

ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СОЛЕЙ

А. М. Пригара^{1,2*}, А. В. Татаркин^{2,3}, В. В. Середин^{2,3}

¹АО «ВНИИ Галургии», Пермь, Россия

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

³ООО НИПППД «Недра», Пермь, Россия

*prandra@yandex.ru

Аннотация

В мире насчитывается более 80 соляных рудников, затопленных в аварийном режиме, в основном из-за недостаточно полной информации об инженерно-геологических условиях. В этой связи весьма актуальной является проблема формирования благоприятных сценариев развития устойчивости природно-технических систем (ПТС) при подземной разработке соляных месторождений. Цель работы – разработка научно-методических основ оценки и прогноза устойчивости ПТС при подземной разработке соляных месторождений. Идея работы – оценка и прогноз устойчивости ПТС на основе установленных закономерностей распространения упругих волн в массиве, находящемся под техногенным воздействием. Для достижения цели использованы методы физического и численного моделирования, эксперименты, статистический анализ. В качестве материалов исследований использованы результаты опытных и научно-исследовательских работ. Разработанные научно-методические основы базируются на геофизических и инженерно-геологических моделях ПТС, позволяющих выявлять опасные инженерно-геологические процессы, и на методиках оценки инженерно-геологических условий водозащитной толщи и прогноза устойчивости гидроизолирующих целиков. Сформированная методология позволяет выполнить оценку и прогноз устойчивости ПТС для обеспечения безопасного строительства и эксплуатации сооружений при подземной разработке соляных месторождений. Результаты исследований реализованы в методиках и программных продуктах, которые используются в производственном процессе для обеспечения устойчивости подземных сооружений и ПТС в целом. Полученные новые геологические сведения учтены при построении инженерно-геологических моделей, проектировании проходческих и закладочных работ, при разработке и реализации проектов на разведку и доразведку различных участков Верхнекамского месторождения солей, реализации проектов по ликвидации участков шахтных полей.

Ключевые слова: инженерно-геологические условия, соляные месторождения, природно-технические системы, устойчивость, опасные процессы, геофизика, сейсморазведка, подземные сооружения, шахты, горные выработки

Для цитирования: Пригара А.М., Татаркин А.В., Середин В.В. Геолого-геофизические модели и методики оценки устойчивости природно-технических систем при подземной разработке месторождений солей. *Вестник СВФУ*. 2026;(1):19-36. DOI: 10.25587/2587-8751-2026-1-19-36

GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL MODELS AND METHODS FOR ASSESSING THE STABILITY OF NATURAL-TECHNICAL SYSTEMS IN THE UNDERGROUND MINING OF SALT DEPOSITS

Andrey M. Prigara^{1,2*}, Aleksey V. Tatarkin^{2,3}, Valery V. Seredin^{2,3}

¹VNII Galurgii JSC, Perm, Russian Federation

²Perm State National Research University, Perm, Russian Federation

³ NIPPPD Nedra LLC, Perm, Russian Federation

*prandra@yandex.ru

Abstract

There are more than 80 salt mines in the world that have been flooded in emergency mode, mainly due to insufficient information about engineering and geological conditions. In this regard, the problem of forming favorable scenarios for the development of the sustainability of natural-technical systems (NTS) during the underground development of salt deposits is very relevant. The purpose of the work was to develop scientific and methodological foundations for assessing and predicting the stability of NTS during underground mining of salt deposits. The idea of the work was to evaluate and forecast the stability of the NTS based on the established patterns of propagation of elastic waves in an array under man-made influence. To achieve this goal, methods of physical and numerical modeling, experiments, and statistical analysis were used. The results of experimental and scientific research works were used as research materials. The developed scientific and methodological foundations are based on geophysical and engineering-geological models of NTS, which make it possible to identify dangerous engineering-geological processes, and on methods for assessing the engineering-geological conditions of the water barrier and predicting the stability of waterproofing structures. The developed methodology makes it possible to assess and forecast the stability of the NTS to ensure the safe construction and operation of facilities during the underground development of salt deposits. The research results are implemented in methods and software products that are used in the production process to ensure the stability of underground structures and substations in general. The new geological information obtained was taken into account in the construction of engineering and geological models, the design of sinking and laying operations, the development and implementation of projects for exploration and additional exploration of various sections of the Verkhnekamskoye salt deposit, and the implementation of projects to eliminate sections of mine fields.

Keywords: engineering and geological conditions, salt deposits, natural-technical systems, stability, hazardous processes, geophysics, seismic exploration, underground structures, mines, mining

For citation: Prigara A.M., Tatarkin A.V., Seredin V.V. Geological and geophysical models and methods for assessing the stability of natural-technical systems in the underground mining of salt deposits. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences*. 2026;(1):19-36. DOI: 10.25587/2587-8751-2026-1-19-36

Введение

Изучением инженерно-геологических условий (ИГУ) и вопросами устойчивости природно-технических систем (ПТС), в том числе в рамках месторождений полезных ископаемых, занимались многие ученые [1-5]. Важную роль при этом играют и геофизические методы, результаты которых достаточно широко освещены в научной печати [6-8]. Тем не менее, мировая практика показывает, что подземная разработка соляных месторождений сопровождается многочисленными аварийными ситуациями из-за отсутствия эффективных методик для построения детальных инженерно-геологических моделей (ИГМ) горного массива [9, 10]. Высоким потенциалом совершенствования научно-методических основ оценки и прогноза устойчивости ПТС обладают геофизические методы, в частности шахтная сейсморазведка [11]. Она обеспечивает возможность изучения физико-механических и прочностных характеристик горного массива. Таким образом, существует и необходимость, и перспектива разработки новых подходов,

обеспечивающих достоверность формируемых геофизических и инженерно-геологических моделей и оценок устойчивости ПТС. Настоящая статья описывает результаты многолетних исследований, проводимых в период с 1997 по 2025 годы. За это время пройден сложный путь, в ходе которого было опробовано значительное количество подходов к получению объективной информации об ИГУ и устойчивости ПТС соляных месторождений. В качестве объекта исследований выбрано одно из крупнейших в мире Верхнекамское месторождение солей (ВКМС), расположенное на севере Пермского края. В рамках статьи описываются результаты шахтных исследований, которые проводились в пределах продуктивных пластов АБ, В, КрII, КрIII и в пределах подстилающей каменной соли.

Методология исследований

Если обратиться к *общему* подходу, реализованному в ходе выполненных многолетних исследований, то он является методологией формирования рационального научно-практического подхода к построению эффективной системы оценки и мониторинга устойчивости ПТС в условиях соляных месторождений. Термин *методология* здесь используется в наиболее распространенном смысле – как научное итеративное и интерактивное исследование методов и методик, которые применяются в определенной области знаний. Термин «итеративность» здесь обозначает цикличность, когда поиск перспективных подходов выполняется путем многократного повторения экспериментов на разных этапах исследований с учетом текущего уровня развития технологий и глубины понимания исследуемых явлений и процессов. «Интерактивность», в свою очередь, означает учет результатов и знаний, полученных на предыдущих итерациях, для поиска и обоснования направлений дальнейших исследований и реализации последующих итераций на новом научном и техническом уровне. Основным инструментом реализации методологии являлось математическое моделирование и натурные эксперименты в различных условиях с последующей оценкой их эффективности путем корреляции с данными объективного контроля – результатами бурения, опробования, проходки горных выработок. Конкретные же методы, технологии и методики, разработанные авторами для решения определенных задач, описаны в статье, и являются, по сути дела, результатом практической реализации описанной выше *общей* методологии исследований.

