

Статья посвящена столетию со дня рождения видного советского и российского ученого в области горных наук, заслуженного деятеля науки РФ, доктора технических наук, профессора Михаила Абрамовича Иофиса.

The article is dedicated to the centenary of the birth of Mikhail Abramovich, a prominent Soviet and Russian scientist in the field of mining sciences, Honored Scientist of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor Iofis.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

SCIENTIFIC ARTICLE

УДК 622.834

DOI: 10.56195/20793332_2024_4_9_14

АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ОСТАВЛЯЕМЫХ ЦЕЛИКАХ ПРИ ОСВОЕНИИ КАЛИЙНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ ЗАЛЕГАНИЯ

А. В. Гришин

ООО «Научно-внедренческая компания «Горная геомеханика» (ООО «НБК «Горгеомех»), г. Москва, Россия

Аннотация: Изложен способ, позволяющий применять камерно-целиковую систему разработки при освоении калийных месторождений на больших глубинах под водоносными горизонтами. Приведены результаты анализа проводимых натурных наблюдений за деформациями оставляемых опорных и междукammerных целиков на калийном руднике глубокого заложения.

Ключевые слова: опорный целик, репер, наблюдения, междукammerный целик, деформация, степень нагружения

Для цитирования: Гришин А. В. Анализ развития деформационных процессов в оставляемых целиках при освоении калийных месторождений на больших глубинах залегания // Маркшейдерия и недропользование. 2024. № 4. С. 9-14. https://doi.org/10.56195/20793332_2024_4_9_14.

ANALYSIS OF THE DEVELOPMENT OF DEFORMATION PROCESSES IN THE ABANDONED TSELIKAS DURING THE DEVELOPMENT OF POTASH DEPOSITS AT GREAT DEPTHS OF OCCURRENCE

A. V. Grishin

LLC Research and Development Company "Mining Geomechanics" (LLC R&D company "Gorgeomeh"), Moscow, Russian Federation

Abstract: The article describes a method that allows the use of a chamber-whole mining system for the development of potash deposits at great depths under aquifers. The results of the analysis of field observations of deformations of the left support and inter-chamber pillars at a deep-laid potash mine are presented.

Keywords: support target, reference point, observations, inter-chamber target, deformation, degree of loading

For citation: Grishin A. V. Analysis of the development of deformation processes in the abandoned tselikas during the development of potash deposits at great depths of occurrence. Mine Surveying and Subsoil Use. 2024;(4):9-14. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2024_4_9_14.

Введение

Истощение запасов калийных солей, расположенных в более доступных горно-геологических условиях: на относительно небольших глубинах залегания (до 500 метров), вызывает необходимость вовлекать в разработку участки месторождений, расположенные на больших

глубинах залегания, в более сложных горно-геологических условиях [1–3]. Переход на большие глубины ведения горных работ влечет за собой пересмотр подходов по управлению горным давлением с целью обеспечения безопасного и эффективного освоения недр.

При освоении калийных месторождений самой распро-

страненной системой разработки как в нашей стране, так и за рубежом является камерная система с оставляемыми, или покидаемыми, целиками. Особенно такая система разработки незаменима, когда возникает необходимость сохранения водозащитной толщи пород при производстве горных работ под водоносными горизонтами. Такая система достаточно проста в реализации, но в то же время имеет недостатки, самый значительный — большие потери полезного ископаемого, оставляемого в целиках. Причем с увеличением глубины ведения горных работ эти потери могут существенно возрастать за счет увеличения размеров оставляемых целиков. Поэтому основной задачей освоения калийных месторождений на больших глубинах является недопущение увеличения уровня потерь полезного ископаемого, сложившегося при освоении месторождений на небольших глубинах залегания, а по возможности их сокращения.

При камерной системе разработки на небольших глубинах залегания пласта расчет параметров целиков производился по методу академика Л. Д. Шевякова (в различных интерпретациях), согласно которому междукammerные целики оставляются по всему шахтному полю одинаковыми. Размеры этих целиков рассчитываются на восприятие давления от веса горных пород, залегающих выше разрабатываемого пласта до земной поверхности. Однако, как отмечал акад. Л. Д. Шевяков, данный метод был обоснован для относительно малых глубин ведения горных работ (до 500 м) и небольших площадей отработки полезного ископаемого [4]. Поэтому применение данного метода в современных условиях ведения горных работ на больших глубинах и с большой площадью отработки необоснованно и приведет к увеличению потерь полезного ископаемого за счет увеличения размеров междукammerных целиков.

