ГЕОТЕХНОЛОГИЯ. ГЕОМЕХАНИКА

УДК 550.8:504.5:553.63:628.1/.3
DOI: 10.46698/VNC.2025.44.49.001

Оригинальная статья

Геофизическая оценка эффективности цеолитсодержащих барьеров для защиты вод от загрязнения на горнопромышленных территориях

Т.А. Панфилова[1,2], В.В. Кукарцев[2,3], Е.В. Худякова[3], М.Н. Степанцевич[3], Л.В. Красовская[3]

[1] Сибирский федеральный университет, Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79;

[2] Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Россия, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, e-mail: t_pan80@mail.ru;

[3] Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, Россия, 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49, e-mail: vlad_saa_2000@mail.ru, vhudyakova@rgau-msha.ru, stepancevich@rgau-msha.ru, kraslud@yandex.ru

Статья поступила: 14.06.2025, доработана: 02.09.2025, принята к публикации: 06.09.2025

Резюме: Актуальность работы. Загрязнение водных ресурсов тяжёлыми металлами в районах горнопромышленной деятельности остаётся одной из наиболее острых экологических проблем юга России. Для минимизации рисков миграции токсикантов в гидросферу применяются природные сорбционные материалы, среди которых цеолиты выделяются высокой доступностью и селективностью. Важной задачей становится разработка неразрушающих методов оценки эффективности таких барьеров в реальных условиях эксплуатации. **Цель исследования.** Экспериментально обосновать эффективность цеолитсодержащих барьеров для защиты водных ресурсов горнопромышленных территорий и продемонстрировать возможности применения геофизических методов для мониторинга их состояния. **Методы исследования.** В данной работе был проведён комплекс лабораторных и полевых испытаний с использованием природного клиноптилолита из Западного Прикаспия. На опытном полигоне применялись электротомография, георадар и сейсмоакустические измерения, синхронизированные с анализом фильтратов и физико-химических свойств образцов. Дополнительно внедрена автоматизированная станция телеметрического контроля влажности и удельного сопротивления в режиме реального времени. **Результаты.** В результате проведенных исследований установлено, что цеолитсодержащие барьеры обеспечивают снижение концентраций тяжёлых металлов до 77,8–92,3 %, а коэффициент эффективного использования сорбционного ресурса достигает 0,59. Геофизические методы выявили высокую чувствительность к изменениям структуры и гидрогеохимических параметров барьера, включая снижение удельного сопротивления и pH, рост плотности и перестройку минеральной структуры. Интеграция полевых и аналитических данных показала, что предложенный подход позволяет оперативно диагностировать зоны перегрузки и прогнозировать деградацию барьерной функции, что делает его перспективным инструментом экологической защиты водных объектов.

Ключевые слова: цеолит, геофизика, барьер, тяжелые металлы, фильтрация, мониторинг.

Для цитирования: Панфилова Т.А., Кукарцев В.В., Худякова Е.В., Степанцевич М.Н., Красовская Л.В. Геофизическая оценка эффективности цеолитсодержащих барьеров для защиты вод от загрязнения на горнопромышленных территориях. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(3): 211-225. DOI: 10.46698/VNC.2025.44.49.001

DOI: 10.46698/VNC.2025.44.49.001

Original paper

Geophysical assessment of the efficiency of zeolite-containing barriers for water protection in mining areas

T.A. Panfilova[1,2], V.V. Kukartsev[2,3], E.V. Khudyakova[3], M.N. Stepantsevich[3], L.V. Krasovskaya[3]

[1] Siberian Federal University, 79 Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russian Federation;

[2] Bauman Moscow State Technical University, 5 2nd Baumanskaya Str., Moscow 105005, Russian Federation, e-mail: t_pan80@mail.ru;

[3] Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 49 Timiryazevskay Str., Moscow 127434, Russian Federation, e-mail: vlad_saa_2000@mail.ru, evhudyakova@rgau-msha.ru, stepancevich@rgau-msha.ru, kraslud@yandex.ru

Received: 14.06.2025, revised: 02.09.2025, accepted: 06.09.2025

Abstract: Relevance. Water contamination by heavy metals in mining areas remains one of the most critical environmental problems in the Russian South. To minimize the risks of pollutant migration into the hydrosphere, natural sorbent materials are applied, among which zeolites are notable for their availability and selectivity. An important challenge is the development of non-destructive methods for assessing the efficiency of such barriers under real operating conditions. **Aim**. The study aims to experimentally substantiate the efficiency of zeolite-containing barriers for protecting water resources in mining territories and to demonstrate the applicability of geophysical methods for monitoring their condition. **Methods**. A set of laboratory and field tests was carried out using natural clinoptilolite from the Eastern Pre-Caspian region. At the experimental site, electrical resistivity tomography, ground-penetrating radar, and seismic-acoustic measurements were applied in combination with filtrate analysis and physico-chemical characterization of samples. In addition, an automated telemetric station was deployed to control moisture and resistivity parameters in real time. **Results**. The findings show that zeolite-containing barriers reduce heavy metal concentrations by 77.8–92.3%, with an effective sorption resource utilization coefficient of 0.59. Geophysical methods demonstrated high sensitivity to changes in barrier structure and hydrogeochemical parameters, including decreasing resistivity and pH, increasing density, and mineral structure transformation. Integration of field and analytical data confirmed that the proposed approach enables timely diagnostics of overloaded zones and forecasting of barrier degradation. This makes it a promising tool for ensuring the environmental protection of water resources in mining regions.

Keywords: zeolite, geophysics, barrier, heavy metals, filtration, monitoring.

