

Оригинальная статья / Original Paper

<https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4S-140-145>

## Задачи геофизики и геомеханики в обеспечении безопасного ведения горных работ на калийных рудниках

А.А. Барях , И.А. Санфиров, А.Г. Ярославцев

Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Российская Федерация

 bar@mi-perm.ru

**Резюме:** Представлены методические основы сейсмогеомеханических исследований в пределах крупнейшего в Европе Верхнекамского месторождения калийных и магниевых солей. Подобные исследования ведутся не один десяток лет, что позволяет определить в качестве основных направлений – мониторинг воздействия горных работ на вмещающий породный массив в пределах действующих рудников и контроль развития аварийных ситуаций. В рамках данных направлений сейсмогеомеханические исследования включают малоглубинную сейсморазведку высокого разрешения и геомеханическую интерпретацию получаемых данных. Содержание аппаратурно-методической составляющей сейсморазведочных исследований сформировано с учетом специфики решаемых задач, сейсмогеологических и поверхностных условий в пределах урбанизированных территорий. В этой связи применяются специально разработанные невзрывные источники малой мощности и телеметрические портативные цифровые сейсмостанции с широким частотным и динамическим диапазоном. Геомеханическая оценка и прогноз безопасных условий подработки водозащитной толщи основываются на математическом моделировании изменения напряженно-деформированного состояния подработанного породного массива под воздействием горных работ. Методика расчетов базируется на модели упругопластической среды, которая в области действия напряжений сжатия реализуется в варианте параболического критерия Кулона–Мора. Результаты подобных комплексных исследований проиллюстрированы практическими примерами для различных горнотехнических ситуаций на действующих калийных рудниках и в аварийных ситуациях.

**Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние, геомеханика, сейсморазведка, калийный рудник, мониторинг, прогноз, водозащитная толща

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания «ГИ УрО РАН» (рег. номер 124020500031-4 и рег. номер 124020500029-1).

**Для цитирования:** Барях А.А., Санфиров И.А., Ярославцев А.Г. Задачи геофизики и геомеханики в обеспечении безопасного ведения горных работ на калийных рудниках. *Горная промышленность*. 2025;(4S):140–145. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4S-140-145>

## Geophysical and geomechanical challenges in ensuring safe mining operations at potash mines

А.А. Барях , И.А. Санфиров, А.Г. Ярославцев

Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

 bar@mi-perm.ru

**Abstract:** The paper presents methodological basis of seismic geomechanical research within the Verkhnekamskoe potash magnesium salt deposit, the largest field in Europe. Such investigations have been conducted for decades, which allows us to define as the main directions, i.e. monitoring the impact of mining operations on the country rock masses within the active mines and monitoring of the emergency situations. Seismic and geomechanical studies within these directions include high resolution shallow seismic survey and geomechanical interpretation of the seismic data. The hardware and methodological component of the seismic surveys is designed with account of the specific features of the targets, seismogeological and surface conditions within urbanized areas. This is achieved through the use of specially designed non-explosive low-power seismic sources with the pulse energy up to 1200 J and telemetric portable digital seismic stations with a wide frequency and dynamic range. Geomechanical assessment and prediction of safe conditions for mining of water protective strata is based on mathematical modeling of changes in the stress-and-strain state of the undermined rock mass under the impact of mining operations. The calculation method is based on the model of an elastic-plastic medium, which is implemented as parabolic Coulomb-Mohr criterion in the zone of

compressive stresses. The results of such complex studies are illustrated by practical examples for various mining situations at the operating potash mines and in emergency situations.

**Keywords:** stress-and-strain state, geomechanics, shallow seismic investigations, potash mine, monitoring, prediction, water protective strata

**Acknowledgments:** The research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education under Agreement on Governmental Order (reg. number 124020500031-4, reg. number 124020500029-1).