Для решения данной проблемы под руководством академика К. Н. Трубецкого профессором М. А. Иофисом с учениками был предложен способ, позволяющий применять камерно-целиковую систему разработки в указанных условиях, направленный на обеспечение безопасности ведения горных работ и снижения потерь полезного ископаемого [5, 6].

Практикой горного дела установлено, что на часть полезного ископаемого, находящуюся между двумя параллельными выработками (предполагается, что влияние от других выработок отсутствует), давит не весь объем горных пород, находящийся над ним, а лишь часть его, ограниченная некоторым сводом [7–12]. Поэтому при реализации камерной системы разработки нагрузка на междукammerные целики, равная весу вышележащих пород, происходит не сразу, а лишь по достижении площади полной подработки. Другими словами, размеры выработанного пространства должны быть сопоставимы с величиной глубины горных работ или превышать ее (условия полной подработки).

Также необходимо отметить, что при достижении полной подработки максимальное давление будут испытывать целики, расположенные в центре выработанного пространства. Целики, расположенные на периферийных участках отработанного шахтного поля, будут испытывать меньшее давление, так как часть нагрузки от вышележащего массива удерживается еще не отработанными породами, которые в это время будут испытывать дополнительное «опорное давление».

На основе выявленных закономерностей творческим коллективом проф. М. А. Иофиса под руководством академика РАН К. Н. Трубецкого был предложен подход по изменению параметров камерной системы разработки для

обеспечения возможности эффективного и безопасного ее применения на глубоких горизонтах при освоении калийных месторождений [13]. Принцип предложенного подхода заключался в том, что для снижения нагрузок на междукammerные целики в условиях больших глубин необходимо не допускать полной подработки массива. Тогда нагрузка на целик будет передаваться не от всей толщи вышележащих пород (до земной поверхности), а лишь от той ее части, которая ограничена сводом равновесия (рис. 1).

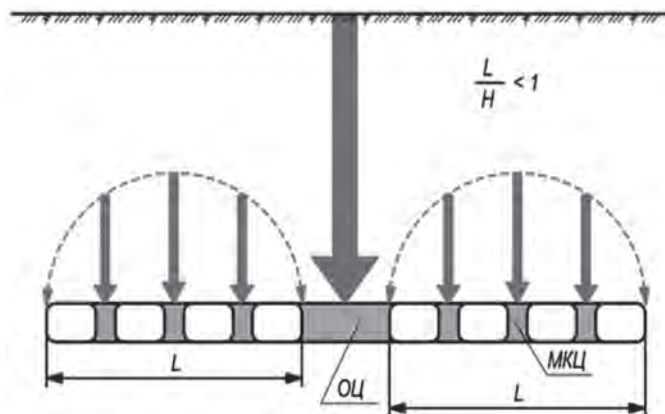


Рис. 1. Нагрузка на опорный и междукammerные целики
Fig. 1. Load on the support and inter-chamber pillars

Отсутствие полной подработки достигается за счет оставления так называемых опорных целиков между отработываемыми блоками. Параметры опорных целиков рассчитываются на восприятие нагрузки от веса вышележащих горных пород от кровли отработываемого пласта до земной поверхности, причем с некоторым запасом, зависящим от величины опорного давления, оказываемого на рассматриваемый целик. Таким образом, за счет введения опорных целиков в камерную систему отработки образуется своеобразный «каркас», воспринимающий на себя нагрузку вышележащей толщи пород и разделяющий шахтное поле на участки с неполной подработкой. В пределах таких участков параметры междукammerных целиков рассчитываются не на весь столб пород, а только на его часть, ограниченную сводом равновесия, что повышает извлечение полезного ископаемого на больших глубинах залегания по сравнению с оставлением равноразмерных целиков.

Указанная методика управления горным давлением на больших глубинах была принята для освоения Гермьинского и Нивенского месторождений калийных солей.

Цель работы: анализ развития деформационных процессов в оставляемых целиках при освоении калийных месторождений на больших глубинах залегания.