For citation: Panfilova T.A., Kukartsev V.V., Khudyakova E.V., Stepantsevich M.N., Krasovskaya L.V. Geophysical assessment of the efficiency of zeolite-containing barriers for water protection in mining areas. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(3): 211-225. DOI: 10.46698/VNC.2025.44.49.001

Введение

Одной из ключевых экологических проблем, с которой сегодня сталкивается мировое сообщество, является загрязнение водных ресурсов в районах интенсивной промышленной деятельности, особенно в регионах горнодобывающей про-

мышленности [Реутова и др., 2021, 2025; Закруткин и др., 2022; Закруткин, Решетняк, 2023; Нуреев и др., 2022; Мирзоева и др., 2024; Черкашин и др., 2024]. Из-за постоянного воздействия на гидросферу со стороны отходов производства, стоков и инфильтрационных вод, насыщенных тяжелыми металлами, радионуклидами и другими токсичными соединениями, наблюдается деградация экосистем, ухудшение качества питьевой воды и рост экологических рисков для населения. Эта ситуация актуальна как для развивающихся стран, так и для промышленно развитых регионов, поскольку экономическое развитие не всегда сопровождается внедрением эффективных технологий охраны окружающей среды.

Среди предложенных научным сообществом решений особое место занимают технологии, направленные на локализацию и снижение миграции загрязнителей в окружающую среду. Одним из таких подходов является создание геохимических барьеров, способных адсорбировать, удерживать или трансформировать вредные соединения, прежде чем они, достигнут водных объектов. В этой связи широко исследуются и применяются материалы природного происхождения, обладающие высокой сорбционной способностью и химической стойкостью – например, природные цеолиты. Благодаря своей микропористой структуре, ионообменным свойствам и селективности по отношению к катионам тяжелых металлов и радионуклидов, цеолиты рассматриваются как перспективные сорбенты для создания фильтрационных завес и барьеров в системах защиты вод [Sprynskyy et al., 2006; Wang, Peng, 2010; Юсупов и др., 2025].

Современные исследования показали, что цеолитсодержащие породы эффективно поглощают такие элементы, как Cs^{+}, Pb^{2+}, Cd^{2+}, Zn^{2+}, Hg^{2+} и Sr^{2+}, а также органические и неорганические загрязнители, включая аммиак, диоксид серы, формальдегид и фреоны [Alpat et al., 2008; Lin et al., 2014; Meshko et al., 2001]. При этом их природное происхождение и относительная доступность делают их экономически целесообразным компонентом при реализации экологических проектов на горнопромышленных территориях [Malekian et al., 2011]. Однако эффективность таких барьеров во многом зависит от физических и химических свойств конкретных пород, степени их обогащения и модификации, а также от условий эксплуатации, включая гидрогеологические параметры и химизм загрязнённых вод [Inglezakis, Grigoropoulou, 2004; Oren, Kaya, 2006].

Как показано в статье [Хатькова и др., 2021], одним из направлений повышения эффективности цеолитов является их предварительная обработка с использованием направленных энергетических воздействий – ультразвука, ускоренных электронов, магнитной и электростатической сепарации. Эти методы позволяют значительно повысить чистоту цеолитового концентрата (до 96–99%), интенсифицировать ионообменные процессы и улучшить механические характеристики пород [Kumar et al., 2012]. Также подчеркивается, что технологическое совершенствование позволяет эффективно использовать не только целевые компоненты, но и вторичные продукты обогащения – в строительстве, рекультивации и других направлениях, тем самым повышая ресурсную эффективность и снижая экологическую нагрузку от самих технологий переработки [Li et al., 2020; Alam et al., 2020; Milyutin et al., 2020; Юсупов и др., 2022, 2023].

Несмотря на высокую потенцию цеолитсодержащих барьеров, в большинстве случаев эффективность их функционирования оценивается лабораторными методами или на основе опытно-промышленных данных. Однако в условиях реальной экс-

плуатации, особенно на масштабных горнопромышленных объектах, крайне важно иметь оперативные и ненарушающие методы контроля состояния таких барьеров и эффективности их работы. Именно здесь возникает потребность в использовании геофизических методов оценки, которые позволяют неинвазивно отслеживать изменения фильтрационно-емкостных свойств, влажностного режима и динамики загрязняющих веществ в массиве породы [Ускун, 2019; Голик, Бурдзиева, 2023].

Геофизические технологии, такие как электротомография, георадарные исследования, сейсмоакустические и электромагнитные методы, обладают высоким разрешением и чувствительностью к изменениям в структуре и составе барьерных сред. Их применение позволяет не только картировать пространственное положение цеолитсодержащих барьеров, но и выявлять зоны их деградации, недостаточной герметичности или перенасыщения сорбционными агентами. Более того, интеграция геофизических данных с гидрогеохимическим моделированием может обеспечить комплексную оценку эффективности защиты водных объектов и прогноз поведения системы в условиях изменяющейся техногенной нагрузки [Павленко, 2000; Юсупов, 1985; Wang et al., 2016].

Актуальность применения геофизических методов оценки эффективности цеолитсодержащих барьеров обусловлена не только необходимостью перехода к более устойчивым и наукоемким подходам в охране окружающей среды, но и потребностью в снижении затрат на эксплуатационный мониторинг, повышении достоверности данных и разработке протоколов оперативного реагирования. На фоне растущих требований к экологической безопасности горнопромышленных предприятий, интеграция геофизических и минералого-технологических подходов представляется особенно перспективной. Такая синергия позволит не только повысить эффективность функционирования барьеров, но и расширить области применения цеолитов в системе охраны водных ресурсов [Thakare, Jana, 2015].

В южных регионах России проблема загрязнения водных ресурсов стоит особенно остро. Горнопромышленные предприятия Северного Кавказа и Западного Прикаспия формируют значительные объёмы сточных и инфильтрационных вод, содержащих тяжёлые металлы (Pb^{2+}, Cd^{2+}, Zn^{2+}) и другие токсичные компоненты [Motsi et al., 2009]. Сложные гидрогеологические условия горных территорий усиливают риск распространения загрязнителей в грунтовые и поверхностные воды. В этих условиях использование природных цеолитсодержащих пород как сорбционных барьеров имеет важное региональное значение, а внедрение методов геофизического мониторинга позволяет адаптировать решения к специфике южных промышленных районов России.

Целью настоящей работы является экспериментальное и геофизическое обоснование эффективности применения цеолитсодержащих барьеров для защиты водных ресурсов горнопромышленных территорий, а также оценка возможностей использования методов геофизического мониторинга для контроля их состояния и адсорбционной активности в реальных условиях эксплуатации [Razmakhnin, Khatkova, 2019].

Методы и материалы

В рамках данной работы была реализована многоступенчатая экспериментальная программа, направленная на комплексную оценку эффективности цеолитсодержащих барьеров для защиты водных ресурсов на горнопромышленных терри-

ториях. Исследование включало как лабораторные, так и полевые этапы, а также синхронное применение геофизических методов контроля в условиях реального водообмена. Особое внимание уделялось неразрушающим технологиям диагностики состояния сорбционного массива и его насыщенности загрязняющими компонентами.

На первом этапе был организован полигонный эксперимент с построением барьерной системы из природного клиноптилолита, добытого из палеогеновых цеолитсодержащих комплексов Западного Прикаспия. Барьер был размещён на площадке размером 55 × 65 м с глубиной до 1,4 м. Для регистрации геофизических характеристик применялась установка электротомографии «ЭРТ-4Р» производства ЗАО НПП «ГеоЛайн» (Россия), работающая в диапазоне частот до 1 кГц, с четырёхточечной конфигурацией электродов и глубиной зондирования до 2 м. Измерения проводились с шагом 0,5 м по линии и разрешением 5 мВ при базовой погрешности менее 3%.

Дополнительно использовалась георадарная система «GSSI SIR-3000» с антенной частотой 300 МГц, обеспечивающая пространственное разрешение до 0,1 м. Исследования проводились при скорости перемещения 0,5 м/с, с фиксацией отражённых сигналов на глубине до 1,5 м. В ходе эксперимента регистрировались параметры сигнала, амплитуда, временная задержка и форма волны, что позволяло выявлять диэлектрические неоднородности и накопление загрязнителей.

Сейсмоакустические измерения осуществлялись с применением комплекса «САК-М» (производства ИГиГ СО РАН), работающего в режиме поверхностных и объемных волн в частотном диапазоне 10–2000 Гц. Источник возбуждения – ударный маятниковый генератор, приём осуществлялся с использованием пьезоэлектрических датчиков. Данные обрабатывались с помощью программного комплекса «SeisView», позволяющего строить скоростные модели и выделять аномалии плотности.

Лабораторный блок включал анализ фильтратов до и после прохождения через барьер с использованием спектрофотометра «Photometer PF-12Plus» (Macherey-Nagel, Германия), с пределом обнаружения до 0,001 мг/л. Также применялись методы дифференциально-термического анализа (установка «Paulik–Paulik–Erdey») для определения изменений минеральной структуры, а плотность образцов измерялась на автоматизированных гидростатических весах «RADWAG PS.X2». Все пробы анализировались в трёхкратной повторности с расчётом среднего арифметического и стандартного отклонения.

Для оценки распределения загрязнителей и сорбционного ресурса использовалась модель массового баланса, основанная на данных о расходе воды ($Q = 5{,}3$ м³/сут), концентрациях и объёмах активной зоны. В пилотной фазе наблюдений применялась автоматизированная геофизическая станция с функцией телеметрии, включающая четыре электрода и датчики влажности «ECH2O 5TE» (METER Group, США) с точностью до 0,045 м³/м³. Это обеспечивало сбор и передачу данных в реальном времени каждые 60 минут, что позволяло оперативно отслеживать изменения в распределении загрязнителей и степени загрузки барьера. Таким образом, применённая методика обеспечила комплексный и высокоточный контроль за функционированием цеолитсодержащего барьера в условиях, приближённых к эксплуатационным.

Результаты

Нами было проведено экспериментальное исследование эффективности цеолитсодержащих барьеров, построенных на основе клиноптилолита, добываемого из палеогеновых цеолитсодержащих комплексов Западного Прикаспия (восточный Северный Кавказ). Это месторождение было отобрано в связи с высоким содержанием минерала — в диапазоне 18–92 % в отложениях Кавказа. Основной задачей исследования стала неструктурная оценка структуры и сорбционной активности барьеров с применением геофизических методов: электротомографии, георадара и сейсмоакустических измерений, синхронизированных с лабораторным анализом фильтратов и измерением физико-химических свойств образцов.

Экспериментальная площадка была организована на участке размером 55 × 65 м, с глубиной установки завесы до 1,4 м. Электротомография продемонстрировала значительные контрасты удельного сопротивления: на периферии барьера значения составляли 92–120 Ом·м, тогда как в центральной зоне фиксировалось падение до 12–19 Ом·м. Эти изменения согласуются с насыщением цеолитовой среды влагой и растворёнными солями с высокой концентрацией ионов тяжёлых металлов.

Данные георадара (антенна 300 МГц) позволили выявить отражающие горизонты линейной конфигурации с длиной 0,45–0,95 м; амплитуда сигнала в насыщенной зоне снижалась почти на 15 дБ. Такая динамика отражает накопление сорбированного материала и повышение диэлектрической неоднородности как внутри, так и на поверхности барьера.

Лабораторный анализ фильтратов выявил значительное снижение концентраций тяжёлых металлов: Zn^{2+} – на 77,8 %, Pb^{2+} – на 92,3 %, Cd^{2+} – на 86,5 %. Финальные концентрации составили: 0,029 мг/л Zn^{2+} (исходно 0,130 мг/л), 0,0053 мг/л Pb^{2+} (исходно 0,065 мг/л), 0,0024 мг/л Cd^{2+} (исходно 0,017 мг/л). Эти значения обеспечивают превышение стандартных нормативов по качеству воды в России и ЕС более чем в 3–4 раза (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Снижение концентрации тяжёлых металлов после прохождения цеолитсодержащего барьера / Reduction in heavy metal concentration after passing through a zeolite-containing barrier

Ион загрязнителя / Pollutant ion	Концентрация на входе, мг/л / Input concentration, mg/l	Концентрация на выходе, мг/л / Output concentration, mg/l	Эффективность удаления, % / Removal efficiency, %
Zn^{2+}	0,130	0,029	77,8
Pb^{2+}	0,065	0,0053	92,3
Cd^{2+}	0,017	0,0024	86,5

На основании трёхмерного моделирования распределения физических параметров было рассчитано, что объём активной зоны насыщения составляет 35,7 м³ из общего объёма 110,3 м³ барьера, что соответствует приблизительно 32,3 % загрузки сорбционного ресурса. При этом коэффициент фильтрации материала варьировался в диапазоне 0,90–1,18 м/сут.

Через пять месяцев эксплуатации электротомография показала увеличение зон с низким сопротивлением (<20 Ом·м) на 22,7 %. Важно, что эти изменения сопровождались локальным снижением pH фильтрата: с 7,2 до 6,0, что указывает на накопление катионов тяжелых металлов и послесорбционные изменения кислотно-щелочного баланса.

Измерения плотности цеолитовой массы показали рост от 1,54 до 1,69 г/см³ (+9,7 %), что подтверждает насыщение материала и умеренное изменение порового пространства. Дифференциально-термический анализ образцов зафиксировал снижение температуры эндотермического пика с 342 до 329 °C, что считается маркером изменения минеральной структуры вследствие насыщения катионами Pb^{2+} и Cd^{2+} (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Изменение физических параметров цеолитового барьера в процессе эксплуатации/ Change in the physical parameters of the zeolite barrier during operation

Параметр / Parameter	Начальное значение / Initial value	Через 5 месяцев / After 5 months	Изменение / Change
Удельное сопротивление (центр), Ом·м / Specific resistance (center), Ohm•m	19,5	13,6	−30,3 %
pH фильтрата / pH of filtrate	7,2	6,0	−1,2
Плотность цеолитовой массы, г/см³ / Density of zeolite mass, g/cm³	1,54	1,69	+9,7 %
Температура эндоэффекта, °C / Temperature of endoeffect, °C	342	329	−13 °C

На основании совокупности экспериментальных данных можно выделить диапазоны эксплуатационных значений, выход за пределы которых указывает на потерю эффективности цеолитсодержащего барьера. При плотности массива выше ~1,70 г/см³ и удельном сопротивлении ниже 12 Ом·м фиксируется резкое снижение сорбционной активности и рост вероятности деградации барьерной функции. Эти критические значения являются ориентировочными и отражают специфику условий Западного Прикаспия, однако они могут служить эксплуатационным ориентиром при оценке ресурса барьера.

С помощью модели массового баланса и данных по расходу воды Q = 5,3 м³/сут, было оценено, что коэффициент эффективного использования сорбционного ресурса достигает 0,59, что указывает на высокую сорбционную отдачу без предварительной модификации. Полученные данные имеют прикладное значение для юга России, где функционируют крупные горнодобывающие кластеры (Северный Кавказ, Западный Прикаспий). В этих регионах высокая минерализация подземных вод и наличие тяжёлых металлов в стоках создают особую нагрузку на экосистемы. Проведённые эксперименты показали, что геофизические методы позволяют оперативно выявлять зоны перегрузки цеолитовых барьеров и прогнозировать их деградацию, что особенно важно для регионов с высокой динамикой водообмена.

В фазе пилотного мониторинга внедрена автоматизированная геофизическая станция, оснащённая четырьмя электродами и датчиками влажности, обеспечивающая измерения удельного сопротивления с погрешностью менее 2,8 % и влажности с точностью до 0,045 м³/м³. Ежечасная передача данных позволяла оперативно

выявлять перегруженные участки, что обеспечивает возможность своевременной регенерации или частичной замены барьера.

Синергия лабораторных и полевых данных продемонстрировала, что барьеры на основе клиноптилолита из цеолитсодержащих пород Западного Прикаспия эффективно функционируют при постоянной нагрузке до 6,2 м³/сут притока воды. Коэффициенты удаления тяжёлых металлов превышают 85%, а корреляционный анализ показал прямую зависимость между плотностью, сопротивлением и степенью насыщения: коэффициент корреляции $r = 0,85$ ($p < 0,01$) между сопротивлением и плотностью, и $r = -0,78$ между сопротивлением и pH, что позволяет прогнозировать насыщение и гидрохимические параметры без химических измерений.

Алгоритм корреляционного анализа, использованный в работе, включал несколько последовательных этапов: предварительную нормализацию данных, построение матрицы парных корреляций, проверку статистической значимости коэффициентов ($p < 0,01$) и интерпретацию полученных зависимостей в физико-химическом контексте. Данный подход не ограничивается только параметрами сопротивления, плотности и pH: он может быть расширен на иные характеристики процесса – коэффициент фильтрации, скорость водообмена, температуру и минерализацию среды. Это позволяет использовать предложенную методику для комплексного многофакторного анализа эксплуатационного состояния барьера.

Итоги исследования демонстрируют высокую эффективность и надёжность геофизической оценки состояния цеолитсодержащих барьеров в реальном масштабе. Геофизические методы обеспечивают своевременное выявление зон сниженной сорбционной активности и предполагаемых угроз деградации. Это, вместе с анализом фильтратов и муниципальными протоколами, создаёт надёжную основу для внедрения экологически устойчивой защиты водных ресурсов в горнопромышленных зонах России и Кавказа.

Сравнительный анализ полученных результатов

Результаты геофизических и аналитических исследований, проведённых на барьерных системах из цеолитсодержащих пород Западного Прикаспия, позволяют выделить ряд устойчивых закономерностей, свидетельствующих о высокой эффективности интеграции геофизических методов в систему оценки защитной функции этих барьеров. Одним из ключевых показателей, зафиксированных в ходе наблюдений, стало последовательное снижение удельного сопротивления в центральной части барьера – с 19,5 до 13,6 Ом·м за пятимесячный период эксплуатации, что указывает на прогрессирующее насыщение порового пространства ионами загрязнителей и рост электропроводности среды. При этом наблюдается устойчивый градиент между периферией (более 90 Ом·м) и ядром сорбции, что свидетельствует о направленной фильтрации и локализации потока в пределах активной зоны.

Значительное снижение значений pH фильтрата в зоне насыщения (с 7,2 до 6,0) подтверждает наличие интенсивного ионообменного процесса, сопровождаемого высвобождением ионов H^+ в результате сорбции тяжёлых металлов. При этом зафиксированное увеличение плотности цеолитовой массы с 1,54 до 1,69 г/см³ подтверждает накопление катионов в микропоровом пространстве минералов и частичную перестройку внутренней структуры. Снижение температуры эндотермического пика деструкции с 342 до 329 °C, зафиксированное при ДТА, интерпретируется как следствие ионной модификации структуры клиноптилолита, аналогично

наблюдаемой ранее в работах [Milyutin et al., 2020], где аналогичный сдвиг составил 11–12 °C при насыщении Pb2+ и Zn2+.

По сравнению с данными аналогичных исследований, в частности, проведённых в Центральной Армении (месторождение Лусажур), где эффективность удаления Pb2+ достигала 84,5%, в нашем случае она составила 92,3%, что на 7,8% выше. Это может быть связано как с лучшей пористой структурой кавказских цеолитов палеогенового комплекса, так и с большей концентрацией клиноптилолита (до 92%), обеспечивающей более высокую ионообменную ёмкость. Аналогичная тенденция прослеживается и по иону Cd2+, где эффективность удаления в исследованиях [Ускун, 2019] не превышала 81,2%, тогда как в наших опытах достигала 86,5% при меньших объёмах фильтрата, что указывает на потенциальную применимость этих барьеров даже в условиях высокой нагрузки.

Коэффициент эффективного использования сорбционного ресурса, равный 0,59, согласуется с результатами, представленными в исследовании [Хатькова и др., 2021], где при лабораторных условиях он варьировался от 0,52 до 0,61 в зависимости от морфологии и минералогического состава цеолита. Таким образом, применение барьеров, основанных на породах Западного Прикаспия, позволяет достигать сопоставимой сорбционной эффективности при более длительных периодах эксплуатации и в условиях более агрессивного химического состава вод.

Повышенная чувствительность электротомографии к изменениям влажности и солесодержания в теле барьера подтверждена высокой корреляцией между сопротивлением и плотностью ($r = 0,85$), а также между сопротивлением и pH ($r = –0,78$), что позволяет использовать этот метод не только как картографический инструмент, но и как индикатор насыщения сорбционной структуры. Полученные зависимости согласуются с выводами [Thakare, Jana, 2015], которые указывали на возможность непрямой оценки степени загрузки ионообменной структуры цеолита по геофизическим данным.

Сравнительный анализ георадарных профилей, полученных в ходе эксперимента, также выявил характерную закономерность: наибольшая потеря амплитуды отражённого сигнала (до 15 дБ) фиксировалась в тех же зонах, где наблюдалось максимальное снижение сопротивления и pH, что указывает на комплексный эффект насыщения. Эти данные подтверждают применимость георадара как метода локального зондирования зон перегрузки. При этом глубина отражающих горизонтов (0,45–0,95 м) соответствует верхнему слою интенсивной сорбции, что подтверждается также результатами пробоотбора.

Важным элементом исследования стала возможность автоматизированного мониторинга. Установленная система продемонстрировала высокую надёжность при длительном цикле наблюдений, фиксируя изменения с точностью до 2,8% по сопротивлению и 0,045 $м^3/м^3$ по влажности. Такой уровень чувствительности позволяет своевременно идентифицировать деградацию барьерной функции, что особенно актуально в условиях сезонных колебаний уровня грунтовых вод и переменной химической нагрузки. На основе анализа данных мониторинга были установлены суточные флуктуации сопротивления в пределах 3,6–4,1% в зависимости от интенсивности притока воды и температурных изменений, что в дальнейшем может лечь в основу прогностической модели деградации.

Дополнительно было выявлено, что при увеличении средней скорости фильтрации с 0,90 до 1,18 м/сут происходит не только увеличение объёма активной зоны

(с 31,2 до 35,7 м³), но и ускоренное насыщение сорбента, что требует более частой регенерации или перезагрузки материала. Это согласуется с расчетными данными по массовому балансу, согласно которым увеличение водообмена на 0,1 м/сут сокращает срок службы барьера в среднем на 18 суток при прочих равных условиях.

Важно подчеркнуть, что именно геофизическая составляющая исследования позволила количественно оценить эффективность барьеров и выявить закономерности изменения их состояния в реальном времени. В отличие от традиционных химико-аналитических методов, геофизический мониторинг обеспечивает непрерывность наблюдений и возможность прогнозирования деградации фильтрационных завес. Для горнопромышленных территорий юга России это открывает перспективу создания интегрированных систем экологической безопасности, основанных на комбинации локальных сорбционных технологий и дистанционного контроля.

Таким образом, результаты исследования позволяют сделать вывод о высокой согласованности геофизических и химико-аналитических индикаторов эффективности цеолитсодержащих барьеров. Совокупность данных подтверждает их применимость как в стационарных, так и в мобильных системах очистки стоков. Геофизические методы, прежде всего электротомография и георадар, показали высокую воспроизводимость и чувствительность к ключевым параметрам состояния барьера. Они могут быть использованы не только для диагностики, но и для оперативного прогнозирования эффективности барьерной функции в условиях динамического водообмена. Это открывает перспективы разработки интегрированных систем мониторинга и управления на основе данных геофизики в сочетании с химическими и термическими параметрами минералов.

Выводы

Проведённое комплексное исследование продемонстрировало высокую эффективность применения цеолитсодержащих барьеров, основанных на клиноптилолитовых породах Западного Прикаспия, для защиты водных ресурсов в условиях горнопромышленных территорий. Полученные данные подтвердили, что такие барьеры способны не только существенно снижать концентрации ионов тяжёлых металлов в инфильтрационных потоках, но и сохранять стабильные гидрогеохимические характеристики в течение длительного периода эксплуатации. Геофизические методы, применённые в рамках работы, показали высокую чувствительность к изменениям физико-химического состояния барьерной среды, что позволило неинвазивно и своевременно отслеживать процесс её насыщения загрязнителями и прогнозировать снижение сорбционной активности.

Результаты электротомографии и георадарных измерений продемонстрировали хорошее согласование с данными химического анализа и параметрами фильтрации, что указывает на возможность их интеграции в системы постоянного мониторинга. Было установлено, что на фоне повышения плотности цеолитовой массы и понижения pH фильтрата происходят изменения в удельном сопротивлении, отражающие увеличение объёма активной зоны сорбции. Высокий уровень корреляции между этими параметрами подтверждает, что геофизические индикаторы могут быть использованы как надёжные критерии оценки загрузки и эффективности барьерной системы.

Автоматизированная геофизическая станция, внедрённая на завершающем этапе, обеспечила постоянный сбор данных с высокой точностью и стабильностью, что позволило оперативно выявлять зоны перегрузки и потенциальной деградации

материала. Такой подход открывает возможности для создания интеллектуальных систем управления эксплуатацией барьеров, основанных на реальном времени.

Коэффициенты удаления тяжёлых металлов достигали 92,3 % (Pb^{2+}), 86,5 % (Cd^{2+}) и 77,8 % (Zn^{2+}), при этом коэффициент эффективного использования сорбционного ресурса составил 0,59. Объём активной зоны, участвующей в сорбции, составлял около 32 % от общего объёма барьера. Температурные сдвиги эндоэффектов и рост плотности цеолита подтвердили структурные изменения вследствие накопления загрязнителей. Удельное сопротивление снижалось на 30 % в центральной зоне, а показатели pH уменьшались на 1,2 единицы, что согласуется с процессом ионного обмена. Важно отметить универсальность предложенной методики. Благодаря адаптивности параметров геофизического мониторинга (глубина зондирования, частотный диапазон георадара, плотность электродной сетки) разработанный подход может быть масштабирован и применён для оценки эффективности цеолитсодержащих барьеров в различных гидрогеологических условиях – от Северного Кавказа и Западного Прикаспия до Урала и Забайкалья. Это делает методику перспективной для широкого внедрения в систему экологической безопасности горнопромышленных территорий.

Таким образом, исследование показало, что использование цеолитсодержащих барьеров на основе клиноптилолита Западного Прикаспия обеспечивает эффективное снижение концентрации тяжёлых металлов в инфильтрационных потоках: Pb^{2+} – до 92,3%, Cd^{2+} – до 86,5%, Zn^{2+} – до 77,8%. Геофизические методы (электротомография и георадар) продемонстрировали высокую чувствительность к изменению состояния барьера и позволили прогнозировать его деградацию по снижению удельного сопротивления, изменению pH и росту плотности цеолитовой массы. Сочетание геофизического мониторинга и химико-аналитических измерений обеспечивает комплексную систему диагностики, актуальную для условий юга России, где экологическая устойчивость горнопромышленных территорий напрямую зависит от эффективности локальных барьерных технологий.

Литература

1. Голик В.И., Бурдзиева О.Г. К концепции разработки месторождений Садонского рудного пояса. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 3. – С. 180–192. DOI: 10.46698/VNC.2023.26.85.014.

2. Закруткин В.Е., Гибков Е.В., Решетняк В.Н. Химический состав и некоторые особенности минералообразования в донных отложениях рек бассейна Северского Донца (в пределах Ростовской области). // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 1. –С. 19–34. DOI: 10.46698/VNC.2022.20.40.002.

3. Закруткин В.Е., Решетняк В.Н. Распределение железа и его минералов в речных отложениях Восточного Донбасса. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 4. – С. 85–98. DOI: 10.46698/VNC.2023.89.38.007.

4. Мирзоева Н.Ю., Проскурнин В.Ю., Кейта И., Диалло А.И.П., Горбунов Р.В., Коротков А.А., Горбунова Т.Ю., Вахрушев М.О., Терещенко Н.Н. Влияет ли добыча полезных ископаемых открытым способом на загрязнение речных экосистем тяжелыми металлами и природным радионуклидом Po-210 (исследования на примере реки Фатала, Гвинейская Республика)? // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 4. – С. 206–217. DOI: 10.46698/VNC.2024.37.37.017.

5. Нуреев Р.Р., Пашкевич М.А., Харько П.А. Оценка воздействия отходов обогащения медных руд на поверхностные и подземные воды. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 4. – С. 169–179. DOI: 10.46698/VNC.2022.37.95.013.

6. Павленко Ю.В. Цеолитовые месторождения Восточного Забайкалья. – Чита: ЧитГУ, 2000. – 101 с.

7. Реутова Н.В., Реутова Т.В., Дреева Ф.Р. Природное и антропогенное загрязнение микроэлементами верховий бассейна р. Ардон. // Геология и геофизика Юга России. – 2025. – Т. 15. № 2. – С. 219–230. DOI: 10.46698/VNC.2025.46.62.001.

8. Реутова Н.В., Реутова Т.В., Дреева Ф.Р., Хутуев А.М. Микроэлементный состав поверхностных вод бассейна реки Малка и геохимические особенности региона. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. № 3. – С. 172–184. DOI: 10.46698/VNC.2021.20.60.014.

9. Ускун С. Активация цеолитов Малатья Хекимхан механохимическим методом и использование в адсорбции тяжелых металлов: дис. ... магистра наук. – Малатья: Университет Иноню, 2019. – 102 с.

10. Хатькова А.Н., Размахнин К.К., Шумилова Л.В., Черкасов В.Г., Размахнина И.Б. Обогащение и модификация свойств цеолитсодержащих пород с целью расширения областей их практического применения. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 3-2. – С. 153–163. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_32_0_153.

11. Черкашин В.И., Заалишвили В.Б., Мамаев С.А., Атаев З.В., Ибаев Ж.Г., Сулейманов В.К. Геоэкологическое состояние верховьев бассейна реки Аварское Койсу. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 4. – pp. 100–112. DOI: 10.46698/VNC.2024.77.35.009.

12. Юсупов А.Р., Мамаев С.А., Юсупов З.А., Мамаев А.С. Цеолитсодержащие кремнистые породы Дагестана как добавка для получения керамической волластонитсодержащей облицовочной плитки. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 4. – С.142–152. DOI: 10.46698/VNC.2022.71.95.011.

13. Юсупов А.Р., Мамаев С.А., Атаев З.В. Адсорбционные свойства цеолитсодержащих кремнисто-карбонатных пород Дагестана. // Геология и геофизика Юга России. – 2025. – Т. 15. № 1. – С. 141–150. DOI: 10.46698/VNC.2025.31.49.012.

14. Юсупов А.Р., Мамаев С.А., Юсупов З.А., Мамаев А.С. Особенности цеолитсодержащих кремнисто-карбонатных пород Дагестана. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 4. – С. 99–107. DOI: 10.46698/VNC.2023.55.96.008.

15. Юсупов Т.С. Методы диагностики и количественного определения содержания цеолитов в горных породах. – Новосибирск: ИГГ СО АН СССР, 1985. – С. 161–168.

16. Alam R., Ahmed Z., Howladar M.F. Evaluation of heavy metal contamination in water, soil and plant around the open landfill site Mogla Bazar in Sylhet, Bangladesh. // Groundwater for Sustainable Development. – 2020. – Vol. 10. Art. No. 100311.

17. Alpat S.K., Ozbayrak O., Alpat S., Akcay M. The adsorption kinetics and removal of lead (II) ions from aqueous solutions with natural zeolite. // Journal of Hazardous Materials. – 2008. – Vol. 153. No. 1-2. – pp. 753–759. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.09.048.

18. Inglezakis V.J., Grigoropoulou H.P. Effects of operating conditions on the removal of heavy metals by zeolite in fixed bed reactors. // Journal of Hazardous Materials. – 2004. – Vol. B112. No. 1-2. – pp. 37–43. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2004.04.008.

19. Kumar R., Kaushik C.P., Kaushik A. Sorption of heavy metals on natural and modified Indian zeolites. // Environmental Monitoring and Assessment. – 2012. – Vol. 185. No. 4. – pp. 3339–3347. DOI: 10.1007/s10661-012-2788-7.

20. Li H., Watson J., Zhang Y., Lu H., Liu Z. Environment-enhancing process for algal wastewater treatment, heavy metal control and hydrothermal biofuel production: A critical review. // Bioresource Technology. – 2020. – Vol. 298. Art. No. 122421.

21. Lin L., Lei Z., Wang L., Liu X., Zhang Y., Wan C., Lee D.J. Adsorption mechanisms of high-arsenic wastewater by natural zeolite. // Environmental Science and Pollution Research. – 2014. – Vol. 21. No. 6. – pp. 4408–4417. DOI: 10.1007/s11356-013-2386-2.

22. Malekian R., Abedi-Koupai J., Eslamian S. Effectiveness of natural zeolite in removing salinity and heavy metals from urban runoff in laboratory scale. // Journal of Environmental Management. – 2011. – Vol. 92. No. 3. – pp. 837–845. DOI: 10.1016/j.jenvman.2010.10.002.

23. Meshko V., Markovska L., Mincheva M., Rodrigues A.E. Adsorption of basic dyes on granular acivated carbon and natural zeolite. // Water Research. – 2001. – Vol. 35. No. 14. – pp. 3357–3366. DOI: 10.1016/S0043-1354(01)00056-2.

24. Milyutin V.V., Razmakhnin K.K., Khatkova A.N., Nekrasova N.A. Natural Zeolites of Eastern Transbaikalia in Technologies for Mining Enterprises Wastewater Treatment. // Journal of Environmental Research, Engineering and Management. – 2020. – Vol. 76. No. 3. – pp. 62–70.

25. Motsi T., Rowson N.A., Simmons M.J. Adsorption of heavy metals from acid mine drainage by natural zeolite. // International Journal of Mineral Processing. – 2009. – Vol. 92. No. 1–2. – pp. 42–48. DOI: 10.1016/j.minpro.2009.03.001.

26. Oren A.H., Kaya A. Factors affecting adsorption characteristics of Zn2+ on two natural zeolites. // Journal of Hazardous Materials. – 2006. – Vol. 131. No. 1-3. – pp. 59–65. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2005.09.022.

27. Razmakhnin K.K., Khatkova A.N. Role of mineralogical and technological evaluation in development of processing technologies for zeolite-containing rocks. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 262. Art. No. 012056. DOI: 10.1088/1755-1315/262/1/012056.

28. Sprynskyy M., Buszewski B., Terzyk A.P., Namiesnik J. Study of the selection mechanism of heavy metal (Pb2+, Cu2+, Ni2+, and Cd2+) adsorption on clinoptilolite. // Journal of Colloid and Interface Science. – 2006. – Vol. 304. No. 1. – pp. 21–28. DOI: 10.1016/j.jcis.2006.08.003.

29. Thakare Y.N., Jana A.K. Performance of high density ion exchange resin (INDION225H) for removal of Cu(II) from wastewater. // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2015. – Vol. 3. No. 2. – pp. 1393–1398.

30. Wang S., Peng Y. Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment. // Chemical Engineering Journal. – 2010. – Vol. 156. No. 1. – pp. 11–24. DOI: 10.1016/j.cej.2009.10.029.

31. Wang Y., Yu Y., Li H., Shen C. Comparison study of phosphorus adsorption on different waste solids: Fly ash, red mud and ferric–alum water treatment residues. // International Journal of Environmental Science. – 2016. – Vol. 50. – pp. 79–86.

References

1. Golik V.I., Burdzieva O.G. Geophysical monitoring of Sadon field development technology. Geology and Geophysics of Russian South. 2023. Vol. 13. No. 3. pp. 180–192. DOI: 10.46698/VNC.2023.26.85.014. (In Russ.)

2. Zakrutkin V.E., Gibkov E.V., Reshetnyak V.N. Chemical composition and certain features of mineral formation in the river sediments of the Seversky Donets River basin (within the Rostov region). Geology and Geophysics of Russian South. 2022. Vol. 12. No. 1. pp. 19–34. DOI: 10.46698/VNC.2022.20.40.002. (In Russ.)

3. Zakrutkin V.E., Reshetnyak V.N. Distribution of iron and its minerals in river sediments of Eastern Donbass. Geology and Geophysics of Russian South. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 85–98. DOI: 10.46698/VNC.2023.89.38.007. (In Russ.)

4. Mirzoeva N.Yu., Proskurnin V.Yu., Keita I., Diallo A.I.P., Gorbunov R.V., Korotkov A.A., Gorbunova T.Yu., Vakhrushev M.O., Tereshchenko N.N. Does open-pit mining affect the pollution of river ecosystems with heavy metals and the natural radionuclide Po-210 (case study of the Fatala River, Republic of Guinea)? Geology and Geophysics of Russian South. 2024. Vol. 14. No. 4. pp. 206–217. DOI: 10.46698/VNC.2024.37.37.017. (In Russ.)

5. Nureev R.R., Pashkevich M.A., Kharko P.A. Assessment of the impact of Copper Ore Enrichment Waste on Surface and Groundwater. Geology and Geophysics of Russian South. 2022. Vol. 12. No. 4. pp. 169–179. DOI: 10.46698/VNC.2022.37.95.013. (In Russ.)

6. Pavlenko Yu.V. Zeolite deposits of Eastern Transbaikalia. Chita. Chita State University. 2000. 101 p. (In Russ.)

7. Reutova N.V., Reutova T.V., Dreeva F.R. Natural and anthropogenic microelement pollution of the upper reaches of the Ardon River basin. Geology and Geophysics of Russian South. 2025. Vol. 15. No. 2. pp. 219–230. DOI: 10.46698/VNC.2025.46.62.001. (In Russ.)

8. Reutova N.V., Reutova T.V., Dreeva F.R., Khutuev A.M. Microelements in the surface waters of the Malka River basin and geochemical features of the region. Geology and Geophysics of Russian South. 2021. Vol. 11 No.3. pp. 172–184. DOI: 10.46698/VNC.2021.20.60.014. (In Russ.)

9. Uskun S. Activation of Malatya Hekimkhan zeolites by the mechanochemical method and use in the adsorption of heavy metals. The dissertation of the Master of Sciences. Malatya. Inonyu University. 2019. 102 p. (In Russ.)

10. Khatkova I.N., Razmakhnin K.K., Shumilova L.V., Cherkasov V.G., Razmakhnina I.B. Beneficiation and modification of properties of zeolite-bearing rocks toward expansion of their application range. Mining Information and Analytical Bulletin. 2021. No. 3-2. pp. 153–163. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_32_0_153. (In Russ.)

11. Cherkashin V.I., Zaalishvili V.B., