

АНАЛИЗ ВОДНОГО РЕЖИМА И ЭВОЛЮЦИИ МАССИВА ГРУНТОВ РЕКУЛЬТИВИРОВАННОГО ОБЪЕКТА ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

В.А. Фоменко¹, З.Э. Маковозова², А.А. Соколов¹, М.А. Аксенова¹, Г.С. Ковалев²

¹ Филиал Южного федерального университета в г. Геленджике,
Геленджик, Россия, e-mail: anso@sfedu.ru

² Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет), Владикавказ, РСО–Алания, Россия

Аннотация: Приведено описание исследований водного режима и эволюции массива грунтов рекультивированного объекта горного производства. Авторами выдвигается гипотеза о непосредственной взаимосвязи водного режима массива грунтов рекультивированного хвостохранилища с деформационными процессами в поверхностном слое хвостохранилища. Разработана и прошла апробацию методология, учитывающая помимо исследования некоторых коллекторских свойств горных пород, таких как пористость и проницаемость, влагонасыщенность и сжимаемость, результаты мониторинга сейсмоданных на исследуемой территории. В результате выполненных исследований были определены основные параметры, влияющие на техногенез Унальского хвостохранилища, среди которых: климатические особенности (горно-долинные ветра, сезонность и обильность осадков); объем поступающей воды с водосборной площади, специфический характер водного режима массива грунтов рекультивированного объекта горного производства. Определено и дифференцировано количество воды по объему поступления осадков на поверхность хвостохранилища основными путями. В ходе полевых работ был исследован водный режим рекультивированного хвостохранилища, проанализированы полученные результаты и сформулирован вывод о том, что для целостного представления эволюции его техногенеза необходима разработка новых методов мониторинга. В заключение предлагается выделить в отдельное направление исследований мониторинг напряженно-деформируемого состояния тела хвостохранилища с учетом сейсмических факторов и их влияния на эволюцию водного режима массива грунтов с вероятностью образования «плывунов».

Ключевые слова: водный режим, геотехнический мониторинг, напряженно-деформируемое состояние, плывун, физико-механические свойства грунтов, нивелирование, сейсмичность.

Благодарность: Исследования выполнены в Южном федеральном университете за счет средств Российского научного фонда (проект № РНФ/23-37-ГЛ, № 23-77-00015).

Для цитирования: Фоменко В. А., Маковозова З. Э., Соколов А. А., Аксенова М. А., Ковалев Г. С. Анализ водного режима и эволюции массива грунтов рекультивированного объекта горного производства // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 5. – С. 118–129. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_5_0_118.

Analysis of water conditions and evolution of rock mass at a mining industry object after reclamation

V.A. Fomenko¹, Z.E. Makovozova², A.A. Sokolov¹, M.A. Aksenova¹, G.S. Kovalev²

¹ Southern Federal University, branch of Southern Federal University in Gelendzhik, Gelendzhik, Russia, e-mail: anso@sfedu.ru

² North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Republic of North Ossetia-Alania, Russia

Abstract: The article presents the research into water conditions and evolution of rock mass at a mining industry object after reclamation. It is hypothesized that water conditions of rock mass at a reclaimed tailings pond are directly connected with deformation processes in the surface layer of the tailings pond. A methodology is developed and tested, that takes into account both studies of some reservoir properties of rocks, such as porosity, permeability, water saturation and compressibility, and seismic monitoring data on the test area. As a result of the accomplished research, the main parameters influencing technogenesis at the Unal tailings pond are determined, namely: climate (mountain and valley winds, seasonality and abundance of rainfall); volume of water feed from drain area; specific nature of water conditions of rock mass at the mining industry object after its reclamation. The quantity of water is determined and differentiated with respect to the volume of rainfall supply on the surface of the tailings pond along the main paths. During field works, the water conditions of the reclaimed tailing pond were investigated, the results were analyzed, and the conclusion on the required development of new monitoring methods for comprehensive understanding of evolution of technogenesis at the tailings pond was drawn. Finally, it is proposed to undertake a special research in the form of the stress-strain monitoring of the tailings pond body with respect to the seismic factors and their influence on evolution of water conditions of rock mass, and probability of flow rock origination.

Key words: water conditions, geotechnical monitoring, stress-strain behavior, flow rock, physical and mechanical properties, leveling, seismicity.

Acknowledgements: The studies were carried out at the Southern Federal University and supported by the Russian Science Foundation, Projects Nos. RNF/23-37-GL and 23-77-00015.

For citation: Fomenko V. A., Makovozova Z. E., Sokolov A. A., Aksenova M. A., Kovalev G. S. Analysis of water conditions and evolution of rock mass at a mining industry object after reclamation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(5):118-129. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_5_0_118.