Методика исследований

Для определения деформаций опорных и междукammerных целиков на разных участках рудника были заложены наблюдательные станции, состоящие из контурных и глубинных реперов. Контурный репер станции предназначен для измерения смещений контуров горных выработок, расположенных на противоположных сторонах целика. Глубинные реперы предназначены для измерения смещений породного массива на определенной от контура выработки глубине. Наблюдения проводились при помощи высокоточных маркшейдерских измерений, в результате которых определялись планово-высотные положения деформационных реперов.

По данным инструментальных измерений вычислялись величины деформаций наблюдаемых целиков.

Результаты исследований и их обсуждение

Из данных натурных наблюдений за сдвижением контуров опорных (ОРЦ) и междукammerных (МКЦ) целиков можно заключить, что рассмотренные целики деформировались по-разному.

Зависимость изменения абсолютных деформаций опорных и междукammerных целиков от времени (абсолютная деформация) приведена на рисунке 2.

Зависимость изменения относительных деформаций опорных и междукammerных целиков от времени (относительная деформация) — на рисунке 3.

Из полученных зависимостей видно, что скорость деформирования опорных целиков характеризуется как затухающая ползучесть, а деформирование междукammerных целиков — установившаяся ползучесть. Это может свидетельствовать о том, что целики в период наблюдения не превысили предела длительной прочности и соответствуют степеням нагружения $0,3 \sigma_{сж}$ и $0,4 \sigma_{сж}$ соответственно [14].

Для определения деформирования горных пород внутри целика проводились измерения сдвижений глубинных реперов, размещенных внутри наблюдательной скважины, пробуренной в целике. Наблюдательные скважины оборудовались в опорных целиках, ширина которых составляла 30 м.

Глубинные реперы размещались на расстоянии l_n от устья наблюдательной скважины (рис. 4). В процессе проведения наблюдений определялись координаты глубинных реперов и расстояние между смежными реперами.

По результатам проведенных измерений были получены зависимости смещений точек массива от времени при различном удалении точки от контура выработки для каждой наблюдательной скважины (рис. 5).

По данным натурных измерений, проводимых в опорных целиках, было установлено, что деформации внутри целиков распределены неравномерно. Деформированию подвержены только законтурные зоны на глубину не более 4 метров, в центральной части целика какие-либо деформации не зафиксированы. Величина деформирования массива в установленных законтурных зонах также распределяется неравномерно. Наибольшие относительные деформации зафиксированы на глубине 2 метра от контура целика и составляют в среднем величину $12 \cdot 10^{-3}$, а в последующие два метра — $6 \cdot 10^{-3}$ и далее затухают, находясь в пределах точности измерения. При зафиксированных величинах деформаций расслоения законтурного массива не наблюдалось. Данные величины деформаций были получены за период наблюдений, который составил в среднем 0,5 года. Нарушения целостности законтурного массива наблюдались при относительных деформациях, близких к величине $20 \cdot 10^{-3}$ при расстоянии между реперами два метра.

По результатам данных натурных наблюдений за деформированием породного массива внутри целиков выделены несколько областей (зон), отличающихся уровнем деформационного воздействия (рис. 6):

— область обрушения — характеризуется наличием трещин, образующих поверхности отрыва, отслоения горных пород от целика, в пределах этой зоны происходит обрушение законтурных пород целика;

— область возникновения трещин — характеризуется деформациями горных пород, способными вызывать нарушение их целостности, но без образования поверхностей потенциального обрушения;

— область плавных деформаций — характеризуется деформированием горных пород без нарушения их целостности;

— область не равнокомпонентного деформирования — характеризуется отсутствием растягивающих деформаций, деформирование внутри данной области происходит за счет перераспределения внутренней структуры массива (уплотнения), породы в пределах этой зоны обладают существенно повышенными прочностными характеристиками (по сравнению с краевыми зонами) и определяют устойчивость целика.

