкости), основным назначением которых является гидроизоляция мышьяксодержащих частиц.

Для оценки эффективности данных мероприятий необходимо проведение дополнительных исследований по разработке наиболее оптимальных рецептур закладочных смесей.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бачурин Б.А. Геохимические аспекты утилизации мышьяксодержащих отходов // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: науч. чтения памяти П.Н. Чирвинского / ПГНИУ [и др.]. – Пермь, 2019. – Вып. 22. – С. 363-368.
2. Исабаев С.М., Кузгибекова Х.М., Жинова Е.В., Зиканова Т.А. Исследование поведения соединений мышьяка в различных средах // Международный научно-исследовательский журнал. – 2013. – № 8-2 (15). – С. 22-24.
3. Копылов Н.И., Каминский Ю.Д. Мышьяк. – Новосибирск: Сибирское университетское изд-во, 2004. – 363 с.: ил.
4. Твидвелл Л.Дж., Плессас К.О., Комба П.Г., Данке Д.Р. Удаление мышьяка из сточных вод и стабилизация мышьяксодержащих твердых отходов // Цветные металлы. – 1996. – № 9. – С. 27-31.
5. Smedley P.L., Kinniburgh D.C. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters // Applied Geochemistry. – 2002. – V .17. – P. 517-568.

## МЕХАНИКА ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.83

DOI: 10.7242/echo.2019.2.5

### О ВОЗМОЖНОСТИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ КАРНАЛЛИТОВОЙ РУДЫ В ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ЗОНАХ

Е.А. ГУБАНОВА

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь.*

**Аннотация:** Рассмотрены варианты ведения очистных работ в окрестности охранного околоскважинного целика за счет создания зон смягчения путем закладки очистных камер одного из рабочих пластов. Математическое моделирование процессов деформирования и разрушения водозащитной толщи (ВЗТ) проведено в двухмерной упругопластической постановке для условий плоского деформированного состояния (ПДС) методом конечных элементов. С использованием критериев Кулона-Мора и предельных растягивающих напряжений проведен анализ эффективности создания зон смягчения в динамике нарастания оседаний земной поверхности. Выполнен анализ потенциальной возможности формирования в подработанном массиве трещин субвертикальной ориентации как основных при формировании водопроводящих каналов по разрезу ВЗТ. Представлены результаты геомеханических расчетов при использовании дополнительных мер охраны на примере Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (ВКМКС).

**Ключевые слова:** математическое моделирование; водозащитная толща; субвертикальная нарушенность; зона смягчения.

## Введение

Недра нашей планеты являются хранилищем практически всех химических элементов и их соединений. Залежи полезных ископаемых богаты многочисленными минералами, среди которых карналлит является практически неисчерпаемым и наиболее дешевым природным «поставщиком» калия, магния и других химических веществ, применяемых в промышленности, в том числе авиационной, автомобильной, медицине, косметологии, сельском хозяйстве и многих других. Для Верхнекамского месторождения карналлит, конечно же, ценное природное сырье для титано-магниевого производства. Вопрос заключается в том, что подготовленных запасов данного минерала очень мало, то есть, в определенной степени, это дефицит для месторождения. С одной стороны, участки, где карналлит можно отработать, уже подработаны и ввиду реализации большой техногенной нагрузки относятся к потенциально опасным. С другой, возможность отработать какие-то площади все-таки существует. Обеспечение безопасных условий ведения горных работ при этом является первостепенной задачей и требует применения дополнительных горнотехнических мер охраны ВЗТ, одной из которых является зона смягчения.

