

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ВЕЛИЧИНУ ПУЧЕНИЯ ПОЧВЫ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК КАЛИЙНЫХ ПЛАСТОВ НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ

Ковальский Е.Р.¹, Миронов Н.А.¹, Уразов Д.В.²

¹*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург;*

²*Филиал ООО «ПроТехИнжиниринг» – «Санкт-Петербург», Санкт-Петербург*

Ключевые слова: калийное месторождение, устойчивость горных выработок, смещение почвы горной выработки, соляной массив, глубокий рудник, физико-механические свойства, численное моделирование.

Аннотация. Работа посвящена оценке влияния горнотехнических и горно-геологических факторов на величину пучения почвы протяженной выработки, заложенной в соляном массиве. На основе численного моделирования определено относительное изменение пучения пород почвы выработки в зависимости от относительного изменения физико-механических (пределы прочности на растяжение разрабатываемого и подстилающего пластов; модули упругости разрабатываемого и подстилающего пластов), геомеханических (величина напряжений, действующих в массиве горных пород; направление главной горизонтальной компоненты напряжений), технологических (мощность защитной пачки до подстилающего пласта; ширина выработки) факторов. Произведена оценка и ранжирование факторов по значимости их влияния на исследуемый процесс. Установлена зависимость величины пучения от мощности защитной пачки. Предложены решения по снижению пучения почвы подготовительных выработок по наиболее значимым из выбранных параметров.

ON ACCOUNTING FOR FACTORS AFFECTING THE MAGNITUDE OF FLOOR HEAVE IN DEVELOPMENT WORKINGS WHEN MINING POTASH SEAMS AT GREAT DEPTHS

Kovalsky E.R.¹, Mironov N.A.¹, Urazov D.V.²

¹*Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg;*

²*Branch of ProTech Engineering LLC – St. Petersburg, Saint-Petersburg*

Keywords: potash deposit, mine workings stability or stability of underground excavations, floor heave, salt rock mass, deep mine, physical-mechanical properties, numerical modeling.

Abstract. This study focuses on assessing the impact of mine technical and geological conditions factors on the floor heave of a long mine workings in a salt rock mass. Numerical modeling was used to determine the relative change in floor heave depending on variations in physical-mechanical properties, including the tensile strength and elastic moduli of the mined and underlying beds; geomechanical conditions, such as the magnitude of the in-situ rock stress and the direction of the major horizontal stress component; and technological parameters, including the thickness of the protective layer above the underlying stratum and the excavation width. The factors were evaluated and ranked by the significance of their influence on the process under investigation. The dependence of the heave magnitude on the protective layer thickness was established, and solutions for reducing floor heave in development openings are proposed, targeting the most influential parameters.

Введение

При отработке глубокозалегающего продуктивного пласта калийного рудника Гремячинского ГОКа наблюдается существенное пучение почвы подготовительных выработок, пройденных по пласту, достигающее 1,5 м за первые 1-3 года эксплуатации [1].

Известные аналитические методы расчета величины пучения базируются на подходах и предположениях, которые можно разделить на две группы: 1) подходы, исходящие из представления о набухании пород почвы под действием влаги из-за содержания в них глинистых частиц; 2) гипотезы о течении вмещающих пластичных пород в результате действия горного давления [2]. Однако, труды, посвященные природе пучения пород почвы горных выработок, в большинстве своем основываются на исследованиях свойств горных пород и шахтных наблюдений в условиях Донецкого, Подмосковского угольных бассейнов

[3]. В результате, существующие методики оценки (прогноза) пучения почвы горных выработок дают существенно меньшие расчетные значения величины пучения, чем наблюдаются в натурных условиях калийно-соляных рудников; используют в расчетах эмпирические коэффициенты для конкретных угольных бассейнов/месторождений; предполагают наличие специфических граничных условий (определённые породы, малые глубины, виды крепления), свойственные угольным шахтам, что опять же не позволяет использовать их в расчетах для условий калийных пластов.

