

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОДРАБОТКИ НА ОПАСНОСТЬ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД НА СТАРОБИНСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ

А.К. Федосеев

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** При проходке горных выработок в подработанном массиве техногенные скопления свободных газов в породах кровли или почвы могут представлять собой очаги газодинамических явлений в виде внезапных обрушений пород кровли (разрушений пород почвы), сопровождающихся газовыделением.

Для оценки степени опасности реализации газодинамических явлений в выработках Второго калийного горизонта ЗРУ Старобинского месторождения проводилось математическое моделирование изменения напряженно-деформированного состояния подработанного массива при очистной выемке сильвинитовых пластов Третьего калийного горизонта. Деформирование слоистого соляного массива, подработанного столбовой системой разработки, описывалось моделью идеальной упруго-пластичной среды с внутренним трением. В качестве критерия пластичности в области сжатия использовалась параболическая огибающая кругов Мора. Глинистые прослои моделировались контактными элементами Гудмана. Численное решение задачи осуществлялось методом конечных элементов. По результатам математического моделирования установлено, что отработка Третьего калийного горизонта не приводит к формированию очагов газодинамических явлений в выработках Второго горизонта.

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

Практика ведения горных работ на рудниках ОАО «Беларуськалий» в последние годы показала, что внедрение новых эффективных технологий отработки запасов Третьего калийного пласта, таких как технология очистной выемки, представляющая собой сочетание двух технологических схем – валовой выемки слоев 2, 2-3 и 3 в охранных междустолбовых целиках (технологическая схема класса 1) и выемки подработанного 25-30 лет назад 4 сильвинитового слоя (технологическая схема класса 10), могут сопровождаться интенсификацией процессов сдвижения подрабатываемых горных пород, расслоением пород по глинистым прослойкам с последующим формированием в образовавшихся расслоениях скоплений свободных газов. Такие техногенные скопления свободных газов в породах кровли или почвы горных выработок, проходка которых ведется в подработанном породном массиве, могут представлять собой очаги газодинамических явлений в виде внезапных обрушений пород кровли (разрушений пород почвы) горных выработок, сопровождающихся газовыделением.

Для оценки изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) подработанного массива в окрестности выработок Второго калийного горизонта вследствие выемки сильвинитовых пластов Третьего калийного горизонта рассматривалась двухмерная расчетная схема (рис. 1), перпендикулярная движению очистного забоя лавы и соответствующая характерному для участка ЗРУ Старобинского месторождения геологическому разрезу. В модели явным образом учитывались глинистые контакты в перекрывающих породах, а также проходка транспортного штрека на Втором калийном горизонте. Глубина отработки составляла чуть менее 670 м; длина столба при первичной отработке составляла 120 м, а ширина междустолбового целика – 60 м. Для учета влияния последовательности отработки на изменение НДС и формирование нарушений в перекрывающих породах в модели использовался итерационный подход для имитации сначала первичной (слои 2, 2-3, 3) выемки, а затем и повторной отработки Третьего калийного горизонта, которая включала в себя выемку целиков и сильвинитового слоя 4. Каждый шаг итерационного процесса учитывал опускание-обрушение пород в выработанное пространство на предыдущем шаге.

