

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАССЛОЕНИЙ НА ХАРАКТЕР РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССА СДВИЖЕНИЯ НА ГРЕМЯЧИНСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ

С.Ю. Лобанов

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Увеличение глубины горных работ обуславливает не только повышение горного давления, но и осложняет структуру породного массива. Применительно к начальному этапу освоения Гремячинского месторождения, в пределах которого планируется отработка калийных солей на глубинах более 1000 метров, разработана математическая модель подработанного массива, отражающая основные особенности его геологического строения и проектные параметры камерной системы разработки. В расчетную модель посредством контактных элементов Гудмана введена возможность расслоения породного массива по границам толщ со значимым отличием деформационных свойств. Методами математического моделирования проведена оценка влияния расслоения по контактам пластов на развитие процесса сдвижения земной поверхности.

**Ключевые слова:** геомеханическое моделирование, контактные элементы, расслоение, деформационная оценка.

Построение геомеханической модели подработанного массива Гремячинского месторождения выполнялось на примере субширотного профиля, проходящего по 53П [1]. Рассматриваются проектные условия отработки месторождения калийных солей. Глубина ведения горных работ составляет порядка 1000 метров.

На данном участке планируется к отработке сильвинитовый пласт Первый. Подробные сведения о параметрах очистной выемки соляных запасов приведены в работе [2] и включены в схему геомеханических расчетов.

Сейсморазведочные работы и данные бурения геологоразведочных скважин в рассматриваемой области легли в основу создания физико-геологической модели разреза [3].

Изменения состояния водозащитной толщи Гремячинского месторождения оценивались с помощью математической модели, которая учитывала весь комплекс горно-геологических и горнотехнических факторов

Известный реологический подход [4], основанный на математическом описании прогнозных графиков нарастания оседаний земной поверхности применялся для анализа деформирования подработанного массива во времени.

Контактные элементы Гудмана [5,6] применялись для моделирования процесса расслоения по границам геологических пластов. Свойства контактов принимались по данным лабораторных исследований [7].

Численная реализация осуществлялась методом конечных элементов в перемещениях [8] с дискретизацией рассматриваемой области на треугольные элементы первого порядка. Решение упругопластической задачи основывалось на методе начальных напряжений [9, 10].

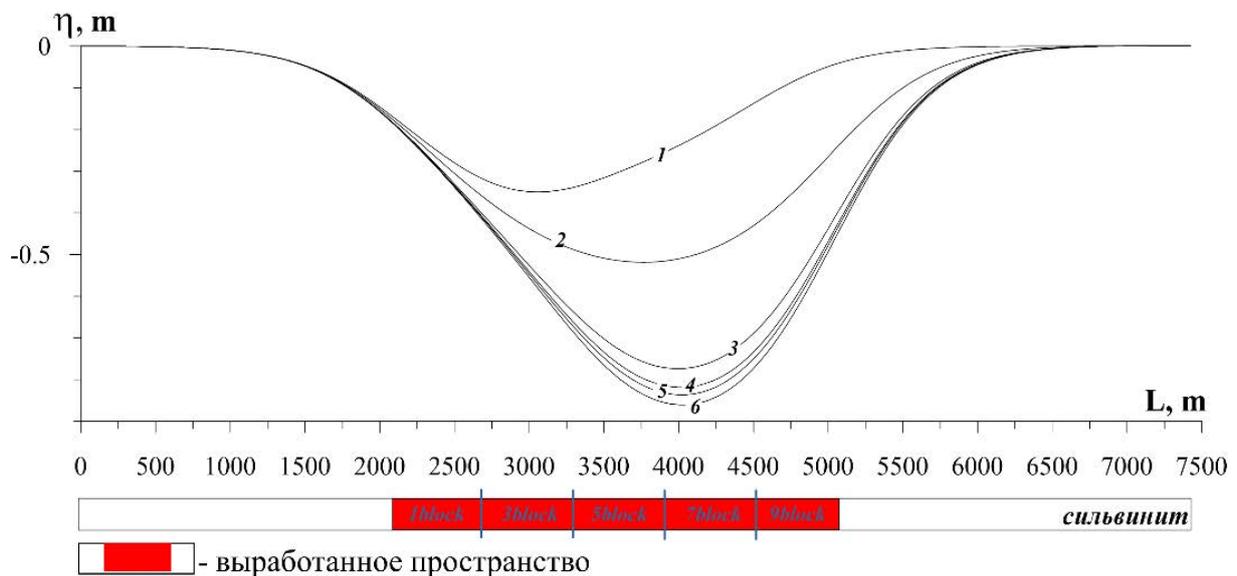
Реализация реологического подхода требует знания функции ползучести  $\Phi(t)$ , которая определяется прогнозными или фактическими графиками нарастания оседаний земной поверхности  $\eta(t)$ . Иначе возможно лишь оценить напряженно-деформированное состояние подработанного массива на конец процесса сдвижения.

