

3. При указанных параметрах (длина шнура – 2,2 м, длина заряда ВВ аммонит 6ЖВ – 1,7 м, диаметр заряда (патрона) – 32 мм, диаметр шнура – 42 мм, радиальный зазор  $\Delta \approx 0,313$ ) расчетная величина ЛНС, вычисленная по формуле (9) для пород, указанных в табл. 1-2, удовлетворяет требованиям п. 280 ПБ [1].

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г. (рег. номер 122012000403-1).*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения»: утв. 3.12.2020, № 494, действуют с 01.01.2021 г. – М.: ЗАО «НТЦ исследований проблем пром. безопасности, 2021. – 352 с. – (Документы по безопасности, надзорной и разрешительной деятельности в области взрывных работ и изготовления взрывчатых материалов: сер. 13, вып. 15).
2. Баум Ф.А., Григорян С.С., Санасарян Н.С. Определение импульса взрыва вдоль образующей скважины и оптимальных параметров скважинного заряда // Взрывное дело. – 1964. – № 54/11. – С. 53-102.
3. Ханукаев А.Н. Энергия волн напряжений при разрушении пород взрывом. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 200 с.: ил.
4. Мальцев В.М., Аникин В.В. Определение величины линии наименьшего сопротивления шпурового заряда ВВ с учётом его радиального зазора // Горное эхо. – 2020. – № 1 (78). – С. 42-46. – DOI: 10.7242/echo.2020.1.9.
5. Мальцев В.М., Аникин В.В. Определение радиуса зоны трещиноватости от одиночного шпурового заряда с радиальным зазором при торпедировании выбросоопасных пластов // Горное эхо. – 2021. – № 1 (82). – С. 54-59. – DOI: 10.7242/echo.2021.1.9.
6. Andreiko S.S., Maltsev V.M., Anikin V.V., Nesterov E.A. Calculation of crack formation radius by modeling the explosive charge with a radial clearance // XXIIIND Winter School on Continuous Media Mechanics. – 2021. – V. 32. – С. 3-9. – (Сер. книг Procedia Structural Integrity). – DOI: 10.1016/j.prostr.2021.09.002.
7. Руководство по ведению взрывных работ на калийных рудниках Верхнекамского месторождения. – Пермь, 1984. – 195 с.
8. Росинский Н.Л., Магойченков М.А., Галаджий Ф.М. Мастер-взрывник: учебник для проф. обучения рабочих на пр-ве. – 3-е изд., перераб. и доп. – М., Недра, 1988. – 384 с.: ил.

УДК 622.2

DOI:10.7242/echo.2022.1.7

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ МОДУЛЯ ДЕФОРМАЦИИ ПОРОД В ПРИКОНТУРНОМ МАССИВЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СКВАЖИННОГО ГИДРОДОМКРАТА

Д.А. Поспелов, В.Н. Токсаров, Н.Л. Бельтюков  
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

**Аннотация:** В статье приведена методика определения модуля деформации осадочных горных пород в натуральных условиях с использованием скважинного гидродомкрата Гудмана. По результатам предварительных экспериментальных исследований установлено, что показатель модуля деформации вмещающих пород может быть использован для оценки степени нарушенности приконтурного массива, т.к. в зоне неупругого деформирования пород, формирующихся в окрестности горных выработок, отмечаются пониженные значения модуля деформации.