Введение

В работе рассматриваются выведенные из эксплуатации и рекультивированные объекты горного производства — намывные техногенные массивы (хвостохранилища), вмещающие большое количество переработанных геологических материалов и являющиеся по сути опасными природно-техническими сис-

темами с постоянным техногенным воздействием на окружающую среду [1 — 3]. Большая часть хвостохранилищ расположена в горных районах, вблизи горнодобывающих предприятий, что обуславливает их местонахождение в сейсмо- и селеопасных районах. Такое расположение и постоянное влияние на них различных мощных энергетических техногенных

и природных воздействий представляет потенциальную опасность, связанную с риском неопределенности их проявлений во времени и величинах, влияющих на их устойчивость [4–6].

Исследуемое Унальское хвостохранилище располагается на высоте около 1700 м над уровнем моря, устроено на крутом борту горной реки Ардон, примыкает к загруженной федеральной автодороге ТрансКАМ и по этим причинам находится в достаточно осложненных опасных горно-геологических условиях. Согласно данным, указанным в работе В.И. Уломова («Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации ОСР-97»), расчетная сейсмическая интенсивность в баллах шкалы М8К-64 для средних грунтовых условий и трех степеней сейсмической опасности в течение 50 лет составляет: А (10%), В (5%), С (1%). Для г. Алагир, находящегося в непосредственной близости от Унальского хвостохранилища, приводятся следующие данные: А – 8, В – 9, С – 10. Здесь также наблюдаются паводки р. Ардон и зарегистрированы многочисленные по масштабу проявления опасных геологических процессов в виде оползней, обвалов, селей, подтоплений. Значительное количество осадков ливневого характера, горно-долинных ветров и климатические особенности Алагирского ущелья влияют на сезонную обводненность тела хвостохранилища, что проявляется на поверхности слоя рекультивации.

Исследованиями эволюционных процессов хвостохранилища, включающих напряженно-деформируемое состояние тела хвостохранилища, под влиянием различных гидрогеологических процессов и геоморфологических особенностей ландшафта, с учетом аналогичных современных изысканий, освещенных в научных работах [7–9], авторы занимаются на протяжении нескольких лет.

В результате выполненных работ были получены данные полевых исследований [10–12], на основе которых был создан научный задел, определивший вектор дальнейших исследований и внесший вклад в изучение рекультивированных хвостохранилищ в виде дополнительных знаний об эволюции выведенных из эксплуатации объектов горного производства, претерпевающих иссушение, в условиях горных территорий.

В ходе полевых исследований напряженно-деформированного состояния массива Унальского хвостохранилища по результатам геомеханического мониторинга и нивелирования поверхности хвостохранилища подтверждено, что иссушенное тело хвостохранилища в настоящее время представляет собой формирующийся горный массив, претерпевающий эволюционные изменения, со специфическими физико-механическими свойствами. Постепенно иссушенные слои хвостохранилища приобретают характерные черты горного массива с нарушениями целостности рекультивированной поверхности в виде образовавшихся трещин, просадок и смещений грунта с элементами развития форм опасных геологических процессов. Поскольку в ходе полевых работ при реализации геотехнического мониторинга и нивелирования были обнаружены и зафиксированы неравномерные деформации уровня поверхности хвостохранилища, образование трещин, просадок, а также разрастающиеся во времени площади высолов, авторами была выдвинута гипотеза о непосредственной взаимосвязи водного режима массива грунтов рекультивированного хвостохранилища с деформационными процессами в поверхностном слое хвостохранилища.

Для подтверждения выдвинутой гипотезы и были проведены описываемые в настоящей работе экспедиционные исследования.

Материалы и методы

В ходе работ по проекту были обследованы участки неравномерного проседания рекультивированного слоя грунта (более 2 м), выявленные с помощью геотехнического мониторинга и подкрепленные данными предыдущего нивелирования (2022 – 2023 гг.). Далее, было выдвинуто предположение о неравномерном проникновении осадков в тело хвостохранилища и, как следствие, различии в изменениях его физико-механических свойств. Проведенные исследования, описанные в работе [13], позволили определить особенности строения намывных грунтов Унальского хвостохранилища: грунты агрегированы, степень агрегатизации высокая, выделены крупнопылеватые, мелкопесчаные и мелкопылеватые агрегаты, структурные связи между частицами и агрегатами относятся к коагуляционному или переходному типу. Внутри агрегатные связи обусловлены присутствием водорастворимых солей и глинистых минералов.

По величине седиментационного объема грунты относятся к потенциальным пльвунам первого типа (без структурных связей). Известно, что при сильных землетрясениях повреждения сооружений вызываются не только сейсмическими колебаниями, но и другими сопровождающими их процессами и явлениями [14], так называемыми косейсмическими эффектами. Наибольшую опасность представляют косейсмические явления в виде разжижения грунтов, сопровождающиеся частичной или полной потерей прочности сооружений [15, 16]. При определении сейсмических рисков, связанных с разрушением дамбы хвостохранилища, необходимо учитывать ее расположение в условиях горных территорий.