Для условий вводимого в освоение Гремячинского месторождения процесс сдвижения является неизученным. В этой связи для калибровки математической

модели использовались данные по Саскачеванскому месторождению, геологическое строение которого, глубина и система разработки в определенной степени являются подобными горнотехническим и горно-геологическим условиям Гремячинского месторождения [1].

Для условий Гремячинского месторождения характерным является залегание над соляными породами прочных и достаточно жестких толщ (карбонатных, доломитовых). Их наличие оказывает влияние на процесс деформирования породного массива, предопределяя возможность расслоения по контактам пластов (толщ). Считалось, что основное расслоение реализуется по нижней границе первого над выработанным пространством доломитового пласта. Физически данное расслоение обусловлено различными деформационными свойствами этих слагающих толщ, а также выраженной пластичностью и ползучестью соляных пород.

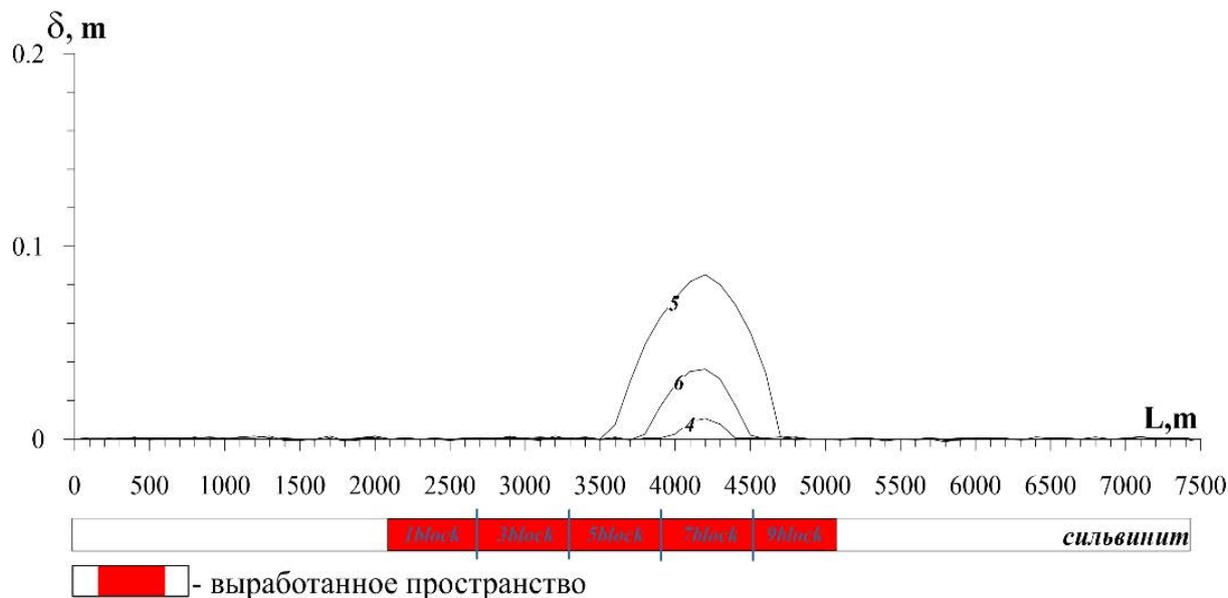
На рис. 1 представлены прогнозные графики оседания земной поверхности вдоль расчетного профиля на различные моменты времени вплоть до завершения процесса сдвижения на Гремячинском месторождении. На рис. 2 иллюстрируется характер расслоения породного массива по границе соляной и доломитовой толщ.



**Рис. 1.** Прогнозные оседания земной поверхности вдоль расчетного профиля:  
1 – через 5 лет сначала отработки; 2 – через 10 лет; 3 – через 15 лет; 4 – через 20 лет;  
5 – через 25 лет; 6 – на конец процесса сдвижения

Как видно из представленных результатов, раскрытие контакта наступает при достаточном развитии процессов деформирования. Смещение максимума мульды сдвижения по латерали на начальных отрезках времени (рис. 1, кривая 1) связано с порядком отработки выделенных блоков. Через двадцать лет после начала отработки (рис. 1, рис. 2, кривая 4) вследствие разрушения несущих элементов камерной системы разработки происходит расслоение по контакту соляной толщи и вышележащими доломитовыми отложениями.

Начиная с этого момента скорость оседания на земной поверхности существенно замедляется и наблюдается увеличение амплитуды расслоения ( $\delta$ ) по нижней границе доломитового слоя (рис. 2, кривая 5). На конец процесса сдвижения оседания (рис. 1, кривая 6) достигают порядка 0,9 метра, а амплитуда раскрытия контакта уменьшается (рис. 2, кривая 6).