**For citation:** Baryakh A.A., Sanfirov I.A., Yaroslavtsev A.G. Geophysical and geomechanical challenges in ensuring safe mining operations at potash mines. *Russian Mining Industry*. 2025;(4S):140–145. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4S-140-145>

## Введение

В России объем извлекаемых калийно-магниевых руд составляет четверть мировых запасов, при этом более 80% сосредоточено в Верхнекамском месторождении, находящемся в Пермском крае. Все известные месторождения калийных руд различаются горно-геологическими условиями разработки, но для любого калийного рудника главной проблемой в обеспечении безопасного ведения горных работ является сохранность водозащитной толщи (ВЗТ), перекрывающей доступ пресных вод в горные выработки. На сегодняшний день в мире известно около ста затопленных соляных и калийных рудников из-за нарушений сплошности ВЗТ как природного, так и техногенного характера. Аварийные затопления калийных рудников и соляных шахт отмечены практически на всех континентах [1–4]. При аварийном прорыве пресных вод в горные выработки вследствие растворения соляных пород интенсифицируются деформации земной поверхности, которые могут реализовываться в динамической форме с образованием провалов глубиной сотни метров [5–7]. Возникает угроза разрушения зданий и объектов инженерной инфраструктуры, расположенных на земной поверхности.

Для исключения подобных негативных ситуаций необходимым является разработка адекватного обеспечения геомеханических расчетов параметров ведения горных работ, базирующегося на содержательной геофизической информации о состоянии подработанного массива и физико-механических свойствах пород.

## Основные методические положения

Геомеханическая оценка и прогноз безопасных условий подработки ВЗТ основываются на математическом моделировании изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) подработанного породного массива под воздействием горных работ. Методика расчетов подробно изложена в [8] и базируется на модели идеальной упругопластической среды, которая в области действия напряжений сжатия реализуется в варианте параболического критерия Кулона–Мора [9; 10]. В области действия напряжений растяжения упругое деформирование ограничивается пределом прочности при растяжении. Фактор времени в геомеханических расчетах учитывается по схеме переменных модулей деформаций. Формирование зон пластиических деформаций в областях сжатия и растяжения непосредственно связывается с нарушением сплошности пластов ВЗТ в процессе деформирования подработанного массива.

Достоверность геомеханических расчетов определяется не только адекватностью принятых математических моделей, но и основывается на их содержательном параметрическом обеспечении, включающем представительную информацию о физико-механических свойствах и структурных особенностях продуктивных и вмещающих отло-

жений. К сожалению, построение таких баз данных технологически ограничено количеством геологоразведочных скважин и характеризуется выраженным дискретным распределением. В этой связи возникает необходимость дополнения информационной составляющей геомеханических расчетов сведениями о латеральной изменчивости структурно-физических параметров породного массива, которые могут быть установлены по результатам соответствующих геофизических исследований [11].

Обоснование применимости того или иного геофизического метода базируется на физико-геологической модели исследуемого интервала геологического разреза. В условиях пластового залегания контролируемых отложений благодаря их акустической контрастности наибольшее распространение на калийных месторождениях получили сейсморазведочные исследования. На сегодняшний день сформирован и действует в активном режиме сейсморазведочный комплекс, включающий наземную, шахтную и скважинную сейсморазведку [12]. Его отдельные элементы включены в действующие на горнодобывающих предприятиях нормативные документы<sup>1</sup>.

Содержание аппаратурно-методической составляющей всего комплекса сейсморазведочных исследований сформировано с учетом специфики решаемых задач, сейсмогеологических и поверхностных условий. Необходимо учитывать расположение существенного объема контролируемых объектов в пределах урбанизированных территорий со значительным техногенным влиянием на процесс регистрации упругих колебаний.

При наземных сейсморазведочных исследованиях применяются: невзрывные источники малой мощности с энергией импульса до 1200 Дж, в том числе пороховые [13] и механизированные; телеметрические портативные цифровые сейсмостанции с широким частотным и динамическим диапазоном IS-128 (Россия), SUMMIT X ONE (Германия). Аналогичное регистрирующее оборудование используется в шахтных сейсмоакустических исследованиях с ударным источником упругих волн. В скважинной сейсморазведке применяются современные гидрофонные сейсмокосы Geometrics (США), электроискровые источники Pulse (Россия), а также волоконно-оптические распределенные системы на базе интерропатора Silixa iDAS (Англия).