**Ключевые слова:** модуль деформации, скважинный гидродомкрат, давление, деформационные свойства.

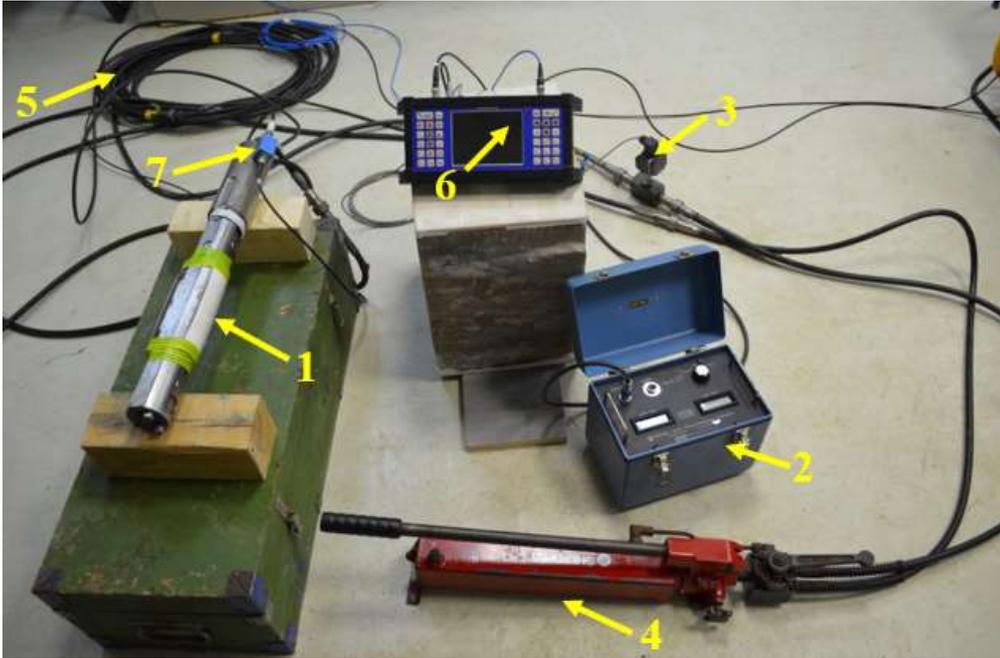
## Введение

Важным инженерным параметром при анализе геомеханического поведения осадочных горных пород и массивов является модуль деформации, представляющий собой коэффициент пропорциональности между напряжениями и деформациями при нагрузке [1, 2]. Геомеханическое поведение массива является, как правило, неупругим из-за наличия в нем разрывов, трещин и других неоднородностей. В этих условиях оценка деформируемости с использованием модуля деформации, при которой учитывается как упругое, так и неупругое поведение породного массива, является более значимой по сравнению с оценкой с использованием модуля упругости. Знание модуля деформации массива важно при расчете параметров системы разработки, выборе мер управления горным давлением. Модуль деформации массива зависит от таких факторов как: предел прочности пород на сжатие, степень напряженного состояния массива (давление), степень нарушенности массива, геологическое строение массива и т.д. [3-8]. Испытания деформационных свойств горных пород в натуральных условиях позволяют учесть влияние масштабного эффекта [9-12]. Для определения механического состояния пород в окрестностях горных выработок, а также оценки деформируемости приконтурного массива широкое распространение получил инструментальный метод контроля модуля деформации вмещающих пород в скважинах с использованием гидродомкрата конструкции Гудмана [13].

## Методика оценки модуля деформации пород с использованием скважинного гидродомкрата

Комплект оборудования для оценки модуля деформации пород в натуральных условиях показан на рис. 1. Гидродомкрат конструкции Гудмана представляет собой каротажный зонд, предназначенный для измерения деформаций стенок скважины диаметром 76 мм под действием приложенной однонаправленной нагрузки, передаваемой двумя расположенными друг напротив друга изогнутыми стальными пластинами, каждая из которых охватывает сектор в 90°. Для контроля деформаций стенок скважины в краевых частях нагрузочных пластин размещены два LVDT-датчика перемещений. Максимальное гидравлическое давление, развиваемое домкратом, составляет 70 МПа. Благодаря использованию гидроцилиндров специальной формы коэффициент передачи давления на породу составляет 0,93. Доставка гидродомкрата в точку проведения измерений обеспечивается с помощью досылочных штанг диаметром 56 мм и толщиной стенки 3 мм.

При проведении экспериментальных исследований осуществляется следующий порядок работ. На первом этапе в стенке горной выработки проводится бурение скважины. Затем в скважину на испытательную глубину помещается гидродомкрат. Далее с помощью ручного насоса производится равномерное повышение давления в гидроцилиндрах. В процессе нагружения измеряется величина давления рабочей жидкости в гидросистеме, а также величина деформации стенок скважины. На следующем этапе процедура проводится в обратном порядке – давление уменьшается путем плавного приоткрывания клапана сброса давления на насосе. В каждой измерительной точке обычно проводится 1-3 цикла нагружения. Для исключения взаимного влияния замерные точки в скважине располагаются на расстоянии 300 мм друг от друга. Измерения напряжений и деформационных свойств пород скважинным гидродомкратом выполняются согласно стандарту [14].