Подошва хвостохранилища устроена по левому борту р. Ардон и сложена на убывающем уклоне песчано-глинисты-

ми отложениями в большей части нижней юры. Периодическое насыщение усыхающего тела хвостохранилища после его рекультивации влагой — достаточно опасное явление. В процессе периодического увлажнения возможно образование повышенных напряженно-деформируемых сил и формирование сильно увлажненных объемов грунтов [17 – 19], вплоть до образования пльвунов в теле хвостохранилища. В условиях повышенной сейсмичности, присущей горным территориям в месте расположения хвостохранилищ, сейсмические воздействия могут привести к непредсказуемым изменениям векторов деформаций тела хвостохранилища [20, 21], что увеличит риск прорыва пльвунов. Нарушение целостности поверхности хвостохранилища в результате сейсмических воздействий могут привести к проникновению значительных объемов воды в тело хвостохранилища.

Источниками увлажнения тела хвостохранилища являются атмосферные осадки, приток воды от дождей и таяния снега с водосборной площади, прилегающей к хвостохранилищу со стороны горного хребта, конденсация водяных паров из воздуха. В зависимости от климатических местных условий и времени года, преобладают те или иные причины увлажнения тела хвостохранилища. Количество влаги W (мм), попадающее в тело хвостохранилища, не остается в течение года постоянным и изменяется согласно известному уравнению водного баланса:

$$W = (A + B + C) - (D + E + F),$$

где для хвостохранилища: A — осадки, выпадающие на укрывающий слой грунта рекультивации; B — вода, прибывающая с водосборной площади, C — приток воды от уровня грунтовых вод по капиллярам, а также в результате паробразного перемещения влаги; D —

сток воды с поверхности слоя рекультивации; E — испарение влаги с поверхности грунта; F — просачивание воды в нижележащие слои геологических пород.

Для слагаемых водного баланса Унальского хвостохранилища авторы статьи определили следующие характерные специфические особенности:

- A — осадки, выпадающие на укрывающий слой грунта рекультивации, имеют сезонный характер и определяются обилием осадков за определенный период времени;

- B — вода, прибывающая с рассчитанной водосборной площади примерно $34,8 \text{ км}^2$ (слагаемое зависит от типа осадков по интенсивности и времени их проявления);

- C — величина притока воды (величина слагаемого зависит от уровня грунтовых вод, а также от парообразного перемещения влаги и достаточно мала);

- D — суммарный сток воды с поверхности хвостохранилища (следов разгрузки не обнаружено);

- E — испарение влаги с поверхности грунта под влиянием горно-долинных ветров (значительное);

- F — величина гравитационного просачивания воды в нижележащие слои геологических пород (не определена).

Предварительный анализ показывает, что основное количество воды (слагаемых A и B) попадает в тело хвостохранилища по раскрытым и глубоким трещинам, а также путем просачивания за счет водопроницаемости ненарушенного рекультивирующего слоя, что подтверждается отсутствием следов стока воды с рекультивированного слоя хвостохранилища и образованием локальных озер на поверхности с последующим образованием высолков на месте их высыхания. Величина D (сток) не обнаружена, а величина слагаемого C мала, ввиду возвышения тела хвостохранилища в месте примыкания р. Ардон более 20 м. Величина E — испарение влаги с поверхности грунта.

Очевидно, что количество воды, попадающее по трещинам из составляющих слагаемого B , на порядок больше всех остальных слагаемых. Для определения количества воды, попадающей внутрь хвостохранилища с ненарушенной поверхностью слоя рекультивации, составляющей в настоящее время боль-

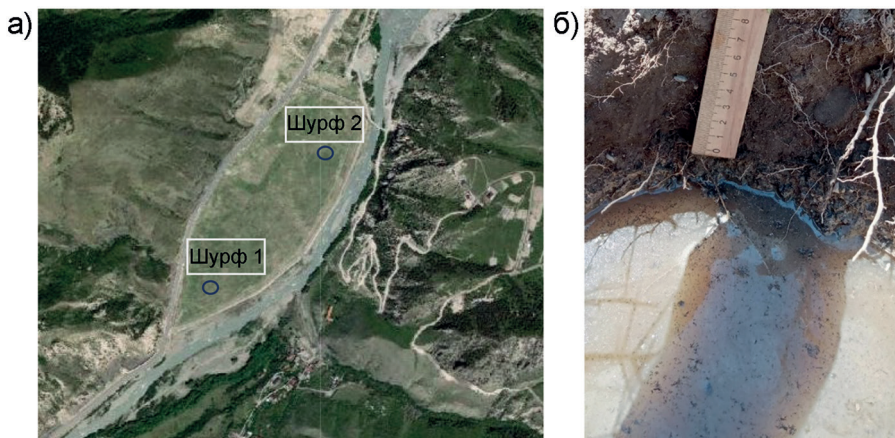


Рис. 1. Схема расположения шурфов на поверхности хвостохранилища (а); фотофиксация уровня воды в шурфе № 1 (б)

Fig. 1. Diagram of the location of the pits on the surface of the tailings storage facility (a); photo of the water level in pit No. 1 (b)

шую часть площади поверхности хвостохранилища, были выполнены методически упрощенные наливы воды в шурфы. Данные исследования были необходимы для экспериментального определения количества воды, поступающей с поверхности путем просачивания в тело хвостохранилища.

