

## ПРОГНОЗ ЦЕЛОСТНОСТИ ВОДОЗАЩИТНОЙ ТОЛЩИ НА ВЕРХНЕКАМСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ КАЛИЙНЫХ РУД

Н. А. Беляков<sup>1</sup>, А. А. Беликов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация:** Представлено исследование напряженно-деформированного состояния пород, слагающих водозащитную толщу (ВЗТ) при разработке первого западного блока второй северо-западной панели (2 – СЗП) на Березниковском калийном производственном рудоуправлении №4 (БКПРУ-4), Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей. Разработка полезного ископаемого осуществляется на глубине 380 м. Численная реализация модели выполнена методом конечных элементов в программном комплексе Simulia Abaqus с использованием вязко-упруго-пластической геомеханической модели сильвинита. Параметрическое обеспечение реологической модели выполнено на основе лабораторных исследований породных образцов. Прогноз выполнялся на срок в 150 лет после полной разработки блока. Математическая модель выполнена в постановке плоской деформации. Произведена проверка целостности участков ВЗТ на основе нелинейного критерия прочности Протождьяконова. Установлено, что без применения мер по обеспечению целостности ВЗТ образуется гидравлически связанная система водопроводящих трещин, что может привести к затоплению рудника и образованию карстовых провалов. Данная система вблизи выработанного пространства имеет ширину 8 м вдоль длины блока и минимальную длину, равную ширине блока – 50 м. Основываясь на результатах исследования, необходимо применять меры по обеспечению целостности ВЗТ с учётом реологического характера деформирования междукамерных целиков.

**Ключевые слова:** соляные породы, реологические свойства соляных пород, ВЗТ, целостность ВЗТ, критерий прочности Кулона – Мора, реологическая модель Друкера – Прагера, устойчивость междукамерных целиков, устойчивость технологического междупластья.

**Благодарность:** Исследование выполнено за счет субсидии на выполнение государственного задания в сфере научной деятельности на 2021 год №FSRW-2020–0014.

**Для цитирования:** Беляков Н. А., Беликов А. А. Прогноз целостности водозащитной толщи на Верхнекамском месторождении калийных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6–2. – С. 33–46. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_62\_0\_33.

### Prediction of the integrity of the water-protective stratum at the Verkhnekamskoye potash ore deposit

N. A. Belyakov<sup>1</sup>, A. A. Belikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, 199106, Russia, rectorat@spmi.ru

**Abstract:** The paper presents a study of the stress-strain state of rocks composing the water-protective strata during the development of the first western block of the second northwest

panel (2 – NWP) at the Bereznikovskiy Potash Production Department No. 4 (BKPRU-4) mine, Verkhnekamskoe potassium-magnesium salt deposit. Mineral development is carried out at a depth of 380 m. The numerical implementation of the model is carried out by the finite element method in the Simulia Abaqus software package using a viscoelastic-plastic geomechanical model of sylvinitic rock. The parametric support of the rheological model is carried out on the basis of laboratory studies of rock samples. The forecast was carried out for a period of 150 years after the panel was fully developed. The mathematical model is made in the formulation of plane deformation. The integrity of the WPS sections was checked on the basis of Protodyakonov strength criterion. It has been established that without the use of measures to ensure the integrity of the WPS, a hydraulically connected system of water-conducting cracks is formed, which can lead to flooding of the mine and the formation of karst sinkholes. This system is close to goaf and has a width of 8 meters along the length of the block, and has a minimum length equal to the width of the block – 50 m. Based on the results of the study, it is necessary to apply measures to ensure the integrity of the WPS, taking into account the rheological nature of deformation of the interchamber pillars.

**Key words:** salt rocks, rheological properties of salt rocks, WPS, integrity of WPS, Coulomb-Mohr strength criterion, Drucker-Prager rheological model, stability of interchamber pillars, stability of technological interbed.

**Acknowledgment:** The study was carried out at the expense of a subsidy for the fulfillment of the state task in the field of scientific activity for 2021 No. FSRW-2020–0014.

**For citation:** Belyakov N. A., Belikov A. A. Prediction of the integrity of the water-protective stratum at the Verkhnekamskoye potash ore deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(6–2):33–46. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_62\_0\_33.

---

## Введение

Разработка месторождений соляных пород неразрывно связана с риском нарушения сплошности водозащитной толщи (ВЗТ), прорывом вод в горные выработки. Такого рода аварии случаются вследствие изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) подработанной части массива горных пород. Они могут привести к затоплению рудника.

Особую актуальность данная проблема приобрела в последние десятилетия после крупных аварий по всему миру [1], в том числе на шахтах «Вапно» (Польша, 1975 г.), «Джеферсон Исланд» (США, 1980 г.) [2], «Холле» (Республика Конго, 1977 г.), «Потокан» (Канада, 1997 г.) и, конечно же, серии аварий на Верхнекамском месторождении – затопление БКПРУ-1, СКРУ-2 и БКПРУ-3 [3, 4].

Решением задачи по исследованию напряженно-деформированного

состояния пород, слагающих водозащитную толщу, занимались многие ученые. Так, например, авторами [5, 6], учитывая актуальность проблемы обеспечения промышленной безопасности при разработке Верхнекамского месторождения, была предложена методика районирования ВЗТ и калийных пластов по физико-механическим свойствам на основе результатов лабораторных испытаний керна и геофизических исследований. Данная методика может быть использована практически на любом месторождении полезных ископаемых. В работе [7] предложена методика оценки ВЗТ на основе численного моделирования. Авторами [8, 9] проведена оценка влияния мульды оседания на ВЗТ при помощи численного моделирования для определения зон смягчения. В работе [10] описывается определение зон нарушений в ВЗТ на основе численного моделирования. Авторами проведено исследование сме-

нения ВЗТ на основе численного моделирования для условий СКРУ ООО «Уралкалий» [11].

