

ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ
РАСЧЕТОВ УСТОЙЧИВОСТИ ПОДРАБОТАННОГО ПОРОДНОГО
МАССИВА СО СЛОЖНЫМ ТЕКТОНИЧЕСКИМ СТРОЕНИЕМА. А. Барях*¹, И. А. Санфиров¹, М. В. Дьяконов², С. Ю. Лобанов¹, А. И. Никифорова¹¹Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Россия²ПАО «Уралкалий», г. Березники, Россия* **Контакт:** Александр Абрамович Барях, bar@mi-perm.ru

На примере Тюбегатанского месторождения калийных солей (Узбекистан) рассмотрен комплекс геофизического и геомеханического обеспечения безопасности горных работ в условиях сложного тектонического строения подработанного породного массива. Геофизические исследования включали наземные сейсморазведочные наблюдения по системе профилей в сочетании с «легкими» стандартными методами электро- и гравиразведки. По результатам этих работ производилось построение физико-геологической модели участков месторождения с локализацией ослабленных зон и разрывных нарушений. В рамках содержательной интерпретации физико-геологическая модель трансформировалась в геомеханическую расчетную схему, которая отражала основные горно-геологические и горнотехнические условия разработки и базировалась на модели упругопластического деформирования соляных пород. Калибровка геомеханической модели производилась по результатам радарной интерферометрической съемки. Фактор времени учитывался в соответствии с разработанной модификацией известного метода переменных модулей деформации. Формирование зон пластичности в физическом выражении отождествлялось с образованием областей трещиноватости в водозащитной толще, определяющих опасность нарушения ее сплошности. Численная реализация геомеханической модели методом конечных элементов позволила обосновать оптимальные параметры камерной системы разработки, обеспечивающие сохранность водозащитной толщи, включая и зоны разрывных нарушений.

Ключевые слова: калийные месторождения, водозащитная толща, тектоника, разрывные нарушения, геофизические исследования, геомеханика, математическое моделирование, численная реализация.

Цитирование: Барях А. А., Санфиров И. А., Дьяконов М. В., Лобанов С. Ю., Никифорова А. И. Информационное обеспечение геомеханических расчетов устойчивости подработанного породного массива со сложным тектоническим строением // Russian Journal of Earth Sciences. — 2024. — Т. 24. — ES1012. — DOI: 10.2205/2024es000894

Введение

В современных условиях глобального дефицита продовольствия активизируется разработка месторождений калийных руд в сложных горно-геологических условиях [Рыльникова и др., 2023; Putjan et al., 2022; Rauche, 2015]. Для подобного типа месторождений общеизвестны повышенные риски, связанные с геологическим строением водоупорных пород, перекрывающих продуктивную толщу, и опасностью прорыва пресных вод в горные выработки [Барях и Евсеев, 2019; Рудковский и др., 2011; Gendzwill and Brehm, 1993; Prugger and Prugger, 1991]. В этой связи особую значимость при

Получено: 15 октября 2023 г.

Принято: 15 января 2024 г.

Опубликовано: 29 февраля 2024 г.



© 2024. Коллектив авторов.

разработке месторождений минеральных солей приобретает геомеханическая оценка влияния горных работ на сохранность водозащитных толщ (ВЗТ), отделяющих водоносные горизонты от выработанного пространства.

Традиционно в качестве информационного обеспечения геомеханических расчетов, основанных на современных численных методах математического моделирования [Барях и др., 2017; Беляков и Беликов, 2022; Karasev et al., 2022] и критериях разрушения [Baryakh and Tsayukov, 2022; *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014*, 2015; You, 2011], используются: данные о физико-механических свойствах горных пород, пространственные физико-геологические модели разрабатываемых участков шахтных полей, параметры ведения горных работ, результаты инструментальных измерений деформаций в горных выработках и оседаний земной поверхности. Из всех перечисленных составляющих наиболее неустойчивой в плане достоверности является физико-геологическая модель.

В простых горно-геологических условиях, без значимой латеральной изменчивости строения и свойств породного массива, модельные построения теоретически могут базироваться только на результатах геологоразведочного бурения. Общемировая практика эксплуатации месторождений водорастворимых полезных ископаемых [Барях и др., 2009] показывает, что подобная ситуация наблюдается крайне редко. Необходимой является повышенная пространственная дискретизация опробования структурно-физических параметров разрабатываемого интервала породного массива. С этой целью применяются различные геофизические исследования, обычно в виде определенного комплекса методов. Содержание комплекса определяется особенностями строения объекта изучения. Для месторождений минеральных солей пластового типа наибольшее распространение получили сейсмо-, электро- и гравиразведка. В качестве параметрического обеспечения интерпретационных заключений по данным наземных наблюдений выполняются и скважинные геофизические исследования [Болгаров и Рослов, 2009; Глебов, 2004; Nolet, 2008; Yilmaz, 2008].

На крупнейшем в Европе Верхнекамском месторождении калийных и магниевых солей для информационного обеспечения геомеханических расчетов применяется сейморазведка на отраженных волнах с привлечением интерференционных систем регистрации по методике многократных перекрытий [Барях и др., 2017].

Подобное методическое решение обусловлено благоприятными сейсмогеологическими условиями, заключающимися в адекватности слоистой квазипараллельной модели реальным средам и подходящих для проведения наземных сейморазведочных наблюдений поверхностных условиях. Наличие аналогичных условий определило ведущую роль сейморазведочных наблюдений и на крупнейшем в мире Саскачеванском месторождении (Канада) [Gendzwill and Stead, 1992; Halabura (Steve) and Hardy, 2007].

Благоприятное сочетание физико-геологических свойств объекта изучения и условий для проведения сейморазведочных исследований характерно не всем месторождениям калийно-магниевых руд. В случае их залегания в условиях горного рельефа необходимая плотность сейморазведочных наблюдений не всегда достижима и возможности требуемой детализации физико-геологической модели разрабатываемой толщи в пределах всего месторождения весьма ограничены. В подобных случаях возможно районирование территории месторождения на основе сочетания более «легких» методов с сейморазведочными исследованиями. На основании результатов районирования производится детализация наиболее неблагоприятных участков с разработкой по сейморазведочным данным типовых физико-геологических моделей основных геологических «опасностей».

В качестве «легких» методов возможно применение стандартных электро- и гравиразведочных технологических решений. Например, вертикальное электрическое зондирование и однократные гравиметрические наблюдения.

Реализация комплекса информационного обеспечения геомеханических оценок опасности нарушения сплошности водозащитных толщ в условиях сложного тектониче-

ского строения иллюстрируется на примере Тюбегатанского месторождения калийных солей.