Применяемое оборудование и программное обеспечение

В рамках настоящих исследований применялось специализированное серийное геофизическое оборудование, созданное для выполнения инженерных сейсморазведочных работ. На заре исследований, в 1990-е и в начале 2000-х, использовались относительно малоканальные аналоговые сейсмостанции – от 24 до 48 каналов, такие как IS-48 (Латвия). Данное оборудование, хотя и обладало рядом недостатков, но для своего времени было вполне современным, и позволяло выполнять исследования на довольно высоком уровне. В середине 2000-х появилась возможность расширить базу регистрации до 96 и более каналов, с одновременным переходом от аналоговой регистрации к цифровой. К числу таких станций относятся актуальный и по сей день IS-96 (ООО «Интромаг», г. Пермь), и ТЕЛСС-3 (ООО «Геосигнал», г. Москва). Это позволило значительно снизить влияние промышленных помех и аппаратных шумов, с одновременным увеличением объема регистрируемой информации. В качестве источника упругих волн опробованы различные средства, в том числе взрывчатые вещества типа аммонита, пороховые заряды, падающий груз, и ударный источник. В качестве наиболее эффективного в наземных условиях признан взрывной источник, а в шахтных условиях – ударный.

Программное обеспечение (ПО) использовано как сторонней, так и собственной разработки. К стороннему ПО относятся ANSYS, RadExpro, SeisPro, Excel, Statistica, Surfer и другие. Программ собственной разработки на момент написания данной статьи создано уже более 50 – это средства для решения прямой и обратной задачи сейсморазведки, как для поверхностных, так и для шахтных условий, а также вспомогательное ПО.

Результаты и обсуждение

В результате практической реализации описанной выше методологии исследований авторами разработаны научно-методические основы оценки и прогноза устойчивости природно-технических систем соляных месторождений. Данные основы включают в себя *геофизические и инженерно-геологические модели ПТС, а также методики прогноза ИГУ ВЗСТ и прогноза устойчивости гидроизолирующих целиков.*

Геофизические модели природно-технических систем. Проведен значительный объем численных экспериментов и физического моделирования [11, 12], что позволило оценить особенности возбуждения, распространения и приема упругих колебаний в условиях полного пространства, и получить следующие *основные выводы:*

- при использовании вертикально-направленного источника упругих колебаний отраженные волны от геологических границ не фиксируются;
- использование горизонтально-направленного источника приводит к появлению четко выраженных отражений на S-волнах от целевых границ.

На основании полученных результатов разработан высокоразрешающий метод шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений (ПВРО) [11], подразумевающий использование горизонтальных сейсмоприемников, совместно с горизонтально-направленным источником упругих волн, с двумя линиями возбуждения (рисунок 1, а). В рамках метода сформирована методика обработки, которая учитывает особенности регистрируемых данных и интерференцию отражений, приходящих из разных полупространств. (рисунок 1, b, c) [11].

Разработанный метод обеспечивает построение детальных геофизических моделей ПТС (рисунок 1, d), которые позволяют получать новые сведения об ИГУ и неоднородностях массива горных пород, и, тем самым, существенно повысить безопасность строительства и эксплуатации сооружений при подземной разработке соляных месторождений.

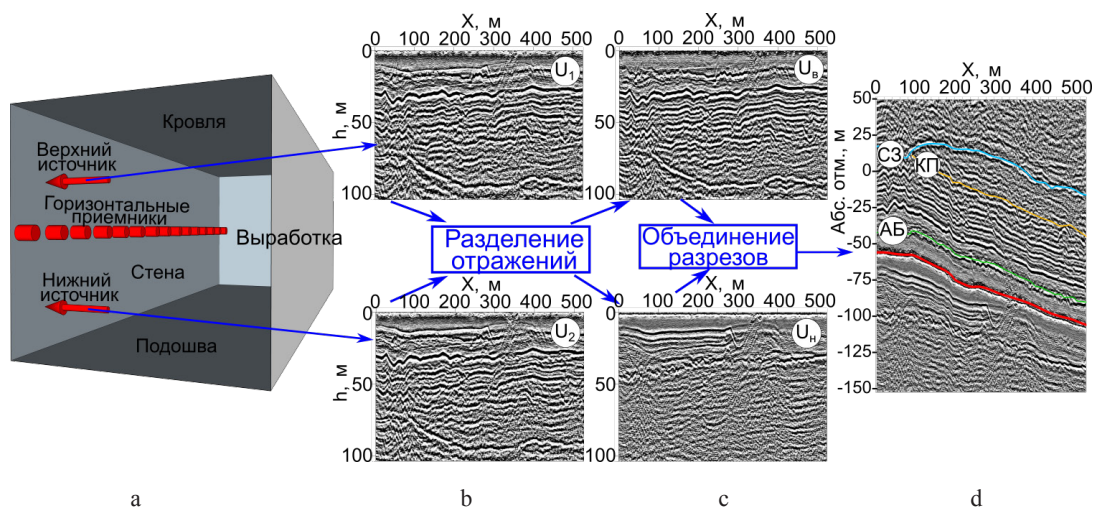


Рис. 1. Блок-схема разработанного метода шахтной сейсморазведки: а – схема выполнения полевых работ, b – разрезы для верхней и нижней линий возбуждения, c – разрезы после разделения отражений из нижнего и верхнего полупространства, d – геофизическая модель ПТС

Fig. 1. Flowchart of the developed mine seismic exploration method: a – field work scheme, b – sections for the upper and lower excitation lines, c – sections after separation of reflections from the lower and upper half-space, d – geophysical model of the NTS

Инженерно-геологические модели природно-технических систем. На месторождениях солей устойчивость ПТС определяется, в первую очередь, строением и составом водозащитной

толщи (ВЗТ), которая является естественным водоупором, предотвращающим проникновение пресных вод в рудники.

Одним из наиболее опасных геологических явлений в ВЗТ на соляных месторождениях с точки зрения устойчивости ПТС является инверсионный рельеф (ИР), отмечаемый в кровле солей на куполах соляных поднятий. Кроме того, в ходе промышленного опробования метода шахтной сейсморазведки ПВРО, также на куполах соляных поднятий были выявлены неизвестные ранее на ВКМС геологические структуры, называемые каньонообразными эрозионными врезами (ЭВ) [11]. Опасность ЭВ заключается в том, что он может нарушить целостность ВЗТ значительно глубже, чем ИР (рисунок 2), что несет серьезную опасность для всей ПТС.

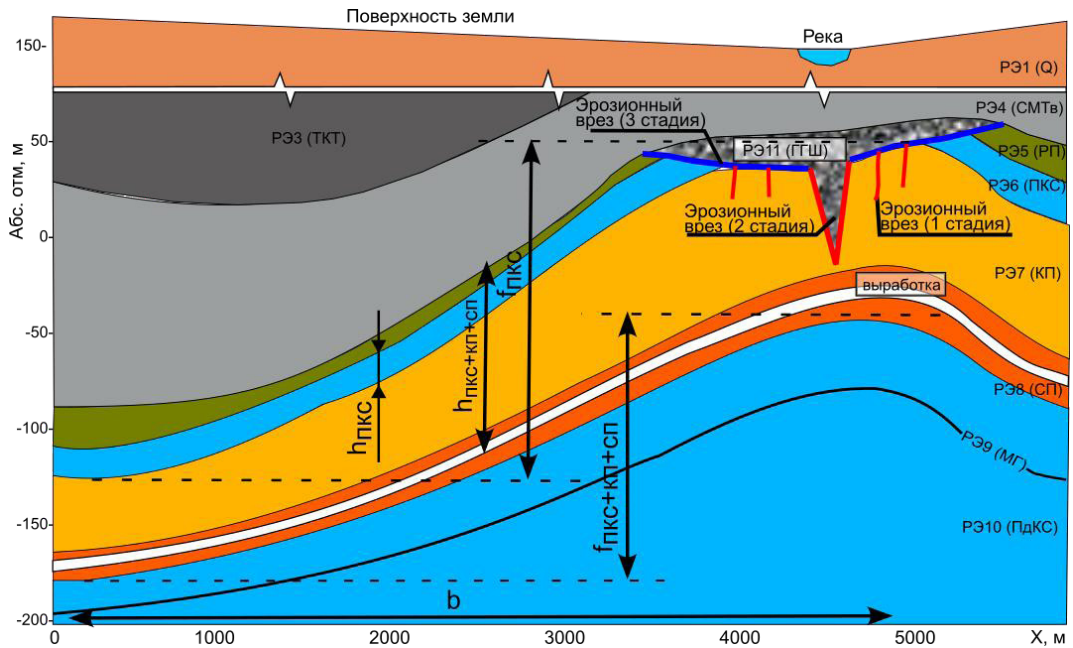


Рис. 2. Структурно-тектоническая модель соляного поднятия в пределах ВКМС (f – высота изгиба пластины, h – толщина пластины, b – длина пластины)

