

ВЛИЯНИЕ РАССОЛА НА СОСТОЯНИЕ ПОРОДНОГО МАССИВА ПРИ «МОКРОЙ» ЛИКВИДАЦИИ УЧАСТКА КАЛИЙНОГО РУДНИКА

М.В. Скопинов¹, П.К. Коносавский², И.Л. Хархордин³, А.А. Потапов²

¹ АО «ВНИИ Галургии», Пермь, Россия

² Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия, e-mail: potapov@dhsph.ru

³ ООО «Геостройпроект», Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: «Мокрый» способ ликвидации калийного рудника представляет собой плановую закачку рассолов в потенциально опасный участок. В первую очередь производится изоляция участка путем сооружения во вскрывающих выработках специальных гидроизоляционных перемычек, после чего выработанное пространство участка заполняется жидкой средой. Для калийного рудника данной средой является минерализованный рассол. Рассол для заполнения всего объема участка планируется брать из шламохранилища, в дальнейшем будет происходить донасыщение рассола на сильвинитовой обогатительной фабрике, после чего через рассолосборник центральной насосной станции рассолы будут поступать в выработанное пространство ликвидируемого участка. Для уменьшения вероятности возникновения негативных техногенных последствий при плановой ликвидации потенциально опасного участка шахтного поля калийного рудника выполняются многочисленные научные исследования. На основе прогноза химического состава раствора были выполнены исследования по взаимной растворимости солей, проведены физико-химические расчеты с использованием специального программного обеспечения. Также был изучен вопрос о растворимости междукammerных целиков с определением степени их «погашенности» (ΔM , м). Для минимизации нарушения целостности целиков ликвидацию необходимо проводить достаточно насыщенными растворами, при этом в процессе ликвидации участка калийного рудника будет еще происходить донасыщение поступающих рассолов по NaCl и KCl и постепенное заполнение всего объема пустот. При плановом выполнении контроля параметров закачиваемых рассолов, в случае возникновения несоответствия закачиваемого рассола требуемым параметрам, необходимо приостановить закачку рассола в выработанное пространство для доведения рассола до требуемых параметров.

Ключевые слова: калийный рудник, «мокрая» ликвидация, гидроизолирующие перемычки, химический состав, рассол, донасыщение, выработанное пространство, проницаемость массива, научные исследования, междукammerные целики, растворение, «деградация» целиков.

Для цитирования: Скопинов М. В., Коносавский П. К., Хархордин И. Л., Потапов А. А. Влияние рассола на состояние породного массива при «мокрой» ликвидации участка калийного рудника // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 9. – С. 54–68. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_9_0_54.

Impact of brine on rock mass condition during 'wet' closure of potash mines

M.V. Skopinov¹, P.K. Konosavskii², I.L. Kharkhordin³, A.A. Potapov²

¹ VNII Galurgii JSC, Perm, Russia

² Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia, e-mail: potapov@dhsppb.ru

³ Geostroyproekt LLC, Saint-Petersburg, Russia

Abstract: 'Wet' closure of a potash mine means planned pumping of brines in a potentially hazardous area. Such area is first isolated by means of construction of special waterproof seals in access ways to this area, and then the mined-out void is filled with a fluid medium. For potash mines, such medium is a mineralized brine. It is planned to take brines from a tailings pond and to resaturate them at a sylvinite processing plant. Then, the brines are to be fed to the mined-out void of a site to be closed through a brine collector of a central pumping station. For the reduction of risk of the adverse induced aftereffects in the planned closure of a potentially hazardous site of a potash mine field, ample research investigations are carried out. Based on prediction of chemical composition of a solution, mutual solubility of salts was studied, and the physicochemical calculations were performed using a dedicated software program. Also, solvability of rib pillars was investigated with the determination of their extraction ratio ΔM , m. For minimizing disintegration of rib pillars, closure of a mined-out void should be carried out with sufficiently saturated brines. During closure of such potash mine site, the brines will be resaturated with NaCl and KCl and will gradually fill the whole void. In the course of the planned control of the pumped brine parameters, in case of detection of their inconsistency with the required values, it is necessary to stop the brine pumping in the mined-out void and to bring the brine to the required standard.

Key words: potash mine, 'wet' closure, waterproof seals, chemical composition, brine, resaturation, mined-out void, rock mass permeability, research investigation, rib pillars, dissolution, 'degradation' of pillars.

For citation: Skopinov M. V., Konosavskii P. K., Kharkhordin I. L., Potapov A. A. Impact of brine on rock mass condition during 'wet' closure of potash mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(9):54-68. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_9_0_54.

Введение

Ликвидация горных выработок рудника является совокупностью технических и организационно-правовых мероприятий, которые принимаются в отношении подземного комплекса в целом или его части, предусматривают полное и окончательное прекращение работ, связанных с добычей полезного ископаемого, с последующим обязательным осуществлением мероприятий, исключающих доступ в подземные горные выработки и обеспечивающих безопас-

ность населения, охрану окружающей природной среды, зданий и сооружений.

Главной опасностью при отработке запасов в соляных рудниках является нарушение водозащитной толщи (далее — ВЗТ). В результате нарушения ВЗТ пресная вода может поступать в горные выработки и растворять соляные породы, что может привести к аварийному затоплению рудника [1–3].

Опыт отработки соляных и калийных рудников показал, что наиболее безопасным способом ликвидации горных

выработок является «мокрый» контролируемый способ подачи минерализованного рассола в выработанное пространство [1, 4, 5].

Ликвидацию горных выработок части калийного рудника Верхнекамского месторождения солей (далее — ВКМС) планируется производить путем контролируемой подачи насыщенных рассолов в выработанное пространство. Поступающие рассолы постепенно заполняют весь объем пустот, при этом не произойдет растворения целиков, так как плотность пресных вод ниже плотности закачиваемых рассолов, даже в случае нарушения сплошности ВЗТ пресные воды не будут поступать в выработанное пространство ликвидируемого участка и, соответственно, не приведут к растворению соляных пород. Вследствие применения данного способа вместе с изоляцией и ликвидацией горных выработок части рудника будет решаться вопрос о защите оставшейся части рудника от проникновения в нее пресных вод и затопления из потенциально опасного участка шахтного поля [6, 7].