1. Общая характеристика Тюбегатанского месторождения и условий его отработки

Тюбегатанское месторождение калийных солей находится на границе Республики Узбекистан (Кашкадарьинская область) и Республики Туркменистан (Чарджоуская область) и разделяется пограничной рекой Шордарья на две части. Месторождение расположено в юго-западных отрогах Гиссарского хребта, являющегося юго-западным ответвлением Тянь-Шаньской горной системы. Максимальные высотные отметки гряды в северной части структуры — 1443 м (г. Тюбегатан), а на юге — 1325 м (г. Карачгат). Относительные превышения горных вершин над дном продольных долин достигают 300–400 м. Склоны гряд изрезаны сетью поперечных ущелий.

В геоморфологическом отношении в пределах Тюбегатанского месторождения калийных солей развит куэстовый рельеф с асимметричным строением: пологими западными и крутыми восточными склонами. В нижней части таких куэстовых площадок развиты глубоко врезанные саи овражистого типа, которые являются водосборниками пресных вод со всей территории Тюбегатанской возвышенности (рис. 1).

В геологическом строении месторождения принимают участие осадочные породы юрской, меловой, неогеновой и четвертичной систем [Поздеев и др., 2010] (рис. 2).

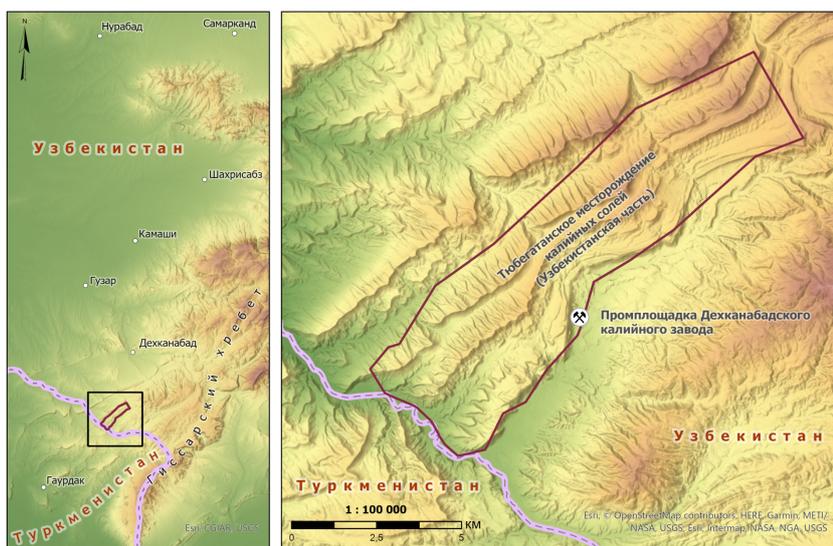


Рис. 1. Обзорная карта Тюбегатанского месторождения калийных солей.

Узбекская часть Тюбегатанского месторождения приурочена к Тюбегатанской брахиантиклинали Гаурдак-Тюбегатанской антиклинальной зоны (рис. 3) и характеризуется крайне сложным тектоническим строением.

Разработка Тюбегатанского месторождения на территории Республики Узбекистан начата в 2010 году (рис. 4). Участок первоочередной отработки расположен в северной части и представляет собой многоугольник, вытянутый в северном направлении на 3 км при ширине до 1,8 км.

Как и на большинстве калийных и соляных месторождений здесь применяется камерная система разработки с поддержанием вышележащей толщи на ленточных междукамерных целиках. Очистные работы ведутся по двум сильвинитовым пластам: Нижний Па (ширина камер $a = 5,5$ м, ширина целиков $b = 3$ м, вынимаемая мощность $m = 5$ м) и Нижний Пб (ширина камер $a = 5,5$ м, ширина целиков $b = 3$ м, вынимаемая мощность $m = 3,1$ м). Промышленные пласты характеризуются пологим залеганием с углом падения на северо-запад $10\text{--}15^\circ$. Порядок движения фронта горных работ — обратный: от юго-восточной границы в северо-западном направлении. На настоящий

Система	Отдел	Ярус	Подярус	Свита	Подвита	Индекс	Колонка	Мощность в м	Характеристика пород					
КВАРТЕР						Q		до 150	Конгломераты, галечники, суглинки, глины, обрушенные породы					
М Е Л О В А Я	Н И Ж Н И Й	АЛЬБСКИЙ K _{1al}	ВЕРХ.			K _{1al3}		100-110	Глины с тонкими прослоями известняков					
			СРЕД.			K _{1al2}		70-150	Глины, известняки ракушняка					
			НИЖНИЙ			K _{1al1}		80-150	Глины, песчаники, алевролиты					
		АПТСКИЙ K _{1a}	ВЕРХ. K _{1a2}	КАЛИН-ГРЕКСКАЯ			K _{1klg}		40-70	Глины, песчаники, известняки				
			НИЖ. K _{1a1}											
		БАРЕМ-СКИЙ K _{1br}	ОКУЗЬ-ЛАКСКАЯ				K _{1okz}		120-150	Глины, пестроцветные, известняки, гипсы розовые, белые				
		ГОТЕРИВ-СКИЙ K _{1g}	КЫЗЫЛ-ТАШСКАЯ				K _{1kzt2}		50-80	Песчаники буро-красные				
							K _{1kzt1}		70-100	Глины с прослоями алевролитов				
		ВАЛАНЖИН-СКИЙ K _{1v}	АЛЬМУ-РАДСКАЯ				K _{1alm3}		30-60	Глины с прослоями алевролитов				
							K _{1alm2}		2-10	Известняки доломитизированные				
							K _{1alm1}		30-50	Глины оранжево-красные				
			КАРАВИЛЬСКАЯ	Верхняя			K _{1krb2}		10-100	Песчаники буро-красные с линзами гравелита				
		Ю Р С К А Я	В Е Р Х Н И Й	ТИТОНСКИЙ J _{3tt}		КАРАВИЛЬСКАЯ	Нижняя	J _{3krb1}		80-150	Глины, алевролиты с мелкими прослоями песчаников			
							Галитовая				J _{3gd2}		10-40	Ангидрит светло-серый
													45-60	Каменная соль розовая
											1-70	Верхний калиеносный горизонт		
											15-50	Каменная соль розовая		
											1-40	Средний калиеносный горизонт		
											2-40	Каменная соль светло-серая		
											5-35	Нижний калиеносный горизонт		
										J _{3gd2}		200-250	Каменная соль светло-серая	
КИМЕРИДЖСКИЙ J _{3km}	ГАУРДАКСКАЯ						Пере-ходная			J _{3gd1-2}		50-100	Чередование каменной соли светло-серой с битуминозными ангидритами	
		Ангидритовая			J _{3gd1}		250-300	Ангидриты светло-серые, темно-серые с линзами каменной соли, прослоями известняков битуминозных с включениями боратов						
ОКСФОРДСКИЙ J _{3o}	ГИССАР-СКАЯ Извест-ковая				J _{3gs}		до 240	Известняки мелкокристаллические темно-серые битуминозные						

Рис. 2. Стратиграфическая колонка района Тубегатанского месторождения калийных солей.