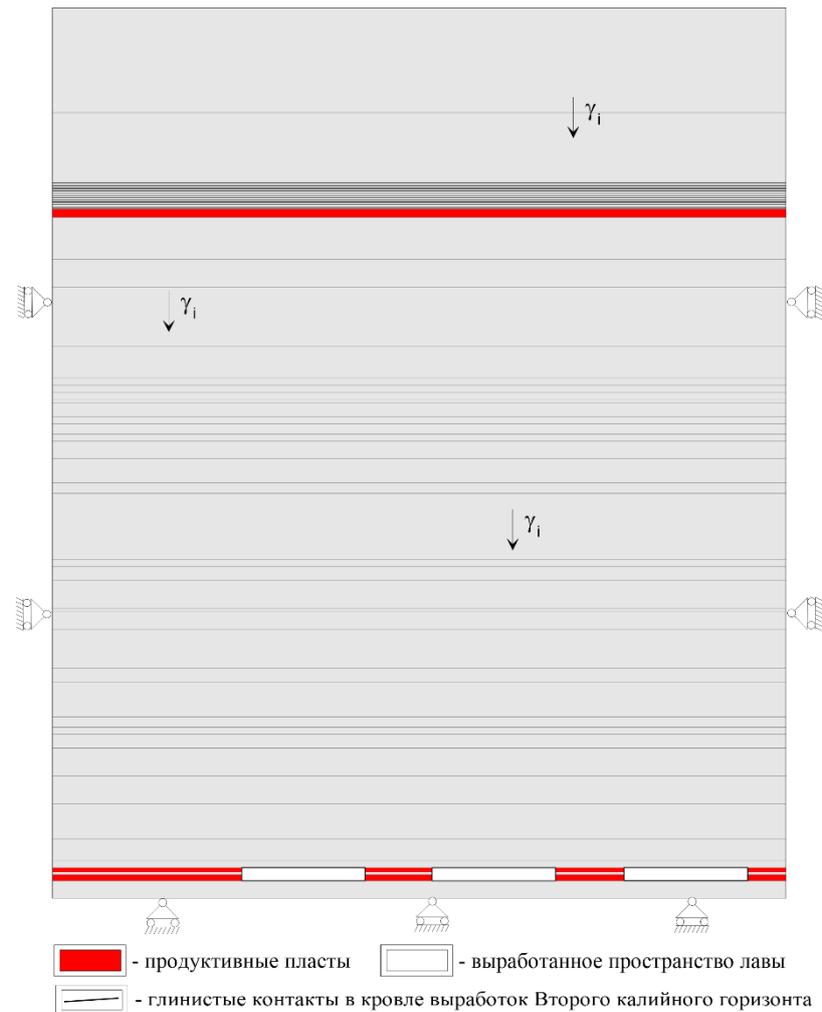


Рис. 1. Общая расчетная схема задачи

Использование такого итерационного подхода позволяет адекватно оценить изменение НДС в окрестности выработок Второго калийного горизонта, пройденных в процессе ведения повторной отработки Третьего горизонта.

Для определения НДС пород применялась модель идеальной упруго-пластичной среды с внутренним трением. В качестве условия пластичности в области сжатия использовалась параболическая огибающая кругов Мора [1]. Условием локализации пластических деформаций являлось выполнение равенства

$$\tau_{max} = \tau^* = \sqrt{(\sigma_p + \sigma) \left[ 2\sigma_p - 2\sqrt{\sigma_p(\sigma_p + \sigma_c) + \sigma_c} \right]}, \quad (1)$$

а в области растяжения –

$$\sigma_1 = \sigma_p, \quad (2)$$

где  $\tau_{max} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$  – максимальное касательное напряжение,  $\sigma = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$  – нормальное напряжение,  $\sigma_c$  – предел прочности на сжатие,  $\sigma_p$  – предел прочности на растяжение,  $\sigma_1, \sigma_3$  – главные напряжения, определяемые по результатам математического моделирования.

Зоны локализации пластических деформаций отождествлялись с процессами трещинообразования, соответственно за счет развития трещин сдвига и отрыва. Численное решение задачи осуществлялось по стандартной процедуре метода конечных элементов [2]. Для учета пластического характера деформирования пород использовался метод секущей матрицы [3].

Выход зоны действия растягивающих напряжений на обнажение [4] или достижение областью сдвиговой трещиноватости «раскрытого» глинистого контакта [5] принимались в качестве условий обрушения пород. Реализация этих критериев осуществлялась путем специальной организации вычислительного итерационного процесса.

Заполненное обрушенными из кровли лавы породами выработанное пространство рассматривалось в качестве новой техногенной геосреды и учитывалось в процессе математического моделирования.

Включенные в расчетную схему глинистые прослои моделировались контактными элементами Гудмана [6].