При применении данного способа подача рассолов в выработанное пространство предусматривается по специально монтируемому трубопроводу. Рассол планируется забирать из существующего рассолосборника центральной насосной станции гидрозакладочного комплекса рудника и перекачивать с помощью вновь монтируемых насосов.

Для снижения негативных последствий при плановой ликвидации потенциально опасного участка калийного рудника ВКМС должны использоваться более минерализованные рассолы. Состав подаваемых на участок рассолов при контролируемом заполнении должен соответствовать составу рассолов на центральной насосной станции.

Количество насыщенного рассола, необходимого для затопления, должно

соответствовать объему пустот выработанного пространства потенциально опасного участка шахтного поля калийного рудника. Количество подаваемого в выработанное пространство рассола должно уточняться по мере проведения ликвидации.

Одним из возможных негативных последствий «мокрой» ликвидации является деградация целиков и образование пустот в непосредственной близости от места поступления рассолов на участок.

В рассматриваемом случае подаваемые в выработанное пространство участка рассолы полностью насыщенными по NaCl и KCl не будут, донасыщение рассола будет производиться уже в процессе заполнения горных выработок, при этом будет происходить определенная деградация междукammerных целиков [8, 9].

Данный процесс деградации может привести к негативным последствиям, следовательно, основной задачей при «мокрой» контролируемой ликвидации участка будет минимизация растворения соляных пород выработанного пространства. Эти процессы приводят к увеличению скоростей оседания почвы и опасности образования провалов на земной поверхности [6].

Для уменьшения вероятности возникновения негативных техногенных последствий при плановой ликвидации потенциально опасного участка шахтного поля калийного рудника должны быть выполнены многочисленные научные исследования, в том числе изучение и прогноз химического состава рассола и прогнозный расчет растворения (деградации) целиков. В процессе проведения исследований необходимо выполнение анализа эмпирических данных по взаимной растворимости солей, а также, с помощью специализированного программного комплекса, требуется выполнение физико-химических расчетов.

С учетом изложенного выше основными задачами исследования являются:

- изучение химического состава рассолов, определение состава минерализации;
- изучение влияния рассолов на массив горных пород в рассматриваемых условиях калийного рудника;
- анализ ущерба (растворения и деградации) междукамерным целикам;
- изучение вопроса по взаимной растворимости солей.

Методика исследований

Для выполнения физико-химических расчетов была использована программа PHREEQC — геохимическая программа, которая предназначена для решения широкого круга моделирования различных геохимических процессов.

Для расчетов коэффициентов активности в концентрированных растворах электролитов был использован метод Питцера (Pitzer, 1979).

Для расчета динамики растворения солей при движении растворов в подземной выработке в среде Visual Studio 2012 на языке C++ была использована компьютерная программа SOLIPC. Программа имеет диалоговый интерфейс и позволяет задавать основные параметры моделей.

Для решения задачи, связанной с оценкой растворения междукамерных целиков, была разработана численная фильтрационно-миграционная модель, реализованная с использованием программного пакета PM8: Processing Modflow версии 8 [10].

Пакет предназначен для решения гидрогеологических задач, связанных с прогнозом течения подземных вод в многослойных системах в рамках предпосылок сплошности среды и ламинарного режима течения. Он позволяет решать задачи в стационарной и нестационарной постановке и моделировать

как напорную, так и безнапорную фильтрацию и миграцию растворенного вещества в подземных водах.

Численный расчет ущерба (деградации) междукамерным целикам по каждому минералу производился исходя из расчетного значения текущей (на каждом временном шаге) концентрации соответствующей соли, в каждом расчетном блоке с соответствующими координатами, и является результирующей величиной, получаемой при решении совокупной задачи переноса растворенного вещества и растворения. При этом моделирование такого миграционного процесса на каждом временном шаге в программе Mt3DMS реализовано в два этапа:

- решение задачи собственно переноса вещества в пределах всей модели;
- моделирование собственно растворения.

Также специально для численного решения геофильтрационной и геомиграционной задачи растворения сильвинита были разработаны геофильтрационная модель (с использованием программы ModFlow) и геомиграционная модель (для моделирования процессов растворения и дальнейшей миграции солей — при помощи программы Mt3DMS, использующей метод характеристик в различных его вариантах (МОС, ММОС, НМОС)).

Схема проведения «мокрой» контролируемой ликвидации

Рассматриваемый потенциально опасный участок расположен на одном из рудников ВКМС, на шахтном поле которого продолжаются горные работы по добыче сильвинитовой руды из промышленных пластов АБ и КрII.

Рассматриваемый участок отделяется от остальной части шахтного поля гидроизоляционным целиком и вскрыт главными штреками и пройденными из