Fig. 2. Development of a structural and tectonic model of salt uplift within the VKSD (f is the bending height of the plate, h is the thickness of the plate, b is the length of the plate)

Каньонообразные эрозионные врезы всегда обнаруживаются в пределах инверсионного рельефа, что говорит об их тесной генетической связи друг с другом. С геологической точки зрения, вероятнее всего, первой стадией формирования ЭВ являются трещины отрыва, которые возникают в кровле солей при образовании поднятий. Далее эти трещины достаточно быстро, в геологическом понимании, выщелачиваются до размеров каньонообразных ЭВ. Для обоснования данной гипотезы выполнены геомеханические расчеты, основанные на известных соотношениях, приближенно определяющих радиальные (σ_r/E) и окружные (σ_φ/E) деформации в центре пластины [11]. Анализ расчетных деформаций показывает, что они достигают и превышают предельные значения, полученные в лабораторных условиях (таблица 1), что дает возможность включить изучаемые опасные процессы в ИГМ ПТС.

Таблица 1

Результаты геомеханических расчетов деформаций для модели ПТС, представленной на рисунке 2

Table 1

Results of geomechanical calculations of deformations for the NTS model shown in Fig. 2

Деформация		Расчет для ПКС		Расчет для ПКС+КП+СП	
		Центр поднятия	Контур поднятия	Центр поднятия	Контур поднятия
Расчетная $\sigma_{\text{радиальная}}$		0,24–0,95 %	0,18–0,41 %	0,37–1,48 %	0,44–1,77 %
Расчетная $\sigma_{\text{окружная}}$		0,24–0,95 %	0,054–0,22 %	0,37–1,48 %	0,13–0,53 %
Пред. по лабораториям	Для кам. соли	0,18–0,35 %			
	Для карналлита	0,032–0,072 %			
	Для сильвинита	0,2–0,25 %			

Разработана трехстадийная технология построения ИГМ ПТС. На первом этапе с использованием результатов бурения поверхностных скважин формируется ИГМ ПТС с линейными границами инженерно-геологических элементов (ИГЭ) (рисунок 3, а). На втором этапе ИГМ ПТС уточняется по данным проходки горных выработок с учетом корреляции между литологическими и структурными характеристиками основных ИГЭ (рисунок 3, б). Несмотря на значительное уточнение моделей, полученных на втором этапе, на их основе весьма сложно предсказать наличие опасных геологических процессов. Дальнейшее повышение детальности

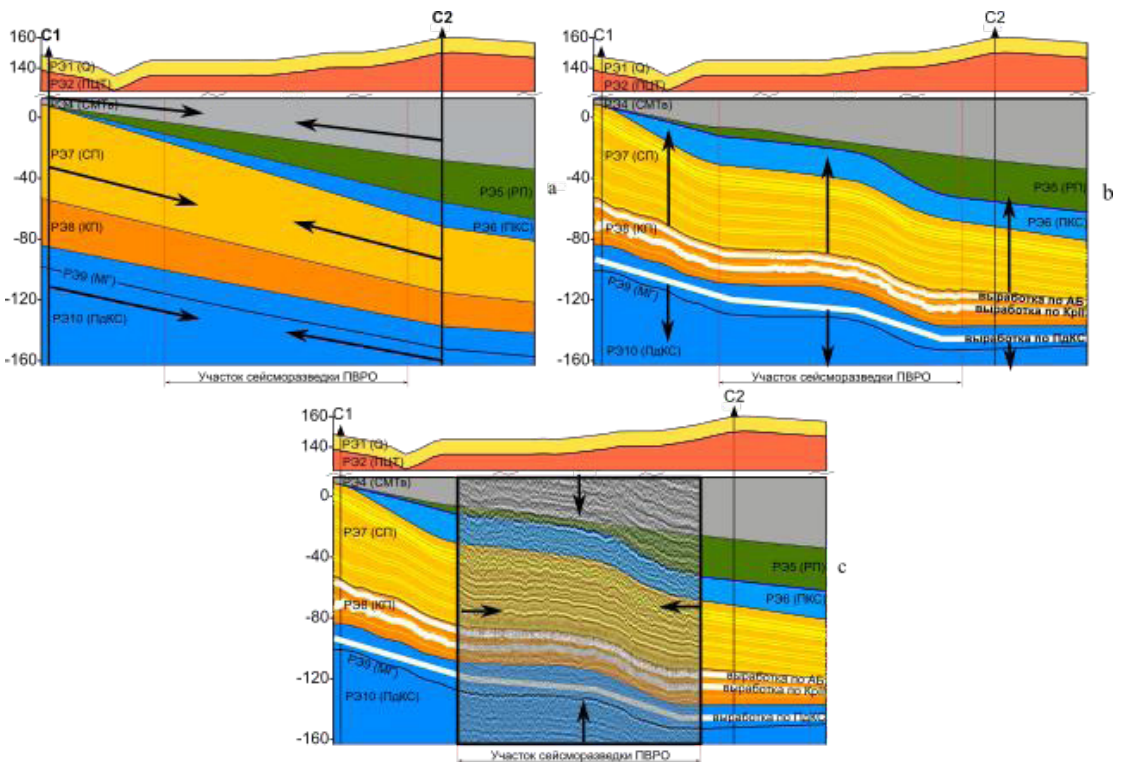


Рис. 3. Этапы построения ИГМ ПТС: а – по данным бурения скважин, б – с учетом результатов проходки горных выработок, в – с учетом результатов шахтных сейсмозащитных работ ПВРО

Fig. 3. Stages of construction of engineering and geological models of the NTS: а – based on drilling data, б – taking into account the results of mining, в – taking into account the results of mine seismic surveys of the air defense

ИГМ обеспечивает метод шахтной сейсмозащиты ПВРО (рисунок 3, с), который привлекается для уточнения геологического строения, обнаружения зон замещения, ЭВ, ИВ, и определения параметров складчатости (рисунок 4).

Методика прогноза ИГУ ВЗТ. В ходе анализа условий, сопутствующих ЭВ и ИР, выявлены ряд закономерностей в структурных характеристиках геологического разреза, коррелируемых с наличием опасных процессов в ВЗТ и устойчивостью ПТС. К выявленным закономерностям относятся: наличие гипсово-глинистой шляпы (ГГШ), наличие поднятия по кровле солей, угол падения крыльев поднятия, мощность ритмопачек (РП), мощность ПКС, наличие понижения рельефа над соляным поднятием, расстояние от оси поднятия, наличие замещения верхних карналлитовых пластов.

С целью формализованного вычисления риска наличия ИР и ЭВ, выявленные закономерности выражены в виде нормированных признаков наличия опасных процессов соответствующими формулами (таблица 2).

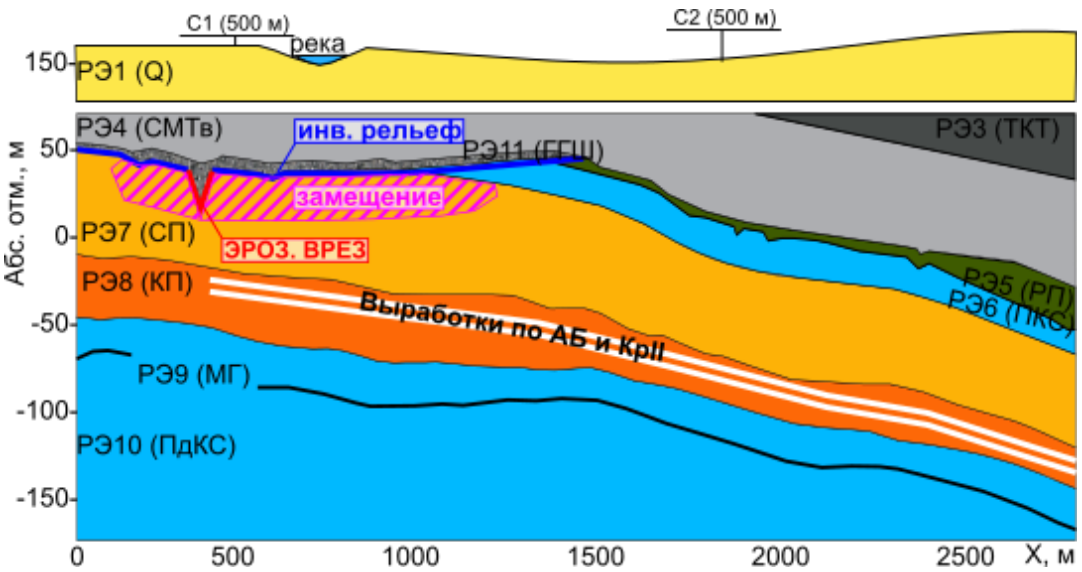


Рис. 4. Итоговая ИГМ ПТС с выявленными опасными процессами

Fig. 4. The final engineering and geological model of the NTS with identified hazardous processes