## Методические положения расчетов

Геомеханическая модель включала выработанное пространство как среду с пониженными по отношению к породам соответствующего пласта механическими свойствами, степень снижения которых определялась путем вариации параметров системы разработки и контролировалась максимальными оседаниями земной поверхности в зоне полной подработки. Формирование мульды сдвижения под воздействием горных работ осуществлялось с использованием реологического подхода, основанного на модификации известного метода переменных модулей [1]. В рамках линейной теории наследственной вязкоупругости можно принять, что вертикальные смещения дневной поверхности изменяются во времени согласно соотношению:

$$v(t) = v_0 \left( 1 + \int_0^t K(t - \tau) d\tau \right) = v_0 [1 + \Phi(t)], \quad (1)$$

где  $v_0$  - упругие смещения, связанные с формированием выработанного пространства,  $K(t - \tau)$  - функция влияния напряжения  $\sigma(\tau)$  в момент времени  $\tau$  на деформацию в момент времени  $t$ ,  $\Phi(t)$  - функция ползучести. Поскольку реальные графики нарастания оседаний определяются разностью полных и упругих смещений, то

$$V(t) = v(t) - v_0 = v_0 \Phi(t). \quad (2)$$

Пусть модуль деформации пласта на момент отработки определяется соотношением:

$$E^p = \frac{b}{a+b} E = (1 - \omega) E,$$

где  $a$ ,  $b$  – соответственно ширина камеры и междукammerного целика,  $\omega$  - коэффициент извлечения руды с пласта,  $E$  - модуль деформации породы. В рамках реализации реологического подхода в зоне полной подработки зависимость вертикальных смещений от времени будет определяться выражениями (1, 2), если переменный модуль отработанного пласта представить соотношением [1]:

$$E_t^p(t) = \frac{E^p}{1 + (1 - \omega)\Phi(t)}. \quad (3)$$

При отработке нескольких пластов действие выражения (3) с соответствующими параметрами (коэффициент извлечения, модуль деформации пород) и функцией ползучести  $\Phi(t)$  распространяется на каждый из них. Для каждого отработанного функция ползучести в общем случае определяется разностью прогнозных (фактических)  $v(t)$  и упругих  $v_0$  оседаний земной поверхности на конкретный момент времени  $\Phi(t) = (v(t) - v_0) / v_0$ .

Математическое моделирование процессов разрушения ВЗТ проводилось в упруго-пластической постановке для условий плоского деформированного состояния (ПДС). Предельные напряжения в области сжатия определялись классической формой закона Кулона-Мора [2]:

$$\tau_{\max} = \tau_{np} = C + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi, \tag{4}$$

где  $C$  - коэффициент сцепления,  $\operatorname{tg} \varphi$  - коэффициент внутреннего трения,  $\sigma_n$  - нормальное напряжение в плоскости действия  $\tau_{\max}$ . Максимальное касательное ( $\tau_{\max}$ ) и нормальное ( $\sigma_n$ ) напряжения определялись на площадках, где отношение ( $\tau_{\max} / \tau_{np}$ ) достигает максимальных значений.

В поле растягивающих напряжений критерий разрушения соляных пород реализовывался согласно соотношению:

$$\sigma_1 = \sigma_{расм}. \tag{5}$$

Методом численной реализации математического моделирования принимался метод конечных элементов [3]. Решение упругопластической задачи основывалось на методе начальных напряжений [4, 5]. Локализация пластических деформаций в физическом смысле означала разрушение пород ВЗТ в области сжатия вследствие развития трещин сдвига, в области растяжения - трещин отрыва.

**Постановка задачи**

В рамках предложенных критериальных оценок проведен анализ возможности извлечения карналлитовой руды применительно к одной из потенциально опасных зон в южной части рудника СКРУ-1 (блоки 197, 195, 193) (рис.1). В пределах данных блоков отработан сильвинитовый пласт КрII с податливыми междукамерными целиками. В западной части блока 195 для охраны ствола геологоразведочной скважины 129 оставлен околоскважинный целик, наличие которого, априори, обуславливает большие оседания земной поверхности и, соответственно, резкие градиенты мульды сдвижения в его краевой части. В связи с чем, выемка карналлитовых запасов сопровождалась принятием дополнительных мер охраны ВЗТ за счет создания по периметру охранного целика зон смягчения различной протяженности путем закладки очистных камер сильвинитового пласта КрII.

Сохранность подработанной толщи оценивалась на момент достижения конечных оседаний земной поверхности и характером формирования зон субвертикальной техногенной нарушенности в пластах ВЗТ по геомеханическому разрезу, секущему охранный целик скважины 129 в меридиональном направлении (рис.1).