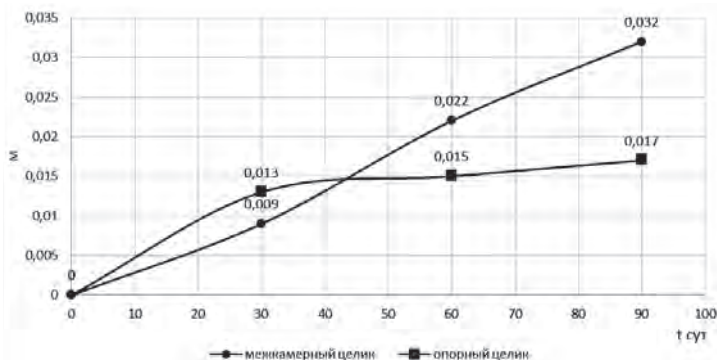


Рис. 2. Изменения ширины опорных и междукammerных целиков (абсолютная деформация) во времени

Fig. 2. Changes in the width of the support and inter-chamber pillars (absolute deformation) over time

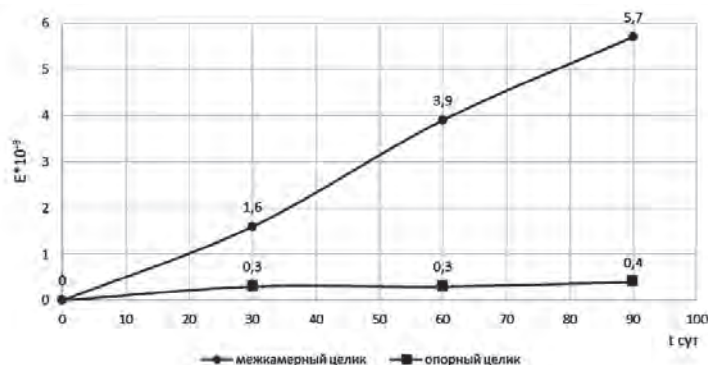


Рис. 3. Изменения относительных деформаций опорных и междукammerных целиков (относительная деформация) во времени

Fig. 3. Changes in the relative deformations of the support and inter-chamber pillars (relative deformation) over time

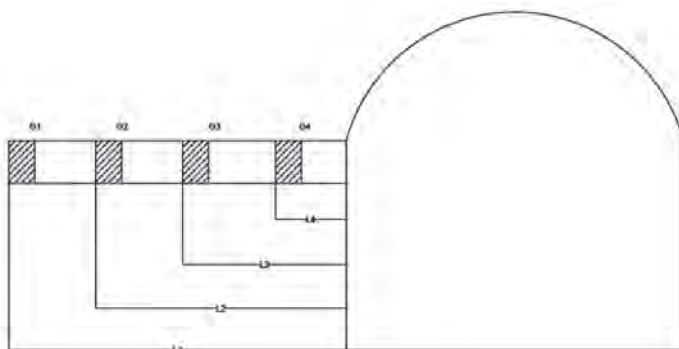


Рис. 4. Схема размещения глубинных реперов

в наблюдательной скважине на расстоянии $l_4 = 0$ м; $l_3 = 2$ м; $l_2 = 4$ м; $l_1 = 6$ м

Fig. 4. The layout of the deep reference points in the observation well at a distance of $l_4 = 0$ m; $l_3 = 2$ m; $l_2 = 4$ m; $l_1 = 6$ m

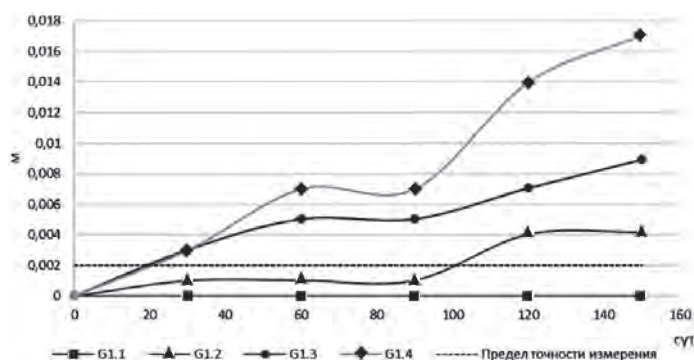


Рис. 5. Зависимости смещений ΔU_n точек массива в окрестностях экспериментальных горных выработок от времени t при различном удалении l точки от контура выработки: G4 – $l = 0$ м; G3 – 2 м; G2 – 4 м; G1 – 6 м

Fig. 5. The dependences of the displacements ΔU_n of the points of the massif in the vicinity of experimental mine workings on time t at different distances of the l point from the contour of the workings: G4 – $l = 0$ m; G3 – 2 m; G2 – 4 m; G1 – 6 m