Для определения водопроницаемости почвенного слоя рекультивации производились работы по осуществлению наливов в шурфы с применением упрощенной методики. Согласно определению приемлемых мест заложения шурфов были выбраны два участка и заложены соответственно два шурфа. Методика выполнения работ заключалась в следующем: в подготовленный шурф глубиной примерно 400 мм и диаметром около 320 мм заливался определенный объем воды до полного заполнения (рис. 1). Далее в режиме реального времени велись наблюдения за изменением уровня столба воды в шурфах. Результаты наблюдений за динамикой процесса убывания столбов воды в обоих шурфах приведены в табл. 1 и 2 соответственно. По итогам выполненных работ по упрощенной методике наливов установлено, что верхний слой рекультивации за прошедшие годы под воздействием природ-

но-климатических факторов, свойственных исследуемой территории, трансформировался до состояния, близкого к водоупорному.

В ходе выполнения исследований по анализу влияния впитываемости грунтов рекультивированной поверхности выведенного из эксплуатации объекта горного производства на напряженно-деформируемое состояние тела хвостохранилища авторы предложили новую методологию комплексных исследований.

Методология включает в себя три этапа и учитывает, помимо исследований непосредственно некоторых коллекторских свойств горных пород (пористость, проницаемость, влагонасыщенность, сжимаемость), комплексный мониторинг сейсмо- и метеопараметров на исследуемой территории.

Первый этап включал в себя геотехнический мониторинг с целью определения деформаций поверхности рекультивированного объекта горного производства. Далее при обнаружении деформаций осуществлялись работы оконтуривания их периметра водостойким окрашивающим пигментом с целью дальнейшего систематического мониторинга эволюции обнаруженных нарушений.

Таблица 1

Результаты испытания впитываемости грунта. Шурф 1

Results of soil absorption test. Pit 1

Дата замеров	Время начала замеров		Промежуток времени между замерами, мин	Высота столба воды в шурфе, см	Разность отсчетов, см	Температура воды, °С	Примечание
	ч	мин					
9 августа 2024	10	55	0	40,0		20 (была использована речная вода)	Шурф 1: 42°88'28" северной широты, 44°16'12" восточной долготы, глубина 400 мм, диаметр 320 мм. Окончание бывшего хвостового озера (рядом с мостом в селе Унал). Температура окружающей среды 29 °С
			2	39,8	0,2		
			5	39,2	0,8		
			8	38,9	1,1		
			11	38,5	1,5		
			14	38,0	2,0		

Таблица 2 /Table 2.

Результаты испытания впитываемости грунта. Шурф 2
Results of soil absorption test. Pit 2

Дата замеров	Время начала замеров		Промежуток времени между замерами, мин	Высота столба воды в шурфе, см	Разность отсчетов, см	Температура воды, °С	Примечание
	ч	мин					
9 августа 2024	11	30	0	40		20 (была использована речная вода)	Шурф 2: 42°88'27" северной широты, 44°16'31" восточной долготы, глубина 400 мм, диаметр 300 мм. Середина бывшего хвостового озера (контакт с изгибом русла р. Ардон). Температура окружающей среды 30 °С
			2	39,5	0,5		
			5	39,0	1,0		
			8	38,4	1,6		
			11	37,9	2,1		
			14	36,9	3,1		

Второй этап предусматривал организацию периодического мониторинга сейсмоданных в режиме онлайн, путем установки стационарно расположенных сейсмоприемников сейсмостанции «DR 4040», положительно зарекомендовавших себя в ходе предыдущих полевых исследований авторского коллектива в период 2023—2024 гг.

Третий этап заключался в применении метеостанции «СОКОЛ М-1» для мониторинга в режиме онлайн метеорологических параметров, в частности, количества осадков и их характера, а также направления и скорости горно-долинных ветров. Данные исследования были необходимы для конкретизации метеопараметров непосредственно на исследуемой территории, а также для определения быстрых изменений климатических параметров в течение суток. Применение метеостанции «СОКОЛ М-1» позволило определить динамику изменения скорости и направления ветра в течение суток, а также изменение влажности в течение суток. Зафиксированные изменения направления ветра, вплоть до противоположного, перепады атмосферного давления и влажности в течение суток, присущие данному участку горных территорий (Алагирское ущелье),

позволили сделать заключение о быстрой динамике иссушения поверхностных горизонтов рекультивированного слоя.

В ходе проведенной в 2024 г. экспедиции авторами был выполнен предварительный научно-практический задел в виде фиксации наиболее прогрессирующих трещин поверхности хвостохранилища и замера их геометрических параметров для дальнейшего систематического наблюдения и описания процесса развития обнаруженных наиболее крупных участков образования трещин и деформаций поверхности (рис. 2).

