



Влияние техногенных рассолов на прочностные характеристики пород продуктивной толщи Палашерского участка Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей

А.И.Рысин^{1,2}, А.М.Лебедева¹✉, М.А.Карасев³, А.С.Нуртдинов¹

¹ ООО «ПроТех Инжиниринг», Санкт-Петербург, Россия

² Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

³ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Рысин А.И., Лебедева А.М., Карасев М.А., Нуртдинов А.С. Влияние техногенных рассолов на прочностные характеристики пород продуктивной толщи Палашерского участка Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей // Записки Горного института. 2025. Т. 274. № 16417. С. 142-153. [EDN NYZMSJ](https://doi.org/10.26907/2541-9404.2025.16417)

Аннотация

Рассмотрена взаимосвязь факторов ослабления массива калийно-магниевых солей Палашерского участка Верхнекамского месторождения – содержания в пласте глинистого материала в виде галопелитовых прослоев и воздействия техногенных рассолов на прочностные характеристики пород продуктивной толщи в процессе закладочных работ выработанного пространства. Представлены результаты лабораторных исследований влияния содержания нерастворимого остатка и влажности соляных пород на их прочностные характеристики. Построены зависимости изменения прочности, влажности и предельных деформаций от времени выдержки в рассолах. На основании результатов выполненных испытаний установлено, что насыщенный рассол не оказывает существенного воздействия на предел прочности сильвинита и каменной соли, но влияет на интенсивность деформируемости.

Ключевые слова

соль; прочность; глинистые прослойки; нерастворимый остаток; рассол; устойчивость целиков

Поступила: 28.03.2024

Принята: 28.01.2025

Онлайн: 26.06.2025

Опубликована: 25.08.2025

Введение

На всех действующих участках Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (ВКМКС) принята камерная система отработки запасов с оставлением ленточных целиков. Подробным обобщением геологического строения месторождения занимались специалисты Н.М.Джиноридзе, А.И.Кудряшов. Общие вопросы добычи калийных солей на Верхнекамском месторождении рассматривались в источниках [1-5], где важным аспектом являлись вопросы повышения эффективности разработки месторождения в условиях соблюдения всех мер безопасности отработки. Ввиду наличия водоносных горизонтов в вышележащей толще и необходимости обеспечения целостности водозащитной толщи [6] наиболее приоритетной задачей при определении параметров системы разработки является расчет несущей способности междукамерных целиков. Высокая изменчивость факторов, влияющих на несущую способность целиков (прочность и зернистость пород, колебания глубины залегания и мощностей слоев, слагающих продуктивный пласт, микро-/макроскладчатость, реологические свойства солей, влажность пород, техногенное воздействие за счет отдельных процессов, таких как закладка выработанных пустот гидравлическим способом), делают задачу подбора оптимальных параметров отработки весьма нетривиальной. Расчет ширины междукамерных целиков при планировании горных работ предусматривает учет ослабленной зоны за счет влияния рассолов при проектировании гидрозакладочных работ выработанного пространства конкретного рассматриваемого участка. Принято, что ширина ослабленной краевой зоны междукамерных целиков должна составлять 0,3 м [7].



Таким образом, для определения параметров ведения очистных работ необходим корректный расчет несущей способности междукамерных целиков, который определяется прочностными характеристиками пород продуктивной толщи и пород кровли с учетом влияния множества дополнительных факторов. В связи с этим особое внимание в изучении поведения соляного массива уделяется комплексному исследованию физико-механических свойств соляных пород в различных условиях под воздействием системы разнообразных факторов: структурно-текстурных особенностей, напряженно-деформированного состояния, условий окружающей среды, в том числе взаимодействия с природными и техногенными рассолами различной степени насыщения [8-12]. Данные подобных исследований активно используются в комплексном анализе, геолого-литологической типизации пород и моделировании участков месторождения¹. Так, в источниках [9, 13-15] предлагаются методы моделирования, основанные на комплексном использовании геофизических и геомеханических подходов. Многие исследования посвящены аспектам поведения породы при воздействии определенных факторов. Методика лабораторных исследований деформирования солей при объемном многоступенчатом нагружении представлена в работе И.Л.Панькова и И.А.Морозова [16].

В процессе закладки в выработанное пространство попадает влага, которая, конденсируясь на стенках и отжимаясь из закладочного массива, скапливается в понижениях. Объем рассолов, вступающих в контакт с породой, зависит от способа и типа закладки. Воздействие рассола на соляную породу можно разделить на два типа: выщелачивание и увлажнение². Первый тип напрямую зависит от температуры и состава рассола и проявляется в случае его ненасыщенности теми солями, с которыми он контактирует. Второй тип воздействия предполагает изменение физических и механических свойств пород в результате увеличения влажности. Предпосылки отклонения прочностных параметров горных пород при увлажнении за счет адсорбционных процессов сформулированы П.А.Ребиндером. Эффект Ребиндера – адсорбционное падение прочности – возникает вследствие физико-химического влияния среды, состоящего в понижении удельной свободной поверхностной энергии тела, что облегчает образование новых поверхностей в процессах деформирования и разрушения. Эффект возможен только при совокупном воздействии среды и определенного напряженного состояния [17-19]. В процессе разрушения атомы жидкости проникают в зону зарождения трещины и включаются во взаимодействие в момент разрыва или перестройки связей. При этом адсорбция может как усиливать повреждаемость, так и препятствовать ей – опыты с измерением усилий показывают и разрушение связей межатомного взаимодействия в вершине трещины, и замедление разрушения ввиду образования новых силовых связей [17, 20].

Именно на ионных кристаллах (в том числе каменной соли) П.А.Ребиндером был установлен и исследован эффект адсорбционного понижения прочности. В поликристаллах солей границы зерен, обладая избыточной свободной энергией и в отсутствие влияния среды, становятся преимущественным путем распространения трещин разрушения, а при наличии такового оказываются местами адсорбции поверхностно-активных примесей как при росте кристаллов из раствора, так и в результате диффузии [21].

Обзор исследований по проявлению адсорбционных процессов в природных солях проводился З.Н.Скворцовой [22]. По данным [23, 24], в присутствии насыщенного раствора соли предел текучести и прочность образцов каменной соли и сильвинита понижаются. В экспериментах [25, 26] описывается сращивание линз галита в присутствии рассола по контакту.

Наличие жидких прослоек по границам зерен меняет упругие, реологические и прочностные свойства пород. Вероятно, именно они являются теми включениями, которые вносят большой вклад в затухание упругих волн и служат путями массопереноса при растворении – переосаждении [19].

В своих исследованиях В.Г.Зильбершмидт, В.В.Зильбершмидт, О.Б.Наймарк³ отмечают увеличение влажности пород вследствие их выдержки в рассолах перед испытанием в течение продолжительного времени (9-15 сут). Установлена зависимость «влажность – прочность на

¹ Проскураков Н.М., Пермяков Р.С., Черников А.К. Физико-механические свойства соляных пород. Л.: Недра, 1973. 272 с.