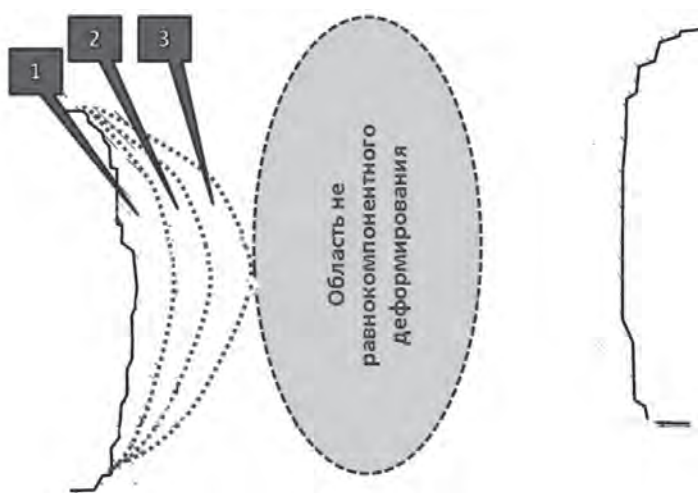


Рис. 6. Области (зоны) деформирования целика: 1 – область обрушения; 2 – область возникновения трещин; 3 – область плавных деформаций

Fig. 6. Areas (zones) of deformation of the whole: 1 – the area of collapse; 2 – the area of cracks; 3 – the area of smooth deformations

По своему размеру установленные зоны могут меняться. На рассматриваемый период наблюдений размеры зон (в среднем) для опорных целиков составляют: область обрушения – 0,3 м; область возникновения трещин – 1,5 м; область плавных деформаций – 2 м.

Величины зон деформирования внутри междукammerных целиков установить пока не удалось, т. к. не были оборудованы наблюдательные скважины в теле целиков. Поэтому деформации междукammerных целиков оценивались только по сдвигению стенок (контуров) целика, результаты которых приведены ранее. По данным наблюдений за деформациями междукammerных целиков можно характеризовать, что законтурный массив в целике может находиться в нарушенном состоянии в пределах установленных зон, некоторые нарушения были зафиксированы при визуальном обследовании выработок (зона обрушений). Если оценивать устойчивость целика по визуальным наблюдениям, то можно характеризовать, что степень его

нагружения находится на допредельной части кривой деформирования и примерно соответствует $0,4-0,5 \sigma_{сж}$.

Другим способом оценки степени нагружения целиков является измерение величин оседания земной поверхности на подработанной территории.

Необходимо отметить, что за более чем 30-летний период наблюдений за оседанием земной поверхности в различных условиях отработки Верхнекамского месторождения было установлено, что если оседание земной поверхности происходит с постоянной скоростью, не выходящей за пределы 15 мм/год, то такой характер сдвижения относится к горнотехническим условиям разработки с расчетным нагружением междукammerных целиков $C \leq 0,4$ [15].

По данным наблюдений за сдвижением земной поверхности, на участках, где была достигнута полная ее подработка, средняя скорость оседания на текущий период составляет 9,2 мм/год. Что может характеризовать общее устойчивое состояние выбранной системы разработки.

Заключение

Представлена первичная информация о процессе деформирования целиков и законтурного массива во времени (период наблюдений – 0,5 года), в результате которой можно сделать следующие выводы:

- скорость деформирования опорных целиков характеризуется как затухающая ползучесть, а деформирование междукammerных целиков – установившаяся ползучесть, целики в период наблюдения не превысили предела длительной прочности и соответствуют степеням нагружения $0,3 \sigma_{сж}$ и $0,4 \sigma_{сж}$ соответственно;
- деформации опорных целиков распределены неравномерно внутри целика. Деформированию подлежат только законтурные зоны на глубину 4 метра, в центральной части целика деформации не зафиксированы. По результатам наблюдений выделены характерные зоны деформирования целика;
- наблюдения, проводимые за сдвижением земной поверхности в зоне влияния горных работ, также подтверждают установленный характер деформирования целиков в выработанном пространстве.