Итоговый показатель риска наличия опасных процессов вычисляется по формуле:

$$P = \begin{cases} 1, & P_{\Gamma} = 1 \\ \frac{\sum_{i=1}^N P_i}{N}, & P_{\Gamma} = 0 \end{cases}, (3)$$

где P_i – один из нормированных геологических признаков наличия опасных процессов согласно таблице 2, N – количество нормированных геологических признаков.

Таблица 2

Признаки наличия опасных процессов для условий ВКМС

Table 2

Signs of the presence of dangerous processes for VKSD condition

Таксон	Признак	Формула
Литологический	Наличие ГГШ	$P_{\Gamma} = \begin{cases} 1, M_{\Gamma} > 0 \\ 0, M_{\Gamma} = 0 \end{cases}$
	Наличие замещения карналлитов	$P_3 = \begin{cases} 1, M_3 > 0 \\ 0, M_3 = 0 \end{cases}$
Структурный	Наличие поднятия по кровле солей	$P_A = \begin{cases} 1, \text{антиклиналь} \\ 0.5, \text{склон} \\ 0, \text{синклиналь} \end{cases}$
	Угол падения крыльев поднятия	$P_{\alpha} = \frac{\alpha}{\alpha_{\text{макс}}}; \alpha = \tan^{-1} \left(\frac{L_c}{H_c} \right)$
	Мощность РП	$P_{\text{рп}} = 1 - \frac{H_{\text{рп}}}{H_{\text{рп_макс}}}$
	Мощность ПКС	$P_{\text{пкс}} = 1 - \frac{H_{\text{пкс}}}{H_{\text{пкс_макс}}}$
Морфологический	Расстояние от оси поднятия	$P_P = 1 - \frac{L}{L_{\text{макс}}}$
	Понижение рельефа	$P_{\Pi} = \begin{cases} 1, \text{понижение} \\ 0.5, \text{склон} \\ 0, \text{поднятия} \end{cases}$

где M_{Γ} – мощность ГГШ, L_c – длина участка крыла поднятия, H_c – перепад высот участка крыла поднятия, $H_{\text{рп}}$ – мощность ритмопачек, $H_{\text{рп_макс}}$ – максимальная мощность ритмопачек, $H_{\text{пкс}}$ – мощность ПКС, $H_{\text{пкс_макс}}$ – максимальная мощность ПКС, L – расстояние от оси поднятия, $L_{\text{макс}}$ – максимальное расстояние от оси поднятия, M_3 – мощность зоны замещения карналлитов.

На основе анализа более 1000 поверхностных скважин, пробуренных для разведки ВКМС выполнено районирование ВКМС по риску наличия ИР и ЭВ. Это дает возможность определить области, в пределах которых проведение детализационных работ для подтверждения или исключения наличия опасных процессов необходимо в обязательном порядке, а также области, где риск наличия опасных процессов минимален. На основе полученных сведений разработана классификация состояния ПТС, которая позволяет ранжировать участки ведения горных работ по условиям устойчивости ПТС. Разработанная классификация играет важную роль в обеспечении безопасного строительства и эксплуатации подземных сооружений при подземной разработке соляных месторождений, однако она не обладает всей полнотой возможностей, так как в ней учтены только результаты буровых и горнопроходческих работ.

Исследование закономерностей распределения характеристик отражений, связанных с ЭР и ИР, позволило выявить сейсмические атрибуты, реагирующие на рассматриваемые геологические аномалии. Выяснено, что некоторые из атрибутов четко реагируют на искомые объекты

выходом за пределы 2σ , что дает возможность использовать их для построения карты районирования и классификации состояний ПТС. Совместное использование атрибутов различной физической природы значительно повышает надежность выявления объектов поиска, поэтому они объединяются в суммарный сейсмический атрибут (ССА).

С учетом выявленных закономерностей и критериев устойчивости, разработана классификации состояний изучаемых ПТС (таблица 3), которых выделено три – устойчивое, неустойчивое, и критическое (нарушенное). Отнесение ПТС к тому или иному состоянию выполняется по наихудшему из условий устойчивости. На основе разработанной классификации выполнено районирование ВКМС по наличию ИР и ЭВ, и сформирована соответствующая карта (рисунок 5, а). Основным уточняющим фактором явились данные шахтной сейсморазведки, проведенной на большинстве из действующих на ВКМС рудников. Эти данные позволили фактически установить, что наличие ЭВ и ИР по кровле соляных поднятий фиксируется, начиная с признака $P > 0.5$.

Итогом представленных разработок является методика оценки устойчивости ПТС, основанная на установленных морфологических характеристиках геологического разреза и закономерностях распределения сейсмических атрибутов (рисунок 5, б).

Таблица 3

Оценка состояния ПТС с учетом геолого-геофизических признаков

Table 3

Assessment of the state of the NTS, taking into account geological and geophysical features

Условия устойчивости ВЗТ	Состояние природно-технической системы «инженерно-геологический массив – подземное сооружение»		
	1 – устойчивое	2 – неустойчивое	3 – критическое
Риск наличия опасных процессов в ВЗТ	$P < 0.5$	$0.75 > P > 0.5$	$P > 0.75$
Выход атрибутов за пределы 2σ	Отсутствует	Инверсионный разрез, ЭВ до КП	Инверсионный разрез, ЭВ до СП
Мощность ВЗТ по данным ПВРО, м	Есть КП и ПКС $H > 70$ м	ПКС отсутствует $70 \text{ м} > H > 20 \text{ м}$	КП отсутствует $H < 20 \text{ м}$
Аномалии в ВЗТ по данным бурения и проходки	Отсутствуют, либо 4 группы	Косвенные признаки разломов, сухие трещины, зоны замещения, аномалия 2 или 3 группы	Разломы, трещины с течью рассолов, обширные зоны замещения, отсутствие ПКС, аномалия 1 группы
Мощность ненарушенных слоев КС в ВЗТ	$H > 20$ м	$H = 20$ м	$H < 20$ м
Степень нагружения целиков	Степень нагружения < 0.3	Степень нагружения = 0.3	Степень нагружения > 0.3
Поступление флюидов в выработки	Отсутствует	Приток насыщенных флюидов	Приток ненасыщенных флюидов