В работах [12, 13] натурные исследования по определению высоты зоны водопроводящих трещин показали, что при одной и той же вынимаемой мощности пласта зона водопроводящих трещин имеет различную высоту в зависимости от литологического состава подрабатываемой толщи. Высота указанной зоны возрастает с уменьшением содержания в толще глинистых пород [14]. Главным преимуществом представленного метода является возможность его применения на основе имеющихся геологических данных. По мнению авторов настоящей работы, его адаптация в рамках математического моделирования является перспективным методом оценки сплошности ВЗТ.

Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей уникально тем, что это одно из самых больших подобных месторождений, к тому же ниже соляных пород здесь залегают нефть и газ. Следовательно, необходимо вести разработку таким образом, чтобы в будущем была возможна добыча углеводородов [15, 16].

Устойчивость междукамерных целиков, а также технологического междупластья функционально связана с обеспечением сохранности ВЗТ. Массив горных пород на Верхнекамском месторождении калийных солей характеризуется ярко выраженными реологическими свойствами и переслаиванием сильвинита и каменной соли, часто разделенных тонкими прослойками глины, это способствует расслоению и преждевременному разрушению междупластья [6, 17].

Оценка их долговременной несущей способности должна учитывать не только проявление реологических

свойств соляных пород, но и изменение степени нагружения из-за техногенных процессов. Техногенное воздействие на междукамерные целики выражается в постепенном разрушении их краевых частей, обрушении кровли и технологического междупластья. Это приводит к изменению размеров целиков и, как следствие, степени их нагружения (высота целика увеличивается, а ширина — уменьшается) [18, 19].

Нарушение сплошности ВЗТ опасно не только затоплением рудника и колоссальными финансовыми проблемами, но и возможностью возникновения карстовых провалов. Гидравлически связанная система трещин в ВЗТ формируется в течение всего процесса оседания земной поверхности. Этот процесс может развиваться многие десятилетия после полной отработки месторождения. Таким образом, с учетом срока эксплуатации рудника необходимо обеспечить целостность ВЗТ на срок более 150 лет [20, 21]. Целью настоящей работы является проведение численных экспериментов для оценки целостности ВЗТ при используемой камерной системе разработки Верхнекамского месторождения на руднике БКПРУ-4.

### **Основные этапы численного моделирования**

Прогноз геомеханических процессов, протекающих в горном массиве, выполнялся с применением численного моделирования методом конечных элементов в программном комплексе Simulia Abaqus [22, 23]. Прогноз выполнялся на срок в 150 лет после полной разработки блока. Математическая модель выполнена в постановке плоской деформации. На рис. 1 представлена расчетная схема, выполненная по данным геологоразведочных скважин № 453 и № 498. Основой для геометрических параметров модели взяты

первый западный блок панели 2 – СЗП. Отработка ведется комбайном Урал-20Р, параметры системы разработки представлены на рис. 2.

Во временной перспективе развитие геомеханических процессов в горном массиве обуславливается тремя основными факторами: развитием горных работ, мгновенным деформированием (упругим и пластическим) [24] элементов системы разработки при извлечении полезного ископаемого (в первую

очередь междукамерных целиков) и их длительным (реологическим) деформированием (целиков, состоящих из сильвинита) [25].

В связи с этим для корректного прогнозирования геомеханических процессов, протекающих в горном массиве, при описании механического поведения сильвинита необходимо использовать вязкоупруго-пластическую геомеханическую модель. Для описания механического поведения горных пород, слагающих про-

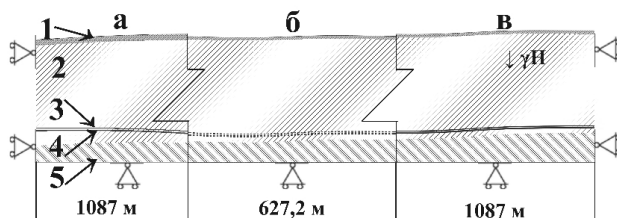


Рис. 1. Общий вид модели, первоначальный этап: а, в – границы модели, б – зона проходки камер; 1 – четвертичные отложения, 2 – вмещающие породы, 3 – сильвинитовый пласт АБ, 4 – сильвинитовый пласт КР-2, 5 – нижний слой породы в модели

Fig. 1. General view of the model, initial stage: а, в – model boundaries, б – chamber penetration zone; 1 – Quaternary deposits, 2 – host rocks, 3 – sylvinite layer AB, 4 – sylvinite layer KR-2, 5 – the bottom layer of the rock in the model

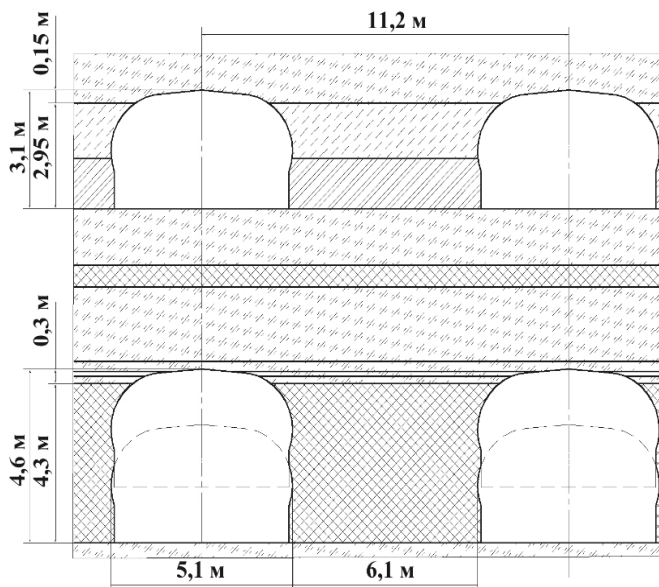


Рис. 2. Параметры системы разработки 1 западного блока 2 – СЗП

Fig. 2. Parameters of the development system 1 of the western block 2 – NWP

чие геологические разности в пределах изучаемых рудников, допустимо использовать геомеханическую модель линейно-деформируемого тела [26, 27].