Наземные и шахтные сейсморазведочные работы в основном выполняются в вариантах 2D профилирования по методу отраженных волн в модификации общей глубинной точки (МОВ ОГТ). В отдельных случаях возможно применение пространственной сейсморазведки 3D [14], а также квази-3D в пределах урбанизированных террито-

<sup>1</sup> Инструкция по шахтной сейсморазведке (применительно к условиям Верхнекамского месторождения калийных солей). Пермь; 2021. 44 с.; Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей. СПб.; Пермь: ГИУрО РАН; 2014. 130 с.

рий и при наблюдениях в горных выработках. Подобные системы включают разнесенные на определенное расстояние линии приема и возбуждения упругих колебаний. Параметры регистрации сейсмических данных и график цифровой обработки для всех направлений сейсморазведочных исследований формируются в соответствии с физико-геологическими особенностями целевого интервала исследований [15]. Результаты цифровой обработки в виде суммарных временных разрезов и различных динамических и кинематических характеристик волнового поля являются входящей информацией этапа интерпретации.

Выделенные сейсморазведочные аномалии включаются в геомеханические расчетные схемы в виде зон, в пределах которых снижение механических свойств пород оценивается по изменению динамических и кинематических характеристик волнового поля.

#### Оценка безопасных условий ведения горных работ

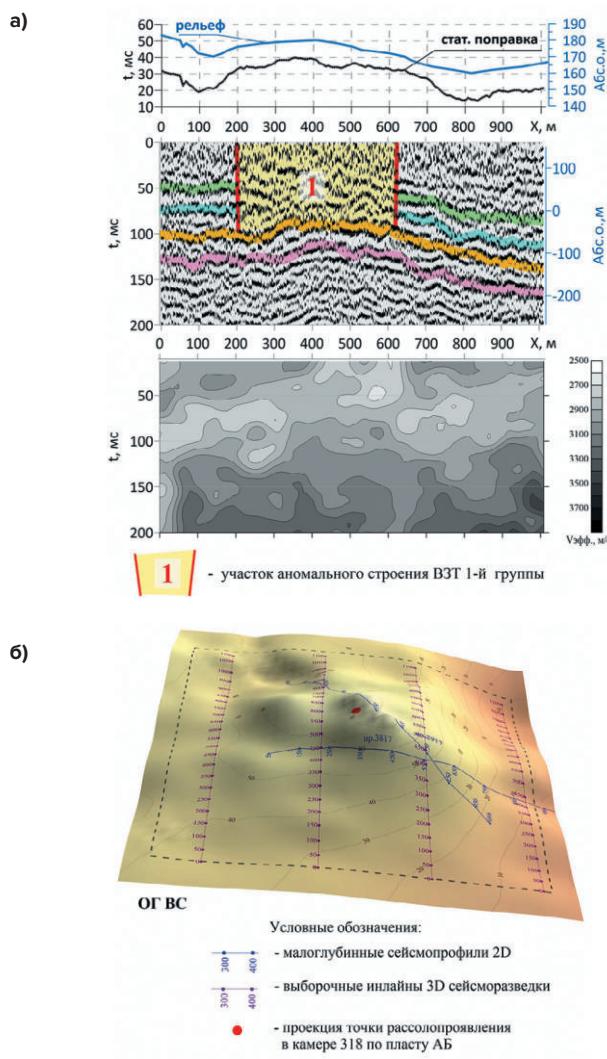
Нередко в процессе ведения горных работ обнаруживаются осложнения геологического строения, не учтенные в проектных решениях, либо после завершения очистной выемки наблюдается отличающееся от прогнозов неконтролируемое разрушение междукамерных целиков и ускоренное оседание земной поверхности. Все это требует выполнения комплекса исследований по оценке состояния породного массива с последующим геомеханическим анализом безопасных условий подработки ВЗТ. По результатам этих работ при возможности и необходимости разрабатываются дополнительные меры охраны ВЗТ (закладка очистных камер, создание зон смягчений и т.д.).

Рассмотрим реализацию этой методологии на одном из участков в центральной части Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМС). Здесь при проходке одной из камер обнаружено интенсивное рассолопроявление, сопровождающееся газовыделением. В связи с этим для оценки сложившейся горно-геологической ситуации в данном районе проведен комплекс геофизических наблюдений.

Учитывая потенциальную опасность прорыва пресных вод в выработанное пространство рудника, разработана и реализована пространственная система регистрации сейсморазведочных данных по сети профилей (2D + 3D).

По результатам обработки в итоговых волновых полях (рис. 1, а) в пределах участка исследований отмечается ряд наиболее динамически выраженных осей синфазности, которые соответствуют: первым выдержаненным пластам каменной соли (ВС) в соляно-мергельной толще, кровле карналлитового пласта Е (Ек) и сильвинитовой зоны (Сил). В интервале соляно-мергельной толщи, ВС дополнительно введен ОГ СМТ, обусловленный наличием резкого отрицательного вертикального скоростного градиента, проявляющегося на скоростной характеристики.

В интервале от поверхности наблюдений до кровли сильвинитовой зоны выделяется участок осложнения волнового поля в виде «купола». В его пределах отмечаются повышенное затухание интенсивности суммарного волнового поля и пониженные значения эффективных скоростей волн. Структурные построения, выполненные по результатам комплексной интерпретации 2D и 3D сейсморазведочных исследований, позволили выделить положительную структурную форму по всем отражающим горизонтам, которая имеет преимущественно широтное простиранье (рис. 1, б) с наиболее ослабленной северной частью.



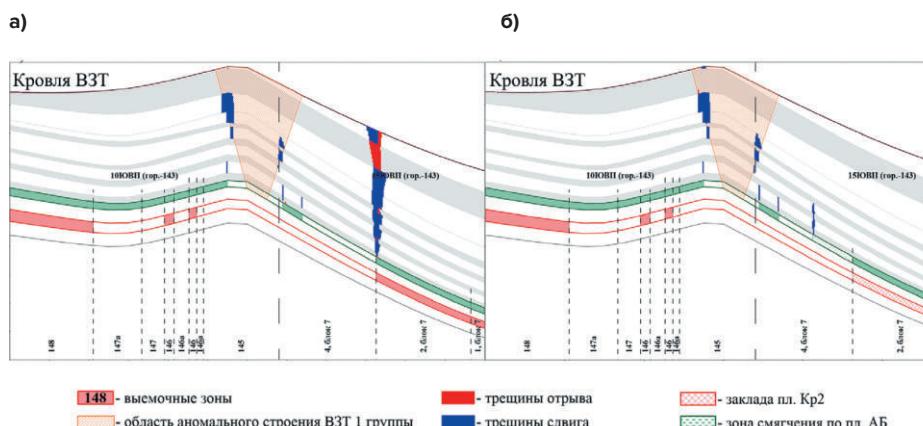
**Рис. 1**  
Пример результатов обработки сейсморазведочных данных:  
а – временной разрез ОГТ и его скоростная характеристика;  
б – структурный план кровли соляной толщи по данным 2D, 3D сейсморазведки

**Fig. 1**  
An example of seismic data processing results:  
a – stacked seismic data of the common-depth-point method (CDP) and its velocity characteristics; b – structural geometry of the top of the salt layer based on the 2D and 3D seismic data

На основании выполненных геофизических исследований и их геологической интерпретации участок рассолопроявления отнесен к аномалии 1-й группы в строении ВЗТ, в пределах которой ведение очистных работ запрещено нормативным документом. Вместе с тем на момент вскрытия рассолопроявления данный участок уже являлся частично подработанным. В этой связи на основе полученной геолого-геофизической информации требовалось дать оценку обеспечения долговременной сохранности ВЗТ.

В соответствии с изложенной выше методикой математического моделирования проведен комплекс геомеханических расчетов с учетом данных сейсморазведки. Геомеханическая модель отражала текущую горнотехническую ситуацию и включала выявленную аномалию в строении ВЗТ. Согласно геофизическим исследованиям снижение прочностных и деформационных свойств в ее пределах принималось равным 2.