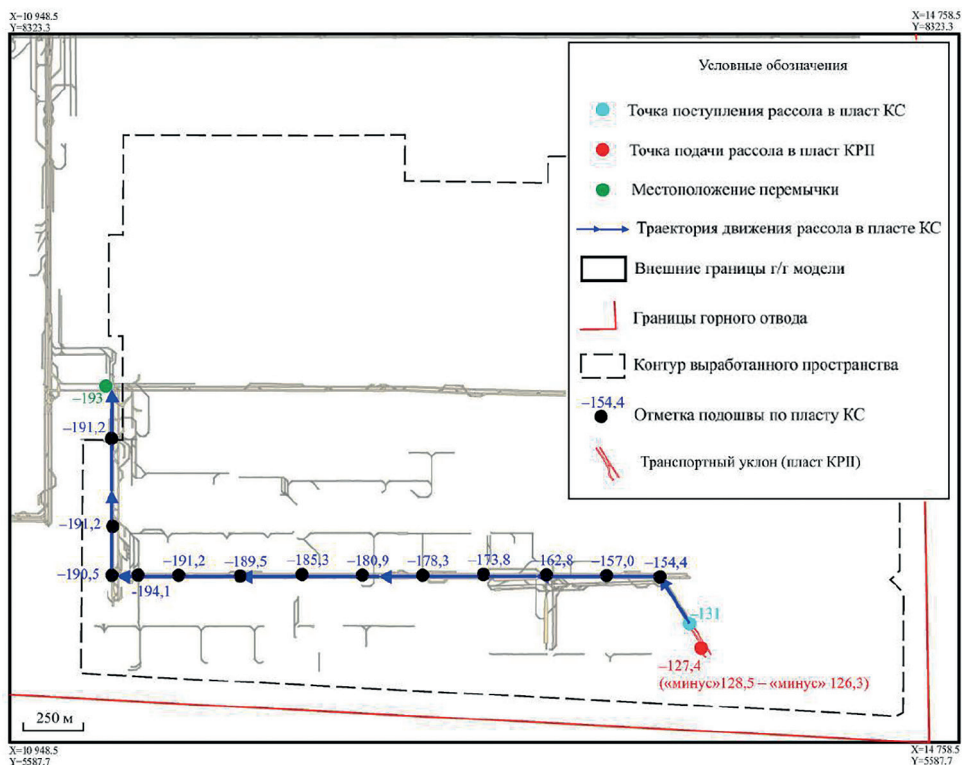


Рис. 1. Схема движения рассолов на рассматриваемом участке калийного рудника

Fig. 1. The flow pattern of brines in the considered site of the potash mine

них групповыми выработками. Добычные работы на рассматриваемом участке закончены, закладка выработанного пространства завершена. Следовательно, данный участок полностью соответствует требованиям для проведения плановой контролируемой ликвидации.

При плановой ликвидации потенциально опасного участка калийного рудника ВКМС затопление происходит в условной точке подачи рассола, находящейся в гипсометрически наивысшей точке пласта каменной соли (КС), от которой воды, продвигаясь по штрекам, достигнут перемычки между двумя частями рудника.

При этом раствор будет подаваться по пласту КрII в точку с абсолютной отметкой минус 127,4 м с расходом 300 м³/ч (7200 м³/сут). А затем под дей-

ствием гравитационных сил перепускаться по транспортному уклону в пласт КС. Схема движения рассолов представлена на рис. 1.

Состав подаваемых в шахту рассолов будет соответствовать составу рассолов на центральной насосной станции после донасыщения, таким образом, исходная минерализация планируемого к подаче рассола примерно будет составлять 358 г/л.

Рассол для заполнения участка шахтного поля рудника будет подаваться из шламохранилища, донасыщаться в отделении обогащения сильвинитовой обогатительной фабрики и поступать в установки приготовления пульпы гидро-закладочного комплекса рудника. Далее рассол будет забираться из существующего рассолосборника центральной

насосной станции гидрозакладочного комплекса рудника и перекачиваться с помощью вновь монтируемых насосов в выработанное пространство ликвидируемого участка. Таким образом будет постоянно подпитываться оборотный рассол гидрозакладочного комплекса и, проходя через комплекс гидрозакладки, забираться из насосной станции для подачи в ликвидируемые горные выработки.

Химический состав рассолов для проведения «мокрой» контролируемой ликвидации

Рассолы для мокрой ликвидации калийного рудника должны быть равновесными с компонентами пород, слага-

ющих междукammerные целики, с целью обеспечения минимизации вероятности проникновения в шахту пресных вод из водоносных горизонтов, а также для снижения деформаций земной поверхности за счет гидравлического подпора рассолов в выработанном пространстве.

Состав подаваемых на участок рассолов при контролируемом заполнении соответствует составу рассолов на центральной насосной станции. Состав подаваемых рассолов приведен в табл. 1.

При движении по пластам KpII и KC раствор будет взаимодействовать преимущественно с силвинитом по пласту KpII и с галитом по пласту KC. После проведения статистической обработки

Таблица 1

Химический состав рассола на центральной насосной станции из 18 проб Chemical composition of brine at the central pumping station from 18 samples

№ пробы	Плотность, г/см ³	pH	Химический состав							
			анионы, г/л				катионы, г/л			
			HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Br ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
1	1,230	6,3	0,043	1,54	210,00	1,52	4,13	6,49	89,70	53,60
2	1,230	6,3	0,037	1,62	211,00	1,57	4,23	5,74	94,70	54,60
3	1,235	6,6	0,041	1,73	209,11	1,38	3,59	5,52	93,03	54,90
4	1,230	5,3	0,047	1,75	207,86	1,27	4,03	5,13	88,42	56,80
5	1,228	6,5	0,036	1,70	213,48	1,26	3,61	4,80	96,60	56,73
6	1,230	6,4	0,039	1,66	233,36	1,17	7,62	9,12	94,50	56,73
7	1,228	6,5	0,045	1,72	206,80	1,32	3,41	4,68	93,89	50,77
8	1,229	6,2	0,036	1,59	211,41	1,35	3,93	4,34	93,15	54,95
9	1,231	6,3	0,036	1,58	211,02	1,38	3,91	5,05	92,80	53,66
10	1,231	6,7	0,037	1,45	206,72	1,50	3,81	4,13	92,86	57,79
11	1,230	6,5	0,036	1,62	214,53	1,43	3,73	4,41	96,22	55,85
12	1,232	6,3	0,041	1,59	210,32	1,36	3,76	4,38	93,75	57,50
13	1,235	6,4	0,037	1,61	217,25	1,37	3,85	4,08	95,46	58,45
14	1,234	6,1	0,038	1,69	206,76	1,41	3,46	0,97	92,61	56,28
15	1,230	6,5	0,034	1,60	208,65	1,49	4,10	3,90	93,02	53,81
16	1,233	6,6	0,038	1,66	213,85	1,40	3,69	4,14	95,00	59,71
17	1,233	6,4	0,037	1,64	204,76	1,24	3,46	4,04	94,51	53,92
18	1,231	6,7	0,033	1,67	211,48	1,46	3,66	4,13	98,21	55,43