момент времени состояние горных выработок на участке первоочередной отработки оценивается как неудовлетворительное: камеры «задавлены» обрушенными породами.

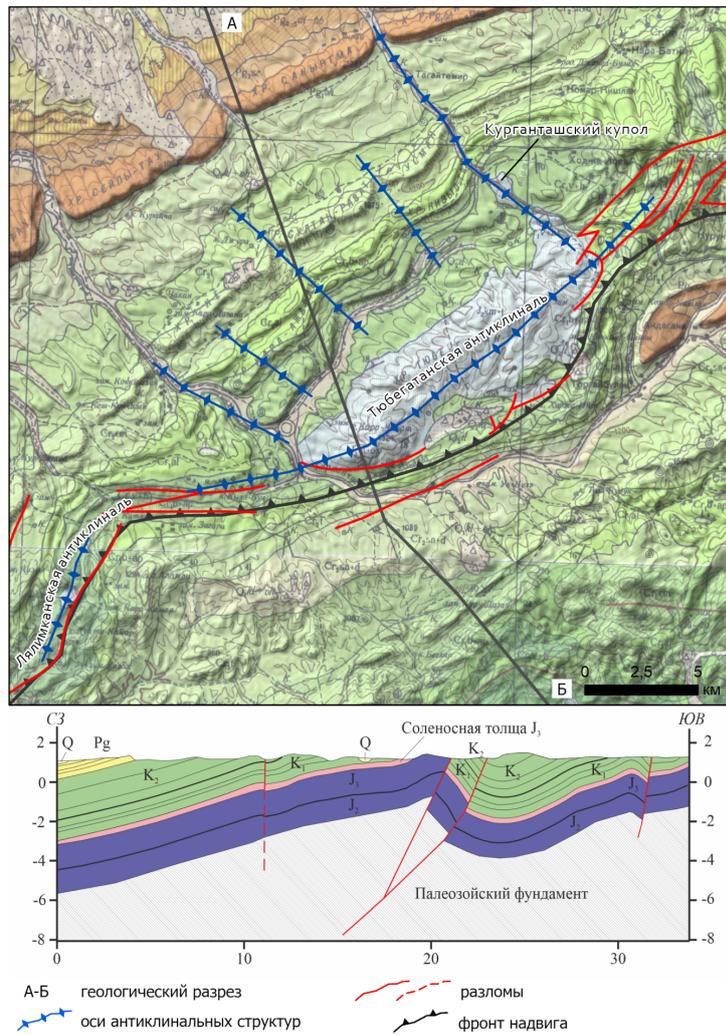


Рис. 3. Геологическая карта района Тюбегатанской антиклинали с элементами тектоники.

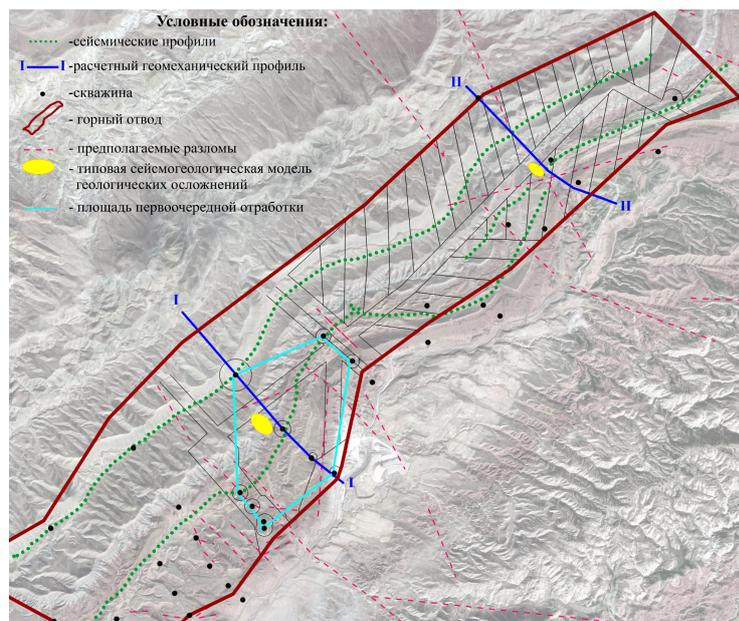


Рис. 4. Схема шахтного поля Дехканабадского калийного завода.

2. Комплексные геофизические исследования

В рамках параметрического обеспечения геомеханических расчетов выполнены площадные гравиразведочные и профильные сейсмо- и электроразведочные исследования.

По совокупности негативных изменений геофизических параметров в пределах горного отвода Тюбегатанского месторождения наиболее достоверно выделяются три участка (рис. 5):

1. на северо-востоке — зоны 1 и 2 сейсморазведочных аномалий, которые характеризуются пониженными значениями скорости и плотности, а также удельного электрического сопротивления;
2. в центре на участке первоочередной отработки — зона 4 сейсморазведочных аномалий с аналогичными признаками по негативным изменениям всех трех составляющих;
3. на юго-западе площади работ, где отмечается снижение значений упругих параметров при противоречивом поведении электрометрических показателей от незначительного понижения к преобладающему повышению значений.

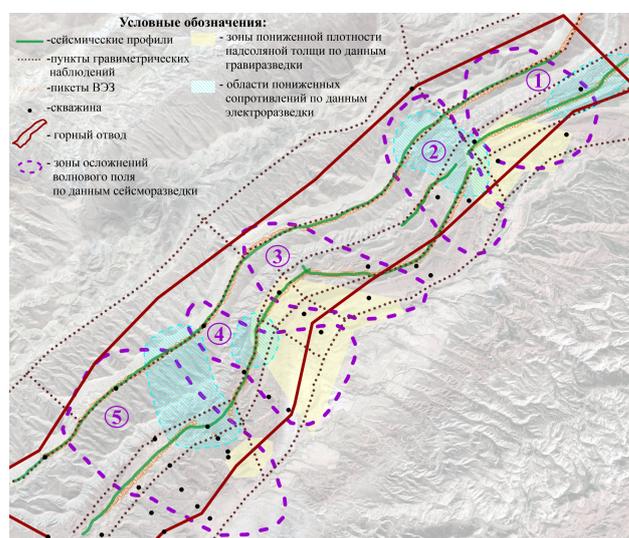


Рис. 5. Схема комплексных результатов геофизических исследований.