Материалы и методы исследований

Для оценки факторов, влияющих на пучение пород почвы, разработаны численные модели продуктивного сильвинитового пласта и вмещающих пород рудника Гремячинского ГОКа с пройденной по пласту протяженной подготовительной выработкой.

Реализация математической модели выполнена методом конечных элементов в постановке плоского деформированного состояния. Для имитирования склонности НДС МПП к интенсивной деформации принята упругопластическая модель среды [4].

В текущих исследованиях в целях выделения наиболее значимых влияющих факторов, исследуемая выработка рассматривалась как одиночная, при этом её размеры и форма сечения принимались в соответствии с габаритами проходческо-очистного комбайна «Урал-20Р». Горно-геологические условия являются типичными для панельных/блоковых выработок объекта исследования [5, 6]. Расчетная схема приведена на рисунке 1.

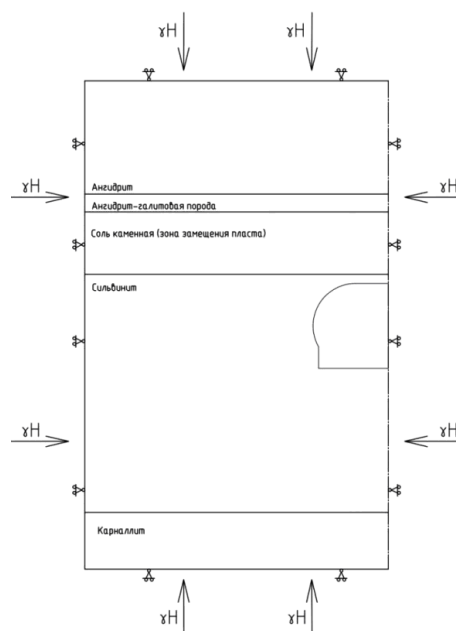


Рис. 1. Расчетная схема

В качестве оцениваемых факторов, влияющих на величину пучения почвы подготовительных выработок при отработке калийных пластов на больших глубинах, были выбраны следующие:

а) физико-механические – пределы прочности на растяжение разрабатываемого (сильвинитового) и подстилающего (карналлитового) пластов; модули упругости разрабатываемого и подстилающего пластов;

б) геомеханические – величина напряжений, действующих в массиве горных пород; взаимная ориентация выработки и направления действия главной горизонтальной компоненты напряжений (перпендикулярно/параллельно выработке) и её величина;

в) технологические – мощность защитной пачки в почве выработки до подстилающего пласта; ширина выработки.

Данные факторы варьировались в моделях в пределах 25% и 50% от средних значений в большую и меньшую сторону (табл. 1).

Табл. 1. Средние величины варьируемых параметров

Группа	Наименование параметра	Условное обозначение	Среднее значение
Физико-механические	Модуль упругости вмещающего пласта	E (сильвинита)	3500 МПа
	Модуль упругости подстилающего пласта	E (карналлита)	1000 МПа
	Предел прочности на растяжение вмещающего пласта	σ_p (сильвинита)	1,4 МПа
	Предел прочности на растяжение подстилающего пласта	σ_p (карналлита)	0,6 МПа

Табл. 1. Продолжение

Группа	Наименование параметра	Условное обозначение	Среднее значение
Технологические	Мощность защитной пачки до карналлита	m	6 м
	Ширина выработки	b	5,1 м
Геомеханические	Горизонтальная компонента напряжений, действующих перпендикулярно сечению выработки	σ_z	24 МПа
	Горизонтальная компонента напряжений, действующих параллельно длине выработки	σ_x	24 МПа
	Величина напряжений, действующих в массиве горных пород (граничные условия)	σ	24 МПа

Результаты

На рисунке 2 представлены графики относительного изменения пучения почвы в зависимости от относительного отклонения анализируемых влияющих факторов.