Таблица 2

**Результаты статистической обработки данных
по химическому составу рассолов на центральной насосной станции**
**Results of statistical processing of data on the chemical composition
of brines in the central pumping station**

	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум	Стандартное отклонение
Na	93,80	93,820	88,415	98,214	2,2998
Ca	4,00	3,786	3,407	7,615	0,9340
Mg	4,73	4,396	0,972	9,117	1,5602
K	55,64	55,640	50,769	59,709	2,1280
Cl	211,580	210,662	204,759	233,361	6,2948
SO ₄	1,63	1,630	1,451	1,751	0,0735
HCO ₃	0,04	0,037	0,033	0,047	0,0037
Плотность	1,23	1,231	1,228	1,235	0,0021
pH	6,37	6,400	5,300	6,700	0,3125
Минерализация	371,41	368,721	361,306	403,024	9,8550

данных по составу рассолов в насосной станции были получены следующие данные (табл. 2).

Статистический анализ демонстрирует близкие значения средних и медианных величин практически по всем показателям, а также небольшие по сравнению со средними значениями величинами стандартных отклонений. Это указывает на стабильность химического состава рассолов во времени.

Таким образом, параметры рассола, который будет закачиваться в выработанное пространство, примерно должны соответствовать следующим значениям:

- минерализация по NaCl — 291,0 г/л;
- минерализация по KCl — 67,5 г/л;
- плотность — 1,228 г/см³;
- KCl — 5,5%;
- NaCl — 23,7%.

Минерализации воды по KCl в точке гидроизоляция перемычки будет составлять те же 67,5 г/л, отсутствие разницы в минерализации с подаваемым рассолом объясняется насыщенностью исходного рассола по NaCl.

**Оценка влияния рассолов
на растворение целиков**

Задача включала оценку насыщенности раствора по отношению к возможным минеральным фазам, а также оценку взаимодействия раствора с галитом, сильвинитом и одновременно с галитом и сильвинитом. В табл. 3 приведены результаты расчета насыщенности рассола по отношению к некоторым минералам [10, 11].

Расчет выполнен для диапазона температур от 5 до 25 °С с интервалом в 5°. В результате данных исследований было выявлено, что раствор находится в равновесии одновременно с сильвинитом и галитом, следовательно, он не агрессивен к указанным минералам и при затоплении рудника не претерпит существенных изменений. Также при всех температурах раствор насыщен по отношению к галиту и его дальнейшее растворение в процессе миграции по выработанному пространству является невозможным. В результате дальнейшей миграции рассола в затопленных выработках при отсутствии доступного

Таблица 3

**Насыщенность растворов с центральной насосной станции
по отношению к отдельным минералам**

Saturation of solutions with the central pumping station in relation to individual minerals

Минерал	Индекс насыщенности	Произведение активностей	Константа равновесия	Химическая формула
Кальцит	0,23	-8,16	-8,39	CaCO_3
Гергейит	4,147	-25,94	-30,08	$\text{K}_2\text{Ca}_5(\text{SO}_4)_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Гипс	-0,09	-4,69	-4,6	$\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Галит	-0,01	1,55	1,55	NaCl
Сильвин	0	0,77	0,77	KCl

для растворения гипса может несколько снизиться концентрация сульфатов и кальция за счет осаждения гергейита [12].

Поскольку раствор не агрессивен к породам, слагающим стены и почву выработок, его трансформации в процессе миграции по горным выработкам практически не будет. Состав рассола после установления равновесия с галитом, сильвинитом и гергейитом приведен в табл. 4.

Данный анализ показал, что рассолы с центральной насосной станции предельно насыщены как по сильвиниту, так и по галиту. Следовательно, возможности трансформации рассола в процессе миграции как по пласту KpII, так и по пласту каменной соли крайне ограничены. Можно только ожидать выпадения в осадок незначительного количества гергейита и, как следствие, снижения концентрации сульфата кальция. На основании этих оценок можно сказать, что затопление участка калийного рудника ВКМС рассолами с цент-

Таблица 4

Состав рассолов, поступающих с центральной насосной станции,

после установления равновесия

Composition of brines coming from the central pumping station after equilibrium is established

Плотность, г/см ³	рН	Химический состав							
		анионы, г/л				катионы, г/л			
		HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Br^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+
1,2317	6,37	0,04	0,36	212,24	1,38	4,14	4,67	93,9	56,3

ральной насосной станции даст минимальный ущерб растворению междокамерных целиков.

Подача рассолов планируется с отметки минус 127,4 м на пласте KpII, далее на отметке минус 131 м рассол поступает в выработанное пространство пластов АБ и КС и, двигаясь по штрекам (основным путем фильтрации в выработанном пространстве), рассол достигает изолирующей перемычки на пласте КС, схема движения рассолов по выработкам с отметками приведена на рис. 1.

Определение возможного растворения и деградации соляных пород

Для решения задачи, связанной с растворением междокамерных целиков на рассматриваемом потенциально опасном участке калийного рудника ВКМС, использовался программный комплекс РМ8, подробное описание которого приведено выше [13, 14].