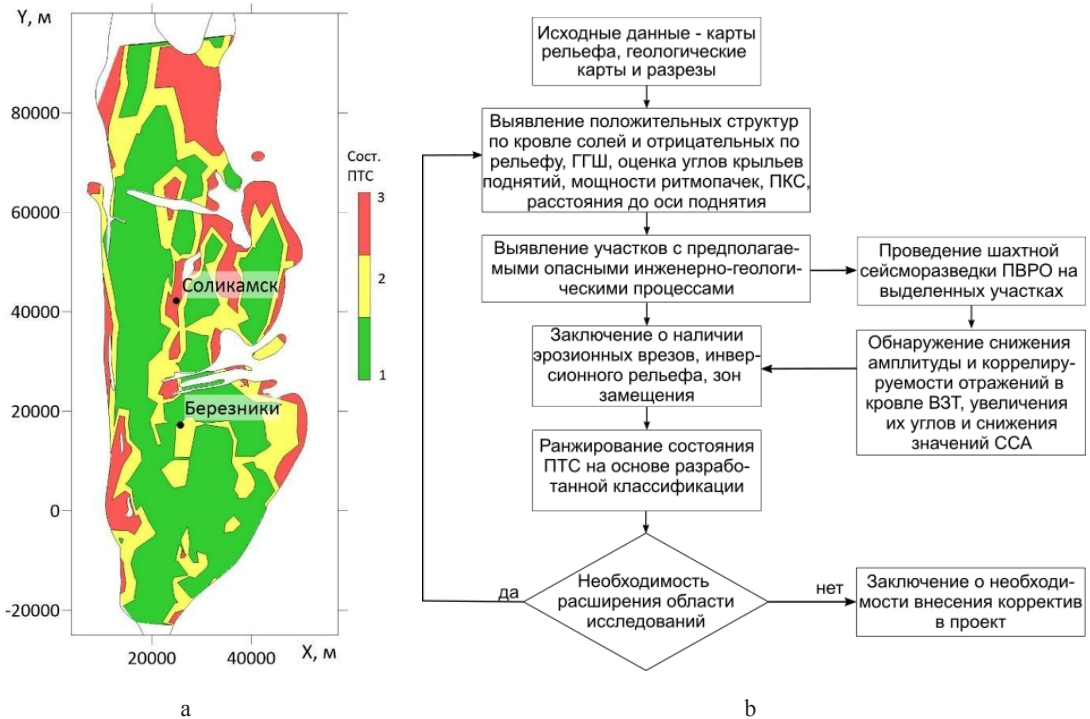


Рис. 5. а – карта районирования ВКМС по состоянию ПТС, б – методика оценки ИГУ ВЗТ, обеспечивающей безопасность подземных сооружений

Fig. 5. a – map of the VKSD zoning according to the state of the NTS, b – methodology for assessing the engineering and geological conditions of the water protection layer that ensures the safety of underground structures

Методика учитывает:

- геотехнические параметры – степень нагружения целиков, мощность ненарушенных слоев каменной соли (КС) в ВЗТ, поступление флюидов в выработки;
- геологические параметры – аномалии в ВЗТ по данным бурения и проходки, аномалии в ВЗТ на основе выявленных закономерностей;
- геофизические признаки – выход сейсмических атрибутов за пределы 2σ , и мощность ВЗТ по результатам шахтной сейсмозведки ПВРО.

Согласно методике, вся имеющаяся геологическая, геотехническая и геофизическая информация анализируется и ранжируется согласно разработанной классификации (таблица 3). В случае, если выявлено наличие опасных процессов, и состояние ВЗТ признано неустойчивым или критическим, для обеспечения ее сохранности и снижения риска опасных динамических горных процессов, связанных с ее нарушением, разработаны практические рекомендации, согласно которым в проект строительства подземных сооружений вносятся необходимые коррективы. Основным способом снижения рисков нарушения ВЗТ является исключение из проектов отработки очистных работ на участках с неустойчивым, и тем более с критическим состоянием ВЗТ, при необходимости – строительство гидроизолирующих перемычек с последующим постоянным мониторингом их строения и ширины. Для максимально же эффективной профилактики рисков активизации опасных процессов предприятиям-недропользователям рекомендуется:

- учет предложенной карты районирования ВКМС при формировании проектов отработки шахтных полей, либо, если речь идет о других месторождениях, разработанной на основе предложенной методики аналогичной карты районирования;

– обязательная реализация на практике предложенной методики оценки и прогноза ИГУ ВЗТ на площадях, относящихся к участкам неустойчивого или критического состояния ПТС, в том числе проходка для этого специальных разведочных выработок по подстилающей каменной соли;

– выборочная или полная, по выбору предприятия-недропользователя, реализация предложенной методики на всех участках, безотносительно степени устойчивости ПТС, такой подход является более затратным, но гарантирует резкое снижение рисков активизации опасных процессов.

Как показывает широкое практическое опробование методики, она позволяет надежно прогнозировать устойчивость ПТС за счет детальной информации об ИГУ ВЗТ, и, тем самым, обеспечить безопасную эксплуатацию подземных сооружений.

Методика прогноза устойчивости гидроизолирующих целиков. В ряде случаев по геологическим и горнотехническим причинам возникает необходимость ликвидации отдельных частей шахтных полей путем заполнения их рассолами. Это приводит к снижению действующих напряжений и интенсивности смещений породного контура и подработанной толщи, что приводит к формированию квазисплошной системы, при которой исключается влияние концентраторов напряжений [10]. При этом действующая часть шахтного поля отделяется от заполняемой рассолами так называемыми гидроизолирующими целиками (ГЦ). Выработки, соединяющие действующую часть шахтного поля с ликвидируемой, перекрываются гидроизолирующими перемычками, которые препятствуют проникновению закладочных рассолов в функционирующие подземные сооружения.

В целях обеспечения устойчивости ПТС и безопасной эксплуатации действующих подземных сооружений необходим строгий контроль за строением и состоянием ГЦ. Гидроизолирующие перемычки делаются абсолютно глухими, и возможность установки в ликвидируемой части шахтного поля каких-либо контролирующих устройств полностью исключена. Поэтому контроль за строением и состоянием ГЦ возможен только с использованием дистанционных методов, среди которых шахтная сейсморазведка играет ведущую роль. Применимость шахтной сейсморазведки для целей исследования и мониторинга строения, ширины и физических свойств целика обоснована специально проведенным для этого численным и физическим моделированием [11, 12]

На основе результатов выполненных исследований разработана методика прогноза устойчивости ГЦ, основанная на комплексном мониторинге физических характеристик горного массива, получаемых по результатам шахтной сейсморазведки ПВРО в горизонтальной плоскости (рисунок 6). Для реализации описанной методики выполнена адаптация разработанного метода ПВРО к условиям работы в горизонтальной плоскости и на двух типах волн – на продольных и поперечных.

Совместное использование продольных и поперечных волн открывает возможность для расчета физико-механических свойств горного массива с использованием формул теории упругости [13] и корреляционных связей, полученных другими исследователями [14] (рисунок 7). Далее через корреляционные связи [15] возможен переход к районированию целика по таким геомеханическим характеристикам, как предел прочности на сжатие и степень нагружения (рисунок 8).

Совместный анализ перечисленных характеристик и сравнение их с предельно допустимыми значениями, представляет собой модель оценки степени устойчивости целика (таблица 4). Она дает полноту сведений о строении и состоянии целика на момент выполнения исследований, достаточную для обеспечения устойчивости ПТС и безопасной эксплуатации подземных сооружений.

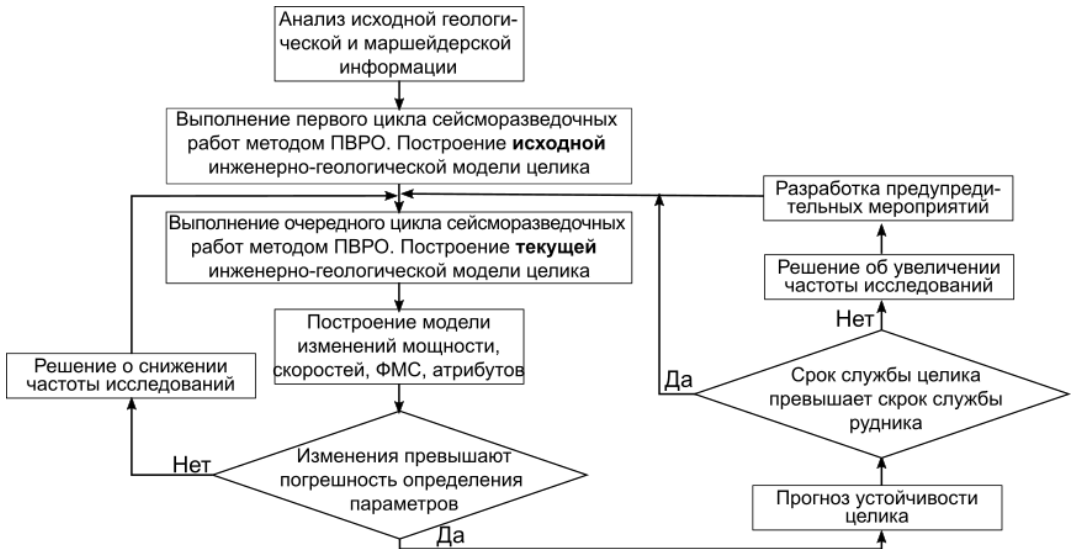


Рис. 6. Методика комплексного изучения и мониторинга гидроизолирующих целиков

Fig. 6. Methodology for the comprehensive study and monitoring of waterproofing pillars