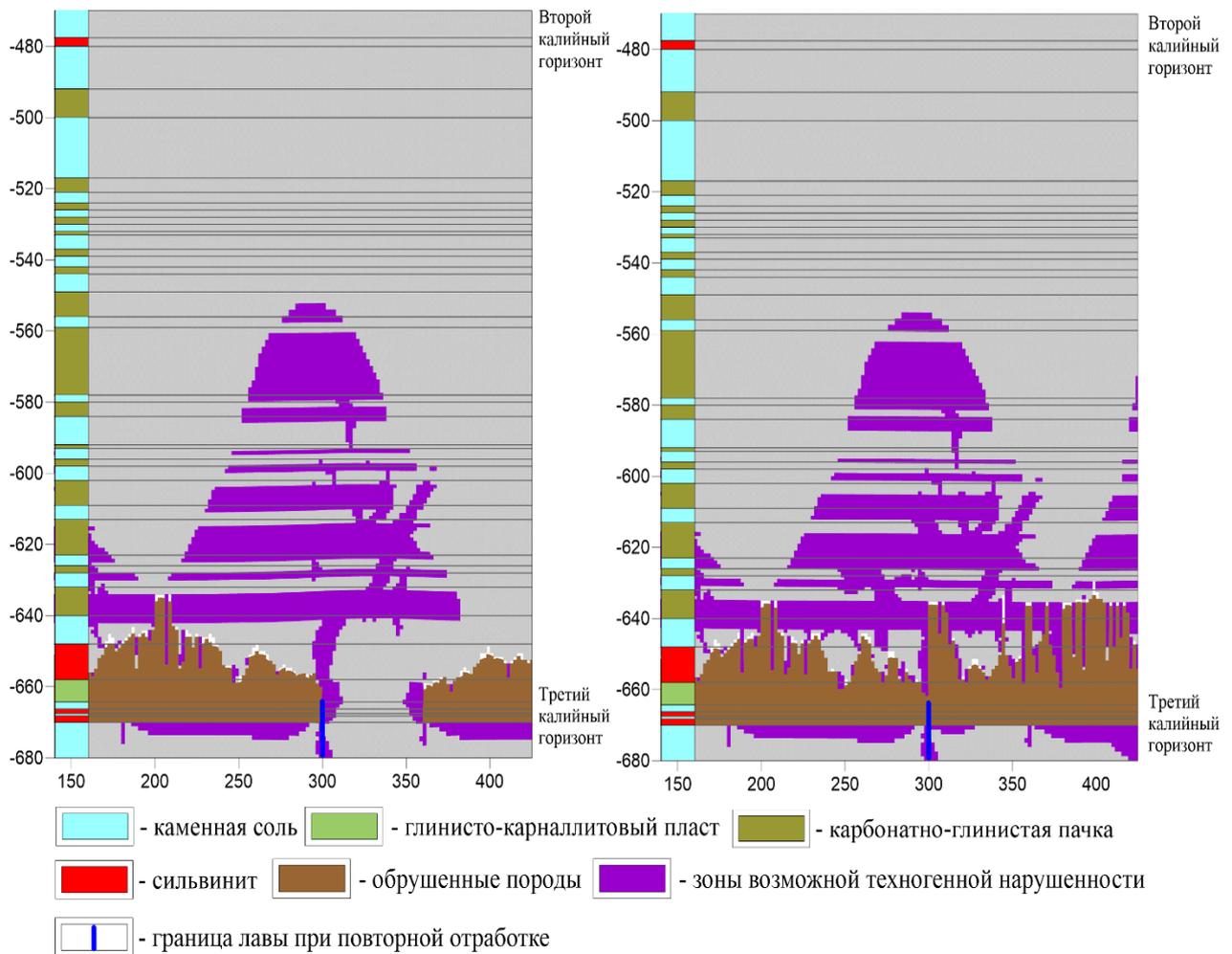
Определение физико-механических свойств соляных пород для Старобинского месторождения проводилось в [7] и [8]. При этом отмечалось значительное отличие результатов лабораторных испытаний от исследований в натуральных условиях [8]. Так, например, модули упругости соляных пород, определяемые в лабораторных условиях, на порядок превышают натурные оценки.

Для калибровки принятой модели на рассматриваемом участке использовались данные по конвергенции «кровля-почва» по результатам натуральных наблюдений на Втором калийном горизонте ЗРУ при продвижении фронта очистных работ. С целью достижения соответствия математической модели наблюдаемым процессам проводилось многовариантное моделирование, по результатам которого были определены механические свойства пород, при которых расчетные значения конвергенции «кровля-почва» составляют 14-15 мм, как было зафиксировано на абсолютном большинстве наблюдательных станций.

Свойства глинистых контактов принимались по данным лабораторных исследований [9].