Следует отметить, что проведенные начиная с 2022 г. исследования по определению влияния проезжающего по автодороге автотранспорта явно не указывают на первопричину нарушения целостности рекультивированной поверхности ввиду слабого (по мнению авторов) сейсмического воздействия. Выполненный расчет коэффициентов затухания по окончании одновременной работы четырех сейсмостанций «ДЕЛЬТА ГЕОН 001» и обработки сейсмоданных оказался в пределах слабозамушенных значений. Однако выявленный медленный спад уровня затухания сейсмических сигналов по дистанции от проезжающего авто-



Рис. 2. Фото обнаруженных деформаций рекультивированной поверхности
 Fig. 2. Photo of detected deformations of the reclaimed surface

транспорта, определяемый на поверхности хвостохранилища, указывает на значительную консолидацию слагающих геологических продуктов переработки и обводненность тела хвостохранилища.

Обсуждение результатов

В результате выполненных исследований были определены следующие параметры, влияющие на техногенез Унальского хвостохранилища: климатические особенности (горно-долинные ветра, сезонность и обильность осадков); объем поступающей воды с водосборной площади, специфический характер водного режима массива грунтов рекультивированного объекта горного производства, а также сейсмические условия района. Определено и дифференцировано количество воды по объему поступления осадков на поверхность хвостохранилища основными путями.

Наиболее опасные ситуации, связанные с комбинаторным воздействием климатических и сейсмических факторов на выведенные из эксплуатации и рекультивированные объекты горного производства, могут возникать в весенний и осенний периоды года. Осенью и весной сочетаются периоды продолжительных маломобильных осадков, способствующих большому влагонасыщению грунтов (увеличение массы, разжижение и увеличение подвижности) и повышению сезонной сейсмической ак-

тивности. Сейсмические воздействия на пропитанный влагой массив способствуют началу возникновения многих опасных геологических процессов [22 – 24], в частности являются одной из причин селеобразования. Образование грязекаменных селей в весенний и осенний периоды наблюдаются на Северном Кавказе, в том числе и в Алагирском ущелье, выше по течению р. Ардон и на ее многочисленных притоках.

На основании полевых изысканий следует выделить в отдельное направление исследований мониторинг напряженно-деформируемого состояния тела хвостохранилища, с учетом сейсмических техногенных и природных факторов и их влияния на эволюцию водного режима массива грунтов с вероятностью образования «пльивунов».

Выдвигаемое предложение может быть актуально при констатации очевидного прогрессирующего развития деформации поверхности хвостохранилища, в частности, образования трещин и проседания поверхности слоя рекультивации, подтвержденного ежегодным нивелированием поверхности с привязкой к реперным точкам, которое осуществляется непрерывно с 2022 г.

Выводы

Предлагаемая методология мониторинга эволюции деформационных процессов рекультивированной поверхности

хвостохранилища, включающая апробацию разработанных экспресс-методов мониторинга в отношении исследования полученных сейсмограмм, безусловно, повысит полноту и достаточность информации по изучению сейсмической устойчивости хвостохранилища. Методология учитывает сейсмоопасность региона с возможными местными землетрясениями, к примеру, случившимися в Северной Осетии: магнитудой 4,4 в июне 2024 г. (<https://rg.ru/2024/06/02/reg-skfo/v-severnoj-osetii-zafiksirovali-zemletriasenie-magnitudoj-44.html?ysclid=m4wf6taes5609681567>) и магнитудой 4,1 в ноябре 2024 г. (<https://ria.ru/20241109/zemletryasenie-1982776352.html?ysclid=m4wf91fdbq652352446>) и предполагает дополнительное оперативное обследование состояния хвостохранилища после

определенного уровня природных и техногенных воздействий.

Заключение

В рамках проводимых научных исследований необходимы дополнительные полевые работы на Унальском хвостохранилище и разработка новых экспресс-методов исследований для корректировки разработанной методологии с учетом изменения сезонной динамики климатических и сейсмических параметров. В дальнейшем описанные в статье разработки возможно внедрить на иных выведенных из эксплуатации и рекультивированных объектах горного производства Российской Федерации, с учетом их индивидуальных географических, сейсмических, гидрогеологических и климатических особенностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Brantut N., Heap M. J., Baud P., Meredith P. G. Mechanisms of time-dependent deformation in porous limestone // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2014, vol. 119, no. 7, pp. 5444–5463. DOI: 10.1002/2014JB011186.
2. Cacace M., Blöcher G. M., Watanabe N., Moeck I., Börsing N., Scheck-Wenderoth M., Kolditz O., Huenges E. Modelling of fractured carbonate reservoirs: outline of a novel technique via a case study from the Molasse Basin, southern Bavaria, Germany // *Environmental Earth Sciences*. 2013, vol. 70, no. 8, pp. 3585–3602. DOI: 10.1007/s12665-013-2402-3.
3. Куликова Е. Ю., Баловцев С. В., Скопинцева О. В. Комплексная оценка геоэкологических рисков при ведении открытых и подземных горных работ // *Устойчивое развитие горных территорий*. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 205–216. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-205-216.
4. Moosavi S. A., Goshtasbi K., Kazemzadeh E., Bakhtiari H. A., Esfahani M. R., Vali J. Relationship between porosity and permeability with stress using pore volume compressibility characteristic of reservoir rocks // *Arabian Journal of Geosciences*. 2014, vol. 7, no. 1, pp. 231–239. DOI: 10.1007/s12517-012-0760-x.
5. Ghabezloo S., Sulem J., Saint-Marc J. Evaluation of a permeability – porosity relationship in a low-permeability creeping material using a single transient test // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2009, vol. 46, no. 4, pp. 761–768. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2008.10.003.
6. Benson P., Schubnel A., Vinciguerra S., Trovato C., Meredith P., Young R. P. Modeling the permeability evolution of microcracked rocks from elastic wave velocity inversion at elevated isostatic pressure // *Journal of Geophysical Research*. 2006. DOI: 10.1029/2005JB003710.
7. Anovitz L. M., Cole D. R. Characterization and analysis of porosity and pore structures // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2015, vol. 80, no. 1, pp. 61–164. DOI: 10.2138/rmg.2015.80.04.
8. Шабанов М. В., Маричев М. С., Манджиева С. С., Соколов А. А. Формирование хемоземов в условиях длительного воздействия аэропромышленных выбросов горно-металлургического комбината // *Устойчивое развитие горных территорий*. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 727–740. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-3-727-740.
9. Lucia F. J. Petrophysical parameters estimated from visual descriptions of carbonate rocks: a field classification of carbonate pore space // *Journal of Petroleum Technology*. 1983, vol. 35, no. 3, pp. 629–637. DOI: 10.2118/10073-PA.