² Борзаковский Б.А., Папулов Л.М. Закладочные работы на Верхнекамских калийных рудниках. М.: Недра, 1994. 234 с.

³ Зильбершмидт В.Г., Зильбершмидт В.В., Наймарк О.Б. Разрушение соляных пород. М.: Наука, 1992. 144 с.



одноосное сжатие» на базе исследований горных пород центральной части месторождения ВКМКС. Согласно приведенным данным, повышение влажности на 0,7-0,9 % приводит к снижению предела прочности соляных пород на 25-45 %. При этом в исследовании не приводится динамика изменения влажности образцов со временем выдержки в рассоле, что не позволяет рассуждать о характере и скорости набора влаги образцами солей в ходе эксперимента [27].

В лабораторных исследованиях Б.А.Борзаковского и Л.М.Папулова⁴ использовались образцы диаметром 43 мм, а увлажнение происходило за счет контакта с глинисто-солевым шламом. Эксперименты показали, что влажность образцов на начальных этапах эксперимента увеличивается, после чего стабилизируется. Отмечается значительное колебание влажности внутри и между партиями: от 0,05 до 0,58 % в течение 0,5 мес., от 0,59 до 1,16 % в течение 1,5 мес. и от 0,22 до 1,05 % в течение 6-8 мес. Помимо этого был проведен эксперимент с кубическими образцами монолитов с гранью 0,2 м, помещенными в шлам в шахтных условиях. За пять лет испытания влажность достигла 0,36 %, в среднем влажность монолитов оказалась меньше, чем влажность образцов диаметром 43 мм. Отсутствие снижения прочности образцов при длительном увлажнении объясняется возможным эффектом залечивания трещин при контакте с насыщенным рассолом.

Еще одной характерной особенностью ВКМКС является существенная изменчивость геологического строения всей толщи при перемещении от центральной части к периферии из-за внутренней соляной тектоники, геологической истории и особенностей осадконакопления. Так, в результате постоянного поступления кластики с восточного берега бассейна в течение всего срока седиментации солей наблюдается закономерное увеличение содержания нерастворимого остатка в юго-восточном направлении. Для пород сильвинитовой пачки оно выражено в появлении новых и увеличении мощности существующих сезонных и многолетних глинистых прослоев⁵. В состав галопелитов входят такие минералы, как ангидрит, кварц, калиевый полевой шпат, карбонаты, глинистые минералы (преимущественно хлорит и иллит). Содержание глинистых минералов в нерастворимом остатке коржей колеблется по площади и увеличивается по разрезу снизу вверх: для коржа над пластом Кр-II оно составляет 19,5 %, над пластом АБ значительно повышается до 34,6 %, над пластом В – до 41,5 % [28].

В исследовании [29], посвященном типизации соляных пород Верхнекамского месторождения, для классификации пород по содержанию сильвина отвергается определение его количества в петрографических шлифах из-за особенностей осадконакопления, сформировавшего сложные слоистые текстуры массива. Вместо этого используется анализ на основе химического состава пробы, что позволяет оценить распределение каждого из содержащихся элементов, в том числе нерастворимого остатка, который также является одним из компонентов литологической типизации.

Анализ результатов проведенного комплекса исследований [30-33] позволяет акцентировать внимание на значимом влиянии прослоев и включений инородного материала в соляной толще на прочностные и деформационные свойства массива, а также на характер деформирования и разрушения образца и толщи. Глинистый материал в соляных породах содержится в различных формах: в виде включений в кристаллы, в межзерновом пространстве, в виде галопелитовых прослоев, выдержанных или не выдержанных по мощности. От формы выделения глинистого материала зависит степень ослабления прочностных свойств в образце. Согласно источникам [34, 35], глина, рассеянная в материале, и ее дискретные включения не оказывают воздействия на механические свойства породы, тогда как содержание в образце глинистых цепочек или прослоев приводит к падению прочности в среднем на 24-34 %. При этом значительное влияние на изменение свойств оказывает геометрия прослоя – его положение в образце, выдержанность, угол наклона, вид контакта с солью. При повышении содержания в образцах глины от 1 до 3 % Н.М.Проскураковым и др. фиксируется падение прочности на 30 %. В работе [32] также внимание акцентируется на ослабляющем влиянии содержания нерастворимого остатка (Н.О.) на прочностные параметры галогенных пород.

⁴ Борзаковский Б.А., Папулов Л.М. Закладочные работы на Верхнекамских калийных рудниках. М.: Недра, 1994. 234 с.

⁵ Месторождения калийных солей СССР. Методы их поисков и разведки / Под ред. В.И.Раевского, М.П.Фивега. Л.: Недра, 1973. 344 с.



В ходе исследования влияния техногенных рассолов на прочностные характеристики представленных структур основными задачами являются измерение параметра естественной влажности каждого вида пород с последующим определением их склонности к насыщению водой из рассолов и дальнейшим установлением тенденции к изменению прочности.

Суть выполненных ранее исследований по рассматриваемой тематике в основном заключается в оценке влияния влажности соляных пород или содержания глинистых прослоек на прочностные характеристики соляных пород. В настоящей работе проведен сравнительный анализ воздействия на прочностные характеристики солей одновременно двух факторов. Исследования выполнены для участка шахтного поля, где при ведении закладочных работ осуществлялся контакт соляных пород с техногенными рассолами.

Методы

Палашерский участок расположен в южной части месторождения. Его восточная и юго-восточная части характеризуются повышением содержания глинистого материала в пласте КрII от 8 до 18 % по сравнению со средним содержанием 3-5 % в центральной части месторождения. Балансовые запасы продуктивной толщи представлены чередующимися напластованиями силвинитовой руды и каменной соли, систематически разделенными сформированными прослойками галопелитовых отложений. В среднем толщина глинистых прослоек варьируется в диапазоне от нескольких миллиметров до 2-3 см за исключением коржевой части пласта КрI-КрII, где толщина слоя, представленного галопелитовыми отложениями, достигает 0,5-0,6 м (рис. 1). Из-за высокого содержания глинистого материала, разнообразия форм его выделения и расположения в толще наблюдается неоднородность физико-механических свойств пород даже в пределах условно однородных пластов.

Для экспериментальных исследований использовались образцы соляных горных пород, отобранные на рассматриваемом участке. Цилиндрическая форма заготовкам придавалась на токарном станке, вспомогательные работы по обработке пробы осуществлялись на камнерезном станке. После обработки боковой поверхности совершалась шлифовка торцов, в ходе которой образец доводился до заданных размеров, определяющихся на основании соотношения высоты к диаметру $h/d = 2,0$, и диаметра, превышающего десятикратный размер зерна в торце. Исходя из указанных условий, размеры всех образцов, подготовленных для испытаний, соответствовали следующим параметрам: $h = 84,00 \pm 0,10$ мм, $d = 42,00 \pm 0,10$ мм. К изучаемым материалам предъявлялись

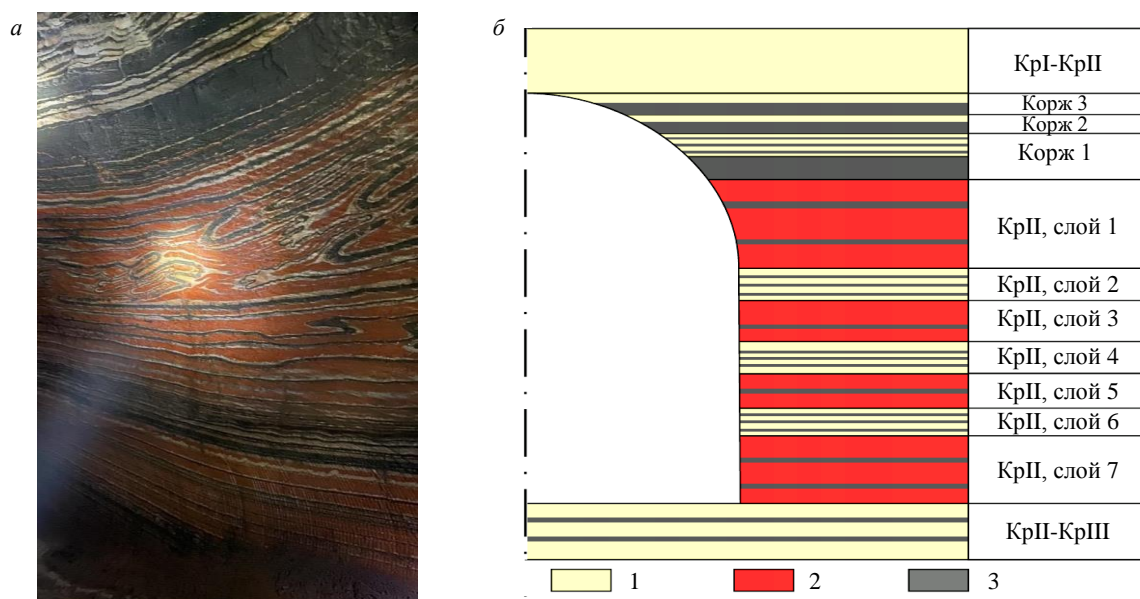


Рис. 1. Фото стенки выработки (а) и типовой разрез продуктивной толщи промышленного пласта КрII (б) на примере 1-й Юго-Восточной панели Палашерского участка

1 – каменная соль; 2 – силвинит; 3 – глина



Рис.2. Типы образцов, использовавшихся для получения физико-механических характеристик

требования отсутствия естественной или техногенной нарушенности, а также визуальной сходимости по составу горных пород, структуре и текстуре. Образцы группировались по литотипу, пласту, слою, визуальной сходимости для формирования представительной выборки. Все испытания проводятся при температуре 24-25 °С в отсутствие массопереноса воздуха. В ходе исследования для каждого образца определялся предел прочности на одноосное сжатие σ при автоматическом поддержании скорости нагружения, равной 1 МПа/с, в условиях сухого трения по контакту образца и нажимной плиты. Помимо этого для каждого образца были установлены влажность W методом высушивания до постоянной массы и химический состав.

Проводимые исследования делились на два этапа. На первом этапе изучалось влияние влажности соляных пород и содержания Н.О. на предел прочности породы в условиях одноосного сжатия. В рамках второго этапа выполнялось сравнение деформирования соляных пород при выдержке их в рассоле.

Влияние глинистости соляных пород на их влажность. Для получения зависимости влажности породы от степени глинистости было изготовлено 69 образцов с различным содержанием глинистого материала, в том числе образцов чистой глины, т.е. образцов глинистого прослоя без включения прослоек сильвинита или каменной соли, отобранных из Коржа 1 каменной соли КрII-КрI в юго-восточной части шахтного поля ООО «ЕвроХим-Усольский калийный комбинат», расположенной в краевой части ВКМКС. Из-за невозможности извлечения галопелитового материала кернавым способом пробы данного литологического состава, как правило, представлены штуфами. Для каждого образца выборки выполнялось определение предела прочности, влажности и химического состава для установления содержания количества нерастворимого остатка.

Зависимость прочности пород от времени контакта с рассолом. Для определения изменения влажности образцов различного состава при выдержке их в насыщенном по калию и натрию рассоле эксперимент был спланирован следующим образом. Образцы разделили на три группы: к группе А отнесены 37 образцов сильвинита без явных включений глинистого материала и 37 образцов каменной соли; к группе Б – 38 образцов каменной соли без сформированных прослоев и гнезд глинистого материала; группа В сформирована из 20 образцов солей смешанного типа, литологической особенностью которых является переслаивание слоев каменной соли и сильвинита прослоями глинистого материала. Типовые образцы каждой группы представлены на рис.2. В группах образцы распределены на четыре подгруппы по длительности воздействия на них рассолов. Время выдержки образцов в рассоле составляло 1, 7 и 14 сут (на основании ранее проведенных исследований⁶). По результатам испытаний определялись предел прочности в условиях

⁶ Зильбершмидт В.Г., Зильбершмидт В.В., Наймарк О.Б. Разрушение соляных пород. М.: Наука, 1992. 144 с.



одноосного сжатия, деформации в точке достижения образцом предельной прочности (предельные деформации $\delta_{пр}$) и итоговая влажность каждого из образцов. Под пределом прочности на одноосное сжатие понимается предельное одноосное сжимающее напряжение, при котором происходит разрушение образца. Относительная деформация образца, полученная на пределе прочности, будет соответствовать предельной деформации.

Для выдержки подготовленных образцов в рассоле применялись цилиндрические контейнеры. Несмотря на то, что используемые рассолы были насыщены по NaCl и недонасыщены по KCl, значимого растворения зерен калия с возникновением полостей замечено не было.

Для образцов с предварительной выдержкой в рассоле испытание проводилось сразу после извлечения. Перед испытанием с поверхности образца влага удалялась для обеспечения сухого контакта с нажимной плитой.

По результатам эксперимента были построены корреляционные зависимости влияния влажности и Н.О. на полученные механические показатели. Степень корреляции между переменными оценивалась коэффициентом Пирсона.

Результаты исследований

В ходе исследования прослежены зависимости влажности соляных горных пород от глинистости на основании анализа результатов лабораторных испытаний 69 образцов соляных пород с различным содержанием глинистого материала и образцов глины, испытанных на одноосное сжатие.

Установлено, что среднее значение предела прочности образцов каменной соли при содержании Н.О. < 3 % составляет 24,37 МПа, а для сильвинита – 27,19 МПа.