**Рис. 1.** Скважинный комплекс для измерения напряжений в массиве горных пород: 1 – гидродомкрат Гудмана; 2 – индикатор деформации; 3 – электронный манометр; 4 – гидравлический насос; 5 – высоконапорные рукава; 6 – прибор регистрации АЭ; 7 – предусилитель сигналов АЭ

Расчет модуля деформации производится по формуле:

$$D = 0,8 \cdot Q_h \cdot \frac{d}{\Delta d} \cdot T^*, \quad (1)$$

где:  $d$  – диаметр скважины, м;  $\Delta d$  – изменение диаметра скважины, м;  $Q_h$  – приращение линейного гидравлического давления с учетом коэффициента передачи давления на породу 0,93, МПа;  $T^*$  – коэффициент, зависящий от коэффициента Пуассона ( $\nu$ ) (принимается согласно табл. 1 [15]).

**Таблица 1**

Значения  $T^*$ , зависящего от коэффициента Пуассона ( $\nu$ )

$\nu$	0,1	0,2	0,25	0,3	0,33	0,4	0,5
$T^*$	1,519	1,474	1,438	1,397	1,366	1,289	1,151

По результатам испытаний строятся графики зависимости давления в гидросистеме от относительного изменения диаметра скважины (рис. 2), на которых можно выделить несколько характерных стадий. Первая стадия (участок 1-2) диаграммы нагружения соответствует перемещению нагрузочных пластин гидродомкрата и раздавливанию гидродомкратом остатков бурового штыба, неровностей стенок скважины, а также уплотнению пород околоскважинного массива. Участок 2-3 соответствует полному контакту нажимных пластин со стенками скважины. Участок 3-4 соответствует плавному снижению нагрузки при сбросе давления. Если есть необходимость, то производится несколько циклов нагружения гидродомкратом Гудмана.

По диаграммам деформирования стенок скважины рассчитывается модуль деформации, который определяется на квазилинейном участке нагружения первого цикла диаграммы как тангенс угла наклона прямой к продольной оси деформации (участок 2-3, рис. 2).