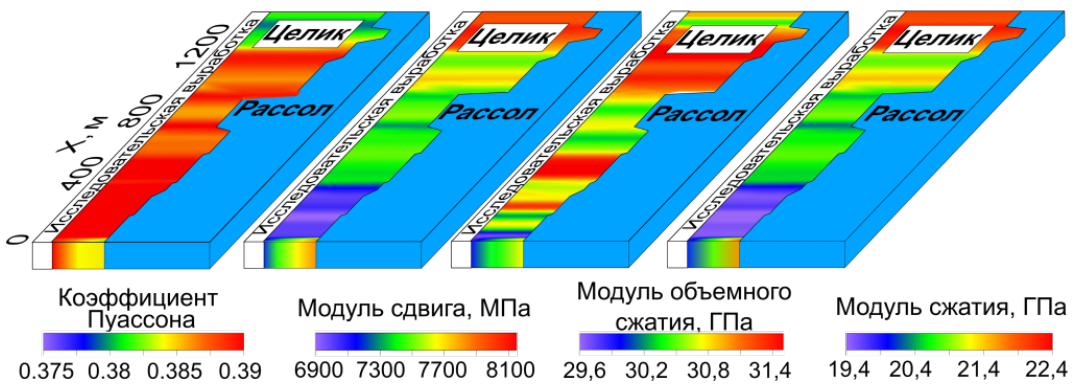


Рис. 7. Физико-механическая модель гидроизолирующего целика, полученная на основе пересчета сейсмических атрибутов

Fig. 7. Physico-mechanical model of the waterproofing pillar, obtained based on the recalculation of seismic attributes

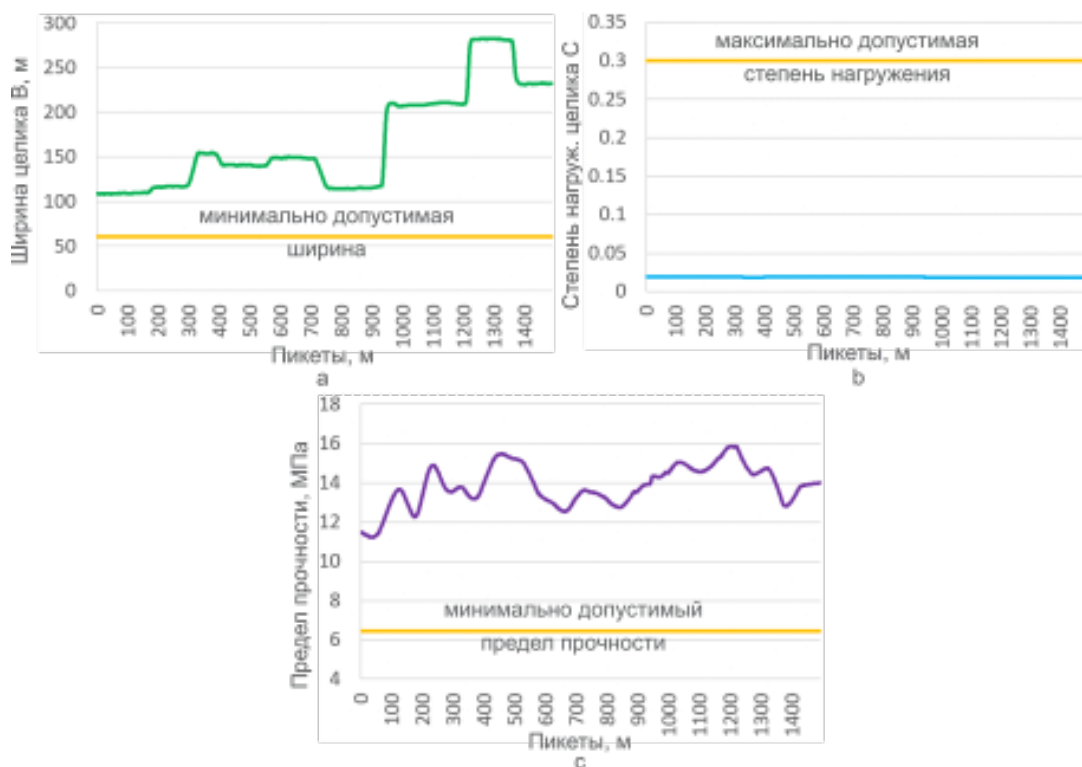


Рис. 8. Районирование по условиям безопасности целика: а – фактическая и минимально допустимая мощности, б – фактическая и максимально допустимая степени нагружения, с – фактический и минимально допустимый предел прочности

Fig. 8. Zoning according to the safety conditions of the waterproofing pillar: а – actual and minimum permissible capacity, б – actual and maximum permissible degree of loading, с – actual and minimum permissible tensile strength

Таблица 4

Модель оценки степени устойчивости гидроизолирующего целика

Table 4

Model for assessing the degree of stability of a waterproofing rear sight

Условия безопасности ГЦ для сильвинита)	Состояние целика (сильвиниты)		
	Устойчивое	Неустойчивое	Критическое
Ширина ГЦ – В, м (по данным сейсморазведки)	$V < V_p$	$V = V_p$	$V > V_p$
Признаки нарушения сплошности (ССА) (по данным сейсморазведки)	$ССА \ll 1$	ССА локально приближается к 1	ССА обширно приближается к 1
Степень нагружения целика С (по данным сейсморазведки)	$C < 0.3$	$C = 0.3$	$C > 0.3$
Значение предела длительной прочности $s_{дл}$ (по данным сейсморазведки)	$s_{дл} > 0.3s_{ск}$	$s_{дл} = 0.3s_{ск}$	$s_{дл} < 0.3s_{ск}$
Поступление воды сквозь целик	Нет	Увлажнение стенок	Поступает вода

Мониторинг изменения геомеханических характеристик, в свою очередь, открывает путь к прогнозу состояния ГЦ и устойчивости ПТС. Так, на одном из ГЦ мониторинговые сейсмо-разведочные работы позволили установить факт заметного уменьшения его мощности, которое локально достигло девяти метров (рисунок 9, а), что превышает погрешность определения геометрических характеристик и должно быть принято во внимание. Прогноз устойчивости выполняется по участку максимальных изменений путем экстраполяции изменения предела прочности на сжатие (рисунок 9, б), ширины целика (рисунок 9, с), и степени его нагружения (рисунок 9, d) на необходимый период, в данном случае до 2050 года. Выполненный прогноз позволяет оценить перспективы дальнейшей эксплуатации ГЦ при сохранении установленных темпов их изменений. В случае, если темпы изменений изменяются, соответственно меняются и прогнозные оценки изменения характеристик целика.

Таким образом, на основании анализа сейсмических атрибутов в горизонтальной плоскости выполняется комплексный прогноз устойчивости гидроизолирующих целиков, с оценкой динамики их ширины, внутренней структуры и геомеханических характеристик. В результате реализуется группа сценариев развития состояния ПТС с дистанционным контролем состояния гидроизолирующих целиков.