По результатам обработки прочностных испытаний образцов горных пород ВЗТ был построен паспорт прочности пород ВЗТ по условию прочности Протодьяконова. Для интересующих точек нелинейного паспорта прочности были определены эквивалентные параметры линейного условия прочности Кулона — Мора: сцепление горной породы и угол внутреннего трения (рис. 3). Рассчитав эквивалентные прочностные параметры пород под конкретное объемное напряженное состояние горных пород ВЗТ, представляется возможным, согласно условию прочности Кулона — Мора в осях главных напряжений, произвести проверку целостности рассматриваемого участка ВЗТ.

Условие прочности Кулона — Мора в осях главных напряжений [28]

$$\sigma_1 = \frac{2C_i \cdot \cos \varphi_i + \sigma_3(1 + \sin \varphi_i)}{1 - \sin \varphi_i}, \quad (1)$$

где  $C_i$  — эквивалентное сцепление горной породы для рассматриваемого

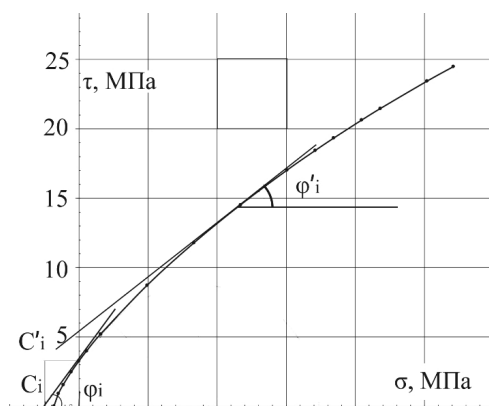


Рис. 3. Паспорт прочности по условию Протодьяконова

Fig 3. Passport of strength according to Protodyakonov's condition

объемного напряженного состояния;  $\varphi_i$  — эквивалентный угол внутреннего трения горной породы для рассматриваемого объемного напряженного состояния;  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  — соответственно максимальные и минимальные главные напряжения.

Для описания механического поведения соляных пород была использована модель Друкера — Прагера. Первоначально эта модель разработана для описания механического поведения металлов и сплавов, но при подборе соответствующих параметров модели она способна в том числе описывать поведение соляных пород. Параметры модели согласно отчету НИР «Оценка и прогноз развития геомеханического состояния массива горных пород на потенциально опасных участках рудников ПАО «Уралкалий» Санкт-Петербургского горного университета, подобранные по результатам натурных наблюдений, и характеристики прочих пород приведены в табл. 1 [29]. Использование модели Друкера — Прагера позволяет описать как мгновенные необратимые деформации (пластические), так и длительные необратимые деформации (ползучесть).

Поверхность пластичности материала в пространстве главных напряжений представляет собой конус (рис. 4, а), а в девиаторной плоскости отображается окружностью (рис. 4, б) [30]. В основе реологической части этой модели используется представление о существовании изоповерхностей ползучести, т.е. таких напряженных состояний, которые имеют одинаковую интенсивность развития ползучести при прочих равных условиях. Эти напряженные состояния характеризуются одинаковым значением эквивалентного напряжения ползучести ( $\sigma^{CT}$ ), которое определяется как функция девиатора напряжений.

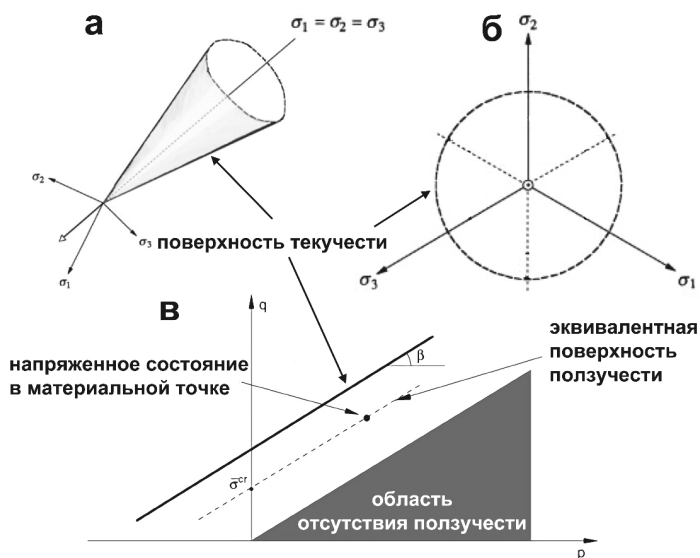


Рис. 4. Поверхность текучести в модели Друкера – Прагера: а – в осях главных напряжений, б – в девиаторной плоскости, в – в плоскости среднего и девиаторного напряжения  
 Fig. 4. Yield surface in the Drucker – Prager model: а – in the axes of principal stresses, б – in the deviatoric plane, в – in the plane of the mean and deviatoric stresses

Таблица 1  
 Физико-механические свойства пород  
 Physical and mechanical properties of rocks

Наименование	E, МПа	ν	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Угол трения, град	Предел прочности при сдвиге, МПа	Константы ползучести		
						A	n	m
Сильвинит	400	0,32	2500	40	3,50	3·10 <sup>-10</sup>	1	-0,3
Четвертичные отложения	40	0,4	2500	–	–	–		
Вмещающие породы	400	0,32	2500	51	–	–		
Нижний слой породы в модели	20000	0,25	2500	–	–	–		

На рис. 4, в в осях среднего и девиаторного напряжений (p – q) представлена изоповерхность ползучести, параллельная поверхности текучести [31, 32]. В модели Друкера – Прагера зависимость скорости относительной деформации ползучести от эквивалентного напряжения ползучести имеет вид

$$\dot{\varepsilon}^{cr} = (A(\sigma^{cr})^n [(m+1)\varepsilon^{cr}]^m)^{\frac{1}{m+1}}, \quad (2)$$

где  $\dot{\varepsilon}^{cr}$  – скорость относительной деформации ползучести;  $\sigma^{cr}$  – эквивалентное напряжение ползучести;  $\varepsilon^{cr}$  – относительная деформация ползучести; A, m, n – параметры ползучести мате-

риала, заданные как функции температурных и полевых переменных.