Подобные сочетания рассматриваемых геофизических параметров позволяют предположить понижение прочностных свойств в целом для надсоляной и соляной толщ на всех трех участках, при этом на первых двух имеет место реализация негативных гидрогеологических процессов, а для третьего пока нет. Геологическая природа данных зон связана с зонами наиболее активного проявления подземного выщелачивания, расслоения и обрушения. Наиболее наглядно они проявляются на результатах цифровой обработки сейсморазведочных данных (рис. 6).

На временных разрезах отмечается ряд наиболее динамически выраженных осей синфазности, которые соответствуют целевым сейсмическим отражающим горизонтам (ОГ), относящимся к конкретным границам.

Согласно геологической модели месторождения и установленному скоростному закону по результатам сейсмических скважинных исследований, основные отражающие горизонты, выделяемые на временных разрезах, имеют следующую геологическую привязку: ОГ Krb — кровля Карабильской свиты (K_1krb_2); ОГ BC — кровля солей Гаурдакской свиты (J_3gd_2); ОГ H2 — кровля продуктивного пласта Нижний II.

При цифровой обработке оцениваются следующие параметры волнового поля:

1. структура волновой картины, представленная на временном разрезе по общей глубинной точке (рис. 6, а);

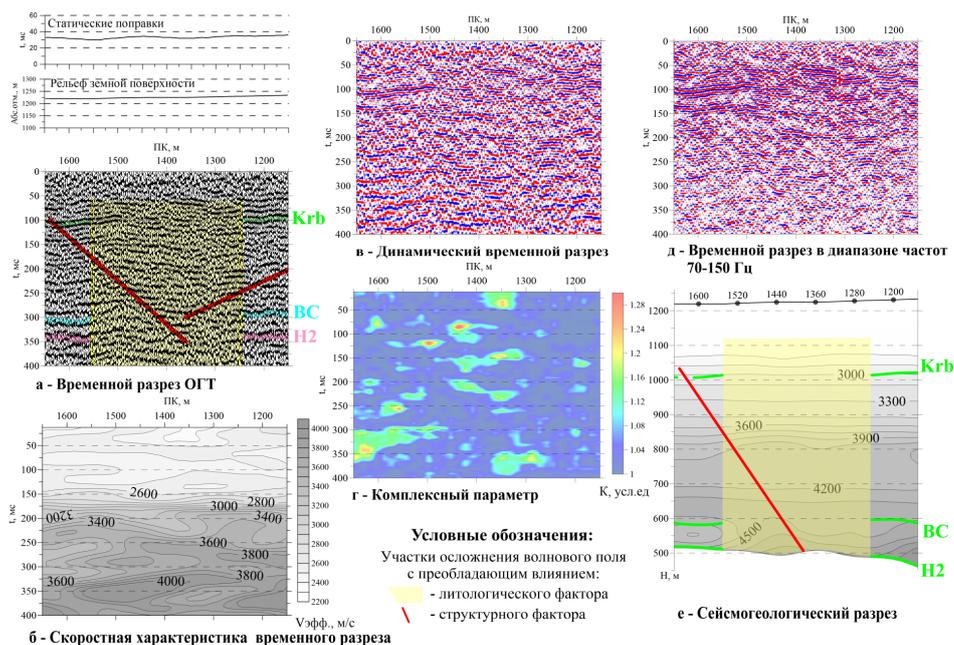


Рис. 6. Результаты цифровой обработки.

2. кинематическая составляющая, оцениваемая по скоростной характеристике (рис. 6, б), представляющей распределение эффективных скоростей во временной области;
3. интенсивность, оцениваемая по динамическому временному разрезу и его модификациям в частотном (рис. 6, в) и высокочастотном (рис. 6, д) диапазонах обработки.

По нарушениям структуры волновой картины, снижению интенсивности и значениям скоростной характеристики на профильных линиях выделяются участки осложнений волнового поля. При их локализации учитывалась согласованность негативных изменений анализируемых сейсмических параметров, представленная на разрезах комплексного параметра (рис. 6, г). Расчет его значений основан на совместном использовании независимых количественных характеристик волнового поля: частота, эффективная скорость, амплитуда, отношение сигнал/помеха. Функции, описывающие поведение указанных характеристик вдоль профиля, преобразуют в промежуточные величины, принимающие значение 0 или 1. Промежуточной функции присваивают 0, если на данном пикете исходная функция не выходит за доверительный интервал, и 1 — если выходит. «Комплексный параметр» представляет собой нормированную сумму промежуточных результатов [Санфи́ров и др., 2013].

В итоге формируется количественная оценка негативных изменений упругих и структурных параметров исследуемого интервала геологического разреза (рис. 6, е), учитываемая при геомеханических расчетах.

В качестве типовых сейсмогеологических моделей для оценки геомеханических рисков выбраны участки в пределах зон № 1 и № 2 (рис. 5), где отмечаются наиболее контрастные негативные изменения геофизических параметров. Выделенные типовые геофизические аномалии представляют собой ослабленные по механическим свойствам зоны, которые могут быть связаны с тектоническими разрывными нарушениями.

3. Геомеханическая оценка и прогноз состояния водозащитной толщи

По результатам геофизических исследований с учетом данных бурения геологоразведочных скважин построены характерные для месторождения физико-геологические модели, которые трансформированы в геомеханические расчетные схемы по двум разрезам: I-I и II-II. Их положение показано на рис. 4. Профиль I-I пересекает участок

первоочередной отработки, профиль II-II приурочен к площади перспективной выемки запасов. Отметим, что сейсморазведочная аномалия, расположенная в пределах профиля I-I, представлена ослабленной зоной без осложнения тектоническим нарушением; выделенная в районе расчетного профиля II-II связана с тектоническим нарушением. Все сейсморазведочные аномалии, в соответствии с имеющейся геологической информацией, имеют природное происхождение. Оценка степени снижения прочностных и деформационных свойств пород в пределах ослабленных зон производилась на основе анализа изменения параметров волнового поля [Барях и др., 2017; Жижин и др., 2023].