На рис. 2, а представлены прогнозные результаты оценки нарушения сплошности ВЗТ при остановке горных работ и



**Fig. 1**  
An example of seismic data processing results:  
a – stacked seismic data of the common-depth-point method (CDP) and its velocity characteristics;  
b – structural geometry of the top of the salt layer based on the 2D and 3D seismic data

сохранения сложившейся ситуации. Как видно, в этом случае на конец процесса сдвижения имеет место сквозное разрушение ВЗТ. В этой связи в целях обеспечения устойчивости ВЗТ требуется применение дополнительных мер ее охраны.

Рассматривались несколько вариантов реализации дополнительных мер охраны: 1) закладка выработанного пространства пласта Кр2 (со степенью заполнения камер не менее 0.7) в краевой части 15 ЮВП; 2) создание наряду с закладочными мероприятиями зоны смягчения по пласту АБ протяженностью 200 м, также в краевой части выработанного пространства 15 ЮВП. Результаты математического моделирования показали, что второй вариант обеспечивает более надежную охрану ВЗТ (рис. 2, б). В этом случае сквозная зона нарушенности ВЗТ практически нивелируется и разрушению подвержена лишь ее нижняя часть.

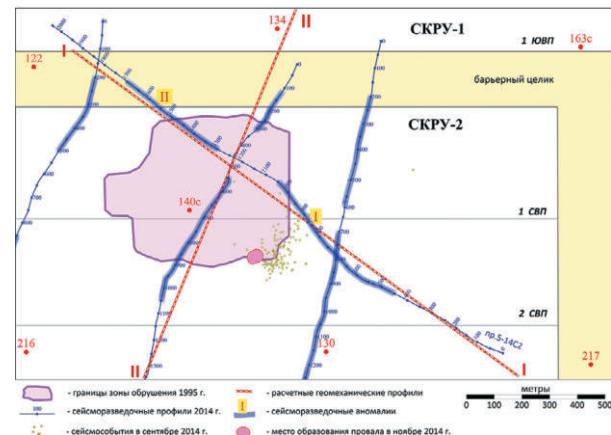
Таким образом, выполнение в комплексе геофизических и геомеханических исследований на участках потенциально опасных по нарушению сплошности ВЗТ позволяет дать достаточно адекватную прогнозную оценку сложившейся ситуации и разработать дополнительные меры охраны, минимизирующие риски ее разрушения. Безусловно, при этом должен быть предусмотрен периодический геофизический контроль изменения состояния ВЗТ с последующей геомеханической интерпретацией полученной информации.

### Сейсмогеомеханический мониторинг аварийных участков

Сейсмогеомеханические исследования особенно востребованы при мониторинге аварийных ситуаций. Проиллюстрируем это на следующем примере. В 1995 г. на шахтном поле рудника СКРУ-2 произошло массовое обрушение пород в горные выработки. Земная поверхность мгновенно осела на 4,5 м, сформировалась мульда сдвижения размерами 450x450 м. На ее границе образовались открытые трещины.

Комплексные сейсмогеомеханические исследования района обрушения выполняются с 1996 г. в ежегодном режиме. Их содержание традиционно включает анализ имеющейся геолого-геофизической информации, маркшейдерские наблюдения за сдвижениями земной поверхности, проведение сейсморазведочных исследований по сети профилей и основанный на полученных данных текущий и прогнозный анализ состояния ВЗТ методами математического моделирования. Схема расположения профильных линий в пределах аварийного участка по состоянию на 2014 г. представлена на рис. 3.

Полевой этап сейсморазведочных исследований, как и



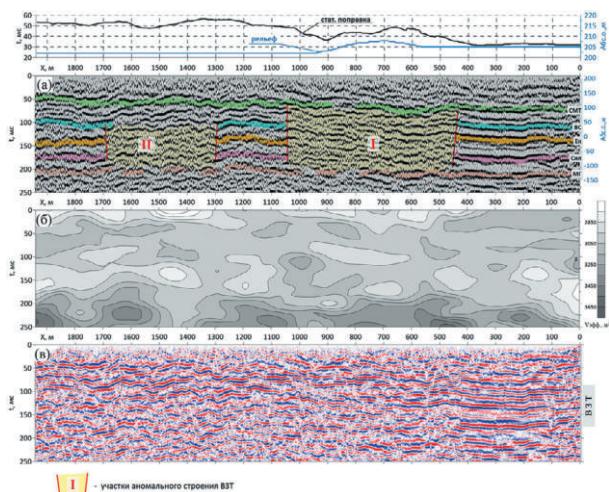
**Рис. 3**  
Схема сейсмогеомеханического мониторинга 2014 г. в пределах аварийного участка