Выводы

1. В представленной статье систематизированы сведения, полученные в результате проведения натурных наблюдений при реализации камерной системы разработки с оставляемыми опорными и междукammerными целиками.
2. Полученные результаты могут свидетельствовать, что предложенный творческим коллективом проф. М. А. Иофиса и под руководством академика РАН К. Н. Трубецкого подход по изменению параметров камерной системы разработки для ее применения на глубоких горизонтах при освоении калийных месторождений направлен на повышение коэффициента извлечения полезного ископаемого при обеспечении должного уровня деформаций водозащитной толщи пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Baryakh, A. A.* Deformations and fracture of rock strata during deep level potash mining / A. A. Baryakh, A. K. Fedoseev, S. Yu. Lobanov // *Procedia Structural Integrity*. — 2021. — Vol. 32. — P. 109–116.
2. *Seifi, C.* Solution procedures for block selection and sequencing in flat-bedded potash underground mines / C. Seifi, M. Schulze, J. Zimmerman // *OR Spectrum*. — 2021. — Vol. 43. — P. 409–440.
3. *Zubov, V. P.* Technologies of intensive development of potash seams by longwall faces at great depths: current problems, areas of improvement / V. P. Zubov, D. G. Sokol // *Journal of Mining Institute*. — 2023. — Vol. 264. — P. 874–885.
4. *Шевяков, Л. Д.* Основы теории проектирования угольных шахт. — М.-Л., 1958. — 328 с.
5. Патент № 2428565 С1 Российская Федерация. Способ отработки полезных ископаемых при минимальных потерях и максимальной безопасности горных работ: № 2010123419/03: заявл. 09.06.2010: опубл. 10.09.2011 / К. Н. Трубецкой, М. А. Иофис, И. В. Милетенко [и др.]; заявитель УРАН ИПКОН РАН.
6. Патент № 2415265 С2 Российская Федерация. Способ отработки полезных ископаемых при оптимальных параметрах: № 2009103761/03: заявл. 05.02.2009 : опубл. 27.03.2011 / К. Н. Трубецкой, М. А. Иофис, И. В. Милетенко [и др.]; заявитель УРАН ИПКОН РАН.
7. A case study of displacement, stress condition and failure criterion of surrounding rock in deep super-large section double chambers in the Longgu Coal Mine, Shandong, China / Z. Wang, S. Zhang, D. Fan [et al.] // *Scientific Reports*. — 2024. — Vol. 14. — P. 16850.
8. Geomechanical justification of security measures in the development of the South Khingan deposit of manganese ore / M. Rasskazov, M. Potapchuk, G. Kursakin [et al.] // *E3S Web Conf*. — 2018. — Vol. 56. — P. 02014.
9. *Борщ-Компонице, В. И.* Практическая механика горных пород / В. И. Борщ-Компонице // М.: Горная книга, 2013. — 322 с.: ил.
10. *Чернопазов, Д. С.* Оценка параметра объемного веса пород подрабатываемой породной толщи для условий разработки Верхнекамского месторождения солей / Д. С. Чернопазов, А. И. Секунцов // *Маркшейдерия и недропользование*. — 2020. — № 5 (109). — С. 11–16.
11. Экспериментальное исследование характера и последствий взаимодействия соляных пород с гидрозакладочными расколами при подземной разработке месторождений калийных солей / Д. Н. Радченко, Р. В. Бергер, В. И. Татарников, П. О. Зубков // *Маркшейдерия и недропользование*. — 2023. — № 6 (128). — С. 60–67.
12. *Васильчук, М. П.* Анализ геомеханических процессов и причин аварий на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей / М. П. Васильчук, М. А. Иофис // *Маркшейдерский вестник*. — 2007. — № 1 (59). — С. 30–32.
13. *Иофис, М. А.* Управление деформационным состоянием массива горных пород при камерной системе разработки калийных месторождений на больших глубинах и в сложных горно-геологических условиях / М. А. Иофис, А. В. Гришин, В. Е. Мараков // *Маркшейдерский вестник*. — 2021. — № 4. — С. 40–43.
14. *Барях, А. А.* Деформирования соляных пород / А. А. Барях, С. А. Константинова, В. А. Асанов. — Екатеринбург: УрО РАН, 1996.
15. *Пинский, В. Л.* Обоснования к основным положениям проекта «Указаний по защите рудников от затопления и охране объектов на земной поверхности от вредного влияния подземных горных разработок в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей» / В. Л. Пинский, Б. А. Крайнев, В. Е. Мараков; АО «ВНИИГ» // Научный отчет. — СПб., 1993.