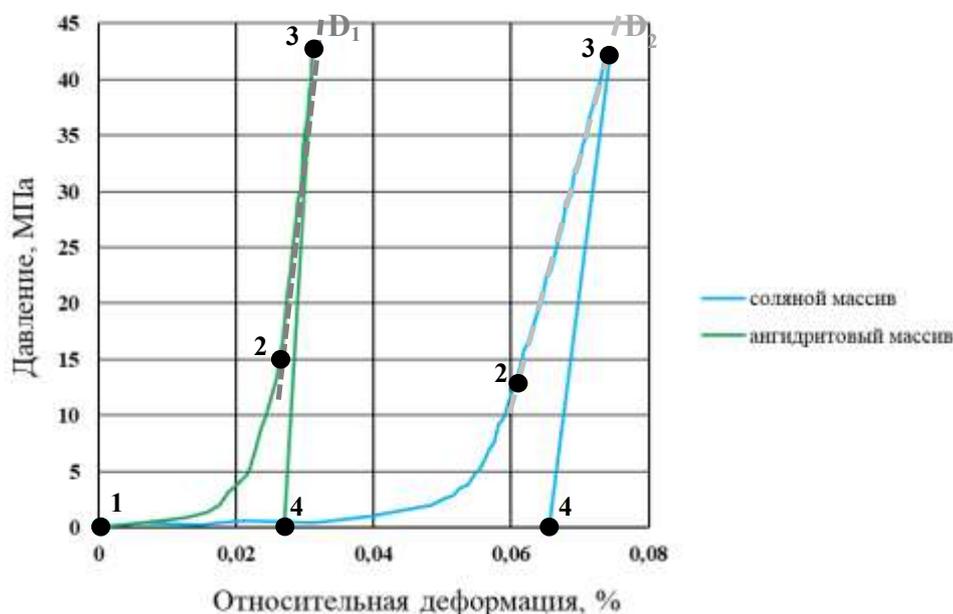


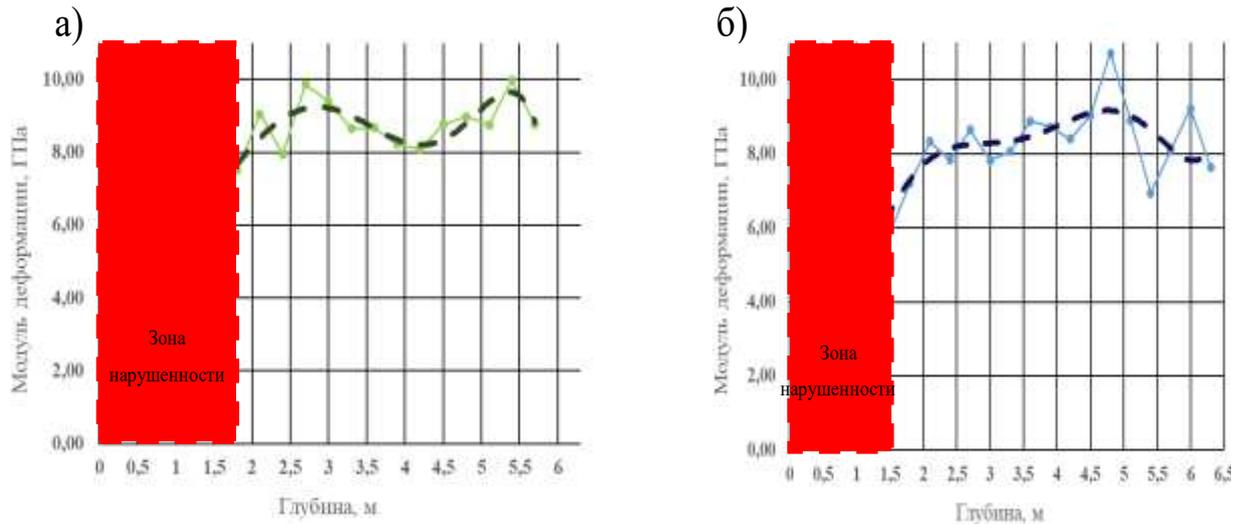
Рис. 2. Характерные графики зависимости давления и относительной деформации при испытании осадочных пород в скважинах

### Анализ результатов натуральных измерений

На руднике Гремячинского ГОКа в главном западном конвейерно-вентиляционном штреке № 1 проведен комплекс натуральных испытаний деформационных свойств ангидрит-доломитовых пород. Конструкция замерной станции представлена на рис. 3. Всего было пробурено 8 горизонтальных скважин диаметром 93 мм в трех направлениях. Учитывая, что диаметр измерительного зонда составляет 76 мм, при испытаниях использовались специальные металлические вкладыши. В экспериментальных скважинах № 5 и 6 определялся модуль деформации пород в вертикальном направлении, в остальных – в горизонтальном направлении. Измерения в скважинах проводились с шагом 0,3 м. Характерные графики изменения величины модуля деформации от глубины показаны на рис. 4.



Рис. 3. Конструкция замерной станции в главном западном конвейерно-вентиляционном штреке № 1



**Рис. 4.** Результаты оценки размера нарушенных зон в стенках выработки:  
а) скважина № 6 (вертикальное направление); б) скважина № 8 (горизонтальное направление)

Экспериментами в 8-ми горизонтальных скважинах установлено, что до глубины 2 м в приконтурном массиве наблюдаются пониженные значения модулей деформаций – порядка 3,5-7,0 ГПа (рис. 4). На больших глубинах величина модуля деформации пород составляет около 8 ГПа и более. Известно, что при проходке горных выработок в приконтурном массиве происходит процесс перераспределения напряжений с образованием нарушенных зон, в которых изменяются механические свойства пород, в том числе и деформационные [16]. Это подтверждается данными натурных исследований: в породах, находящихся в зоне неупругого деформирования, как правило, фиксируются пониженные значения модуля деформации. Таким образом появляется возможность прогнозирования ширины зоны нарушенности в окрестности выработок по результатам изучения деформационных свойств приконтурных пород в скважинах. Так, ширина зоны нарушенности в скважине № 6 составляет около 1,8 м, а в скважине № 8 – порядка 1,5 м.

Программой экспериментальных исследований также было предусмотрено сравнение результатов определения величины модуля деформации пород в шахтных и лабораторных условиях. Для этого из керна скважины № 4 было изготовлено 8 образцов цилиндрической формы с соотношением высоты к диаметру равному 2. Полученные образцы испытывались в лабораторных условиях на прессе Zwick/ Z400.