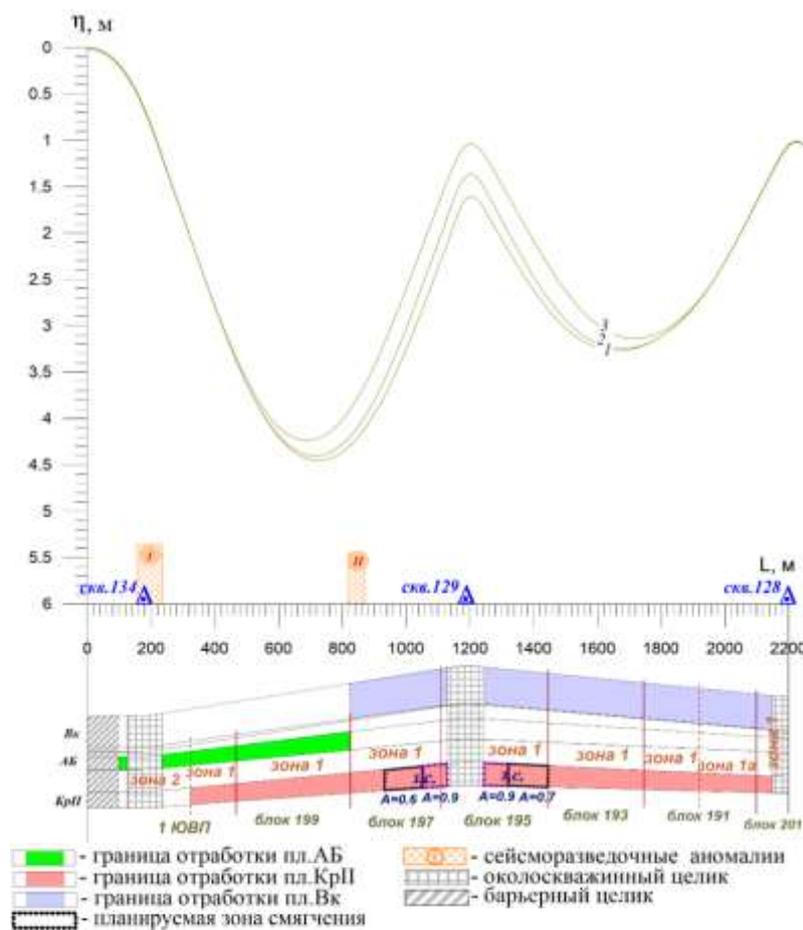
- 5 - номера зон с различными параметрами отработки
- 187 - номер блока
- 1 - геомеханический профиль
- 78 - маркшейдерский профиль
- сейсморазведочные аномалии
- линии сейсморазвед. профилей
- граница зоны смягчения
- площадь отработки пл. Вк
- площадь отработки пл. ЛБ
- площадь отработки пл. КрII
- площадь отработки пл. КрI

**Рис. 1.** Обзорная схема и положение зон смягчения относительно околоскважинного целика скважины 129

В геомеханических расчетах с целью извлечения в ближайшее десятилетие карналлитовой руды проанализированы следующие варианты ведения очистных работ вблизи охранного целика скважины 129:

1. Отсутствие зоны смещения.
2. Создание по периметру околоскважинного целика одноступенчатой зоны смягчения шириной 80 м путем закладки камер пласта КрII с коэффициентом заполнения  $A=0,7$ .
3. Создание по периметру околоскважинного целика двухступенчатой зоны смягчения с разными по протяженности ступенями путем закладки очистных камер пласта КрII с коэффициентами закладки в диапазоне от 0,6 до 0,9.

Расчетные кривые оседаний земной поверхности и результаты, иллюстрирующие разрушение пластов ВЗТ вдоль расчетного профиля при выемке карналлитовых запасов в пределах блоков 197, 195, 193 на конец процесса сдвижения для всех расчетных вариантов представлены соответственно на рис.2 и рис.3.