Вследствие выемки сильвинитовых слоев 2, 2-3 и 3 на Третьем калийном горизонте в кровле выработанного пространства реализуются критические растягивающие и сдвиговые напряжения, которые, с учетом наличия глинистых прослоев, приводят к обрушению пород. Над выработанным пространством формируется «новая» кровля, вид которой в разрезе, перпендикулярном движению очистного забоя лавы, близок к арочной форме. При этом обрушенные породы заполняют выработанное пространство, что ведет к образованию нового техногенного пласта. Наиболее обширные области техногенной трещиноватости при этом формируются над охранными целиками, оставляемыми между лавами. Эти зоны нарушения пронизывают как карбонатно-глинистые пачки, так и пласты каменной соли, и простираются на 70 м вверх по разрезу.

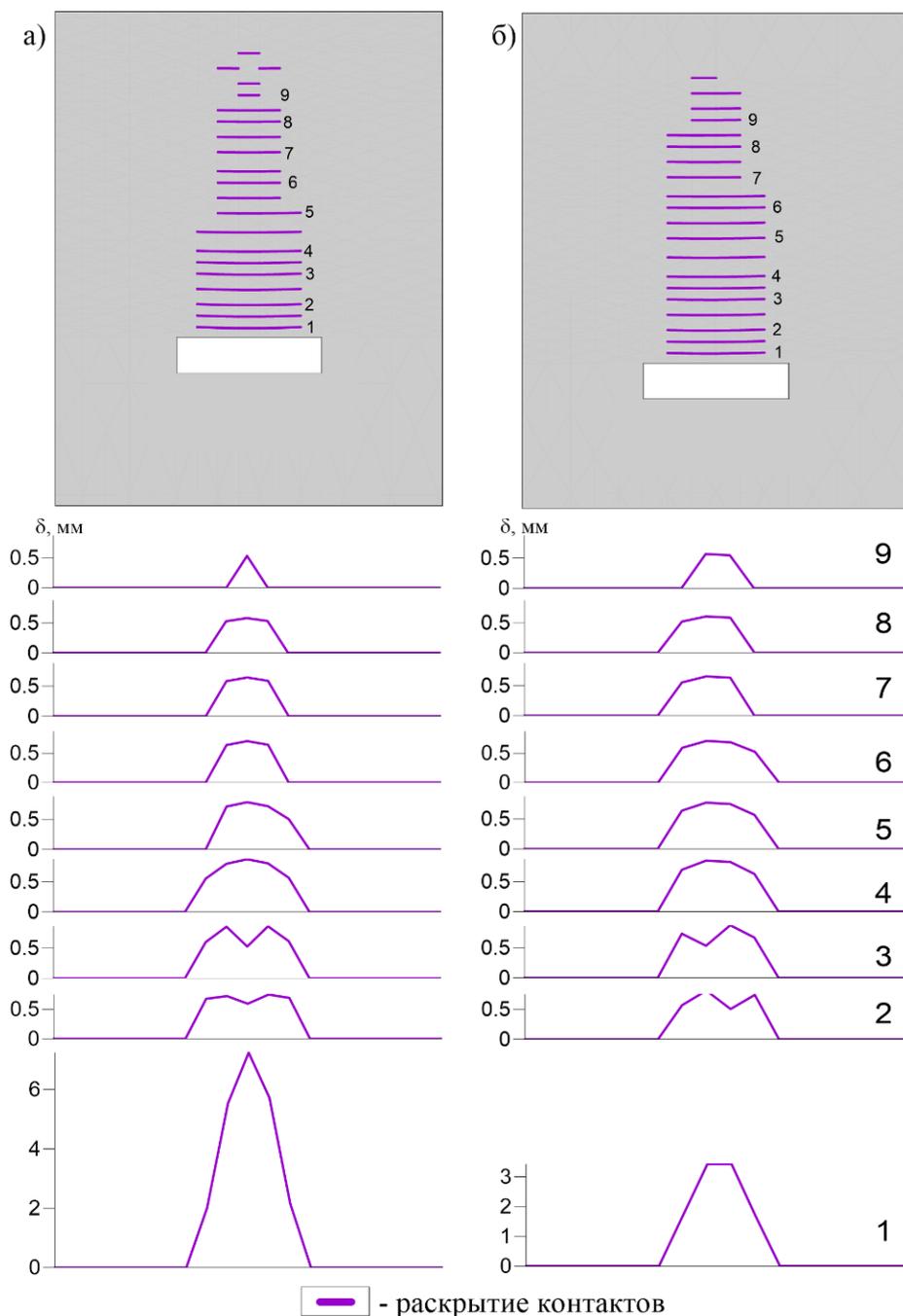
При выемке обрушенных или просевших в выработанное пространство пород 4 сильвинитового слоя, а также ранее оставленных в целиках сильвинитовых слоев 2, 2-3 и 3, процесс обрушения вышележащих пород демонстрирует сложный и неоднородный характер (рис. 2). Области техногенной нарушенности при этом могут распространяться на 100-120 м вверх по разрезу. Расслоение может происходить до высоты 70 м над выработанным пространством. После заполнения выработанного пространства обрушенными породами большинство раскрытых контактов закрывается.