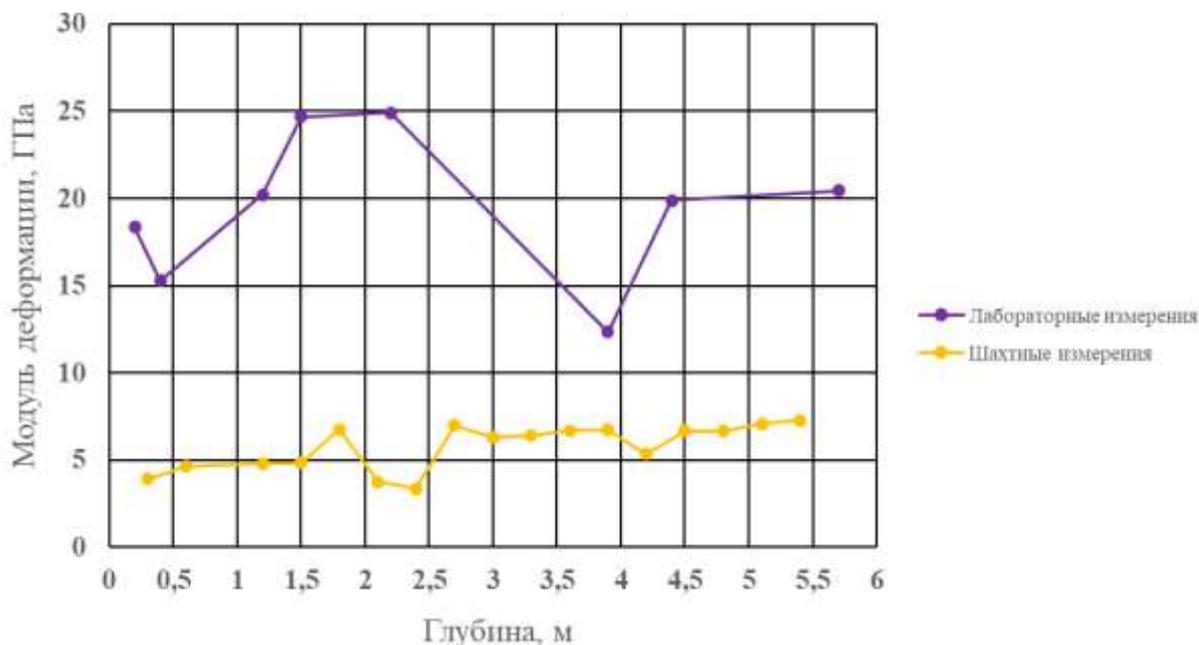
Сравнительные графики распределения величины модуля деформации ангидрит-доломитовых пород по глубине в скважине № 4 показаны на рис. 5. Установлено, что среднее значение модуля деформации, полученного в натуральных условиях, составляет 5,8 ГПа, что примерно в 3,3 раза меньше средней величины модуля деформации, полученного при лабораторных испытаниях ( $D = 19,5$  ГПа). Данное различие объясняется, по-видимому, как наличием масштабного эффекта, так и методическими особенностями экспериментальных исследований.

Таким образом, по результатам экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

- разработана и реализована методика оценки модуля деформации пород с использованием скважинного гидродомкрата;
- установлена взаимосвязь между величиной модуля деформации ангидрит-доломитовых пород и степенью нарушенности массива в окрестности капитальных и

подготовительных выработок, пройденных в условиях Гремячинского месторождения солей: в нарушенных зонах величина модуля деформации пород в 1,5-2,0 раза ниже соответствующих значений, полученных в нетронутом массиве;

– среднее значение модуля деформации ангидрит-доломитовых пород, полученного в натуральных условиях, примерно в 3,3 раза меньше величины среднего модуля деформации, полученного при лабораторных испытаниях.



**Рис. 5.** Сравнительные графики изменения величины модуля деформации ангидрит-доломитовых пород от глубины, полученные при проведении шахтных и лабораторных испытаний (скважина № 4)

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г. (рег. номер 122012000403-1), а также гранта РФФИ 20-45-596011 «Разработка научных основ комплексной оценки напряженно-деформированного состояния массивов горных пород при освоении соляных и калийных месторождений».*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зерцалов М.Г. Механика грунтов (введение в механику скальных пород): учеб. издание. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2006 – 364 с.
2. Palmström A., Singh R. The deformation modulus of rock masses – Comparisons between in situ tests and indirect estimates // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2001. – V. 16, № 2. – P. 115-131.
3. Распределение и корреляция показателей физических свойств горных пород: Справ. пособие / [М.М. Протодяконов, Р.И. Тедер, Е.И. Ильницкая и др.] под ред. Н.В. Мельникова. – М: Недра, 1981. – 190 с.: ил.
4. Витке В., Земприх С., Плишке Б. Механика скальных пород / под ред. В.М. Мосткова, С.Б. Ухова. – М: Недра, 1990. – 438 с.: ил.
5. Dixit M., Dev H., Singh R., Dhawan A.K. Insitu deformability characteristics of rock mass by Goodman Jack // 10th ISRM Congress. 2003–Technology roadmap for rock mechanics / South African Institute of Mining and Metallurgy. – 2003. – P. 249-254.
6. Барях А.А., Асанов В.А., Паньков И.Л. Физико-механические свойства соляных пород Верхнекамского калийного месторождения: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2008. – 198 с.