Геомеханическая оценка и прогноз изменения напряженно-деформированного состояния породного массива под воздействием горных работ основывались на численном математическом моделировании. Методика расчетов достаточно подробно изложена в работе [Барях и др., 2017] и базируется на модели идеальной упруго-пластической среды, которая в области действия напряжений сжатия реализуется в варианте параболического критерия Кулона-Мора [Wang et al., 2019], а в области напряжений растяжения упругое деформирование ограничивается пределом прочности при растяжении. Отметим, что в физическом выражении формирование зон пластических деформаций в областях сжатия и растяжения связывается с процессами трещинообразования, соответственно за счет развития трещин сдвига и отрыва.

Геомеханическая расчетная схема отражала весь комплекс горнотехнических и горно-геологических факторов (глубину горных работ, количество отработанных пластов, параметры системы разработки, порядок отработки, угол падения пластов, установленные по результатам геофизических особенности строения подработанного массива и др.). В рамках принятой схемы математического моделирования временной фактор учитывался в соответствии с разработанной модификацией известного метода переменных модулей деформации [Барях и Самоделькина, 2005].

Граничные условия определялись следующим образом: на боковых границах горизонтальные смещения, а на нижней границе вертикальные — принимались равными нулю. Верхняя граница (дневная поверхность) — свободная от усилий. Учет собственного веса пород проводился посредством задания массовых сил интенсивностью γ_i . (γ_i — удельный вес i -го элемента геологического разреза). Исходное напряженное состояние ненарушенного горными работами соляного массива считалось гидростатическим:

$$\sigma_x^0 = \sigma_y^0 = \gamma H, \tau_{xy}^0 = 0.$$

В расчетных схемах учтены выделенные по результатам геофизических работ области пониженных механических свойств пород. Разрывные тектонические нарушения моделировались проницаемой субвертикальной нарушенной зоной со свойствами уменьшенными в 10 раз по отношению к ненарушенному массиву. Исходное вертикальное напряжение по всему разрезу, включая и области сейсморазведочных аномалий, принималось равным γH . В геомеханической модели выработанное пространство отражалось средой с пониженными по отношению к породам соответствующего пласта механическими свойствами. Степень снижения механических свойств определялась принятыми параметрами камерной системы разработки.

Параметрическое обеспечение геомеханических расчетов основывалось на результатах механических испытаний пород, представленных в геологическом разрезе Тубегатанского месторождения.

В связи с отсутствием системы маркшейдерских наблюдений за оседаниями земной поверхности на шахтном поле рудника калибровка геомеханической модели по профилю I-I производилась по результатам радарной интерферометрической съемки спутника Sentinel-1A¹. Полученные оценки среднегодовых скоростей оседания земной поверхности составили: в 2021 году — 200 мм/год, в 2022 — 300 мм/год. Эти величины приняты в качестве ориентира при калибровке геомеханической модели по оседаниям земной поверхности. Численная реализация геомеханической модели основывалась на известных алгоритмах метода конечных элементов [Borst et al., 2012; de Souza Neto et al., 2008; Zienkiewicz et al., 2014].

Выполненные геомеханические расчеты показали, что на участке первоочередной отработки (рис. 7) уже на сегодняшний момент времени в ВЗТ сформированы зоны субвертикальной трещиноватости, которые могут служить каналами для поступления пресных вод в выработанное пространство рудника. Причем, в данных условиях отработки нарушение сплошности ВЗТ обусловлено не наличием выделенной аномалии (ослабленная зона без осложнения разрывным нарушением), а в большей степени связано с реализованными параметрами очистной выемки.

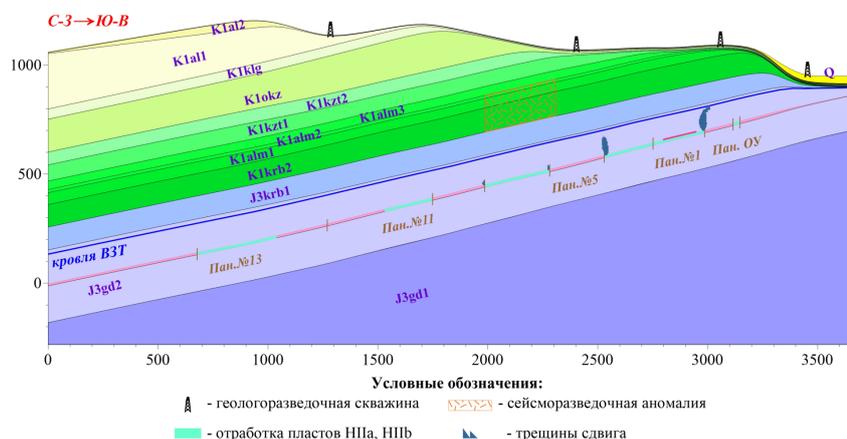


Рис. 7. Характер формирования зон техногенной нарушенности в водозащитной толще (ВЗТ) в пределах отработанного участка (профиль I-I) на момент 2022 года.

При оценке опасности нарушения сплошности ВЗТ на участке перспективной выемки запасов силвинитовой руды (профиль II-II, рис. 8) установлено, что сквозное ее разрушение при сохранении принятых ранее параметров разработки наступает уже через 10 лет после начала горных работ.

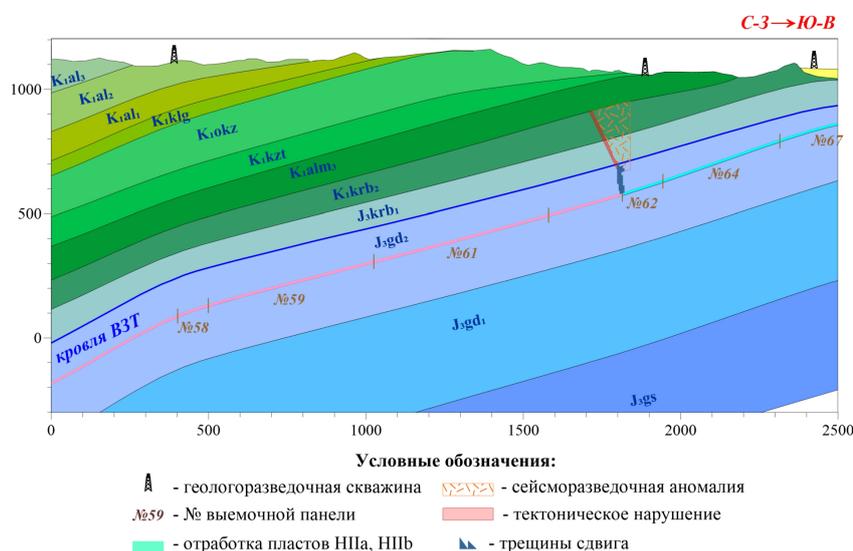


Рис. 8. Характер формирования зон техногенной нарушенности в ВЗТ в районе перспективной отработки (профиль II-II) через 10 лет после начала горных работ.