**Fig. 3**  
A schematic map of seismic geomechanical monitoring within the emergency area in 2014

в предыдущем примере, выполнен по методике невзрывной малоглубинной сейсморазведки МОВ ОГТ. В качестве основных признаков предполагаемых осложнений геологического разреза рассматриваются: нарушение корреляции отражающих горизонтов (рис. 4, а), снижение значений эффективных скоростей (рис. 4, б) и повышенное затухание сейсмической записи (рис. 4, в).

Геомеханическая интерпретация сейсморазведочных данных летом 2014 г. показала, что сохранность ВЗТ на участке сейсморазведочной аномалии I в районе юго-восточной границы зоны обрушения обеспечивается частичной целостностью нижней части ПП и ПКС, а также пластов каменной соли, развитых в верхней части карналито-сильвинитовой зоны. Еще более интенсивное разрушение пластов ВЗТ отмечается у северо-западной границы зоны обрушения, примыкающей к барьерному целику между рудниками СКРУ-2 и СКРУ-1. Здесь устойчивость ВЗТ обеспечивалась за счет сохранения сплошности верхней части покровной каменной соли (ПКС) и переходной пачки (ПП).

В сентябре 2014 г. по данным сейсмологических станций зафиксировано резкое увеличение сейсмической активности в районе юго-восточной границы зоны обрушения. В октябре проведены повторные сейсморазведочные работы. Вследствие негативной динамики изменения всех параметров упругих волн в пределах сейсморазведочной аномалии I выполнены соответствующие корректирующие геомеханические расчеты. По их результатам спрогнози-



**Рис. 4**  
Пример результатов сейсморазведочных наблюдений по профилю 5-14С2: а – временной разрез МОГТ; б – его скоростная характеристика; в – динамический временной разрез

**Fig. 4**  
An example of seismic survey results along Profile 5-14C2:  
a – stacked seismic data of the CDP method ();  
б – its velocity characteristic;  
в – dynamic stacked seismic data

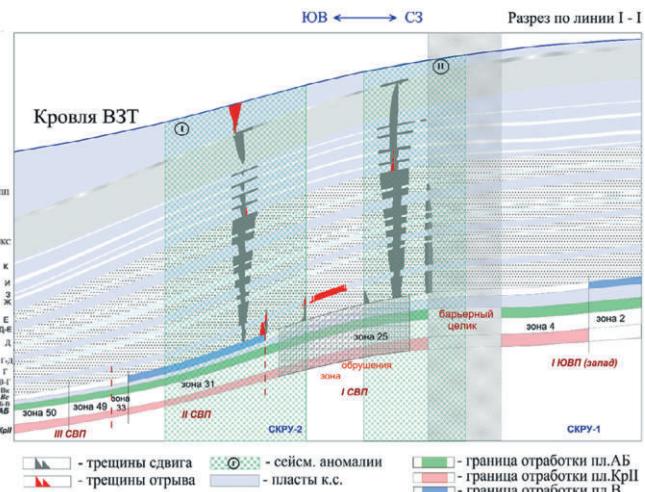
ровано значимое ухудшение геомеханической обстановки в районе юго-восточной границы зоны обрушения (рис. 5). Состояние ВЗТ на октябрь 2014 г. оценивалось как критическое. Интенсивное развитие субвертикальной трещиноватости в пластах ВЗТ, возможно менее значительное, чем на юго-востоке, в период с августа по октябрь наблюдалось также в северо-западной части зоны обрушения. Здесь по разрезу ВЗТ целостность сохраняет только ПП.

Таким образом, к осени 2014 г. согласно полученным оценкам на аварийном участке сложились предпосылки к прорыву пресных вод в выработанное пространство рудника. Последствием прорыва, как и следовало ожидать, явилось образование провала на земной поверхности в середине ноября 2014 г. (рис. 6).