По результатам анализа предела прочности, влажности и химического состава образцов сформированы зависимости изменения прочности от влажности и содержания нерастворимого остатка (рис.3), которые представлены в совмещенном виде путем пересчета относительного предела прочности по среднему значению показателя для каменной соли и сильвинита. Такой подход не обеспечивает определение корректной зависимости для каждого литотипа, но позволяет обобщить данные с точки зрения влияния каждого из двух факторов. График зависимости предела прочности от содержания нерастворимого остатка имеет концентрации значений в диапазонах содержания Н.О. 0-10, 40-60, 80-90 %. Отмечается формирование устойчивых мощных прослоев галопелитов при содержании Н.О. 10-40 %, что в значительной мере затрудняет отбор проб и изготовление испытательных образцов.

В качестве аппроксимационной выбрана степенная функция. Коэффициент корреляции Пирсона выше при варианте зависимости предела прочности от содержания нерастворимого остатка, поэтому можно предполагать, что предел прочности и влажность образца связаны косвенно.

Для выявления зависимости прочности пород от времени контакта с рассолом проведен анализ 95 испытаний сильвинита, каменной соли и переслаивания солей различного типа. Численные результаты полученных характеристик для каждой выделенной подгруппы представлены в таблице.

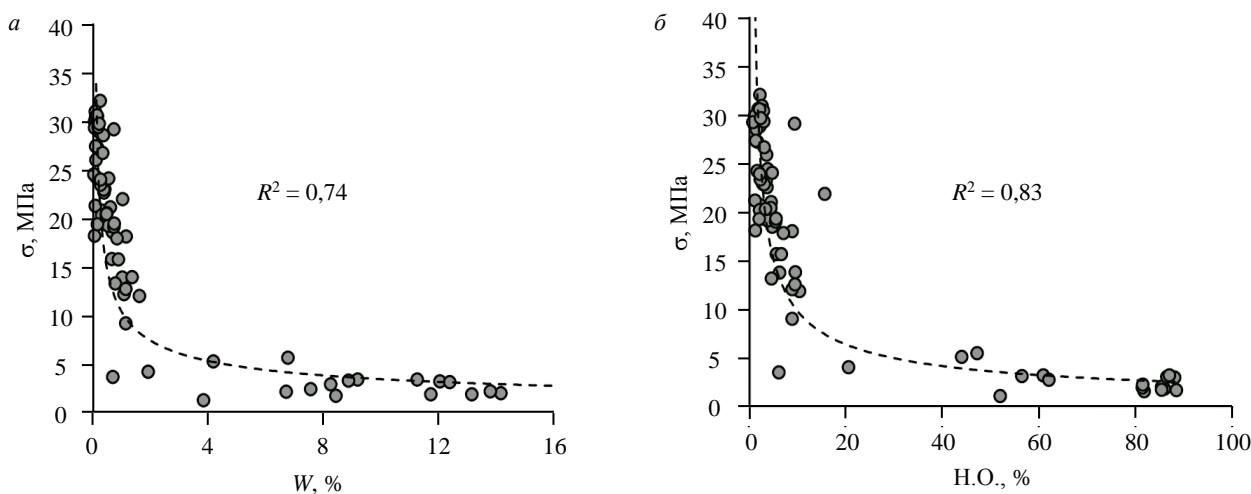


Рис.3. Зависимости предела прочности на одноосное сжатие от влажности (а) и содержания Н.О. (б)



Средние значения физико-механических свойств галогенных пород при различных сроках выдерживания в рассоле

Тип породы	Параметр	Без намокания	Время выдержки в рассоле		
			1 сут	7 сут	14 сут
Сильвинит	σ , МПа	$\frac{28,86}{21,20-32,36}$ (15 шт.)	$\frac{27,02}{21,97-31,90}$ (7 шт.)	$\frac{30,03}{27,56-32,68}$ (7 шт.)	$\frac{30,47}{26,31-35,14}$ (8 шт.)
	$\varepsilon_{пр}$, %	$\frac{2,66}{1,65-3,93}$ (15 шт.)	$\frac{3,41}{2,25-4,35}$ (7 шт.)	$\frac{3,45}{2,27-4,38}$ (7 шт.)	$\frac{3,89}{3,22-5,35}$ (8 шт.)
	W , %	$\frac{0,14}{0,04-0,34}$ (6 шт.)	$\frac{0,06}{0,03-0,13}$ (7 шт.)	$\frac{0,11}{0,04-0,18}$ (7 шт.)	$\frac{0,04}{0,00-0,08}$ (8 шт.)
Каменная соль	σ , МПа	$\frac{22,54}{18,44-33,91}$ (15 шт.)	$\frac{23,72}{18,82-28,46}$ (8 шт.)	$\frac{24,60}{19,46-32,04}$ (9 шт.)	$\frac{23,59}{17,86-24,42}$ (6 шт.)
	$\varepsilon_{пр}$, %	$\frac{1,43}{0,87-2,21}$ (15 шт.)	$\frac{2,10}{1,24-3,05}$ (8 шт.)	$\frac{2,23}{1,47-2,55}$ (9 шт.)	$\frac{2,18}{1,73-2,72}$ (6 шт.)
	W , %	$\frac{0,40}{0,09-0,59}$ (10 шт.)	$\frac{0,24}{0,02-0,45}$ (8 шт.)	$\frac{0,30}{0,17-0,51}$ (9 шт.)	$\frac{0,27}{0,08-0,43}$ (6 шт.)
Переслаивание солей различного типа	σ , МПа	$\frac{17,98}{13,83-21,46}$ (8 шт.)	$\frac{13,28}{11,60-15,23}$ (8 шт.)	$\frac{12,90}{12,82-12,98}$ (2 шт.)	$\frac{12,60}{9,51-14,90}$ (5 шт.)
	$\varepsilon_{пр}$, %	$\frac{1,02}{0,63-1,74}$ (8 шт.)	$\frac{1,50}{0,89-2,24}$ (8 шт.)	$\frac{1,45}{1,36-1,54}$ (2 шт.)	$\frac{1,65}{0,98-2,20}$ (5 шт.)
	W , %	$\frac{0,87}{0,49-1,56}$ (8 шт.)	$\frac{1,15}{0,94-1,64}$ (8 шт.)	$\frac{1,16}{1,16-1,16}$ (2 шт.)	$\frac{1,43}{1,11-1,90}$ (5 шт.)

Примечание. В числителе – среднее значение; в знаменателе – диапазон изменения показателей.

Характерные виды разрушения образцов каждой группы в условиях естественной влажности (без выдержки в рассоле) и при выдержке в рассоле в течение 14 сут представлены на рис.4, а, в, д. Характерным итогом одноосного сжатия образцов горной породы с соотношением высоты к диаметру 2:1 и трением по контакту «образец – плита» принято считать разрушение по конической поверхности, образующееся в результате сдвига по плоскостям максимального касательного напряжения в образце [7]. Разрушение как сильвинита, так и каменной соли, в естественных условиях реализуется не всегда по конусам, оно может проходить по диагональной трещине либо комбинированным способом – с одним конусом и трещиной. При выдержке в рассоле в течение 14 сут конфигурация разрушения при достижении предела прочности в условиях мгновенного нагружения не изменяется.