В этом случае зона субвертикальной нарушенности локализуется непосредственно в районе разрывного нарушения. Таким образом, можно констатировать, что в условиях Тюбегатанского месторождения основная опасность прорыва пресных вод в горные выработки связана с наличием разрывных тектонических нарушений.

В целях обеспечения потенциальной возможности отработки запасов Тюбегатанского месторождения в условиях сложного тектонического строения выполнены расчеты с изменениями параметров камерной системы разработки. При сохранении ширины

очистных камер и вынимаемой мощности на обоих рабочих пластах соблюдалось следующее требование: вне зависимости от глубины горных работ степень нагружения междукамерных целиков не должна превышать 0,4, т. е. запас их несущей способности не менее 2,5. При соблюдении этих условий безопасные условия подработки ВЗТ обеспечиваются вплоть до завершения процесса сдвижения.

4. Заключение

Комплексные геофизические и геомеханические исследования, выполненные в районе Тюбегатанского месторождения, позволили сделать некоторые общие выводы, направленные на обеспечение безопасности горных работ в условиях сложного тектонического строения разрабатываемого соляного массива:

1. Наряду с традиционными геологоразведочными работами, на стадии подготовки месторождения к отработке необходимо предусмотреть комплекс геофизических исследований, ориентированный на пространственную локализацию аномальных зон, особенно связанных с разрывными нарушениями.
2. Результаты геофизических исследований должны быть представлены в виде физико-геологических моделей для последующей их трансформации в геомеханические расчетные схемы.
3. Обязательным элементом разработки калийных месторождений в сложных горно-геологических условиях является сопроводительный мониторинг состояния подработанного массива, который включает режимный геофизический комплекс исследований, сейсмологический контроль процессов разрушения, инструментальные и/или радарные интерферометрические наблюдения за развитием оседаний земной поверхности, измерения в гидронаблюдательных скважинах. Геомеханическая интерпретация результатов мониторинга позволит получить более достоверную оценку устойчивости водозащитной толщи и повысит качество обеспечения безопасности горных работ.

Благодарности. Исследования выполнены сотрудниками Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН под руководством члена-корреспондента РАН В. О. Михайлова. Работа частично выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 19-77-30008.

Список литературы

- Барях А. А., Евсеев А. В. Ликвидация калийных рудников и соляных шахт: обзор и анализ проблемы // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — Т. 9. — С. 5–29. — DOI: [10.25018/0236-1493-2019-09-0-5-29](https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-09-0-5-29).
- Барях А. А., Красноштейн А. Е., Санфиоров И. А. Горнотехнические аварии: затопление Первого Березниковского калийного рудника // Вестник Пермского научного центра. — 2009. — № 2. — С. 4–9. — EDN: PYWAJJ.
- Барях А. А., Самоделкина Н. А. Об одном подходе к реологическому анализу геомеханических процессов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2005. — № 6. — С. 32–41. — EDN: PFHADT.
- Барях А. А., Санфиоров И. А., Федосеев А. К. и др. Сейсмо-геомеханический прогноз состояния водозащитной толщи на калийных рудниках // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2017. — № 6. — С. 10–22. — DOI: [10.15372/FTPRPI20170602](https://doi.org/10.15372/FTPRPI20170602).
- Беляков Н. А., Беликов А. А. Прогноз целостности водозащитной толщи на Верхнекамском месторождении калийных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2022. — № 6–2. — С. 33–46. — DOI: [10.25018/0236_1493_2022_62_0_33](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_62_0_33).
- Болгаров А. Г., Рослов Ю. В. Межскважинная сейсмическая томография для решения инженерно-геологических задач // Технологии сейсморазведки. — 2009. — № 1. — С. 105–111. — EDN: NCGHRJ.
- Глебов С. В. Геофизическое обеспечение разработки Верхнекамского месторождения солей // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2004. — № 9. — С. 89–92. — EDN: IFAPOR.
- Жикин А. А., Санфиоров И. А., Фаткин К. Б. Классификация волновых образов типовых геологических неоднородностей соляной толщи Верхнекамского месторождения калийных и магниевых солей // Проблемы недропользования. — 2023. — Т. 3, № 38. — С. 118–128. — DOI: [10.25635/2313-1586.2023.03.118](https://doi.org/10.25635/2313-1586.2023.03.118).
- Поздеев А. А., Земсков А. Н., Ибрагимов Г. И. Некоторые аспекты освоения Тюбегатанского месторождения калийных солей // Рудник Будущего. — 2010. — № 1. — С. 6–10. — EDN: POEWHN.