**Рис. 2.** Расчетные оседания земной поверхности на конец процесса сдвижения при отсутствии зоны смягчения (кривая 1); при создании одноступенчатой зоны смягчения (кривая 2) и двухступенчатой зоны смягчения (кривая 3)

Следует отметить, что отработка карналлита сопровождается большой техногенной нагрузкой на подработанный массив. Уже к текущему моменту времени двухпластовая отработка силвинитовых пластов (АБ и КрII) на участке соседнего с блоком 197 блока 199 уже обуславливает высокие градиенты мульды сдвижения (рис.2, кривая 1) и достаточно большой уровень техногенной нагрузки на подработанный массив в пределах границ данного блока (рис.3, а). Максимально интенсивное разрушение всех карналлитовых пластов в интервале ВЗТ наблюдается у южной границы блока 199 с ЮВП.



При отсутствии зоны смягчения над охранном целиком скважины 129 прогнозируется выраженный контрастный перегиб мульды сдвижения (рис.2, кривая 1). У границы целика с блоком 197 формируется сквозная зона разрушения пород ВЗТ (рис.3, а). Все карналлитовые пласты (В, Г, Д, Е, Ж, З, И, К) и слои межпластовой каменной соли в интервале ВЗТ теряют свою устойчивость за счет развития в них трещин сдвига (рис.3, а). Для верхней части ВЗТ (интервал ПП, ПКС) характерно появление трещин отрыва. Отработка карналлита в данном случае запрещена.

При создании по периметру охранного целика скважины 129 одноступенчатой зоны смягчения шириной 80 м путем закладки камер рабочего пласта КрII с коэффициентом заполнения 0,7 происходит некоторое выполаживание мульды сдвижения над охранном целиком (рис.2, кривая 2) и снижение техногенной нагрузки, выраженное в уменьшении по латерали размеров областей разрушения (рис.3, б) по сравнению с вариантом отсутствия зоны смягчения. В районе северной границы охранного целика межпластовая каменная соль в интервале ВЗТ сохраняет свою устойчивость, тогда как зона нарушенности в пределах его южной границы характеризуется полной потерей устойчивости всех пластов. В связи с тем, что безопасные условия ведения горных работ не обеспечиваются, возможность извлечения карналлитовой руды в данном случае также отсутствует.

Как показали расчеты, закладка камер пласта КрII по периметру охранного целика скважины 129 с разными по ширине ступенями и коэффициентами является эффективной мерой снижения нагрузки на ВЗТ. По сравнению с одноступенчатой двухступенчатая зона смягчения протяженностью 200 м обеспечивает более значимое снижение градиента оседаний земной поверхности над охранном целиком (рис.2, кривая 3). Области разрушения, приуроченные к границам целика, уменьшаются в размерах как по латерали, так и по разрезу ВЗТ (рис.3, в). Устойчивость сохраняет межпластовая каменная соль верхней и средней части ВЗТ. В интервале ПП и ПКС не прогнозируется сквозное разрушение пород. Таким образом, данная мера охраны ВЗТ по сравнению с рассмотренными вариантами приводит к более значимому улучшению ее состояния.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Baryakh A.A., Samodelkina N.A Rheological analysis of geomechanical processes // Journal of Mining Science. – 2005. – V. 41, № 6. – P. 522-530. DOI: 10.1007/s10913-006-0015-x.
2. Кузнецов Г.Н. Механические свойства горных пород. – М.: Углетехиздат. – 1947. – 180 с
3. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 541 с.: ил.
4. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
5. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с.: ил.

УДК 622.83

DOI: 10.7242/echo.2019.2.6

## РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИКОНТУРНЫХ ПОРОД В УСЛОВИЯХ ГЛУБОКОГО КАЛИЙНОГО РУДНИКА

В.Н. ТОКСАРОВ

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Приведены результаты экспериментальных исследований по измерению напряжений в нетронутым соляном массиве рудника Гремячинского ГОК на глубине около 1100 м. Контроль напряжений осуществлялся методом, основанном на использовании акустоэмиссионных эффектов памяти нагружаемого околошпурового пространства. Экспериментами установлено, что средний коэффициент бокового распора в массиве соляных пород рудника равен 0,9.

**Ключевые слова:** скважинный гидродомкрат, эффект Кайзера, нетронутый массив, контроль напряжений, коэффициент бокового распора.