7. Немчин Н.П., Терентьев П.Ю. Полуэмпирические формулы определения модуля деформации и модуля спада массива горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – № 11. – С. 305-313.
8. Torbica S., Lapčević V. A model for estimation of stress-dependent deformation modulus of rock mass // International Journal of Mining and Geo-Engineering. – 2019. – V. 53, № 1. – P. 63-67.
9. Ильницкая Е.И., Тедер Р.И., Ватолин Е.С., Кунтыш М.Ф. Свойства горных пород и методы их определения / под ред. М.М. Протодяконова. – М.: Недра, 1969. – 392 с.: ил.
10. Meyer T.O., McVey J.R. NX borehole jack modulus determinations in homogeneous, isotropic, elastic materials // US Bur Mines Rep Invest. – 1974. – № 7855.
11. Heuze F.E. Scale effects in the determination of rock mass strength and deformability // Rock Mechanics Felsmechanik Mecanique des Roches. – 1980. – V. 12, № 3-4. – P. 167-192.
12. Паньков И.Л., Асанов В.А. Изучение механизма масштабного эффекта при сжатии квазипластичных соляных пород // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2015. – № 2. – С. 273-278.
13. Goodman, R.E., Van, T.K., Heuze, F.E. Measurement of Rock Deformability in Boreholes // Proceedings of the 10th U.S. Symposium on Rock Mechanics American Institute of Mechanical Engineers. – Austin, 1970. – P. 523-555.
14. ASTM D4971-08 Standard Test Method for Determining In Situ Modulus of Deformation of Rock Using Diametrically Loaded 76-mm (3-in.) Borehole Jack. – 2008. – 7 p.
15. Heuze, F.E. Suggested Method for Estimating the In-Situ Modulus of Deformation of Rock Using the NX-Borehole Jack // Geotechnical Testing Journal. – 1984. – V. 7, № 4. – P. 205-210.
16. Park S., Kim J.-S., Kwon S. Investigation of the development of an excavation damaged zone and its influence on the mechanical behaviors of a blasted tunnel // Geosystem Engineering. – 2018. – V. 21. № 3. – P. 165-181.

УДК 622.831

DOI:10.7242/echo.2022.1.8

## ОЦЕНКА ГРАНИЧНЫХ УГЛОВ ПРИ ОТРАБОТКЕ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ

С.Ю. Лобанов, А.К. Федосеев  
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

**Аннотация:** Вопрос влияния отработки калийных залежей на больших глубинах на сохранность объектов на земной поверхности в настоящее время не является до конца изученным. Использование инженерных подходов, принятых для месторождений меньшей глубины, при переходе к большим глубинам зачастую приводит к существенной ошибке. В статье на примере Гремячинского месторождения калийных солей рассматривается изменение мульды сдвижений земной поверхности в зависимости от горнотехнических условий при выемке продуктивных пластов с глубины более 1 км. Геомеханическое моделирование осуществлялось с использованием реологического подхода, основанного на математическом описании прогнозных графиков нарастания оседаний земной поверхности. Численная реализация осуществлялась методом конечных элементов. Расслоение по границам геологических пластов моделировалось контактными элементами Гудмана. По результатам моделирования показана возможность значительно уменьшить ширину охранного целика под железной дорогой, проходящей по территории рудника.

**Ключевые слова:** калийные рудники, напряженно-деформированное состояние, математическое моделирование, метод конечных элементов

Увеличение глубины горных работ, а также наличие достаточно мощного жесткого слоя пород, перекрывающего обрабатываемые пласты, приводит к существенному отличию расчетных оседаний от фактических при использовании традиционных методов прогнозирования развития деформаций земной поверхности [1]. Это, в свою очередь, может приводить как к завышенной, так и к заниженной оценке воздействия выемки продуктивных пластов на сохранность наземных объектов и сооружений. Такая ситуа-