В разработанной конечно-элементной модели представлены основные стадии отработки полезного ископаемого — последовательная проходка очистных камер по пластам АБ и КР-2 согласно средней производительности горного участка.

### Верификация модели

Для верификации модели с точки зрения деформации ВЗТ было использовано сравнение показателей процесса оседания земной поверхности, полученных из натуральных наблюдений по профильным линиям, с аналогичными показателями, полученными при моделировании. В качестве реального аналога разработанной численной модели был принят неопасный по нарушению целостности ВЗТ третий восточный блок панели 3–ЮВП. Какие-либо аномалии, согласно имеющимся отчетным материалам, в этом блоке отсутствуют. Блок разрабатывался по продуктивным пластам АБ и КР-2 в 1998 г, в анализе учитывались ведомости оседаний по профильной линии 5 с момента разработки по 2017 год.

Принятый к сравнению блок расположен вблизи заложеного потенциально опасного по нарушению сплошности ВЗТ участка, что определяет характер деформации земной поверхности. Ввиду этого показания крайнего репера не приводятся. Показатели оседаний приведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что за первые 20 лет после отработки блока средние и максимальные скорости оседания поверхности корректно соотносятся с данными съемок по профильным линиям неопасного по нарушению целостности ВЗТ третьего восточного блока панели 3–ЮВП. Также следует отметить, что в течение всего срока прогноза скорость оседания поверхности уменьшалась до значений близких к таковым у наблюдаемого блока. Представленное сопоставление косвенно свидетельствует о корректности подходов к моделированию для оценки процесса деформирования подрабатываемой ВЗТ, использованных в рамках настоящей статьи.

### Анализ целостности ВЗТ

Определение сплошности ВЗТ было проведено на 1 м ниже УГВ, рав-

Таблица 2  
Показатели оседаний поверхности  
*Surface subsidence indicators*

Данные по профильной линии 5				В модели после разработки				
№	измерения		скорость	№	20 лет	скорость за 20 лет, мм/мес.	150 лет	скорость за 150 лет, мм/мес.
	15.10.1997	13.04.2017	оседа- ний					
	м	м	мм/мес.		м	м		
57	149.620	149.169	1.9519	1	0.240	1.000	1.158	0.643
58	150.873	150.582	1.2589	2	0.408	1.700	1.988	1.104
59	144.864	144.671	0.8355	3	0.516	2.148	2.563	1.424
60	140.000	139.778	0.9593	4	0.512	2.133	2.558	1.421
61	144.079	143.910	0.7316	5	0.399	1.663	1.999	1.111
62	150.914	150.704	0.9095	6	0.228	0.948	1.123	0.624
Средняя скорость оседаний			1.11			1.599		1.055

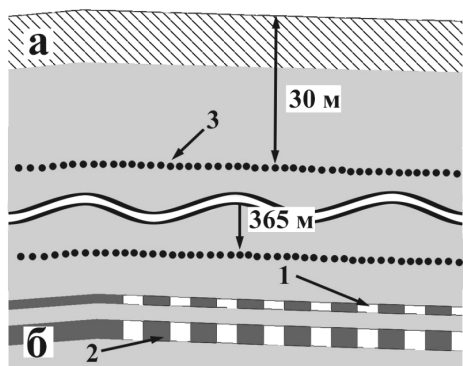


Рис. 5. Участки проверки целостности ВЗТ: а — на глубине 30 м, б — на глубине 365 м; 1 — очистные камеры, 2 — междукамерные целики, 3 — элементы модели

Fig. 5. Areas for checking the WPS integrity: а — at a depth of 30 m, б — at a depth of 365 m; 1 — chambers, 2 — inter-chamber pillars, 3 — model elements

ного 29 м согласно скважине № 498, и вблизи кровли камер первой очереди, проведённых по пласту АБ. Оба отстроенных пути сбора результатов расчёта представлены на рис. 5.

### Методика определения целостности ВЗТ

1. Выражение максимально допустимых главных напряжений через полученные минимальные главные напряжения,  $\sigma_{пр}$  и  $\sigma_3$ , соответственно, подставив их в условие прочности Кулона — Мора в осях главных напряжений (1).

Если максимально допустимые главные напряжения численно получаются меньше 0, то они растягивающие. В таком случае необходимо сравнить их по модулю с пределом прочности на растяжение,  $[\sigma_p] = 1,778$  МПа. Максимальные растягивающие напряжения не могут быть больше предела прочности на растяжение, а значит, при проверке большие по модулю значения  $\sigma_{пр}$  заменяются на  $[\sigma_p]$ .

2. Сравнение полученного графика максимально допустимых главных

напряжений с напряжениями, полученными в результате моделирования: сжимающие напряжения — со сжимающими  $\sigma_1$ , растягивающие (со знаком «-») — с растягивающими  $\sigma_1$ .

Рассмотрим получившиеся графики распределения главных напряжений в ВЗТ: верхний горизонтальный участок — на уровне грунтовых вод, и нижний горизонтальный участок — у кровли камер, в разные моменты времени: этап окончания проходки добычных камер (рис. 6), спустя 30 лет после окончания очистных работ в блоке (рис. 7), спустя 150 лет после окончания очистных работ в блоке (рис. 8).