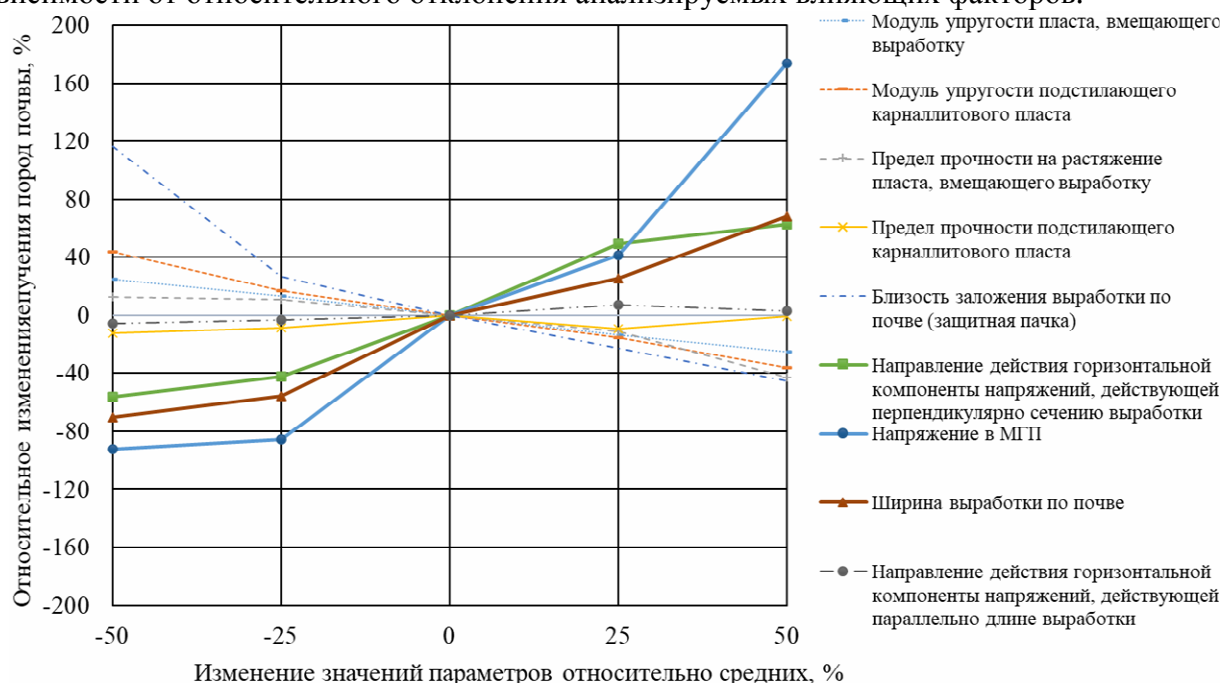


Рис. 2. График зависимости относительного изменения пучения пород почвы от относительного отклонения факторов, влияющих на процесс пучения

По степени влияния на исследуемый процесс можно выделить три группы факторов:

- низкая степень влияния (изменение влияющего фактора на 25% приводит к изменению относительной величины пучения менее, чем на 25%): пределы прочности на растяжение разрабатываемого и подстилающего пластов; величина горизонтальной компоненты напряжений, действующей параллельно длине выработки;
- средняя степень влияния (изменение влияющего фактора на 25% приводит к изменению относительной величины пучения на 25-50%): ширина выработки;
- высокая степень влияния (изменение влияющего фактора на 25% приводит к изменению относительной величины пучения более, чем 50%): модули упругости разрабатываемого и подстилающего пластов; уровень напряженного состояния массива горных пород (граничные условия); величина горизонтальной компоненты напряжений, действующей перпендикулярно длине (сечению) выработки; мощность защитной пачки в почве выработки до слоя карналлитовых пород.

Обсуждение результатов

Выбор технологических решений по снижению величины пучения подготовительных выработок следует направлять на нивелирование факторов со средней и высокой степенью влияния на процесс пучения.

Модуль упругости. Деформационные свойства соляных пород рудника Гремячинского ГОКа (сильвинитового пласта и подстилающего карналлита) достаточно низкие, однако в разрезе соленосной толщи в окрестности продуктивного пласта присутствуют мощные слои скальных пород (ангидрит, ангидрит-доломит) со средними значениями модуля упругости 12000-20000 МПа. Заложение подготовительных выработок в таких породах позволит повысить устойчивость выработок по данному фактору. Схема с проведением выработок выше рабочего пласта описана в работе [7].