В настоящее время осуществляется комплексный мониторинг развития аварийной ситуации. В качестве сейсморазведочных критериев развития зон дезинтеграции породного массива учитываются негативные изменения эффективных скоростей распространения упругих волн и пространственное распределение повышенного затухания интенсивности суммарного волнового поля.

## Заключение

Многолетняя практика комплексирования сейсморазведочных исследований и геомеханической интерпретации получаемых данных подтверждает информационные возможности подобного сочетания. Особую значимость данные исследования приобретают при ведении горных работ на калийных месторождениях с высокой вероятностью катастрофического развития негативных изменений в свойствах и строении породного массива. Они включают



**Рис. 5**  
Характер формирования зон субвертикальной трещиноватости в пластах ВЗТ в октябре 2014 г. с учетом данных сейсморазведки по линии I–I

**Fig. 5**  
The nature of near-vertical fracture zone formation in formations of the water protective strata along Line I–I in October 2014 with account of the seismic data



**Рис. 6**  
Фото провала 2014 г.  
в пределах шахтного поля  
СКРУ-2

**Fig. 6**  
A photographic image of the 2014 sinkhole with in the SKRU-2 mine field

выявление на основе сейсморазведочных исследований аномальных особенностей строения ВЗТ и определение свойств соляных пород в их пределах с последующей геомеханической интерпретацией полученных результатов. Геомеханический анализ безопасных условий подработки ВЗТ позволяет дать временную оценку опасности нарушения сплошности ВЗТ и при необходимости разработать дополнительные меры защиты рудника от затопления. Важным аспектом сейсмогеомеханических исследований является мониторинг аварийных ситуаций, обусловленных прорывом пресных вод в выработанное пространство рудника, растворением соляных пород и интенсификацией деформационных процессов вплоть до образования провалов на земной поверхности. Прогнозные оценки, полученные на основе данного подхода, позволяют минимизировать риски, связанные с возможностью нанесения ущерба зданиям и объектам инфраструктуры путем предварительной реализации мероприятий по поддержанию инженерных коммуникаций, расселению жилых домов и т.д.

## Список литературы / References

1. Rauche H. *Die Kaliindustrie im 21. Jahrhundert*. Springer Vieweg; 2015. 560 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-46834-0>
2. Барях А.А., Смирнов Э.В., Квиткин С.Ю., Тенисон Л.О. Калийная промышленность России: проблемы рационального и безопасного недропользования. *Горная промышленность*. 2022;(1):41–50. <https://doi.org/10.30686/16099192-2022-1-41-50>
3. Baryakh A.A., Smirnov E.V., Kvitskin S.Y., Tenison L.O. Russian potash industry: Issues of rational and safe mining. *Russian Mining Industry*. 2022;(1):41–50. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1-41-50>