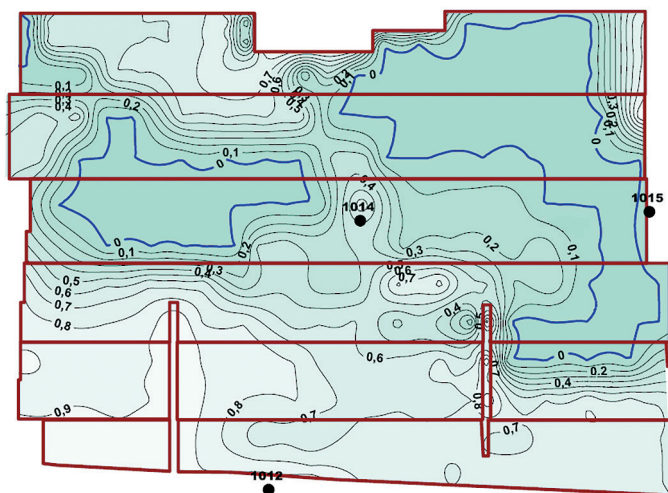


Рис. 2. Распределение параметра ΔM (м) по пласту KrII на момент начала затопления участка
Fig. 2. Distribution of the parameter ΔM (m) across the KrII seam at the start of flooding of the site

В процессе проведения исследований были выполнены различные варианты расчетов (с разными коэффициентами фильтрации). Также для расчетов определялись значения пористости для каждого из пластов и учитывался коэффициент упругости, который задавался равным коэффициенту сжимаемости воды [15].

Для расчетного варианта затопления рудника по результатам численного моделирования дана оценка степени деградации междукammerных целиков (Δ) (уменьшение ширины целика $\Delta b = 2\Delta$, где b — ширина целика) на момент полного заполнения выработанного пространства рассматриваемой части калийного рудника.

При выполнении расчетов деградации междукammerных целиков также был учтен тот факт, что к началу затопления очистные камеры участка уже частично «погашены». Таким образом, в рассматриваемых условиях растворению (или деградации) будет подвержена только «свободная» для прохождения рассола часть междукammerных целиков.

Относительная оценка степени «погашенности» выполнялась по формуле

$$\Delta M = \frac{\eta_k - \eta_t}{\eta_k},$$

где η_k — конечные оседания земной поверхности; η_t — текущие оседания. При $\Delta M = 0$ — очистные камеры полностью «погашены», при $\Delta M = 1$ — конструктивные элементы сохраняют свою исходную устойчивость.

Распределения степени «погашенности» (ΔM , м) по пластам на момент начала ликвидации рассматриваемого участка приведены на рис. 2, 3.

В результате выполненных исследований был сделан вывод, что участки с наибольшим процентом растворения целиков находятся в точках поступления рассола на ликвидируемый участок и в местах расположения гидроизоляционных перемычек. Наибольшее растворение соляного массива по площади приходится именно на участок, где расположены гидроизоляционные сооружения [16]. Степень деградации междукammerных целиков на момент полного затопления рассматриваемого участка по пластам АБ и KrII представлена на рис. 4, 5.

В результате данных исследований также было выявлено, что максималь-

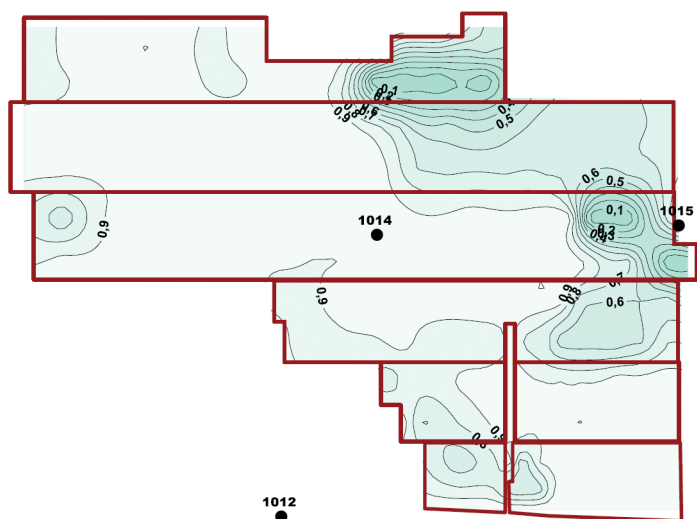


Рис. 3. Распределение параметра ΔM по пласту АБ на момент начала затопления участка
 Fig. 3. Distribution of the parameter ΔM across the AB seam at the start of flooding of the site

ная степень «погашения» очистных камер наблюдается на пласте КрII, а также чуть менее выражено на пласте АБ в районе скв. 1014 и в восточной части участка; это позитивный фактор, так как уменьшится возможность свободного проникновения рассолов в выработанное пространство [17 – 21].

Практические рекомендации по обеспечению безопасного проведения «мокрой» контролируемой ликвидации

Контроль концентрации солей в рассоле, закачиваемом в выработанное пространство ликвидируемого участка рудника, необходимо выполнять через конт-

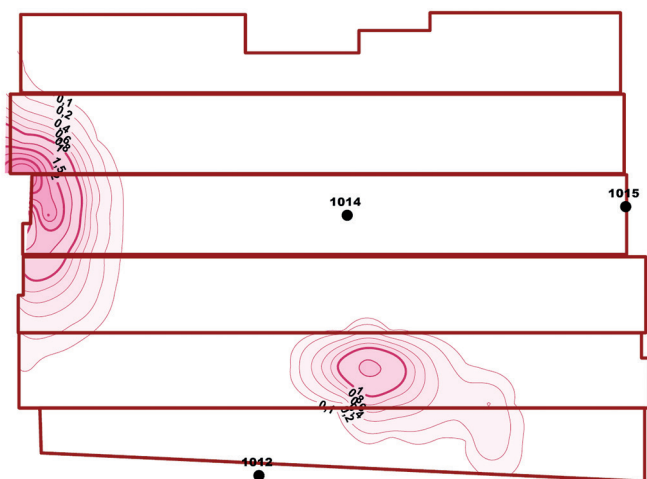


Рис. 4. Изолинии деградации целиков Δb пласта КрII при полном затоплении рассматриваемой части калийного рудника ВКМС

Fig. 4. Isolines of pillars Δb degradation of the KrII seam during complete flooding of the considered part of the potash mine of Verkhnekamskoye salt deposit