Иная картина наблюдается при разрушении образца с выдержанным прослоем глинистого материала. В центральной части многослойного монолита, сложенной прослоем каменной соли, формируются субвертикальные сколовые трещины, перерастающие затем в отрывные за счет раздвижения более жесткой соли вдоль глинистых прослоев. При повышении нагрузки прослой первыми начинают деформироваться, а порода выше и ниже прослоя помимо нагрузки в вертикальной оси испытывает касательные напряжения в плоскости ослабления, что ускоряет его разрушение и снижает прочность. В таких образцах заметно дробление материала по зоне ослабления, а трещины в соляной части образца субвертикальны, без дробления кристаллов по стенкам самой трещины. При этом принципиальной разницы в характере разрушения образцов естественной влажности и подвергшихся воздействию рассола не наблюдается.

Анализ результатов испытаний на одноосное сжатие сильвинита показал, что при естественной влажности его средний предел прочности составляет 28,86 МПа, при выдержке в рассоле в течение одних суток – 27,02 МПа, а при выдержке в рассоле в течение 14 сут – 30,47 МПа. Полученные значения прочностного показателя лежат в интервале естественного разброса (10-15 %), что позволяет сделать вывод о минимальном влиянии времени замачивания на прочность сильвинита. Напротив, для предельной деформации сильвинита отмечается влияние времени замачивания, выражающееся в возрастании данного деформационного показателя с увеличением времени нахождения образца в рассоле (рис.4, б).

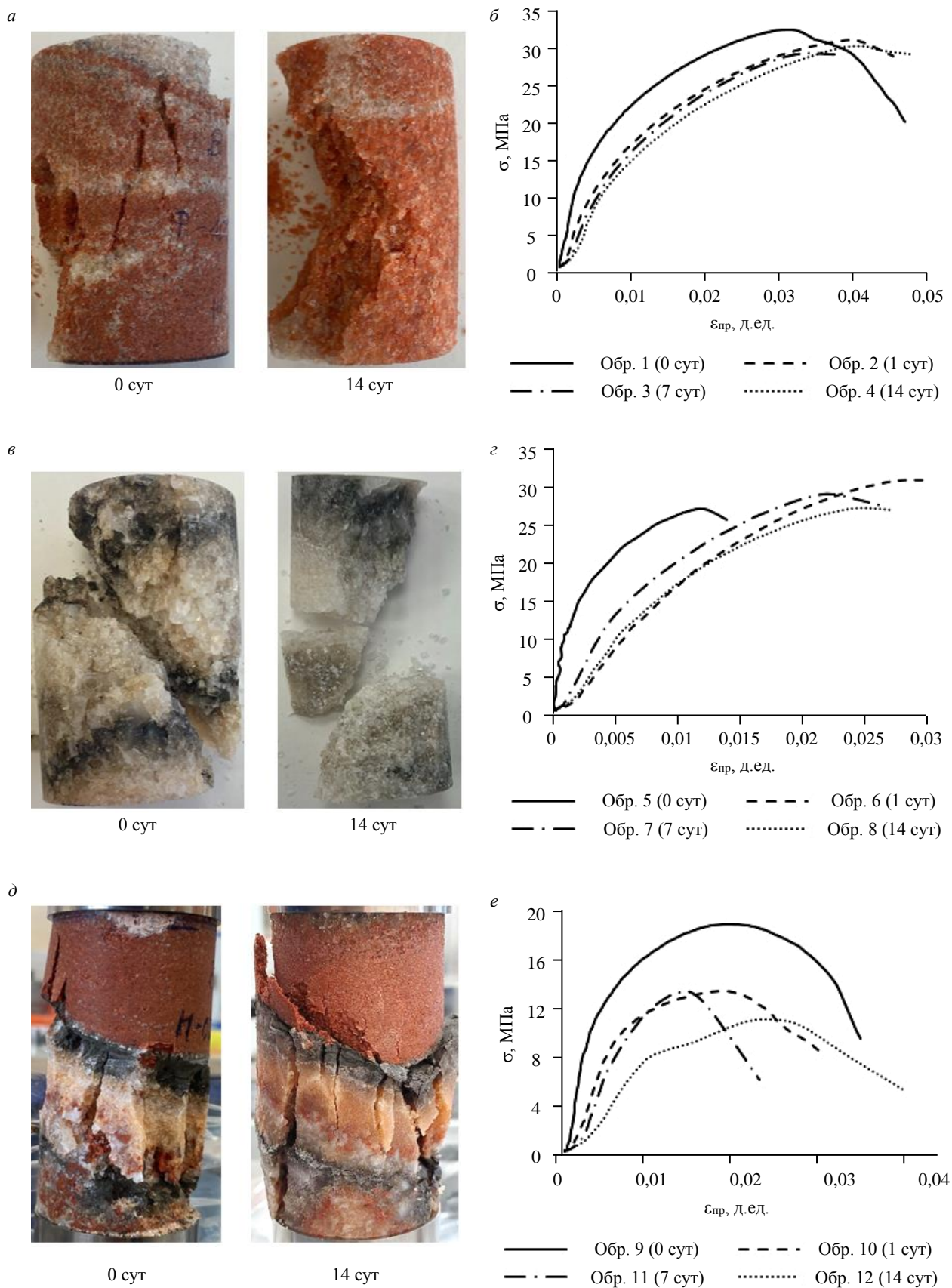


Рис.4. Характерный вид разрушения образцов до и после замачивания и графики деформирования образцов при различных сроках выдержки в рассоле: а, б – сильвинит (группа А); в, з – каменная соль (группа Б); д, е – переслаивание солей различных типов (группа В)



Аналогичный анализ результатов проведен для каменной соли. При естественной влажности средний предел прочности составляет 22,54 МПа, при выдержке в рассоле в течение одних суток – 23,72 МПа, а при выдержке в рассоле в течение 14 сут – 23,59 МПа. Полученные значения предела прочности на одноосное сжатие лежат в интервале естественного разброса. Таким образом, можно сделать вывод об отсутствии влияния времени замачивания на прочность каменной соли. При этом так же, как и для сильвинита, с ростом времени замачивания образцов в рассоле увеличиваются предельные деформации породы – наблюдается смещение кривых деформирования влево по оси OX (рис.4, z).

И для сильвинитов, и для каменных солей характерно более хрупкое разрушение после выдержки в рассоле, что выражается в мгновенном разрушении образца при достижении предела прочности, часто сопровождающееся разлетом осколков, размыканием оснастки для датчика радиальных деформаций, закрепленной на образце.

В отличие от соляных пород без примесей, на образцах смешанного состава фиксируется падение прочности уже в течение первых суток взаимодействия с рассолом (17,98 МПа при естественной влажности и 13,28 МПа после 1 сут), однако дальнейшего значимого изменения прочностных параметров не наблюдается. Нет явного прироста относительных деформаций, поэтому кривые деформирования не смещаются по оси деформаций (рис.4, e).