Результаты исследования и их анализ

На графиках наглядно показаны участки моделируемой ВЗТ, в которых максимальные главные напряжения превышают предельно допустимые

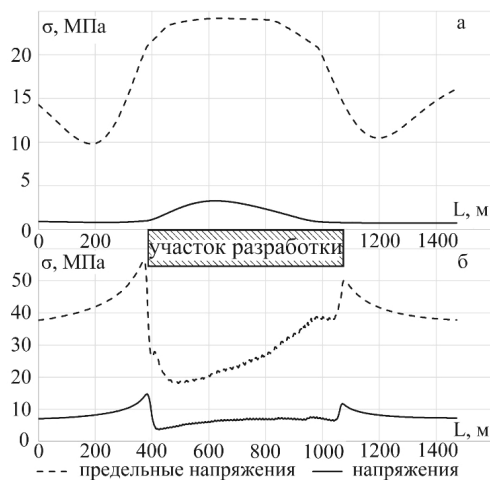


Рис. 6. Графики распределения главных напряжений в ВЗТ на этапе окончания проходки: а — верхний участок, б — нижний участок

Fig. 6. Diagrams of the distribution of the main stresses in the WPS at the stage of the end of mining: а — upper section, б — lower section



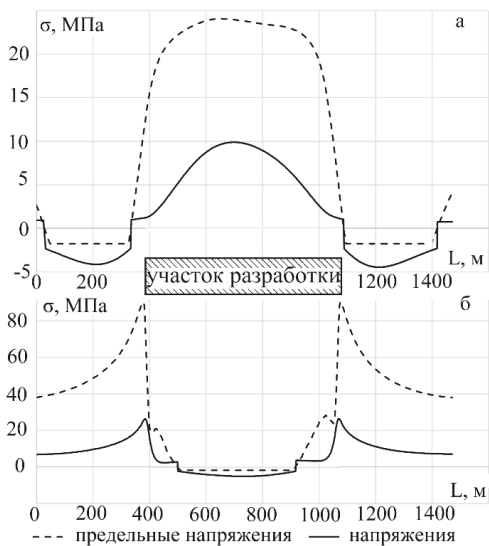


Рис. 7. Графики распределения главных напряжений в ВЗТ спустя 30 лет после окончания очистных работ: а — верхний участок, б — нижний участок

Fig. 7. Diagrams of the distribution of the main stresses in the WPS 30 years after the end of mining: a — the upper section, b — the lower section

напряжения. В этих зонах образуются трещины. Стоит отметить, что они образуются несколько позже полной отработки блока и в основном под действием растягивающих напряжений.

С течением времени отпор целиков постепенно уменьшается, они деформируются, расширяясь в поперечном направлении. Вследствие этого процесса распределение главных напряжений в ВЗТ похоже на распределение напряжений в однопролётной балке с защемлением на опорах. В верхней её части — в области над опорой (межпанельный целик) и в нижней — в середине пролёта действуют растягивающие напряжения, которые приводят к образованию нормально ориентированных к слоям пород трещин, что подтверждается работами [8, 9, 13].

Зоны разрушения ВЗТ увеличиваются со временем за счет проявления

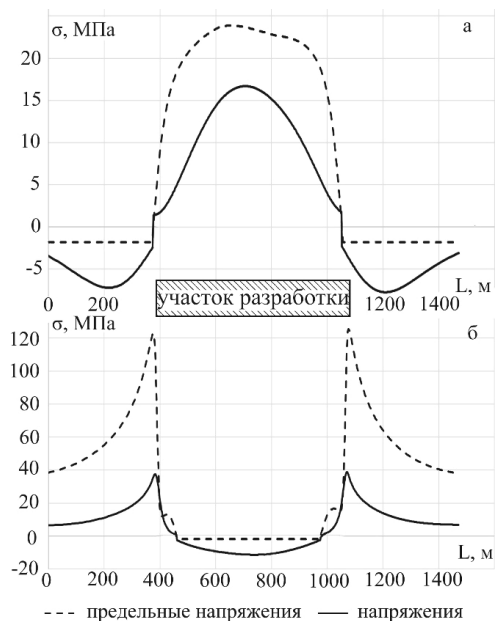


Рис. 8. Графики распределения главных напряжений в ВЗТ спустя 150 лет после окончания очистных работ: а — верхний участок, б — нижний участок

Fig. 8. Diagrams of the distribution of the main stresses in the WPS 150 years after the end of mining: a — the upper section, b — the lower section

реологических свойств соляных пород междукамерных целиков и техногенного воздействия на них. К предполагаемому окончанию оседания (рис. 8) поверхности системы водопродводящих трещин на графике занимают область в верхней части моделируемой ВЗТ на отметке  $-30$  м на горизонтальных участках:

- от 0 м до 379 м;
- от 1047 м до 1471 м;

в нижней части моделируемой ВЗТ на отметке  $-365$  м на горизонтальных участках:

- от 396 м до 409 м;
- от 458 м до 978 м;
- от 1048 м до 1056 м.

В правой части модели, где камеры были пройдены в последнюю очередь, наблюдается явный признак образова-

ния гидравлически связанной системы водопроводящих трещин — образование зон разрушения ВЗТ в нижнем и в верхнем участках друг под другом. Данная система имеет протяжённость 8 метров вдоль длины блока и минимальную длину, равную ширине блока — 50 м, согласно принятой системе разработки месторождения.

В левой части модели зона разрушения ВЗТ в нижнем участке отделена от таковой в верхнем участке областью неразрушенной породы толщиной 17 м. Толща такой мощности, согласно действующим «Указаниям по защите рудников от затопления...», не удовлетворяет минимальным требованиям по обеспечению безопасных параметров подработки ВЗТ. Соответственно, с обеих сторон панели возможно образование водопритока в очистные выработки.

### **Заключение**

В статье авторами предпринята попытка разработать методический подход к оценке сплошности водозащитной толщи при отработке месторождения каменных солей на основании численного моделирования. Предложенный подход учитывает неоднородность геологического разреза и упруго-вязко-пластический характер работы соляных горных пород.

По результатам представленной работы установлено, что без применения мер по обеспечению целостности ВЗТ образуется гидравлически связанная система водопроводящих трещин, что может привести к затоплению рудника и образованию карстовых провалов с течением времени.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Апарин А. Г., Санковский А. А.* Особенности проходки зоны температурного градиента при строительстве вертикальных стволов с использованием метода искусственного замораживания пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 2. — С. 51–61. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_2\_0\_51.

В работе рассмотрено НДС ВЗТ под действием влияния разработки одного блока, однако не рассматривались возможные горно-геологические нарушения в ВЗТ, и исключено влияние межпанельных целиков при разработке нескольких панелей. Учет этих факторов является перспективным направлением развития исследований.

Одной из мер по обеспечению целостности ВЗТ может быть закладка очистных камер с использованием твердеющей закладки для создания достаточного отпора, препятствующего реологической деформации целиков. На предприятии применяется гидрозакладка с большим недозакладом, она не отвечает вышеописанным требованиям. Также возможно рассмотрение изменения параметров системы разработки, к примеру, увеличение ширины междукамерных целиков с учётом реологического характера их деформирования. Создание зон смягчения, основанных на увеличении ширины междукамерных целиков в граничных зонах панели, или проектирование участков с неотработанными запасами в пределах панели может использоваться в качестве мер по обеспечению целостности ВЗТ.

### **Вклад авторов**

*Беляков Н. А.* — формирование концепции исследования, редактирование текста и графиков.

*Беликов А. А.* — создание математической модели, обработка результатов исследования, написание текста и составление графических материалов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

2. Warren J. K. Evaporites. A Geological Compendium. 2nd edition. Springer, 2016, 1812 p. DOI: 10.1007/978-3-319-13512-0.

3. Барях А. А. Оценка рисков нарушения сплошности водозащитной толщи: подходы и реалии // Стратегия и процессы освоения георесурсов: Сб. науч. тр. Вып.12. ГИ УрО РАН. – Пермь – 2014. – С. 68–71.

4. Baryakh A. A., Sanfirov I. A., Fedoseev A. K. Seismic-Geomechanical Control of Water-Impervious Strata in Potassium Mines // Journal of Mining Science. 2017, vol. 53(6), pp. 981–992. DOI: 10.1134/S1062739117063041.

5. Кашников Ю. А., Ермашов А. О., Ефимов А. А. Геолого-геомеханическая модель участка Верхнекамского калийного месторождения // Записки Горного института. – 2019. – № 237. – С. 259–267. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.259.

6. Kashnikov Yu., Shustov D., Ermashov A., Lebedeva O., Zhukov A., Prigara A. Solving the problems of exploitation safety of potassium salt deposit based on joint application of geophysical and geomechanical studies // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. vol. 833. pp. 1–8. DOI: 10.1088/1755–1315/833/1/012084.

7. Куликова А. А., Овчинникова Т. И. К вопросу снижения геоэкологических рисков на горнодобывающих предприятиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 2–1. – С. 251–262. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-251-262.

8. Барях А. А., Губанова Е. А. О мерах охраны калийных рудников от затопления // Записки Горного института. – 2019. – № 240. – С. 613–620. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.613.

9. Baryakh A. A., Stazhevskii S. B., Timofeev E. A. Strain state of a rock mass above karst cavities // Journal of Mining Science. 2008, vol. 44(6), pp. 531–538. DOI: 10.1007/s10913-008-0059-1.

10. Зубов В. П., Сокол Д. Г. Влияние температуры на проведение работ по совершенствованию системы отработки калийных отложений Старобинского месторождения // Горный журнал. – 2020. – № 10. – С. 74–79. DOI: 10.17580/gzh.2020.10.07.

11. Санковский А. А., Ковальский Е. Р. Оценка параметров напряженно-деформированного состояния массива в окрестности очистных камер // Записки Горного института. – 2014. – № 207. – С. 63–65.

12. Гусев В. Н., Илюхин Д. А., Алексенко А. Г. Определение параметров зоны водопроводящих трещин через горизонтальные деформации подрабатываемой толщи // Записки Горного института. – 2013. – № 204. – С. 69–73.

13. Гусев В. Н. Прогноз безопасных условий разработки свиты угольных пластов под водными объектами на основе геомеханики техногенных водопроводящих трещин // Записки Горного института. – 2016. – № 221. С. 638–643. DOI: 10.18454/pmi.2016.5.638.

14. Gusev V. N., Maliukhina E. M., Volokhov E. M. Assessment of development of water conducting fractures zone in the massif over crown of arch of tunneling (construction) // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2019, no. 2, pp. 635–643.

15. Кудряшов А. И. Верхнекамское месторождение солей. 2-е издание. – М.: Эпсилон Плюс, 2013. – 378 с.

16. Джиноридзе Н. М. Петротектонические основы безопасной эксплуатации Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей. – СПб–Соликамск: ОГУП, 2000. – 400 с.

17. Baryakh A. A., Lobanov S. Y., Lomakin I. S. Analysis of time-to-time variation of load on interchamber pillars in mines of the Upper Kama Potash Salt Deposit // Journal of Mining Science. 2015, vol. 51(4), pp. 696–706. DOI: 10.1134/S1062739115040064.

18. Vermeer P. A. Non-Associated Plasticity for Soils: Concrete and Rock // Heron. 1984, no. 29(3), pp. 3–64. DOI: 10.1007/978-94-017-2653-5\_10.

19. Rauche H. Die Kaliindustrie im 21. Jahrhundert. Springer, Vieweg, 2016. 580 p.

20. Шиман М. И. Предотвращение затопления калийных рудников. – М.: Недра, 1992. – 176 с.

21. Karasev M. A., Protosenya A. G., Katerov A. M., Petrushin V. V. Analysis of shaft lining stress state in anhydrite-rock salt transition zone // Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik. 2022, no. 12, pp. 151–162. DOI: 10.17794/rgn.2022.1.13.

22. Gendler S. G., Fazylov I. R. Methods of regulation air temperature in the Russian oil mains // Topical issues of Rational Use of Natural Resources. — London: Taylor & Francis Group, 2019. — pp. 16–21. DOI: 10.1201/9781003014577-3.