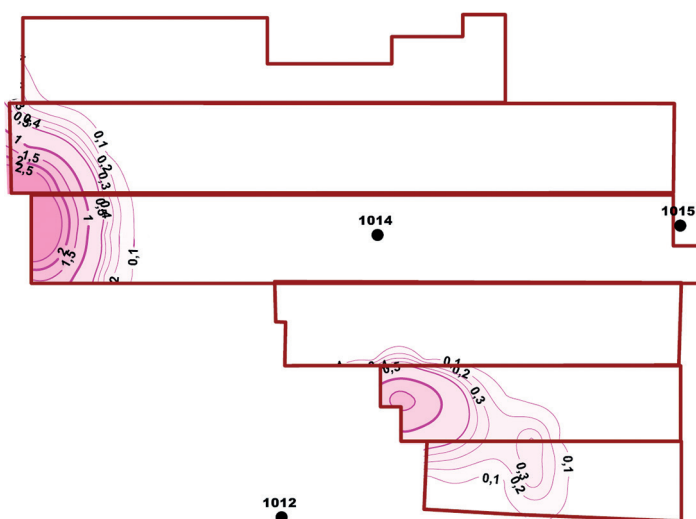


Рис. 5. Изолинии деградации целиков Δb пласта АБ при полном затоплении рассматриваемой части калийного рудника ВКМС

Fig. 5. Isolines of pillars Δb degradation of the AB seam during complete flooding of the considered part of the potash mine of Verkhnekamskoye salt deposit

роль плотности рассола. Для этого с периодичностью два раза в смену будет производиться отбор проб из рассолосборника центральной насосной станции. По полученным значениям плотности приблизительно определяется концентрация растворенных в рассоле солей. При необходимости аналогичный контроль насыщенности рассола может проводиться в рассолосборниках устройства нижнего слива (УНС). Контроль плотности рассола также допускается производить цифровыми датчиками (плотномерами). Датчики могут быть установлены на трубопроводах вблизи от центральной насосной станции. Показа-

ния датчиков будут выведены на автоматизированное рабочее место оператора центральной насосной станции. Способ контроля насыщенности рассола по его плотности применяется для экспресс-анализа насыщенности рассола.

Кроме того, для более точного определения насыщенности рассола по хлористому калию применяется прямой метод контроля — химический анализ рассола. Для этого предусматривается периодический (один раз в 10 дней) отбор проб для анализа в химической лаборатории. Пробы рассола отбираются из рассолосборника центральной насосной станции.

Таблица 5

Параметры закачиваемого рассола
Brine parameters

Наименование параметра	Значение параметра
Плотность рассола, г/см ³	1,228, не менее
Содержание KCl, г/л (%)	67,5 (5,5), не менее
Содержание NaCl, г/л (%)	232,2 (18,9), не менее
Содержание суммы солей KCl+NaCl, г/л (%)	299,7 (24,4), не менее

Параметры рассола, который необходимо закачивать в выработанное пространство рудника при ликвидации, должно соответствовать параметрам, приведенным в табл. 5.

В случае несоответствия параметров закачиваемого рассола приведенным в табл. 4, закачка рассола должна быть временно прекращена до выяснения причин снижения насыщенности рассола солями и доведения рассола до требуемых параметров.

Заключение

При «мокром» способе ликвидации калийных рудников производится контролируемая закачка рассола в выработанное пространство участка по специально монтируемому трубопроводу. Поступающие насыщенные рассолы, постепенно заполняя весь объем пустот, минимально влияют на растворение целиков. В связи с этим обеспечивается минимальная деградация вмещающего массива и, соответственно, возможны допустимые деформации водозащитной

толщи без нарушения ее сплошности, а также допустимые оседания земной поверхности, не приводящие к нарушениям объектов.

Для минимизации растворения солей на ликвидируемом участке шахтного поля рудника должны производиться:

- оценка остаточного количества пустот, которые требуется заполнить рассолом;
- определение путей подачи рассола, а также путей миграции в процессе заполнения выработок;
- расчеты сроков заполнения выработанного пространства рассолами;
- определение вариантов состава рассола, который возможно подать в ликвидируемые выработки;
- расчеты деградации междукammerных целиков при заполнении выработанного пространства различными вариантами рассола по составу;
- выбор состава рассола, обеспечивающего безопасное проведение технических мероприятий по ликвидации выработанного пространства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов Э. В., Зданович М. Я., Урминский Д. Г., Скопинов М. В., Курсанин Ю. В., Салахив Д. Ф., Русаков М. И., Носов О. А., Елькин А. А. Патент RU 2 801 258 C1, 04.08.2023. Способ герметизации участка горной выработки в соляном руднике. 2023. Бюл. № 22.
2. Скопинов М. В. Гидроизоляция выработанного пространства при ликвидации потенциально опасного участка на калийном руднике // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2025. — № 4. — С. 59–71. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_4_0_59.
3. Потапов А. А., Коносовский Р. А., Филин Р. А. Численная фильтрационная и миграционная модель для оценки растворения междукammerных целиков при аварийном затоплении рудника СКРУ-2 Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / Инженерная и рудная геофизика 2020: 16-я научно-практическая конференция совместно с семинаром «Инженерная и рудная геология — 2020». — Пермь, 2020. — С. 79. DOI: 10.3997/2214-4609.202051100.
4. Whyatt J., Varley F. Catastrophic failures of underground evaporite mines / Proceedings of 27th International Conference on Ground Control in Mining. Morgantown, West Virginia, USA, 2008, pp. 113–122.
5. Rauche H. Sinkhole formation over flooded potash mines — Case studies from the motherland of the potash industry / Fall 2000 Meeting. San Antonio, Texas, USA, 2000, p. 161.
6. Барях А. А., Евсеев А. В. Ликвидация калийных рудников и соляных шахт: обзор и анализ проблемы // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 9. — С. 5–29. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-09-0-5-29.
7. Потапов А. А., Коносовский П. К., Макашов С. Э. Численное моделирование естественной гидрогеохимической зональности в районе шахтного поля БКПРУ-1 Верхнекамского ме-

сторождения калийных солей // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. — 2017. — № 6. — С. 52 — 65.