Направление горизонтальной компоненты напряжений, действующей перпендикулярно сечению выработки. В пределах шахтного поля рудника Гремячинского ГОКа выделяются тектонические особенности строения пласта (флексуры, участки поднятия пласта до 40 градусов, складчатые структуры), вследствие чего на трассах выработок наблюдаются локальные участки нарушения устойчивости, приходящиеся на окрестности замков геологических нарушений (концентраторов напряжений). Опыт поддержания выработок на руднике показывает, что интенсивность проявления горного давления в таких зонах может иметь разный характер в зависимости от направления проходки выработки. Детальная оценка влияния складчатости на состояние подготовительных выработок требует дополнительных исследований с использованием компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород [8].

Ширина выработок. В условиях уже сложившейся инфраструктуры рудника и имеющегося парка оборудования уменьшение ширины подготовительных выработок с целью снижения величины пучения их почвы является достаточно затратным и неэффективным мероприятием.

Мощность защитной пачки. Основным способом решения проблемы пучения пород почвы подготовительных выработок на руднике является оставление защитных пачек полезного ископаемого в почве.

На основе созданных моделей для характерных (средних) условий эксплуатации выработок рудника Гремячинского ГОКа была построена зависимость смещений почвы Δ от мощности m оставляемого сильвинита (рис. 3), которая в исследуемом диапазоне аппроксимируется зависимостью

$$\Delta = \frac{2,4721}{m}, \quad (1)$$

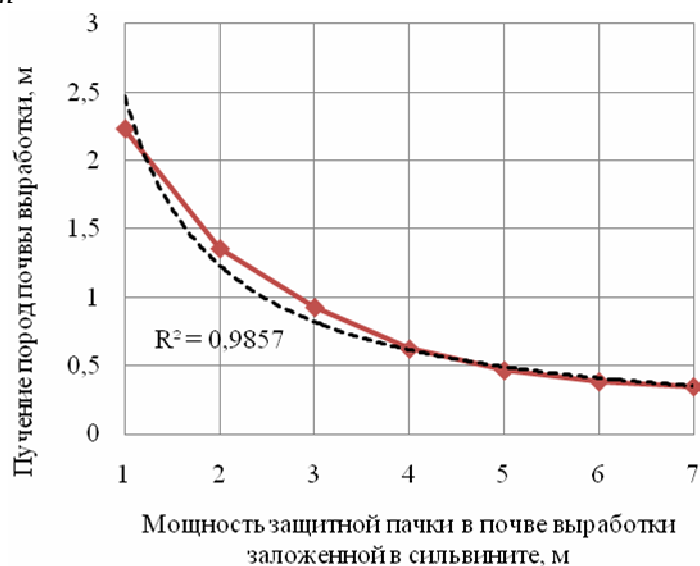


Рис. 3. Зависимость пучения почвы от мощности защитной пачки

Следует отметить, что мощность пласта по шахтному полю рудника Гремячинского ГОКа варьируется от 2 до 20 м, в среднем составляя 9 м. Из графика видно, что даже при существенных мощностях защитной пачки пучение почвы выработок составляет величины порядка 0,5 м, что значительно затрудняет их эксплуатацию. Данная расчетная зависимость подтверждается опытом эксплуатации выработок на руднике, где, во-первых, не всегда удается оставить защитную пачку достаточных размеров из-за вариаций мощности пласта, а во-вторых, даже при больших размерах защитных пачек состояние выработок является неудовлетворительным.

Величина напряжений, действующих в массиве горных пород. Гремячинское месторождение характеризуется большой глубиной залегания продуктивного пласта (порядка 1100 м) и, как следствие высокими значениями природного поля напряжений. Под влиянием данного фактора, а также в силу вязкопластического характера деформирования соляных пород, в окрестности подготовительных выработок развиваются существенные деформации (рис. 4).