3. Лаптев Б.В. Историография аварий при разработке соляных месторождений. *Безопасность труда в промышленности*. 2011;(12):41–46. Режим доступа: <https://safety.ru/sites/default/files/2011-12-41-46.pdf> (дата обращения: 09.06.2025). Laptev B.V. Historiography of accidents in the development of salt deposits. *Occupational Safety in Industry*. 2011;(12):41–46. (In Russ.) Available at: <https://safety.ru/sites/default/files/2011-12-41-46.pdf> (accessed: 09.06.2025).
4. Земсков А.Н., Кудряшова О.С., Заалишвили В.Б., Шамрин М.Ю. Разработка мероприятий по предотвращению затопления рудника Дехканабадского калийного завода (Узбекистан). *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2022;(2):270–283. Zemskov A.N., Kudryashova O.S., Zaalistvili V.B., Shamrin M.Yu. Development of measures to prevent flooding of the mine of the Dehkanabad potash plant (Uzbekistan). *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2022;(2):270–283. (In Russ.)
5. Whyatt J.K., Varley F.D. Catastrophic failures of underground evaporite mines. In: *27<sup>th</sup> International Conference on Ground Control in Mining, Morgantown, West Virginia, July 29 – July 31, 2008*. National Institute for Occupational Safety and Health, USA; 2008, pp. 113–122.
6. Шиман М.И. *Предотвращение затопления калийных рудников*. М.: Недра; 1992. 160 с.
7. Зубов В.П., Смычник А.Д. Снижение рисков затопления калийных рудников при прорывах в горные выработки подземных вод. *Записки Горного института*. 2015;215:29–37. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/5180> (дата обращения: 09.06.2025). Zubov V.P., Smychnik A.D. The concept of reducing the risks of potash mines flooding caused by groundwater inrush into excavations. *Journal of Mining Institute*. 2015;215:29–37. (In Russ.) Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/5180> (accessed: 09.06.2025).
8. Baryakh A.A., Sanfirov I.A., Fedoseev A.K., Babkin A.I., Tsayukov A.A. Seismic-geomechanical control of water-impervious strata in potassium mines. *Journal of Mining Science*. 2017;53(6):981–992. <https://doi.org/10.1134/S1062739117063041>
9. Wang D.-J., Tang H., Shen P., Cai Y. A parabolic failure criterion for transversely isotropic rock: modification and verification. *Mathematical Problems in Engineering*. 2019;8052560. <https://doi.org/10.1155/2019/8052560>
10. Gu J., Li K., Su L. Modified nonlinear Mohr – Coulomb fracture criteria for isotropic materials and transversely isotropic UD composites. *Mechanics of Materials*. 2020;151:103649. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2020.103649>
11. Yaroslavtsev A.G., Baryakh A.A., Sanfirov I.A., Fedoseev A.K., Tsayukov A.A. Engineering seismic application in geomechanical calculations of complex mine technical objects. In: *12<sup>th</sup> Conference and Exhibition Engineering Geophysics 2016, Anapa, April 25–29, 2016*. Curran Associates, Inc.; 2016, pp. 154–160.
12. Sanfirov I.A., Stepanov Yu.I., Fat'kin K.B., Gerasimova I.Yu., Nikiforova A.I. Shallow geophysical exploration of the Upper Kama Potash Salt Deposit. *Journal of Mining Science*. 2013;49(6):902–907. <https://doi.org/10.1134/S1062739149060087>
13. Миньков С.И., Бобров В.Ю., Санфиров И.А., Ярославцев А.Г., Мехонин Е.А. *Импульсный пороховой источник упругих колебаний*. Патент РФ RU234713U1. Опубл. 06.06.2025.
14. Yaroslavtsev A.G., Bobrov V.Y., Zhikin A.A. Engineering 3D seismic survey on the potash mine territory. In: *13<sup>th</sup> Conference and Exhibition Engineering Geophysics 2017, April 2017*. European Association of Geoscientists & Engineers; 2017, pp. 1–9. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201700411>
15. Ярославцев А.Г., Жикин А.А. Особенности цифровой обработки сейсморазведочных данных при изучении малоглубинной калийной залежи. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2012;(5):188–193. Yaroslavtsev A.G., Zhikin A.A. Features of digital processing of seismic data in the study of shallow potash deposit. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2012;(5):188–193. (In Russ.)

#### Информация об авторах

**Барях Александр Абрамович** – доктор технических наук, академик РАН, научный руководитель, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-2737-6166>; e-mail: bar@mi-perm.ru

**Санфиров Игорь Александрович** – доктор технических наук, профессор, директор, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-9190-4296>; e-mail: sanf@mi-perm.ru

**Ярославцев Александр Геннадьевич** – кандидат технических наук, заведующий сектором моделирования сейсмоакустических процессов, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-0766-5104>; e-mail: asa\_gis@mi-perm.ru

#### Информация о статье

Поступила в редакцию: 29.06.2025  
Поступила после рецензирования: 18.08.2025  
Принята к публикации: 25.08.2025

#### Information about the authors

**Alexander A. Baryakh** – Dr. Sci. (Eng.), Academician of the Russian Academy of Sciences, Scientific Director, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-2737-6166>; e-mail: bar@mi-perm.ru

**Igor A. Sanfirov** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-9190-4296>; e-mail: sanf@mi-perm.ru

**Aleksandr G. Yaroslavtsev** – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Seismoacoustic Processes Modeling Sector, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-0766-5104>; e-mail: asa\_gis@mi-perm.ru

#### Article info

Received: 29.06.2025  
Revised: 18.08.2025  
Accepted: 25.08.2025