- Рудковский Р. Р., Трофимов В. Л., Хазиев Ф. Ф. Блуждающие рассолы соляных толщ и мероприятия по защите горных выработок от их затопления // Разведка и охрана недр. — 2011. — № 1. — С. 63–72. — EDN: LVFAKN.
- Рыльникова М. В., Есина Е. Н., Сахаров Е. М. *и др.* Закономерности геодинамических явлений при освоении глубоко-козалегающих сложноструктурных месторождений калийно-магниевого солей // Горная промышленность. — 2023. — № 1. — С. 89–94. — DOI: [10.30686/1609-9192-2023-1-89-94](https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-1-89-94).
- Санфиоров И. А., Степанов Ю. И., Фатькин К. Б. *и др.* Малоглубинные геофизические исследования на Верхнекамском месторождении калийных солей // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2013. — № 6. — С. 71–77. — EDN: RRUGXL.
- Baryakh A., Tsayukov A. Justification of fracture criteria for salt rocks // Frattura ed Integrità Strutturale. — 2022. — Vol. 16, no. 62. — P. 585–601. — DOI: [10.3221/IGF-ESIS.62.40](https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.62.40).
- Borst R. de, Crisfield M. A., Remmers J. J. C., *et al.* Non-Linear Finite Element Analysis of Solids and Structures. — Wiley, 2012. — DOI: [10.1002/9781118375938](https://doi.org/10.1002/9781118375938).
- de Souza Neto E. A., Perić D., Owen D. R. J. Computational Methods for Plasticity: Theory and Applications. — Wiley, 2008. — DOI: [10.1002/9780470694626](https://doi.org/10.1002/9780470694626).
- Gendzwil D. J., Brehm R. High-resolution seismic reflections in a potash mine // GEOPHYSICS. — 1993. — Vol. 58, no. 5. — P. 741–748. — DOI: [10.1190/1.1443459](https://doi.org/10.1190/1.1443459).
- Gendzwil D. J., Stead D. Rock mass characterization around Saskatchewan potash mine openings using geophysical techniques: a review // Canadian Geotechnical Journal. — 1992. — Vol. 29, no. 4. — P. 666–674. — DOI: [10.1139/t92-073](https://doi.org/10.1139/t92-073).
- Halabura (Steve) S. P., Hardy M. P. An overview of the geology of solution mining of potash in Saskatchewan // Fall 2007 Conference 8–9 October 2007. — Halifax, Nova Scotia, Canada : Solution Mining Research Institute, 2007.
- Karasev M. A., Protosenya A. G., Katerov A. M., *et al.* Analysis of shaft lining stress state in anhydrite-rock salt transition zone // Rudarsko-geološko-naftni zbornik. — 2022. — Vol. 37, no. 1. — P. 151–162. — DOI: [10.17794/rgn.2022.1.13](https://doi.org/10.17794/rgn.2022.1.13).
- Nolet G. A Breviary of Seismic Tomography: Imaging the Interior of the Earth and Sun. — Cambridge University Press, 2008. — DOI: [10.1017/CBO9780511984709](https://doi.org/10.1017/CBO9780511984709).
- Prugger F. F., Prugger A. F. Water problems in Saskatchewan potash mining - what can be learned from them? // CIM Bulletin. — 1991. — Vol. 84, no. 945. — P. 58–66.
- Pumjan S., Long T. T., Loc H. H., *et al.* Deep well injection for the waste brine disposal solution of potash mining in Northeastern Thailand // Journal of Environmental Management. — 2022. — Vol. 311. — P. 114821. — DOI: [10.1016/j.jenvman.2022.114821](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114821).
- Rauche H. Die Kaliindustrie im 21. Jahrhundert. — Springer Berlin Heidelberg, 2015. — DOI: [10.1007/978-3-662-46834-0](https://doi.org/10.1007/978-3-662-46834-0).
- The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014 / ed. by R. Ulusay. — Springer International Publishing, 2015. — DOI: [10.1007/978-3-319-07713-0](https://doi.org/10.1007/978-3-319-07713-0).
- Wang D.-J., Tang H., Shen P., *et al.* A Parabolic Failure Criterion for Transversely Isotropic Rock: Modification and Verification // Mathematical Problems in Engineering. — 2019. — Vol. 2019. — P. 1–12. — DOI: [10.1155/2019/8052560](https://doi.org/10.1155/2019/8052560).
- Yilmaz Ö. Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data. Volume I, II. — Society of Exploration Geophysicists, 2008. — 2027 p.
- You M. Comparison of the accuracy of some conventional triaxial strength criteria for intact rock // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. — 2011. — Vol. 48, no. 5. — P. 852–863. — DOI: [10.1016/j.ijrmms.2011.05.006](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2011.05.006).
- Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Fox D. The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics. — Seven. — Elsevier, 2014. — 624 p. — DOI: [10.1016/C2009-0-26332-X](https://doi.org/10.1016/C2009-0-26332-X).

INFORMATION SUPPORT FOR GEOMECHANICAL CALCULATIONS OF STABILITY OF THE UNDERMINED ROCK MASS WITH A COMPLEX TECTONIC STRUCTURE

A. A. Baryakh^{*1} , I. A. Sanfirov¹ , M. V. Dyakonov² , S. Yu. Lobanov¹ , A. I. Nikiforova¹ ¹Mining Institute, Ural Branch of RAS, Perm, Russia²Uralkali, Berezniki, Russia****Correspondence to:** A. A. Baryakh, bar@mi-perm.ru

Using the example of the Tyubegatan potash deposit (Uzbekistan), a complex of geophysical and geomechanical safety assurance for mining operations in conditions of the complex tectonic structure of the undermined rock mass is considered. Geophysical research included ground-based seismic surveys using a profile system in combination with «light» standard electro- and gravimetric techniques. Based on the results of these works, a physical and geological model of the deposit areas was built with the weakened zones and faults localization. As part of the meaningful interpretation, the physical and geological model was transformed into a geomechanical calculation scheme, which reflected the main mining-geological and mining-technical condition of development and was based on a model of elastoplastic deformation of salt rocks. The geomechanical model was calibrated from radar interferometric surveys. The time factor was taken into account in accordance with the developed modification of the well-known method of variable deformation modules. The formation of plasticity zones in physical terms was identified with the formation of fracturing areas in the water protection layer, which determine the danger of violating its continuity. Numerical implementation of the geomechanical model using the finite element method made it possible to substantiate the optimal parameters of the chamber development system, ensuring the safety of the water protection layer, including fault zones.

Received: 15 October 2023

Accepted: 15 January 2024

Published: 29 February 2024



© 2024. The Authors.

Keywords: potash deposit, water protection layer, tectonic, fault, geophysical research, geomechanical, mathematical modeling, numerical implementation.**Citation:** Baryakh A. A., Sanfirov I. A., Dyakonov M. V., Lobanov S. Yu., Nikiforova A. I. (2024), Information Support for Geomechanical Calculations of Stability of the Undermined Rock Mass With a Complex Tectonic Structure, *Russian Journal of Earth Sciences*, 24, ES1012, <https://doi.org/10.2205/2024es000894>**References**

- Baryakh A., Tsayukov A. Justification of fracture criteria for salt rocks // *Frattura ed Integrità Strutturale*. — 2022. — Vol. 16, no. 62. — P. 585–601. — DOI: [10.3221/IGF-ESIS.62.40](https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.62.40).
- Baryakh A. A., Evseev A. V. Closure of potash and salt mines: Review and analysis of the problem // *Mining Informational and analytical bulletin*. — 2019. — Vol. 9. — P. 5–29. — DOI: [10.25018/0236-1493-2019-09-0-5-29](https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-09-0-5-29).
- Baryakh A. A., Krasnoshtein A. E., Sanfirov I. A. Mining accidents: flooding of the First Bereznikovskiy potash mine // *Bulletin of the Perm Scientific Center*. — 2009. — No. 2. — P. 4–9. — EDN: PYWAJJ.
- Baryakh A. A., Samodelkina N. A. Rheological analysis of geomechanical processes // *Journal of Mining Science*. — 2005. — No. 6. — P. 32–41. — EDN: PFHADT.