23. Гендлер С. Г., Фазылов И. Р. Оценка эффективности использования закрытой системы сбора нефти для нормализации микроклимата в эксплуатационных галереях нефтяных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 9. — С. 65–78. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_9\_0\_65.

24. Karasev M. A., Sotnikov R. O., Sinogubov V. Y., Egorova N. A., Makarov K. V., Thorikov A. I. Development of a model for predicting the dynamic effect on the stability of rock excavation // Journal of Physics: Conference Series. — 2019. vol 1384(1). pp. 1–7. DOI: 10.1088/1742-6596/1384/1/012051.

25. Zhou H., Liu D., Lei G., Xue D., Zhao Y. The Creep-Damage Model of Salt Rock Based on Fractional Derivative // Energies. 2018, no. 11, pp. 1–9. DOI: 10.3390/en11092349.

26. Wu F., Chen J., Zou Q. A nonlinear creep damage model for salt rock. International // Journal of Damage Mechanics. 2018, no. 28(5), pp. 1–14. DOI:10.1177/1056789518792649.

27. Зуев Б. Ю., Зубов В. П., Смычник А. Д. Определение статических и динамических напряжений в физических моделях слоистых и блочных массивов горных пород // Горный Журнал. — 2019. № 7. — С. 61–72. DOI: 10.17580/gzh.2019.07.02.

28. Guo J., Liu X., Huang W. Mohr-Coulomb Strength Criterion Based on Elastic Strain Energy // Journal of Tongji University. 2018, vol. 46, pp. 1168–1174. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2018.09.002.

29. Ермашов А. О. Геомеханическое обоснование расчетов оседания земной поверхности при добыче калийно-магниевых руд (на примере Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей): Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Пермь: Горный институт УрО РАН, 2015. — 20 с.

30. Zhang Y., Xiong X., Musa M., Lyu X. Analysis of a compressive strength model for FRP-confined damaged concrete columns based on the Drucker–Prager yield criterion // Structural Concrete. 2022, vol. 24, pp. 721–735. DOI: 10.1002/suco.202100584.

31. Taheri S. R., Pak A., Shad S., Mehrgini B., Razifar M. Investigation of rock salt layer creep and its effects on casing collapse // International Journal of Mining Science and Technology. 2020, no. 30, pp. 357–365. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.02.001.

32. Taheri S. R., Pak A. Casing Failure in Salt Rock: Numerical Investigation of its Causes // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2020, no. 59, pp. 3903–3918. DOI: 10.1007/s00603-020-02161-9. **MIAB**

## REFERENCES

1. Aparin A. G., Sankovsky A. A. Peculiarities of passing through a temperature gradient in vertical shaft sinking with artificial ground freezing. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 2, pp. 51–61 DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_2\_0\_51 [In Russ].

2. Warren J. K. *Evaporites. A Geological Compendium*. 2nd edition. Springer, 2016, 1812 p. DOI: 10.1007/978-3-319-13512-0.

3. Baryakh A. A. Assessment of the risks of disruption of the continuity of the water protection strata: approaches and realities. *Strategy and processes for the development of georesources: collection of articles. scientific. tr. Issue 12*. State Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Perm. 2014, pp. 68–71. [In Russ].

4. Baryakh A. A., Sanfirov I. A., Fedoseev A. K. Seismic–Geomechanical Control of Water-Impervious Strata in Potassium Mines. *Journal of Mining Science*. 2017, vol. 53(6), pp. 981–992. DOI: 10.1134/S1062739117063041.

5. Kashnikov Yu. A., Ermashov A. O., Efimov A. A. Geological and geomechanical model of the section of the Verkhnekamskoye potash deposit. *Journal of Mining Institute*. 2019, no. 237, pp. 259–267. [In Russ]. DOI: 10.31897 / PMI.2019.3.259
6. Kashnikov Yu., Shustov D., Ermashov A., Lebedeva O., Zhukov A., Prigara A. Solving the problems of exploitation safety of potassium salt deposit based on joint application of geophysical and geomechanical studies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 833, pp. 1–8. DOI: 10.1088/1755–1315/833/1/012084.
7. Kulikova A. A., Ovchinnikova T. I. On the issue of reducing geoeological risks at mining enterprises. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 2 – 1, pp. 251–262. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236–1493-2021–21–0-251–262.
8. Baryakh A. A., Gubanova E. A. On measures to protect potash mines from flooding. *Journal of Mining Institute*. 2019, no. 240, pp. 613–620 DOI: 10.31897 / PMI.2019.6.613 [In Russ].
9. Baryakh A. A., Stazhevskii S. B., Timofeev E. A. Strain state of a rock mass above karst cavities. *Journal of Mining Science*. 2008, vol. 44(6), pp. 531–538. DOI: 10.1007/s10913-008-0059-1.
10. Zubov V. P., Sokol D. G. Temperature effect on implementation of mining system improvement for the potash-bearing strata in Starobin deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2020, no. 10, pp. 74–79. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2020.10.07.
11. Sankovsky A. A., Kovalsky E. R. Estimation of the parameters of the stress-strain state of the massif in the vicinity of the treatment chambers. *Journal of Mining Institute*. 2014, no. 207, pp. 63–65. [In Russ].
12. Gusev V. N., Ilyukhin D. A., Aleksenko A. G. Determination of the parameters of the zone of water-conducting cracks through horizontal deformations of the undermined thickness. *Journal of Mining Institute*. 2013, no 204, pp. 69–73. [In Russ].
13. Gusev V. N. Prediction of safe conditions for the development of a suite of coal seams under water bodies based on the geomechanics of technogenic water-conducting cracks. *Journal of Mining Institute*. 2016, no. 221, pp. 638–643. [In Russ]. DOI: 10.18454/pmi.2016.5.638.
14. Gusev V. N., Maliukhina E. M., Volokhov E. M. Assessment of development of water conducting fractures zone in the massif over crown of arch of tunneling (construction). *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2019, no. 2, pp. 635–643.
15. Kudryashov A. I. Verkhnekamskoe deposit of salts. 2nd edition. Moscow, “Epsilon Plus”, 2013, 378 p. [In Russ].
16. Dzhinoridze N. M. Petrotectonic foundations of safe operation of the Verkhnekamskoe deposit of potassium-magnesium salts, OGUP, St. Petersburg – Solikamsk, 2000, 400 p. [In Russ].
17. Baryakh A. A., Lobanov S. Y., Lomakin I. S. Analysis of time-to-time variation of load on interchamber pillars in mines of the Upper Kama Potash Salt Deposit. *Journal of Mining Science*. 2015, vol. 51(4), pp. 696–706. DOI: 10.1134/S1062739115040064.
18. Vermeer P. A. de Borst R. Non-Associated Plasticity for Soils: Concrete and Rock. *Heron*. 1984, no. 29 (3), pp. 3–64. DOI: 10.1007 / 978-94-017-2653-5\_10.
19. Rauche H. Die Kaliindustrie im 21. Jahrhundert, [The Potash Industry in the 21st Century]. Springer, Vieweg, 2016, 580 p.
20. Shiman M. I. Prevention of flooding of potash mines. Moscow, Nedra, 1992, 176 p. [In Russ].
21. Karasev M. A., Protosenya A. G., Katerov A. M., Petrushin V. V. Analysis of shaft lining stress state in anhydrite-rock salt transition zone // Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik. 2022, no. 12, pp. 151–162. DOI: 10.17794/rgn.2022.1.13.
22. Gendler S. G., Fazylov I. R. Methods of regulation air temperature in the Russian oil mains. Topical issues of Rational Use of Natural Resources. London. Taylor & Francis Group. 2019. pp. 16–21. DOI: 10.1201/9781003014577-3.