8. Борзаковский Б. А., Шилов А. В. Процессы выщелачивания солей при затоплении рудника БКПРУ-1 // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2010. — № 9. — С. 136 — 143.

9. Радченко Д. Н., Бергер Р. В., Татарников В. И., Зубков П. О. Экспериментальное исследование характера и последствий взаимодействия соляных пород с гидрозакладочными рассолами при подземной разработке месторождений калийных солей // Маркшейдерия и недропользование. — 2023. — № 6. — С. 60 — 67. DOI: 10.56195/20793332_2023_6_60_67.

10. Parkhurst D. L. User's guide to PHREEQC: a computer program for speciation, reactionpath, advective transport, and inverse geochemical calculation / U.S.G.S. Water Resources Invs. Rept. 1995, vol. 95-4227, 143 p.

11. Parkhurst D. L., Appelo C. A. J. User's guide to PHREEQC (Version 2) — A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations / U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99, 1999, vol. 4259, 312 p.

12. Чайковский И. И. Калистронцит и гёргейит Верхнекамского месторождения солей // Записки Российского минералогического общества. — 2011. — № 3. — С. 83 — 87.

13. Langevin C. D., Shoemaker W. B. MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model — Documentation of the SEAWAT-2000 Version with the Variable-Density Flow Process (VDF) and the Integrated MT3DMS Transport Process (IMT). Open-File Report 2003-426. 2013. DOI: 10.3133/ofr03426.

14. Langevin Ch. D., Shoemaker W. B., Weixing Guo MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model — Documentation of the SEAWAT-2000 Version with the Variable-Density Flow Process (VDF) and the Integrated MT3DMS Transport Process (IMT). Open-File Report. Tallahassee, Florida 2003. DOI: 10.3133/ofr03426.

15. Baryakh A. A., Samodelkina N. A., Konosavsky P. K. Prevention of freshwater breakthrough into potassium mines // Procedia Structural Integrity. 2021, vol. 32, pp. 17 — 25.

16. Шкуратский Д. Н., Скопинов М. В., Смирнов Э. В., Барях А. А. Ликвидация потенциально опасных участков на калийных рудниках // Горный журнал. — 2023. — № 3. — С. 5 — 12. DOI: 10.17580/gzh.2023.03.01.

17. Зольников Н. А., Климович В. В., Титова Н. В., Дешковский В. Н. Воздействие рассолов на соляные породы // Горная механика и машиностроение. — 2015. — № 3. — С. 11 — 17.

18. Титова Н. В., Протьюко Н. С., Шутин С. Г. Тампонажный материал для герметизации горной породы при строительстве гидроизоляционных сооружений в калийных рудниках // Горная механика и машиностроение. — 2024. — № 2. — С. 78 — 84.

19. Рысин А. И., Лебедева А. М., Карасев М. А., Нуртдинов А. С. Влияние техногенных рассолов на прочностные характеристики пород продуктивной толщи Палашерского участка Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей // Записки Горного института. — 2025. — Т. 274. — С. 142 — 153.

20. Ильинов М. Д., Коршунов В. А., Поспехов Г. Б., Шоков А. Н. Комплексные экспериментальные исследования механических свойств горных пород: проблемы и пути их решения // Горный журнал. — 2023. — № 5. — С. 11 — 18. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.02.

21. Проскуряков Н. М., Пермьяков Р. С., Черников А. К. Физико-механические свойства соляных пород / Под ред. И.Г. Сидорова. — Л.: Недра, 1973. — 271 с. **ГИАБ**

REFERENCES

1. Smirnov E. V., Zdanovich M. Ya., Urminskiy D. G., Skopinov M. V., Kursanin Yu. V., Salakhiev D. F., Rusakov M. I., Nosov O. A., El'kin A. A. Patent RU 2 801 258 S1, 04.08.2023. [In Russ].

2. Skopinov M. V. Waterproofing of mined-out voids during closure of potentially hazardous sites in potash mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025, no. 4, pp. 59 — 71. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_4_0_59.

3. Potapov A. A., Konosovskii R. A., Filin R. A. Numerical filtration and migration model for assessing the dissolution of interchamber pillars during emergency flooding of the SKRU-2 mine of Vernekamskoye potash-magnesium salt deposit. *Inzhenernaya i rudnaya geofizika 2020: 16-ya nauchno-prakticheskaya konferentsiya sovmestno s seminarom «Inzhenernaya i rudnaya geologiya — 2020»*

[Inzhenernaya i rudnaya geofizika 2020: 16th scientific and practical conference together with a seminar «Inzhenernaya i rudnaya geologiya 2020»], Perm, 2020, pp. 79. [In Russ]. DOI: 10.3997/2214-4609.202051100.

4. Whyatt J., Varley F. Catastrophic failures of underground evaporite mines. *Proceedings of 27th International Conference on Ground Control in Mining*. Morgantown, West Virginia, USA, 2008, pp. 113–122.

5. Rauche H. Sinkhole formation over flooded potash mines — Case studies from the motherland of the potash industry. *Fall 2000 Meeting*. San Antonio, Texas, USA, 2000, p. 161.

6. Baryah A. A., Evseev A. V. Closure of potash and salt mines: Review and analysis of the problem. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 9, pp. 5–29. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-09-05-29.

7. Potapov A. A., Konosavskii P. K., Makashov S. E. Numerical modeling of natural hydrogeochemical zonation in the area of the BKPRU-1 mine field of Verkhnekamskoe potash salt deposit. *Geokologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*. 2017, no. 6, pp. 52–65. [In Russ].