REFERENCES

1. *Baryakh AA, Fedoseev AK, Lobanov SYu.* Deformations and fracture of rock strata during deep level potash mining. *Procedia Structural Integrity*. 2021;32:109-16.
2. *Seifi C, Schulze M, Zimmermann J.* Solution procedures for block selection and sequencing in flat-bedded potash underground mines. *OR Spectrum*. 2021;43:409-40.
3. *Zubov VP, Sokol DG.* Technologies of intensive development of potash seams by longwall faces at great depths: current problems, areas of improvement. *Journal of Mining Institute*. 2023;264:874-85.
4. *Shevyakov LD.* Fundamentals of the theory of designing coal mines. Moscow, 1958 (In Russ.).
5. Patent No. 2428565 C1 Russian Federation. Method of mining minerals with minimal losses and maximum safety of mining operations : No. 2010123419/03: application 09.06.2010 : publ. 10.09.2011 / K. N. Trubetskoy, M. A. Iofis, I. V. Miletchenko [et al.] ; applicant URANIUM IPCON RAS (In Russ.).
6. Patent No. 2415265 C2 Russian Federation. Method of mining minerals at optimal parameters : No. 2009103761/03 : application 05.02.2009 : publ. 27.03.2011 / K. N. Trubetskoy, M. A. Iofis, I. V. Miletchenko [et al.] ; applicant URANIUM IPCON RAS (In Russ.).
7. *Wang Z, Zhang S, Fan D, et al.* A case study of displacement, stress condition and failure criterion of surrounding rock in deep super-large section double chambers in the Longgu Coal Mine, Shandong, China. *Sci Rep*. 2024;14:16850 (In Russ.).
8. *Rasskazov M, Potapchuk M, Kursakin G, et al.* Geomechanical justification of security measures in the development of the South Khingan deposit of manganese ore. *E3S Web Conf*. 2018;56:02014 (In Russ.).
9. *Borsch-Komponietz VI.* Practical mechanics of rocks. Moscow, 2013 (In Russ.).
10. *Chernopazov DS, Sekuntsov AI.* Estimation of the parameter of the volume weight of rocks of the mined rock strata for the conditions of development of the Verkhnekamsk salt deposit. *Surveying and subsoil use*. 2020;5(109):11-6 (In Russ.).
11. *Radchenko DN, Berger RV, Tatarnikov VI, et al.* Experimental study of the nature and consequences of the interaction of salt rocks with hydraulic brines during underground mining of potash deposits. *Surveying and subsoil use*. 2023;6(128):60-7 (In Russ.).
12. *Vasilchuk MP, Iofis MA.* Analysis of geomechanical processes and causes of accidents at the Verkhnekamsk deposit of potassium and magnesium salts. *Surveying bulletin*. 2007;1(59):30-2 (In Russ.).

13. Iofis MA, Grishin AV, Marakov VE. Control of the deformation state of a rock mass in a chamber system for the development of potash deposits at great depths and in difficult mining and geological conditions. The Surveyor's Bulletin. 2021;4:40-3 (In Russ.).
14. Baryakh AA, Konstantinova SA, Asanov VA. Deformation of salt rocks. Yekaterinburg, 1996 (In Russ.).
15. Pinsky VL, Krainev BA, Marakov VE. Justification for the main provisions of the draft «Guidelines for the protection of mines from flooding and the protection of objects on the Earth's surface (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ



*Гришин Александр Викторович —
доцент, кандидат технических наук,
генеральный директор, консультант по
геомеханике, ООО «Научно-внедренческая
компания «Горная геомеханика» (ООО «НВК
«Горгеомех»), г. Москва, Россия,
e-mail: info@gorgeomeh.ru*

ABOUT THE AUTHOR

*Alexander V. Grishin —
Associate Professor, Ph.D. of Engineering Sciences,
General Director, Geomechanics Consultant, LLC
Research and Development Company «Mining
Geomechanics» (LLC R&D company «Gorgeomeh»),
Moscow, Russian Federation,
e-mail: info@gorgeomeh.ru*