Рис. 4. Поле векторов смещений в окрестности одиночной горной выработки (а) и пример деформаций в выработке Гремячинского ГОКа (б)

В целях изменения напряжённого состояния массива пород может быть применен способ охраны в виде нарезки компенсационных щелей по периметру выработок [9, 10]. Однако, высокие скорости смещений (1,5 мм/сут) породного контура выработок рудника влекут за собой необходимость постоянного восстановления сечения нарезаемых щелей. Возможным вариантом снижения интенсивности напряженно-деформированного состояния массива может являться увеличение размеров компенсационных полостей.

Выводы

В работе оценена степень влияния физико-механических (пределы прочности на растяжение вмещающего и подстилающего пластов, модули упругости разрабатываемого и подстилающего пластов), геомеханических (величина напряжений, действующих в массиве горных пород; направление и величина главной горизонтальной компоненты напряжений), технологических (мощность защитной пачки до карналлита, ширина выработки) факторов на величину пучения почвы в выработке.

Установлено, что к числу наиболее влияющих факторов относятся модули упругости разрабатываемого и подстилающего пластов; напряжения в МГП; величина горизонтальной компоненты напряжений, действующей перпендикулярно сечению выработки; уровень напряженного состояния (граничные условия), а также мощность защитной пачки до слоя «слабых» карналлитовых пород.

Показано, что в условиях рудника Гремячинского ГОКа текущие мероприятия по снижению пучения почвы подготовительных выработок, заключающиеся в оставлении защитной пачке полезного ископаемого, характеризуются низкой эффективностью и не

смогут обеспечить приемлемого эксплуатационного состояния подготовительных выработок на всём сроке их эксплуатации. Дальнейшее изыскание способов обеспечения эксплуатационного состояния выработок должно быть направлено на обоснование способов заложения подготовительных выработок вне продуктивного пласта во вмещающих крепких породах; изменения ориентации выработок относительно складчатости, где это позволяют условия разработки; поиск способов перераспределения напряжений в окрестности комплекса выработок.

Список литературы

1. Токсаров В.Н., Морозов И.А., Бельтюков Н.Л., Ударцев А.А. Исследование деформирования подземных горных выработок в условиях Гремячинского месторождения калийных солей // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – №7. – С. 113-124. – doi.org/10.25018/0236-1493-2020-7-0-113-124.
2. Кузьмин С.В., Сальвассер И.А. Факторы и классификационные признаки, определяющие пучение // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2014. – №3(103). – С. 43-45.
3. Черняк И.Л. Предотвращение пучения почвы горных выработок. – М.: Недра, 1978. – 237 с.
4. Барях А.А., Девятков С.Ю., Денкевич Э.Т. Математическое моделирование развития процесса сдвижения при отработке калийных руд длинными очистными забоями // Записки Горного института. – 2023. – Т. 259. – С. 13-20. – doi.org/10.31897/PMI.2023.11.
5. Токсаров В.Н., Поляков И.В., Бельтюков Н.Л., Лифшиц Е.Л., Морозов И.А. Напряженное состояние породного массива в условиях Гремячинского калийного месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – №1. – С. 100-113. – doi.org/10.25018/0236_1493_2025_1_0_100.
6. Андрейко С.С., Нестерова С.Ю. Природа внезапных разрушений приконтурной части массива при проходке подготовительных выработок в руднике Гремячинского горно-обогатительного комбината // Недропользование. – 2022. – Т. 22, №3. – С. 144-150.
7. Ковальский Е.Р., Миронов Н.А., Уразов Д.В., Мусинский Н.А. Оценка возможных способов заложения капитальных выработок на глубоких горизонтах проектируемого калийного рудника Западно-Петриковского месторождения // Устойчивое развитие горных территорий. – 2025. – Т. 17, №2. – С. 1033-1045. – doi.org/10.21177/1998-4502-2025-17-2-1033-1045.
8. Сидоренко А.А., Мисливский Д.Г., Береснев А.С. Обоснование эффективных технологических решений отработки шахтных полей и их участков сложной конфигурации // Развитие современной науки и образования: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей VII Международной научно-практической конференции, Пенза, 25 марта 2023 года. – Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2023. – С. 120-122.
9. Казанин О.И., Сидоренко А.А., Ильинец А.А., Васильев В.Ф. Численные исследования пучения почвы штреков при применении разгрузочных щелей на шахте "Талдинская-Западная 2" // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2018. – №3. – С. 179-187.
10. Петровский Б.И., Мисников В.А., Ерохин К.А., Петровский А.Б. Поддержание подготовительных выработок в сложных горно-геологических условиях Старобинского месторождения // Горный журнал. – 2020. – №11. – С. 26-32. – doi.org/10.17580/gzh.2020.11.02.