8. Borzakovskii B. A., Shilov A. V. Salt leaching processes during flooding of the BKPRU-1 mine. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2010, no. 9, pp. 136–143. [In Russ].

9. Radchenko D. N., Berger R. V., Tatarnikov V. I., Zubkov P. O. Experimental study of the nature and consequences of interaction of salt rocks with hydrofilling brines during underground development of potassium salt deposits. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2023, no. 6, pp. 60–67. [In Russ]. DOI: 10.56195/20793332_2023_6_60_67.

10. Parkhurst D. L. User's guide to PHREEQC: a computer program for speciation, reaction path, advective transport, and inverse geochemical calculation. *U.S.G.S. Water Resources Invs. Rept.* 1995, vol. 95-4227, 143 p.

11. Parkhurst D. L., Appelo C. A. J. User's guide to PHREEQC (Version 2) — A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. *U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99*, 1999, vol. 4259, 312 p.

12. Chaikovskii I. I. Kalistrontite and görgeyite of Verkhnekamskoe salt deposit. *Proceedings of the Russian Mineralogical Society*. 2011, no. 3, pp. 83–87. [In Russ].

13. Langevin C. D., Shoemaker W. B. *MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model — Documentation of the SEAWAT-2000 Version with the Variable-Density Flow Process (VDF) and the Integrated MT3DMS Transport Process (IMT)*. Open-File Report 2003-426. 2013. DOI: 10.3133/ofr03426.

14. Langevin Ch. D., Shoemaker W. B., Weixing Guo *MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model — Documentation of the SEAWAT-2000 Version with the Variable-Density Flow Process (VDF) and the Integrated MT3DMS Transport Process (IMT)*. Open-File Report. Tallahassee, Florida 2003. DOI: 10.3133/ofr03426.

15. Baryakh A. A., Samodelkina N. A., Konosavsky P. K. Prevention of freshwater breakthrough into potassium mines. *Procedia Structural Integrity*. 2021, vol. 32, pp. 17–25.

16. Shkuratskii D. N., Skopinov M. V., Smirnov E. V., Baryakh A. A. Elimination of potentially hazardous areas in potash mines. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 3, pp. 5–12. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.03.01.

17. Zol'nikov N. A., Klimovich V. V., Titova N. V., Deshkovskii V. N. The effect of brines on salt rocks. *Gornaya mekhanika i mashinostroenie*. 2015, no. 3, pp. 11–17. [In Russ].

18. Titova N. V., Prot'ko N. S., Shutin S. G. Grouting material for the sealing of rock in the construction of waterproofing structures in potash mines. *Gornaya mekhanika i mashinostroenie*. 2024, no. 2, pp. 78–84. [In Russ].

19. Rysin A. I., Lebedeva A. M., Karasev M. A., Nurtudinov A. S. The influence of man-made brines on the strength characteristics of productive strata rocks of Palasherskiy site of Verkhnekamskoye potash-magnesium salt deposit. *Journal of Mining Institute*. 2025, vol. 274, pp. 142–153. [In Russ].

20. Il'inov M. D., Korshunov V. A., Pospekhov G. B., Shokov A. N. Comprehensive experimental studies of the mechanical properties of rock: problems and ways to solve them. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 5, pp. 11–18. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.02.

21. Proskuryakov N. M., Permyakov R. S., Chernikov A. K. *Fiziko-mekhanicheskie svoystva solyanykh porod* [Physical and mechanical properties of salt rocks], Leningrad, Nedra, 1973, 271 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Скопинов Михаил Владимирович — директор проектной части, директор горно-геологической научной части, АО «ВНИИ Галургии», e-mail: Mihail.Skopinov@uralkali.com,
Коносавский Павел Константинович — канд. геол.-минерал. наук, доцент, Горный институт Уральского отделения РАН, e-mail: konosavsky@dhspb.ru,
Хархордин Иван Леонидович — канд. геол.-минерал. наук, заместитель директора, ООО «Геостройпроект», e-mail: kharkhordin@rambler.ru,
Потапов Александр Анатольевич — канд. геол.-минерал. наук, доцент, Горный институт Уральского отделения РАН, e-mail: potapov@dhspb.ru.

Для контактов: Потапов А.А., e-mail: potapov@dhspb.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

M. V. Skopinov, Director for Design, Director of Mining and Geological Research Section, VNII Galurgii JSC, 614002, Perm, Russia, e-mail: Mihail.Skopinov@uralkali.com,
P. K. Konosavskii, Cand. Sci. (Geol. Mineral.), Associate Professor, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 614007, Perm, Russia, e-mail: konosavsky@dhspb.ru,
I. L. Kharkhordin, Cand. Sci. (Geol. Mineral.), Deputy Director, Geostroyproekt LLC, 199106, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: kharkhordin@rambler.ru,
A. A. Potapov, Cand. Sci. (Geol. Mineral.), Associate Professor, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 614007, Perm, Russia, e-mail: potapov@dhspb.ru.

Corresponding author: A. A. Potapov, e-mail: potapov@dhspb.ru.

Получена редакцией 17.03.2026; получена после рецензии 19.05.2026; принята к печати 10.08.2026.
Received by the editors 17.03.2026; received after the review 19.05.2026; accepted for printing 10.08.2026.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ
(специальный выпуск), смотри на www.gornaya-kniga.ru

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАХВАТА ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ФРАКЦИЙ ПЫЛИ ЖИДКОСТЬЮ
ПРИ ГИДРООБЕСПЫЛИВАНИИ НА ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ**
(2026, № 3, СБ 9, 16 с.)

Пернебек Бектур Пернебекулы — ассистент, НИТУ МИСИС, e-mail: pbektur@mail.ru.

EFFICIENCY OF CAPTURE OF FINE DUST FRACTIONS BY LIQUID DURING HYDRAULIC DEDUSTING AT MINING AND METALLURGICAL ENTERPRISES

B. P. Pernebek, Assistant, NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia, e-mail: pbektur@mail.ru.