- Baryakh A. A., Sanfirov I. A., Fedoseev A. K., *et al.* Seismic-Geomechanical Prediction of Water-Impervious Strata State in Potassium Mines // Journal of Mining Science. — 2017. — No. 6. — P. 10–22. — DOI: [10.15372/FTPPI20170602](https://doi.org/10.15372/FTPPI20170602).
- Belyakov N. A., Belikov A. A. Prediction of the integrity of the water-protective stratum at the Verkhnekamskoye potash ore deposit // Mining informational and analytical bulletin. — 2022. — No. 6–2. — P. 33–46. — DOI: [10.25018/0236_1493_2022_62_0_33](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_62_0_33).
- Bolgarov A. G., Roslov Y. V. Inter-well seismic tomography for solving engineering-geological problems // Seismic technologies. — 2009. — No. 1. — P. 105–111. — EDN: NCGHRJ.
- Borst R. de, Crisfield M. A., Remmers J. J. C., *et al.* Non-Linear Finite Element Analysis of Solids and Structures. — Wiley, 2012. — DOI: [10.1002/9781118375938](https://doi.org/10.1002/9781118375938).
- de Souza Neto E. A., Perić D., Owen D. R. J. Computational Methods for Plasticity: Theory and Applications. — Wiley, 2008. — DOI: [10.1002/9780470694626](https://doi.org/10.1002/9780470694626).
- Gendzwill D. J., Brehm R. High-resolution seismic reflections in a potash mine // GEOPHYSICS. — 1993. — Vol. 58, no. 5. — P. 741–748. — DOI: [10.1190/1.1443459](https://doi.org/10.1190/1.1443459).
- Gendzwill D. J., Stead D. Rock mass characterization around Saskatchewan potash mine openings using geophysical techniques: a review // Canadian Geotechnical Journal. — 1992. — Vol. 29, no. 4. — P. 666–674. — DOI: [10.1139/t92-073](https://doi.org/10.1139/t92-073).
- Glebov S. V. Geophysical support for the development of the Verkhnekamskoye salt deposit // Mining informational and analytical bulletin. — 2004. — No. 9. — P. 89–92. — EDN: IFAPOR.
- Halabura (Steve) S. P., Hardy M. P. An overview of the geology of solution mining of potash in Saskatchewan // Fall 2007 Conference 8–9 October 2007. — Halifax, Nova Scotia, Canada : Solution Mining Research Institute, 2007.
- Karasev M. A., Protosenya A. G., Katerov A. M., *et al.* Analysis of shaft lining stress state in anhydrite-rock salt transition zone // Rudarsko-geološko-naftni zbornik. — 2022. — Vol. 37, no. 1. — P. 151–162. — DOI: [10.17794/rgn.2022.1.13](https://doi.org/10.17794/rgn.2022.1.13).
- Nolet G. A Breviary of Seismic Tomography: Imaging the Interior of the Earth and Sun. — Cambridge University Press, 2008. — DOI: [10.1017/CBO9780511984709](https://doi.org/10.1017/CBO9780511984709).
- Pozdeev A. A., Zemskov A. N., Ibragimov G. I. Some aspects of the development of the Tyubegatan potassium salt deposit // Mine of the Future. — 2010. — No. 1. — P. 6–10. — EDN: POEHWH.
- Prugger F. F., Prugger A. F. Water problems in Saskatchewan potash mining - what can be learned from them? // CIM Bulletin. — 1991. — Vol. 84, no. 945. — P. 58–66.
- Pumjan S., Long T. T., Loc H. H., *et al.* Deep well injection for the waste brine disposal solution of potash mining in Northeastern Thailand // Journal of Environmental Management. — 2022. — Vol. 311. — P. 114821. — DOI: [10.1016/j.jenvman.2022.114821](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114821).
- Rauche H. Die Kaliindustrie im 21. Jahrhundert. — Springer Berlin Heidelberg, 2015. — DOI: [10.1007/978-3-662-46834-0](https://doi.org/10.1007/978-3-662-46834-0).
- Rudkovsky R. R., Trofimov V. L., Khaziev F. F. Errant brines in salt sections and actions to take to study the brines // Exploration and protection of subsoil. — 2011. — No. 1. — P. 63–72. — EDN: LVFAKN.
- Rylnikova M. V., Esina E. N., Sakharov E. M., *et al.* Regularities in geodynamic phenomena in mining deep-lying potassium-magnesium salt deposits with complex structure // Mining Industry Journal. — 2023. — No. 1. — P. 89–94. — DOI: [10.30686/1609-9192-2023-1-89-94](https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-1-89-94).
- Sanfirov I. A., Stepanov Y. I., Fatkin K. B., *et al.* Shallow geophysical exploration of the upper Kama potash salt deposit // Journal of Mining Science. — 2013. — No. 6. — P. 71–77. — EDN: RRUGXL.
- The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014 / ed. by R. Ulusay. — Springer International Publishing, 2015. — DOI: [10.1007/978-3-319-07713-0](https://doi.org/10.1007/978-3-319-07713-0).
- Wang D.-J., Tang H., Shen P., *et al.* A Parabolic Failure Criterion for Transversely Isotropic Rock: Modification and Verification // Mathematical Problems in Engineering. — 2019. — Vol. 2019. — P. 1–12. — DOI: [10.1155/2019/8052560](https://doi.org/10.1155/2019/8052560).
- Yilmaz Ö. Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data. Volume I, II. — Society of Exploration Geophysicists, 2008. — 2027 p.
- You M. Comparison of the accuracy of some conventional triaxial strength criteria for intact rock // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. — 2011. — Vol. 48, no. 5. — P. 852–863. — DOI: [10.1016/j.ijrmms.2011.05.006](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2011.05.006).
- Zhikin A. A., Sanfirov I. A., Fatkin K. B. Classification of wave patterns of typical geological heterogeneities of the salt strata of the Verkhnekamskoye deposit of potassium and magnesium salts // Problems of Subsoil Use. — 2023. — Vol. 3, no. 38. — P. 118–128. — DOI: [10.25635/2313-1586.2023.03.118](https://doi.org/10.25635/2313-1586.2023.03.118).
- Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Fox D. The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics. — Severn. — Elsevier, 2014. — 624 p. — DOI: [10.1016/C2009-0-26332-X](https://doi.org/10.1016/C2009-0-26332-X).