**Рис. 2.** Характер расслоения породного массива по границе соляной и доломитовой толщ  
4 – через 20 лет; 5 – через 25 лет; 6 – на конец процесса сдвижения

По результатам численного моделирования установлено, что расслоение породного массива по границам толщ со значимым отличием деформационных свойств существенно замедляет скорость оседания на земной поверхности, что связано с ростом амплитуды расслоения на границе доломитового слоя.

Численные эксперименты показали, что с увеличением амплитуды расслоения по нижней границе доломитового слоя уменьшаются значения оседаний земной поверхности, однако суммарные вертикальные перемещения (оседания плюс расслоение) остаются практически постоянными и совпадают с расчетными конечными оседаниями в отсутствие расслоения.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 20-45-596001 р\_НОЦ\_Пермский край и Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г.*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лобанов С.Ю. Калибровка геомеханической модели ВЗТ Гремячинского месторождения калийных солей // Горное эхо. – 2020. – № 2 (79). – С. 25-30. DOI: 10.7242/echo.2020.2.5.
2. Горно-обогатительный комбинат по добыче и обогащению калийных солей мощностью 2,3 млн. т/год 95% KCl Гремячинского месторождения Котельниковского района Волгоградской области. Рудник Гремячинского ГОК: Проектная документация. Раздел 5 / АО «ВНИИ Галургии». – Пермь, 2016.
3. Технический проект обработки Гремячинского месторождения подземным шахтным способом: Проектная документация. Раздел 2. Геологическое строение шахтного поля. 71.002-ГГ / ОАО «Галургия». – Пермь, 2015.
4. Барях А.А., Самоделкина Н.А. Об одном подходе к реологическому анализу геомеханических процессов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2005. – № 6. – С. 32-41.
5. Goodman R.E. The mechanical properties of joints // Adv. Rock Mech. – 1974. – V.1, Pt A. – P. 127-140.
6. Groth T. Description and applicability of the BEFEM code. // Applied Rock Mechanics Mining: Proceedings Conference, Lulea. 1-3 June, 1980. – London, 1981. – P. 204-208.

7. Асанов В.А., Барях А.А., Дудырев И.Н., Паньков И.Л. Взаимодействие слоев в соляном массиве: общ. I. Механические свойства контактов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1992. – № 2. – С. 48-52.
8. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.: ил.
9. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
10. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с.: ил.

УДК 622.831

DOI:10.7242/echo.2021.4.9

## ОЦЕНКА СТЕПЕНИ НАГРУЖЕНИЯ МЕЖДУКАМЕРНЫХ ЦЕЛИКОВ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

И.С. Ломакин

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация.** На основе анализа изменения напряженно-деформированного состояния очистных выработок методами математического моделирования выполнена оценка степени нагружения целиков сложной формы. Численная реализация осуществлялась в упругой постановке для условий плоского деформированного состояния методом конечных элементов.

**Ключевые слова:** степень нагружения, междукамерные целики, напряженно-деформированное состояние, математическое моделирование.

На Верхнекамском месторождении солей (ВКМС) добыча полезного ископаемого ведется камерной системой разработки с поддержанием налегающей толщи на ленточных междукамерных целиках (МКЦ). Расчет степени нагружения МКЦ ( $C$ ) основан на методике Турнера-Шевякова и регламентирован в нормативной документации [1], разработанной для условий ВКМС:

$$C = \xi \gamma H_0 \frac{a+b}{bk_f \sigma_m} \leq [C], \quad (1)$$

где  $\xi$  – коэффициент, учитывающий изменение нагрузки на целики вследствие влияния различных горнотехнических факторов (пригрузка от солеотвалов, опорное давление, наличие межходовых целиков и др.);  $\gamma$  – объемный вес пород;  $H_0$  – максимальное значение расстояния от земной поверхности до кровли целиков;  $a$  – ширина очистных камер;  $b$  – ширина междукамерных целиков;  $k_f$  – коэффициент формы целиков;  $\sigma_m$  – прочность пород в массиве;  $C$  и  $[C]$  – соответственно, расчетная и допустимая степень нагружения целика.

При добыче руды на нескольких продуктивных пластах формирование очистных камер ведется соосно. В таком случае межосевое расстояние  $L$ , представляющее собой сумму ширины камеры ( $a$ ) и ширины целика ( $b$ ), будет одинаковым на каждом рабочем пласте. Расчет степени нагружения междукамерных целиков, согласно [1], выполняется независимо для каждого пласта по формуле (1). Соосное расположение выработок позволяет провести вычисление степени нагружения МКЦ по тем же принципам даже в случае формирования объединенного камерного блока.

Однако иногда возникают ситуации, когда межосевое расстояние  $L$  верхнего и нижнего рабочего пласта различны. Например,  $L_{\text{нижн.пласт}} = 2L_{\text{верхн.пласт}}$ . Параметры такой системы разработки представлены в таблице 1. Там же указана степень нагружения