23. Gendler S. G., Fazylov I. R. Application efficiency of closed gathering system toward microclimate normalization in operating galleries in oil mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021. no. 9. pp. 65–78. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_9\_0\_65.

24. Karasev M. A., Sotnikov R. O., Sinegubov V. Y., Egorova N. A., Makarov K. V., Thorikov A. I. Development of a model for predicting the dynamic effect on the stability of rock excavation. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019, vol 1384(1). pp. 1–7. DOI:10.1088/1742-6596/1384/1/012051.

25. Zhou H., Liu D., Lei G., Xue D., Zhao Y. The Creep-Damage Model of Salt Rock Based on Fractional Derivative. *Energies*. 2018, no. 11, pp. 1–9. DOI: 10.3390/en11092349.

26. Wu F., Chen J., Zou Q. A nonlinear creep damage model for salt rock. *International Journal of Damage Mechanics*, 2018, no. 28(5), pp. 1–14. DOI:10.1177/1056789518792649.

27. Zuev B. Yu., Zubov V. P., Smychnik A. D. Determination of static and dynamic stresses in physical models of layered and block rock masses. *Gornyi Zhurnal*. 2019, no. 7, pp. 61–72. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2019.07.02.

28. Guo J. Liu X. Huang W. Mohr-Coulomb Strength Criterion Based on Elastic Strain Energy. *Journal of Tongji University*. 2018, vol. 46, pp. 1168–1174. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2018.09.002.

29. Ermashov A. O. Geomechanical substantiation of calculations of subsidence of the earth's surface during the extraction of potassium-magnesium ores (on the example of the Verkhnekamskoye deposit of potassium-magnesium salts): Doctor's thesis, Perm, Mining Institute, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2015, 20 p. [In Russ].

30. Zhang Y., Xiong X., Musa M., Lyu X. Analysis of a compressive strength model for FRP-confined damaged concrete columns based on the Drucker-Prager yield criterion. *Structural Concrete*. 2022, vol. 24, pp.721–735. DOI: 10.1002/suco.202100584.

31. Taheri S. R., Pak A., Shad S., Mehrgini B., Razifar M. Investigation of rock salt layer creep and its effects on casing collapse. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020, no. 30, pp. 357–365. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.02.001.

32. Taheri S. R., Pak A. Casing Failure in Salt Rock: Numerical Investigation of its Causes. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2020, no. 59, pp. 3903–3918. DOI: 10.1007/s00603-020-02161-9.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Беляков Никита Андреевич*<sup>1</sup> – канд. техн. наук, доцент каф. СГПиПС, <http://orcid.org/0000-0002-9754-501X>, e-mail: [Belyakov\\_NA@pers.spmi.ru](mailto:Belyakov_NA@pers.spmi.ru);

*Беликов Артем Артурович*<sup>1</sup> – аспирант СГПиПС, <https://orcid.org/0000-0001-5051-0680>, e-mail: [s205046@stud.spmi.ru](mailto:s205046@stud.spmi.ru);

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2, Россия.

**Для контактов:** *Беликов Артем Артурович*, e-mail: [s205046@stud.spmi.ru](mailto:s205046@stud.spmi.ru).

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Belyakov N. A.*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Construction of Mining Enterprises and Underground Structures, <http://orcid.org/0000-0002-9754-501X>, e-mail: [Belyakov\\_NA@pers.spmi.ru](mailto:Belyakov_NA@pers.spmi.ru);

*Belikov A. A.*<sup>1</sup>, postgraduate student of the department of construction of mining enterprises and underground structures, <https://orcid.org/0000-0001-5051-0680>, e-mail: [s205046@stud.spmi.ru](mailto:s205046@stud.spmi.ru);

<sup>1</sup> Saint Petersburg Mining University, 199106, St. Petersburg, Vasilievsky Island, 21 line 2, Russia.

**Corresponding author:** *Artem A. Belikov*, e-mail: [s205046@stud.spmi.ru](mailto:s205046@stud.spmi.ru).

Получена редакцией 14.01.2022; получена после рецензии 12.04.2022; принята к печати 10.05.2022.

Received by the editors 14.01.2022; received after the review 12.04.2022; accepted for printing 10.05.2022.