**Рис. 2.** Характер разрушения породного массива в процессе повторной отработке

Результаты геомеханических расчетов показали незначительное влияние подработки Третьего калийного горизонта на раскрытие глинистых контактов в кровле выработок Второго горизонта (рис. 3). Характер и амплитуда расслоения после проходки камеры разворота (рис. 3а) практически не отличается от варианта отсутствия подработки по Третьему горизонту (рис. 3б). При этом качественный и количественный характер расслоения практически не зависит от положения камеры разворота относительно границы отработки на Третьем калийном горизонте.

Таким образом, согласно полученным результатам, в рассмотренных геологических и горнотехнических условиях (в первую очередь, вследствие значительной глубины проведения горных работ) отработка Третьего калийного горизонта оказывает незначительное влияние на изменение поля напряжений и нарушение сплошности массива, включая расслоение кровли выработок на уровне Второго калийного горизонта. В то же время, как показывает практика и различные исследования [10], существенное влияние на возможность реализации многоярусного ГДЯ может оказывать ширина пролета выработки. Поэтому для предотвращения обрушений пород кровли, сопровождающихся газовыделением, в выработках Второго калийного горизонта, отличающихся большей шириной по сравнению с другими подготовительными выработками, рекомендуется применение профилактической дегазации пород кровли.



**Рис. 3.** Амплитуды расслоения по глинистым контактам в кровле камеры разворота на Втором калийном горизонте в нетронutom (а) и подработанном (б) массиве

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Министерства образования и науки Пермского края в рамках проекта 20-45-596001 р\_НОЦ\_Пермский край и 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 122030100425-6)*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов Г.Н. Механические свойства горных пород. М.: Углетехиздат, 1947.
2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975.
3. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. М.: Недра, 1987.

4. Барях А.А. О механизме формирования карстовых провалов на земной поверхности / А.А. Барях, А.К. Федосеев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – № 4.–С. 12-22.
5. Барях А.А. Критерии и особенности разрушения слоистой кровли камер при разработке Верхнекамского месторождения калийных солей / А.А. Барях, А.Ю. Шумихина, В.Н. Токсаров, С.Ю. Лобанов, А.В. Евсеев // Горный журнал. – 2011. – № 11. – С. 15-19.
6. Goodman R.E. The mechanical properties of joints // Adv. Rock Mech. 1974. V.1, Pt A. P. 127-140.
7. Проскуряков Н.М. Исследование физико-механических свойств соляных пород Старобинского месторождения / Проскуряков Н. М., Антонов А. А., Ливенский В. С. // Записки Горного института. – 1972. – №61(1), 101.
8. Петровский А.Б. Физико-механические свойства пород, слагающих и перекрывающих третий калийный пласт Старобинского месторождения / Петровский А.Б., Прушак В.Я., Лутович Е.А. // ДОКЛАДЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ. – 2021. – Т. 65. № 4. – С. 484-494.
9. Барях А.А. Взаимодействие слоев в соляном массиве. Сообщение 1. Механические свойства контактов / А.А. Барях, И.Н. Дудырев, В.А. Асанов, И.Л. Паньков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1992. – № 2. – С. 7-11.
10. Барях А.А. Газодинамическое обрушение кровли при разработке месторождений калийных солей / Барях А.А., Андрейко С.С., Федосеев А.К. // Записки Горного института. – 2020. – №246. – С. 601-609.