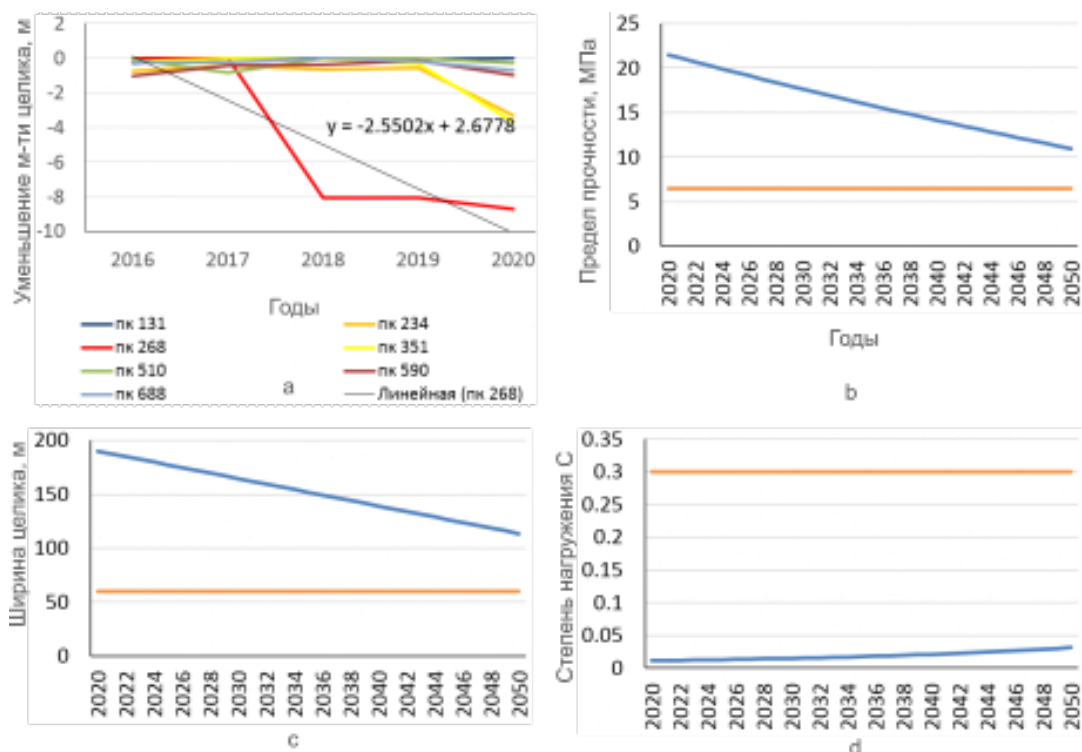


Рис. 9. Прогнозная оценка характеристик целика: а – результаты мониторинга целика за период 5 лет, б, с, d – прогнозная оценка характеристик целика на участке наибольших изменений соответственно для предела прочности на сжатие, ширины целика и максимальной степени нагружения

Fig. 9. Predictive assessment of rear sight characteristics: a – results of rear sight monitoring over a period of 5 years, b, c, d – predictive assessment of rear sight characteristics at the site of the greatest changes, respectively, for the ultimate compressive strength, rear sight width and maximum degree of loading

Заключение

Созданные геофизические, инженерно-геологические и динамические модели природно-технических систем базируются на комплексной геологической, горнотехнической и геофизической информации о строении и физических свойствах ИГМ, и необходимы для проектной, изыскательской, образовательной и научно-исследовательской деятельности в плоскости решения задач инженерной геологии.

Получен ряд новых сведений об ИГУ ВЗТ, в том числе впервые установлено наличие на ВКМС каньонообразных эрозионных врезов, представляющих угрозу безопасности подземным сооружениям. Выполнено геомеханическое обоснование природы эрозионных врезов, создана динамическая модель их возникновения, и комплексный анализ условий, в которых они зафиксированы, обнаружены закономерности, сопутствующие их возникновению, предложен подход к формализованному вычислению показателя наличия инверсионного рельефа и эрозионных врезов, учитывающего литологический, структурный и морфологический факторы.

Произведено районирование ВКМС по признаку наличия опасных геологических процессов, сформирована классификация состояния ПТС «ИГМ – подземное сооружение» на основе геологических и горнотехнических параметров. Установлена связь наличия эрозионных врезов и инверсии соляных поднятий с распределением ряда амплитудных, частотных и корреляционных характеристик сейсмических разрезов, выполнена классификация состояния ПТС с учетом поведения сейсмических атрибутов.

Разработан научный подход к переходу от упругих характеристик к структурной и физико-механической моделям целиков, и далее – к степени нагружения целиков и пределу прочности на сжатие слагающих их пород. На основе установленных связей, закономерностей и разработанных подходов сформированы методики оценки и прогноза устойчивости природно-технических систем при подземной разработке соляных месторождений, обеспечивающие безопасное строительство и эксплуатацию подземных сооружений.

Представленные научно-методические основы оценки и прогноза устойчивости природно-технических систем апробированы и внедрены на рудниках ВКМС, где показали высокую эффективность при решении геологических и горнотехнических задач, и рекомендуются для практического использования при строительстве и эксплуатации сооружений при подземной разработке соляных месторождений.

Таким образом, в ходе исследований решена актуальная научная проблема оценки устойчивости природно-технических систем при подземной разработке соляных месторождений, имеющая важное социально-экономическое и хозяйственное значение. Изложены новые научно-обоснованные технические и методические решения, а также разработаны рекомендации по их практической реализации для повышения безопасности горнодобывающих комплексов и сохранности запасов ископаемых солей, что вносит значительный вклад в экономическое развитие Российской Федерации.

Литература

1. Абатурова И. В., Савинцев И. А., Стороженко Л. А. и др. Этапность изучения инженерно-геологических условий месторождений полезных ископаемых от разведки до отработки. *Известия вузов. Горный журнал*. 2020;(7):83–91. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-7-83-91
2. Батракова Г. М., Савина О. В. Оценка природных и техногенных рисков для территорий нового строительства. *Актуальные проблемы природопользования и природообустройства*: Сборник статей II Международной научно-практической конференции, 25-26 декабря 2019 г. Пенза: Изд-во Пензенского государственного аграрного университета. 2019:55-58.
3. Кутепов Ю.И., Кутепова Н.А., Пономаренко М.Р., Кутепов Ю.Ю. Геомеханический мониторинг устойчивости бортов разрезов и отвалов при разработке угольных месторождений. *Горный журнал*. 2023;(5):69-74.

4. Олянский Ю. И., Щекочихина Е. В., Кузьменко Д. А. и др. Основные закономерности изменения состава и свойств незасоленных и засоленных глинистых пород при диффузионном выщелачивании. *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура*. 2023;3-4(92):27-38.
5. Латыпов А. И., Гараева А. Н., Колчина Ю. Н. Оценка суффозионной опасности территории Восточного Закамья. *Карст и пещеры*. 2024: Сборник научных трудов по материалам Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, 28 мая – 01 июня 2024 г. Пермь: Изд-во Пермского государственного национального исследовательского университета. 2024:85-91.
6. Якимов А.А., Ефремов В.Н., Христофоров И.И. и др. Мерзлотные условия участка эксплуатации гидроузла на реке Магга по данным электроразведки. *Устойчивость природных и технических систем криолитозоны в условиях изменения климата*: Материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 150-летию М.И. Сумгина, 22-24 марта 2023 г. Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН. 2023:169-172.
7. Кулагов Е.В., Хвесеня С.С., Иванов С.В. и др. Возможности шахтных сейсмических исследований на примере месторождения калийных солей. *Инженерная и рудная геофизика 2024. Инженерная и рудная геология 2024*: Материалы 20-й научно-практической конференции и выставки, 13-16 мая 2024 г. Казань: Изд-во ООО «Геомодель Развитие». 2024:358-362.
8. Бабкин А. И. Оперативный прогноз изменчивости физико-механических свойств продуктивных пластов по данным шахтных сейсмоакустических исследований. *Горное эхо*. 2019;4(77):67-72.
9. Зубов В. П., Ковальский Е. Р., Антонов С. В. И др. Повышение безопасности рудников при отработке Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(5):22-33. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-22-33
10. Барях А. А., Евсеев А. В. Ликвидация калийных рудников и соляных шахт: обзор и анализ проблемы. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(9):5-29. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-09-0-5-29.
11. Пригара А.М., Царев Р. И., Ворошилов В.А. и др. *Шахтная сейсморазведка на месторождениях солей (на примере ВКМС)*. Пермь: ООО «Меркурий-каталог». 2024:184.
12. Пригара А.М., Аптуков В.Н., Ворошилов В.А. и др. Исследование процесса распространения волн при сейсмоакустических воздействиях в породном массиве методами математического моделирования. *«Инженерная и рудная геофизика 2020»*: Материалы конференции EAGE, 14-18 сентября 2020 г. Пермь: Изд-во ООО «EAGE Геомодель»; 2020:38.
13. Новацкий В. *Теория упругости*. Москва: Мир; 1975:872.
14. Кашников Ю.А., Ермашов А.О., Шустов Д.В. и др. Создание геолого-геомеханической модели Верхнекамского месторождения калийных солей. *Маркшейдерский вестник*. 2019;1(128):40-46.
15. Лебедева О.О. Прогноз деформационных процессов междушахтных целиков калийного месторождения на основе комплекса натурных исследований: Дис. ... канд. техн. наук. СПб:2024:131.