10. Яицкая Н. А., Бригада В. С. Геоинформационные технологии при решении трехмерных геоэкологических задач: пространственная интерполяция данных // Геология и геофизика Юга России. — 2022. — Т. 12. — № 1. — С. 162–173. DOI: 10.46698/VNC.2022.86.27.012.

11. Шестопалов В. Л., Фоменко В. А., Соколов А. А., Мирошников А. С. Сравнительный анализ деформационных методов мониторинга сейсмической активности горных районов Черноморского побережья и Камчатки // Устойчивое развитие горных территорий. — 2021. — Т. 13. — № 4. — С. 535–543. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-4-535-543.

12. Фоменко В. А., Соколов А. А., Лолаев А. Б., Аймбетова И. О. Некоторые результаты работ по оценке эманаций радона Унальского хвостохранилища // Устойчивое развитие горных территорий. — 2022. — Т. 14. — № 4. — С. 576–585. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-4-576-585.

13. Дзебоев С. О. Влияние техногенеза на формирование природно-технической системы — намывной техногенный грунтовый массив и экологическая безопасность горных территорий (на примере Унальского хвостохранилища, Республика Северная Осетия — Алания): Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. геол.-минерал. наук. — Владикавказ, 2022. — 21 с.

14. Сейсмический риск и инженерные решения: Пер. с англ. / Под ред. Ц. Ломнитца, Э. Розенблюта. — М.: Недра, 1981. — 375 с.

15. Вознесенский Е. А. Землетрясения и динамика грунтов // Соросовский образовательный журнал. — 1998. — № 2. — С. 101–108.

16. Zaalishvili V. B., Melkov D. A., Martyushev N. V., Klyuev R. V., Kukartsev V. V., Konyukhov V. Y., Kononenko R. V., Gendon A. L., Oparina T. A. Radon emanation and dynamic processes in highly dispersive media // *Geosciences*. 2024, vol. 14, no. 4, article 102. DOI: 10.3390/geosciences14040102.

17. Bakhtiari H. A., Moosavi A., Kazemzadeh E., Kamran G., Esfahani M. R., Vali J. The effect of rock types on pore volume compressibility of limestone and dolomite samples // *Geopersia*. 2011, vol. 1, no. 1, pp. 37–82. DOI: 10.22059/geope.2011.22163.

18. Meng F., Li X., Baud P., Wong T. Bedding anisotropy and effective stress law for the permeability and deformation of clayey sandstones // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2020. DOI: 10.1007/s00603-020-02306-w.

19. Menke H. P., Maes J., Geiger S. Upscaling the porosity-permeability relationship of a microporous carbonate for Darcy-scale flow with machine learning // *Scientific Reports*. 2021, vol. 11, no. 1, 2625. DOI: 10.1038/s41598-021-82029-2.

20. Settari A., Al-Ruwaili K., Sen V. Upscaling of geomechanics in heterogeneous compacting reservoirs / *SPE Reservoir Simulation Symposium*. Society of Petroleum Engineers, 2013. DOI: 10.2118/163641-MS.

21. Hassanzadegan A., Guérizec R., Reinsch T., Blöcher G., Zimmermann G., Milsch H. Static and dynamic moduli of malm carbonate: a poroelastic correlation // *Pure and Applied Geophysics*. 2016, vol. 173, no. 8, pp. 2841–2855. DOI: 10.1007/s00024-016-1327-7.

22. Rashid F., Glover P., Lorinczi P., Collier R., Lawrence J. Porosity and permeability of tight carbonate reservoir rocks in the north of Iraq // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2015, vol. 133, pp. 147–161. DOI: 10.1016/j.petrol.2015.05.009.