References

1. Toksarov V.N., Morozov I.A., Beltyukov N.L., Udartsev A.A. Deformation of underground excavations under conditions of the Gremyachinsk potassium salt deposit // Mining Informational and Analytical Bulletin. 2020, vol. 7, pp. 113-124. doi.org/10.25018/0236-1493-2020-7-0-113-124.
2. Kuzmin S.V., Salvasser I.A. Factors and classification evidences determining rock heaving // Bulletin of Kuzbass State Technical University. 2014, vol. 3, no. 103, pp. 43-45.
3. Chernyak I.L. Prevention of heaving of the soil of mine workings. – M.: Nedra, 1978. – 237 p.
4. Baryakh A.A., Devyatkov S.Yu., Denkevich E.T. Mathematical modelling of displacement during the potash ores mining by longwall faces // Journal of Mining Institute. 2023, vol. 259, pp. 13-20. doi.org/10.31897/PMI.2023.11.
5. Toksarov V. N., Polyakov I. V., Beltyukov N. L., Lifshic E. L., Morozov I. A. Rock mass stress state at the Gremyachinskoe potassium deposit // Mining Informational and Analytical Bulletin. 2025, no. 1, pp. 100-113. doi.org/10.25018/0236_1493_2025_1_0_100.
6. Andreiko S.S., Nesterova S.Yu. The nature of sudden destruction of the near-contour part of the massif during the driving of development workings in the mine of the Gremyachinsky mining and processing plant // Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering. 2022, vol. 22, no. 3, pp.144-150.
7. Kovalsky E.R., Mironov N.A., Urazov D.V., Musinsky N.A. Assessment of potential methods for driving main developments at deep levels of the designed Zapadno-Petrikovskoye potash mine deposit // Sustainable Development of Mountain Territories. 2025, vol. 17, no. 2, pp. 1033-1045. doi.org/10.21177/1998-4502-2025-17-2-1033-1045.
8. Sidorenko A.A., Mislivsky D.G., Beresnev A.S. Justification of effective technological solutions of mining of mine fields and sections with complex configuration // Development of modern science and education: current issues,

achievements and innovations: collection of articles of the VII International Scientific and Practical Conference, Penza, March 25, 2023. – Penza: Science and Education (IP Gulyaev G.Yu.), 2023. – P. 120-122.

9. Kazanin O.I., Sidorenko A.A., Ilinets A.A., Vasiliev V.F. Numerical studies of the entries floor heavewhile using relieve slots in the mine "Taldinskaya-Zapadnaya 2" // News of the Tula State University. 2018, vol. 3, pp. 179-187.
10. Petrovsky B. I., Misnikov V. A., Erokhin K. A., Petrovsky A. B. Stability of development drifts in difficult geological conditions of Starobin deposit // Mining Journal. 2020, vol. 11, pp. 26-32. doi.org/10.17580/gzh.2020.11.02.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Ковальский Евгений Ростиславович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры разработки месторождений подземным способом	Kovalsky Evgeny Rostislavovich – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of underground mineral deposit development
Миронов Никита Артурович – аспирант	Mironov Nikita Arturovich – postgraduate student
Уразов Денис Владимирович – кандидат технических наук, начальник Управления горного проектирования	Urazov Denis Vladimirovich – candidate of technical sciences, head of the mining engineering Department
mironov_na@pers.spmi.ru	

Получена 09.12.2025