References

1. Abaturova I.V., Savintsev I.A., Storozhenko L.A., et al. The stages of studying the engineering and geological conditions of mineral deposits from exploration to mining. *University News. Mining Magazine*. 2020;(7):83–91 (in Russian). DOI: 10.21440/0536-1028-2020-7-83-91.
2. Batrakova G.M., Savina O.V. Assessment of natural and man-made risks for the territories of new construction. In: *Actual problems of nature management and environmental management: Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference*, December 25–26, 2019 Penza: Publishing House of Penza State Agrarian University; 2019:55–58 (in Russian).
3. Kutepov Yu.I., Kutepova N.A., Ponomarenko M.R., Kutepov Yu.Y. Geomechanical monitoring of stability of sides of sections and dumps during the development of coal deposits. *Mining Magazine*. 2023;(5):69–74 (in Russian).
4. Olyansky Yu.I., Shchekochikhina E.V., Kuzmenko D.A., et al. The main patterns of changes in the composition and properties of unsalted and saline clay rocks during diffusion leaching. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2023;3–4(92):27–38 (in Russian).

5. Latypov A.I., Garayeva A.N., Kolchina Yu.N. Assessment of the suffusion hazard of the territory of Eastern Zakamye. In: *Karst and Caves. 2024: Collection of scientific papers based on the materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation*, May 28 – June 01, 2024, Perm. Perm: Publishing House of Perm State National Research University; 2024:85–91 (in Russian).

6. Yakimov A.A., Efremov V.N., Khristoforov I.I., et al. Permafrost conditions at the site of operation of the hydroelectric power plant on the Matta River according to electrical survey data. In: *Sustainability of natural and technical cryolithozone systems in the face of climate change: Proceedings of the All-Russian Conference with International Participation dedicated to the 150th anniversary of M.I. Sumgin, March 22-24, 2023*. Yakutsk: Publishing House of the P.I. Melnikov Institute of Permafrost Science SB RAS; 2023:169–172 (in Russian).

7. Kulagov E.V., Khvesenya S.S., Ivanov S.V., et al. The possibilities of mine seismic research using the example of a deposit of potash salts. In: *Engineering and Ore Geophysics 2024. Engineering and Ore Geology 2024: Proceedings of the 20th scientific and practical conference and exhibition*, May 13-16, 2024. Kazan: Publishing House of Geomodel Razvitie LLC; 2024:358–362 (in Russian).

8. Babkin A.I. Operational forecast of variability of physical and mechanical properties of productive formations according to mine seismic and acoustic studies. *The Mountain Echo*. 2019;4(77):67–72 (in Russian).

9. Zubov V.P., Kovalsky E.R., Antonov S.V., et al. Improving mine safety during the development of the Verkhnekamskoye deposit of potassium and magnesium salts. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2019;(5):22–33 (in Russian). DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-22-33.

10. Baryakh A.A., Evseev A.V. Liquidation of potash mines and salt mines: a review and analysis of the problem. *Mining information and analytical bulletin*. 2019;(9):5–29 (in Russian). DOI: 10.25018/0236-1493-2019-09-0-5-29.

11. Prigara A.M., Tsarev R. I., Voroshilov V.A., et al. Mine seismic exploration in salt deposits (using the example of the VKMS). Perm: Mercury Catalog LLC; 2024:184 (in Russian).

12. Prigara A.M., Aptukov V.N., Voroshilov V.A., et al. *Investigation of the wave propagation process during seismic and acoustic impacts in a rock mass by mathematical modeling methods. "Engineering and Ore Geophysics 2020": Proceedings of the EAGE conference*, September 14-18, 2020. Perm: Publishing House of EAGE Geomodel LLC; 2020:38 (in Russian).

13. Novatsky V. *Theory of elasticity*. Moscow: Mir; 1975:872 (in Russian).

14. Kashnikov Yu.A., Ermashov A.O., Shustov D.V., et al. Creation of a geological and geomechanical model of the Verkhnekamskoye potash salt deposit. *The Surveyor's bulletin*. 2019;1(128):40–46 (in Russian).

15. Lebedeva O.O. Forecast of deformation processes of inter-shaft pillars of a potash deposit based on a complex of field studies: Dis. ... Candidate of Technical Sciences. St. Petersburg; 2024:131 (in Russian).

Сведения об авторах

ПРИГАРА Андрей Михайлович – к.т.н., руководитель направления АО «ВНИИ Галургии», г. Пермь, Российская Федерация, ORCID 0000-0003-0129-6133, Scopus Author ID 12789555800

E-mail andrey.prigara@uralkali.com.

ТАТАРКИН Алексей Викторович – д.т.н., проф. кафедры инженерной геологии и охраны недр ФГАОУ ВО «ПГНИУ», зав. лабораторией геофизики ООО НИПППД «Недра», г. Пермь, Российская Федерация, ORCID 0000-0003-4446-5507, Scopus Author ID 55937468700

E-mail vsto08@mail.ru.

СЕРЕДИН Валерий Викторович – д. г.-м. н., проф., зав. кафедрой инженерной геологии и охраны недр ФГАОУ ВО «ПГНИУ», г. Пермь, Российская Федерация, Scopus Author ID 56974744000.

About the authors

Andrey M. Prigara – Cand. Sci. (Engineering), Head of the Department, VNI Galurgii JSC, Perm, Russian Federation, ORCID 0000-0003-0129-6133, Scopus Author ID 12789555800

E-mail andrey.prigara@uralkali.com

Alexey V. Tatarkin – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Department of Engineering Geology and Subsoil Protection, Perm State National Research University; Head of the Laboratory of Geophysics, NIPPPD Nedra LLC, Perm, Russian Federation, ORCID 0000-0003-4446-5507, Scopus Author ID 55937468700

E-mail vsto08@mail.ru

Valery V. Seredin – Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, Head of the Department of Engineering Geology and Subsoil Protection, Perm State National Research University, Perm, Russian Federation, Scopus Author ID 56974744000.

Вклад авторов

Пригара А.М. – разработка концепции, выполнение численного и физического моделирования, разработка метода ПВРО и моделей, программно-алгоритмического обеспечения, методик, научных подходов, научно-методических основ, апробация и внедрение разработок.

Татаркин А.В. – консультации, обсуждение идей.

Середин В.В. – консультации, обсуждение идей.

Authors' contribution

Andrey M. Prigara – concept development, numerical and physical modeling, model development, software and algorithmic support, methods, scientific approaches, scientific and methodological foundations.

Alexey V. Tatarkin – consultations, discussion of ideas.

Valery V. Seredin – consultations, discussion of ideas.

Информация о конфликте интересов

Один из авторов – Пригара А.М. заявляет о финансовом конфликте интересов с Горным институтом УрО РАН (г. Пермь), который, как и АО «ВНИИ Галургии», являются подрядчиками одного генерального заказчика, в связи с чем авторы просят редакцию не отправлять данную рукопись на рецензирование лицам, аффилированным с Горным институтом УрО РАН.

Conflict of interests

One of the authors, Prigara A.M., claims a financial conflict of interest with the Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Perm), which, like VNI Galurgii JSC, are contractors of the same general customer, and therefore the authors ask the Editorial Board not to send this manuscript for review to persons affiliated with the Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Поступила в редакцию / Submitted 19.02.2026

Поступила после рецензирования / Revised 04.03.2026

Принята к публикации / Accepted 27.03.2026