23. Lucia F. J. Rock-fabric petrophysical classification of carbonate pore-space for reservoir characterization // *AAPG Bulletin*. 1995, vol. 79, pp. 1275–1300. DOI: 10.1306/7834d4a4-1721-11d7-8645000102c1865d.

24. Lucia F. J. Origin and petrophysics of dolostone pore-space // *Geological Society, London, Special Publications*. 2004, vol. 235, no. 1, pp. 141–155. DOI: 10.1144/GSL.SP.2004.235.01.06. **PLAS**

REFERENCES

1. Brantut N., Heap M. J., Baud P., Meredith P. G. Mechanisms of time-dependent deformation in porous limestone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2014, vol. 119, no. 7, pp. 5444–5463. DOI: 10.1002/2014JB011186.

2. Cacace M., Blöcher G. M., Watanabe N., Moeck I., Börsing N., Scheck-Wenderoth M., Kolditz O., Huenges E. Modelling of fractured carbonate reservoirs: outline of a novel technique via a case study from the Molasse Basin, southern Bavaria, Germany. *Environmental Earth Sciences*. 2013, vol. 70, no. 8, pp. 3585–3602. DOI: 10.1007/s12665-013-2402-3.

3. Kulikova E. Yu., Balovtsev S. V., Skopintseva O. V. Comprehensive assessment of geoecological risks in conducting open and underground mining. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 1, pp. 205–216. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-205-216.

4. Moosavi S. A., Goshtasbi K., Kazemzadeh E., Bakhtiari H. A., Esfahani M. R., Vali J. Relationship between porosity and permeability with stress using pore volume compressibility characteristic of reservoir rocks. *Arabian Journal of Geosciences*. 2014, vol. 7, no. 1, pp. 231 – 239. DOI: 10.1007/s12517-012-0760-x.

5. Ghabezloo S., Sulem J., Saint-Marc J. Evaluation of a permeability – porosity relationship in a low-permeability creeping material using a single transient test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2009, vol. 46, no. 4, pp. 761 – 768. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2008.10.003.

6. Benson P., Schubnel A., Vinciguerra S., Trovato C., Meredith P., Young R. P. Modeling the permeability evolution of microcracked rocks from elastic wave velocity inversion at elevated isostatic pressure. *Journal of Geophysical Research*. 2006. DOI: 10.1029/2005JB003710.

7. Anovitz L. M., Cole D. R. Characterization and analysis of porosity and pore structures. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2015, vol. 80, no. 1, pp. 61 – 164. DOI: 10.2138/rmg.2015.80.04.

8. Shabanov M. V., Marichev M. S., Mangiyeva S. S., Sokolov A. A. Chemozem formation under conditions of prolong exposure to aero-industrial emissions from a mining and smelting plant. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023, vol. 15, no. 3, pp. 727 – 740. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-3-727-740.

9. Lucia F. J. Petrophysical parameters estimated from visual descriptions of carbonate rocks: a field classification of carbonate pore space. *Journal of Petroleum Technology*. 1983, vol. 35, no. 3, pp. 629 – 637. DOI: 10.2118/10073-PA.

10. Yaitskaya N. A., Brigida V. S. Geoinformation technologies in solving three-dimensional geocological problems: spatial data interpolation. *Geology and geophysics of Russian South*. 2022, vol. 12, no. 1, pp. 162 – 173. [In Russ]. DOI: 10.46698/VNC.2022.86.27.012.

11. Shestopalov V. L., Fomenko V. A., Sokolov A. A., Miroshnikov A. S. Comparative analysis of deformation methods for monitoring seismic activity in the mountainous regions of the Black Sea coast and Kamchatka. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021, vol. 13, no. 4, pp. 535 – 543. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-4-535-543.

12. Fomenko V. A., Sokolov A. A., Lolaev A. B., Aimbetova I. O. Some results of the work on the evaluation of radon emanations at Unal tailings. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 4, pp. 576 – 585. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-4-576-585.

13. Dzeboev S. O. *Vliyanie tekhnogeneza na formirovanie prirodno-tekhnicheskoy sistemy – namyvnoy tekhnogenniy gruntoviy massiv i ekologicheskaya bezopasnost' gornyykh territoriy (na primere Unal'skogo khvostokhranilishcha, Respublika Severnaya Osetiya – Alaniya)* [The influence of technogenesis on the formation of a natural-technical system – alluvial technogenic soil massif and environmental safety of mountainous territories (on the example of the Unal tailings dump, Republic of North Ossetia – Alania)], Candidate's thesis, Vladikavkaz, 2022, 21 p.

14. *Seysmicheskyy risk i inzhenernyye resheniya*. Per. s angl. Pod red. Ts. Lomnitsa, E. Rozenblyuta [Seismic risk and engineering solutions: Trans. from English. C. Lomnitz, E. Rosenbluth (Eds.)], Moscow, Nedra, 1981, 375 p.