Обсуждение результатов исследований

На основании анализа ранее выполненных исследований предполагалось увеличение влажности породы при ее выдерживании в насыщенном рассоле, однако, как видно из результатов испытаний, ни для образцов группы «сильвинит», ни для образцов группы «каменная соль» при отсутствии глинистых примесей не фиксируются значимые изменения (колебание относительно средних значений составляют для сильвинита менее 0,1 %, для каменной соли – менее 0,2 %). Увеличение влажности образцов происходит за счет набора влаги галопелитами. Установлено, что средняя влажность образцов с глинистым прослоем изменяется от 0,66 % при отсутствии увлажнения до 1,24 % при выдержке в рассоле в течение 14 сут, при этом влажность отдельных образцов достигает почти 3 %, что зависит от мощности, конфигурации, состава и естественной влажности прослоя. При этом отмечена тенденция максимального набора влажности в течение первых суток, при дальнейшей выдержке образцов в рассоле существенного роста влажности не установлено. Значимые отклонения от общей зависимости показателя влажности образцов формируются в основном при высоком содержании в них Н.О. Данный эффект можно объяснить тем, что исходно более влагонасыщенные пробы глины более восприимчивы к внешним факторам в процессе отбора, транспортировки, пробоподготовки и т.д.

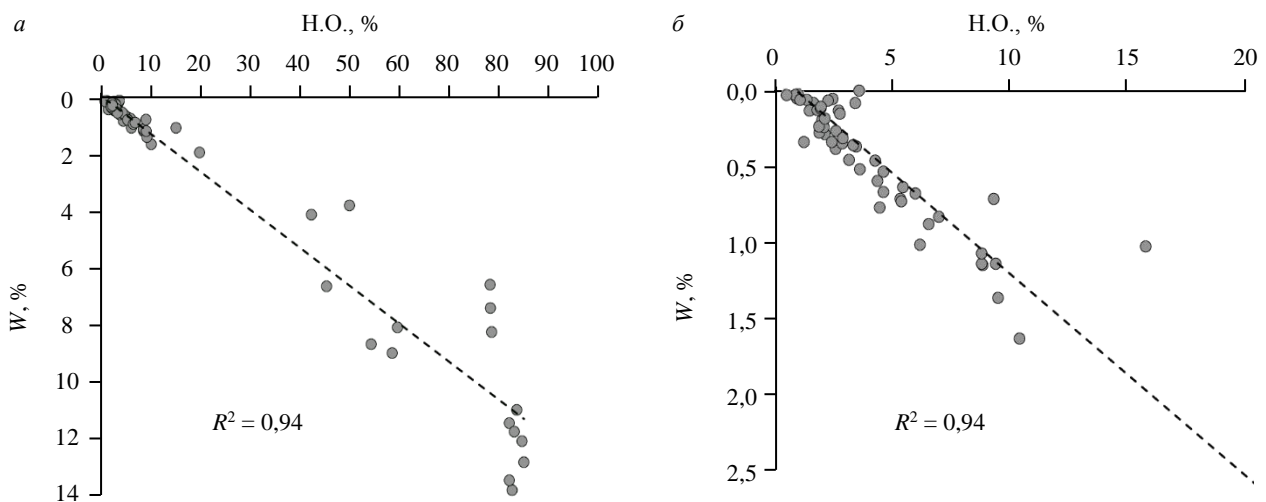


Рис.5. Зависимость влажности образца от содержания глины в полном интервале значений Н.О. (а) и в интервале содержания 0-20 % (б)



Полученные зависимости прочности от влажности и прочности от содержания Н.О. имеют схожий характер, а корреляция влажности пород с содержанием в ней глинистого материала довольно высока и характеризуется коэффициентом корреляции 0,94 (рис.5). Таким образом, можно сформировать гипотезу о наличии линейной связи между содержанием Н.О. и влажностью породы. Соль при отсутствии в ней нарушений сплошности представляет собой низкопористую горную породу, таким образом значительное увеличение ее влажности за счет набора рассола невозможно, тогда как галопелитовые прослои, в состав которых входят в том числе активные глинистые минералы, напротив, склонны к увлажнению при взаимодействии с жидкой средой. При оценке мгновенных прочностных и деформационных характеристик соляных пород представляется более корректным оценивать зависимость показателей от содержания нерастворимого остатка, так как влажность является его производной характеристикой.

Как видно из представленных на рис.6 данных, предел прочности на одноосное сжатие для групп образцов «сильвинит» и «каменная соль» вне зависимости от времени выдержки в рассоле колеблется в пределах 6,4 и 9,1 % соответственно относительно среднего значения по контрольным группам. В то же время у образцов категории «переслаивание солей» с прослоем глины отмечается снижение прочности в течение первых суток выдержки в рассолах с 17,98 до 13,28 МПа (на 26,2 %), однако при дальнейшей выдержке существенного изменения данного показателя не выявлено – падение прочности при выдержке в течение 14 сут составило 29,9 %.

После выдержки в рассоле меняется характер деформирования сильвинита и каменной соли – увеличивается значение предельной деформации, повышается склонность к хрупкому разрушению, в связи с чем ни на одном образце без глины, выдержанном в рассоле, не удалось получить зависимость напряжения от относительных деформаций на запредельной стадии деформирования. Можно выдвинуть гипотезу о влиянии воздействия рассола на деформационные характеристики соляных пород. Для более детального изучения данной взаимосвязи необходимо проведение дальнейших исследований, в том числе длительных испытаний для определения степени влияния данного фактора на реологические характеристики соляных пород.

Заключение

В работе представлены результаты лабораторных исследований прочности образцов соляных пород с различной влажностью. На основании выполненных исследований можно сформулировать следующие основные выводы:

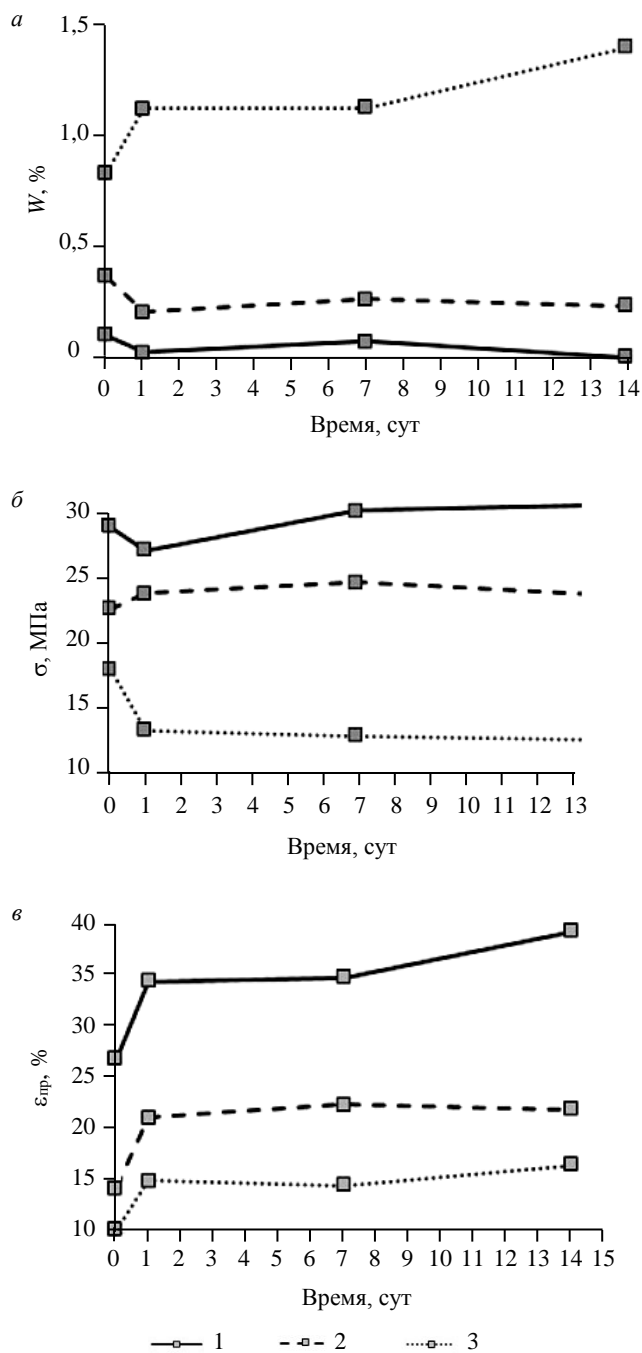


Рис.6. Изменения влажности (а), прочности (б) и предельной деформации (в) от времени выдержки в рассоле
1 – сильвинит; 2 – каменная соль; 3 – переслаивание солей с галопелитами



• Породы, слагающие промышленный пласт (сильвинит и каменная соль с глинистыми прослоями) имеют различную естественную влажность, при этом влажность галопелитов многократно выше влажности соляных пород. В результате исследования особенностей физических параметров соляных горных пород установлено, что чем выше в породе содержание нерастворимого остатка, тем больше влажность солей. Изменение влажности образцов соляных пород без выраженных включений галопелитовых прослоев при выдержке их в насыщенных рассолах не установлено. Взаимосвязь прочности горной породы и ее влажности стоит отнести к косвенным факторам, более детально данный вид зависимости предлагается изучать в координатах «прочность – содержание Н.О.».

• Насыщенный рассол за 14 сут не оказывает существенного воздействия на предел прочности сильвинита и каменной соли без примесей, но влияет на характер их деформирования, таким образом можно предполагать значительное влияние рассолов на длительные прочностные свойства солей. Для выявления тенденций поведения массива на каждой из описанных стадий в условиях контакта с рассолом требуется проведение дальнейших детальных исследований.

• При воздействии рассола на горные породы с выраженными скоплениями или прослоями глиен наблюдается снижение их прочностных свойств на 29,9 %, что необходимо учитывать при планировании горных работ.

Ввиду сложности среды и большого количества ее компонентов для корректного расчета несущей способности междукамерных целиков необходимо учитывать влияние не только отдельных значимых факторов ослабления, но и их совокупность. Значительное влияние на прочность массива оказывает фактор глинистости – процентное содержание нерастворимого остатка в породе, степень его рассеянности, тип концентрации в породе, мощность сформированного прослоя. Помимо этого, галопелиты наиболее явно подвергаются увлажнению, в связи с чем при расчетах и прогнозировании поведения междукамерных целиков во взаимодействии с рассолами наиболее пристальное внимание должно быть уделено изучению глинистых прослоев как зон ослабления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барях А.А., Смирнов Э.В., Квиткин С.Ю., Тенисон Л.О. Калийная промышленность России: проблемы рационального и безопасного недропользования // Горная промышленность. 2022. № 1. С. 41-50. DOI: [10.30686/1609-9192-2022-1-41-50](https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1-41-50)
2. Зубов В.П., Ковальский Е.Р., Антонов С.В., Пачгин В.В. Повышение безопасности шахт при разработке верхнекамских калийных и магниевых солей // Горный информационно-аналитический вестник. 2019. № 5. С. 22-33. DOI: [10.25018/0236-1493-2019-05-0-22-33](https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-05-0-22-33)
3. Litvinenko V. Advancement of geomechanics and geodynamics at the mineral ore mining and underground space development // EUROROCK2018: Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium, 22-26 May 2018, Saint Petersburg, Russia. CRC Press, 2018. Vol. 1. P. 3-16. DOI: [10.1201/9780429462078](https://doi.org/10.1201/9780429462078)
4. Dzhinoridze N.M. Upper Kama deposit of lower permian potash-magnesium salts; peculiarities of halogenesis, tectonic development and mineral transformation // Prace Panstwowego Instytutu Geologicznego. 1997. № 157. Part 3. P. 69-70.
5. Ковальский Е.Р., Конгар-Сюрюн Ч.Б., Петров Д.Н. Проблемы и перспективы внедрения многостадийной выемки руды при отработке запасов калийных месторождений // Устойчивое развитие горных территорий. 2023. Т. 15. № 2 (56). С. 349-364. DOI: [10.21177/1998-4502-2023-15-2-349-364](https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-2-349-364)
6. Беляков Н.А., Беликов А.А. Прогноз целостности водозащитной толщи на Верхнекамском месторождении калийных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6-2. С. 33-46. DOI: [10.25018/0236_1493_2022_62_0_33](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_62_0_33)
7. Басов И.Г., Лузгин Ю.Н. К определению прочности горных пород при одноосном сжатии // Известия Томского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института им. С.М.Кирова. 1968. Т. 158. С. 62-67.
8. Ильинов М.Д., Коршунов В.А., Поспехов Г.Б., Шоков А.Н. Комплексные экспериментальные исследования механических свойств горных пород: проблемы и пути их решения // Горный журнал. 2023. № 5. С. 11-18. DOI: [10.17580/gzh.2023.05.02](https://doi.org/10.17580/gzh.2023.05.02)
9. Ковальский Е.Р., Громцев К.В., Петров Д.Н. Моделирование процесса деформирования междукамерных целиков в условиях закладки очистных камер // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 9. С. 87-101. DOI: [10.25018/0236-1493-2020-9-0-87-101](https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-9-0-87-101)
10. Куранов А.Д., Багаутдинов И.И., Котиков Д.А., Зуев Б.Ю. Комплексный подход к прогнозу устойчивости предохранительного целика при слоевой системе разработки запасов Яковлевского месторождения // Горный журнал. 2020. № 1. С. 115-119. DOI: [10.17580/gzh.2020.01.23](https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.23)
11. Liang W., Yang C., Zhao Y. et al. Experimental investigation of mechanical properties of bedded salt rock // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2007. Vol. 44. Iss. 3. P. 400-411. DOI: [10.1016/j.ijrmmms.2006.09.007](https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2006.09.007)
12. Господарииков А.П., Киркин А.П., Трофимов А.В., Ковалевский В.Н. Определение физико-механических свойств горных пород при применении противоударных разгрузочных мероприятий // Горный журнал. 2023. № 1. С. 26-34. DOI: [10.17580/gzh.2023.01.04](https://doi.org/10.17580/gzh.2023.01.04)



13. *Беликов А.А., Беляков Н.А.* Методика прогноза напряженно-деформированного состояния междукамерных целиков, закрепленных податливой тросовой крепью // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 4. С. 20-34 (in English). DOI: [10.25018/0236_1493_2023_4_0_20](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_4_0_20)
14. *Рыбак Я., Хайрутдинов М.М., Кузиев Д.А. и др.* Прогнозирование геомеханического состояния массива при отработке соляных месторождений с закладкой // Записки Горного института. 2022. Т. 253. С. 61-70. DOI: [10.31897/PMI.2022.2](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.2)
15. *Ильинов М.Д., Петров Д.Н., Карманский Д.А., Селихов А.А.* Аспекты физического моделирования процессов структурных изменений образцов горных пород при термобарических условиях больших глубин // Горные науки и технологии. 2023. Т. 8. № 4. С. 290-302. DOI: [10.17073/2500-0632-2023-09-150](https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-09-150)
16. *Паньков И.Л., Морозов И.А.* Деформирование соляных пород при объемном многоступенчатом нагружении // Записки Горного института. 2019. Т. 239. С. 510-519. DOI: [10.31897/PMI.2019.5.510](https://doi.org/10.31897/PMI.2019.5.510)
17. *Щукин Е.Д.* Влияние активной среды на механическую устойчивость и повреждаемость поверхности твердого тела // Вестник Московского университета. Серия 2. Химия. 2012. Т. 53. № 1. С. 50-72.
18. *Ребиндер П.А., Щукин Е.Д.* Поверхностные явления в твердых телах в процессах их деформации и разрушения // Успехи физических наук. 1972. Т. 108. Вып. 1. С. 3-42. DOI: [10.3367/UFNr.0108.197209a.0003](https://doi.org/10.3367/UFNr.0108.197209a.0003)
19. *Траскин В.Ю.* Эффект Ребиндера в тектонофизике // Физика Земли. 2009. № 11. С. 22-33.
20. *Корнев В.М.* Количественное описание эффекта Ребиндера (хрупкие и квазихрупкие тела): от замедления разрушения до самопроизвольного диспегирования // Физическая мезомеханика. 2003. Т. 6. № 3. С. 9-18.
21. *Малкин А.И.* Закономерности и механизмы эффекта Ребиндера // Коллоидный журнал. 2012. Т. 74. № 2. С. 239-256.
22. *Скворцова З.Н.* Деформация по механизму растворения-пересадки как форма адсорбционного пластифицирования природных солей // Коллоидный журнал. 2004. Т. 66. № 1. С. 5-15.
23. *Ставрогин А.Н.* Исследования реологических грунтов. Ленинград: Энергия, 1968. Вып. 38. С. 44-46.
24. *Urai J.L., Spiers C.J., Zwart H.J., Lister G.S.* Weakening of rock salt by water during long-term creep // Nature. 1986. Vol. 324. Iss. 6097. P. 554-557. DOI: [10.1038/324554a0](https://doi.org/10.1038/324554a0)
25. *Hickman S.H., Evans B.* Kinetics of pressure solution at halite-silica interfaces and intergranular clay films // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1995. Vol. 100. Iss. B7. P. 13113-13132. DOI: [10.1029/95JB00911](https://doi.org/10.1029/95JB00911)
26. *Hickman S.H., Evans B.* Experimental pressure solution in halite: the effect of grain/interphase boundary structure // Journal of the Geological Society. 1991. Vol. 148. № 3. P. 549-560. DOI: [10.1144/gsjgs.148.3.0549](https://doi.org/10.1144/gsjgs.148.3.0549)
27. *Борзаковский Б.А., Шилов А.В.* Процессы выщелачивания солей при затоплении рудника БКПРУ-1 // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2010. № 9. С. 136-143.
28. *Молоштанова Н.Е.* Минеральный состав нерастворимого остатка галопелитов из «коржей» Верхнекамского месторождения // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. 2011. № 11. С. 49-50.
29. *Чайковский И.И.* Химико-генетическая типизация первичных соляных пород Верхнекамского месторождения // Горное эхо. 2020. № 1. С. 27-31. DOI: [10.7242/echo.2020.1.6](https://doi.org/10.7242/echo.2020.1.6)
30. *McBeck J., Mair K., Renard F.* Linking macroscopic failure with micromechanical processes in layered rocks: How layer orientation and roughness control macroscopic behavior // Tectonophysics. 2019. Vol. 750. P. 229-242. DOI: [10.1016/j.tecto.2018.11.016](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.11.016)
31. *Tijani M., Hadj-Hassen F., Rouabhi A. et al.* Effect of insoluble materials on salt behavior during creep tests // Mechanical Behavior of Salt VII: Proceedings of the 7th Conference on the Mechanical Behavior of Salt, 16-19 April 2012, Paris, France. CRC Press, 2012. P. 97-103. DOI: [10.1201/b12041](https://doi.org/10.1201/b12041)
32. *Yinping Li, Wei Liu, Chunhe Yang, Daemen J.J.K.* Experimental investigation of mechanical behavior of bedded rock salt containing inclined interlayer // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2014. Vol. 69. P. 39-49. DOI: [10.1016/j.ijrmms.2014.03.006](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.03.006)
33. *Басалаева П.В., Куранов А.Д.* Оценка влияния угла падения литологически неоднородной прослойки пород на устойчивость горизонтальной горной выработки при ее проходке // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2024. № 3. С. 17-30. DOI: [10.25018/0236_1493_2024_3_0_17](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_3_0_17)
34. *Каблинов О.С., Чайковский И.И.* О влиянии формы выделения глинистого материала на прочность каменной соли // Горное эхо. 2021. № 2 (83). С. 3-6.
35. *Чайковский И.И., Каблинов О.С.* О геологических причинах, влияющих на прочность образцов солей Верхнекамского месторождения // Стратегия и процессы освоения георесурсов: Материалы ежегодной научной сессии Горного института УрО РАН по результатам НИР в 2008 г., 20-24 апреля 2009. Пермь: Горный институт УрО РАН, 2009. С. 5-7.

Авторы: Александр Игоревич Рысин, руководитель лаборатории, аспирант, <https://orcid.org/0009-0005-3489-2195> (ООО «ПроТех Инжиниринг», Санкт-Петербург, Россия); Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия), Анастасия Михайловна Лебедева, инженер, amlebedeva07@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-8046-364X> (ООО «ПроТех Инжиниринг», Санкт-Петербург, Россия), Максим Анатольевич Карасев, д-р техн. наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0001-8939-0807> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), Антон Сергеевич Нуртдинов, главный специалист, <https://orcid.org/0009-0000-6934-4547> (ООО «ПроТех Инжиниринг», Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.