15. Voznesensky E. A. Earthquakes and soil dynamics. *Soros educational journal*. 1998, no. 2, pp. 101 – 108. [In Russ].

16. Zaalishvili V. B., Melkov D. A., Martyushev N. V., Klyuev R. V., Kukartsev V. V., Konyukhov V. Y., Kononenko R. V., Gendon A. L., Oparina T. A. Radon emanation and dynamic processes in highly dispersive media. *Geosciences*. 2024, vol. 14, no. 4, article 102. DOI: 10.3390/geosciences14040102.

17. Bakhtiari H. A., Moosavi A., Kazemzadeh E., Kamran G., Esfahani M. R., Vali J. The effect of rock types on pore volume compressibility of limestone and dolomite samples. *Geopersia*. 2011, vol. 1, no. 1, pp. 37 – 82. DOI: 10.22059/jgeope.2011.22163.

18. Meng F., Li X., Baud P., Wong T. Bedding anisotropy and effective stress law for the permeability and deformation of clayey sandstones. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2020. DOI: 10.1007/s00603-020-02306-w.

19. Menke H. P., Maes J., Geiger S. Upscaling the porosity-permeability relationship of a microporous carbonate for Darcy-scale flow with machine learning. *Scientific Reports*. 2021, vol. 11, no. 1, 2625. DOI: 10.1038/s41598-021-82029-2.

20. Settari A., Al-Ruwaili K., Sen V. Upscaling of geomechanics in heterogeneous compacting reservoirs. *SPE Reservoir Simulation Symposium*. Society of Petroleum Engineers, 2013. DOI: 10.2118/163641-MS.

21. Hassanzadegan A., Guéizec R., Reinsch T., Blöcher G., Zimmermann G., Milsch H. Static and dynamic moduli of malm carbonate: a poroelastic correlation. *Pure and Applied Geophysics*. 2016, vol. 173, no. 8, pp. 2841 – 2855. DOI: 10.1007/s00024-016-1327-7.

22. Rashid F., Glover P., Lorinczi P., Collier R., Lawrence J. Porosity and permeability of tight carbonate reservoir rocks in the north of Iraq. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2015, vol. 133, pp. 147 – 161. DOI: 10.1016/j.petrol.2015.05.009.

23. Lucia F. J. Rock-fabric petrophysical classification of carbonate pore-space for reservoir characterization. *AAPG Bulletin*. 1995, vol. 79, pp. 1275 – 1300. DOI: 10.1306/7834d4a4-1721-11d7-8645000102c1865d.

24. Lucia F. J. Origin and petrophysics of dolostone pore-space. *Geological Society, London, Special Publications*. 2004, vol. 235, no. 1, pp. 141 – 155. DOI: 10.1144/GSL.SP.2004.235.01.06.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Фоменко Владимир Александрович*¹ – канд. техн. наук,

доцент, e-mail: vafomenko@sfedu.ru,

ORCID ID: 0000-0002-3791-8793,

*Маковозова Залина Элгуджаевна*² – канд. геол.-минерал. наук,

доцент, e-mail: geologistik@bk.ru,

ORCID ID: 0009-0000-3555-4394,

*Соколов Андрей Андреевич*¹ – канд. техн. наук,

доцент, зав. кафедрой, e-mail: anso@sfedu.ru,

ORCID ID: 0000-0002-1127-9612,

*Аксенова Мария Анатольевна*¹ – ассистент кафедры,

e-mail: maaksenova@sfedu.ru,

ORCID ID 0009-0005-5482-4691,

*Ковалев Георгий Сергеевич*² – студент,

e-mail: georkovalev@mail.ru,

ORCID ID 0009-0005-6016-0545,

¹ Филиал Южного федерального университета в г. Геленджике,

² Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет).

Для контактов: Соколов А.А., e-mail: anso@sfedu.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*V.A. Fomenko*¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

e-mail: vafomenko@sfedu.ru,

ORCID ID: 0000-0002-3791-8793,

*Z.E. Makovozova*², Cand. Sci. (Geol. Mineral.),

e-mail: geologistik@bk.ru,

ORCID ID: 0009-0000-3555-4394,

*A.A. Sokolov*¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

Head of Chair, e-mail: anso@sfedu.ru,

ORCID ID: 0000-0002-1127-9612,

*M.A. Aksenova*¹, Assistant of Chair,

e-mail: maaksenova@sfedu.ru,

ORCID ID 0009-0005-5482-4691,

*G.S. Kovalev*², Student, e-mail: georkovalev@mail.ru,

ORCID ID 0009-0005-6016-0545,

¹ Branch of Southern Federal University in Gelendzhik, 353461, Gelendzhik, Russia,

² North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University),
362021, Vladikavkaz, Republic of North Ossetia-Alania, Russia.

Corresponding author: A.A. Sokolov, e-mail: anso@sfedu.ru.

Получена редакцией 31.01.2025; получена после рецензии 05.03.2025; принята к печати 10.04.2025.

Received by the editors 31.01.2025; received after the review 05.03.2025; accepted for printing 10.04.2025.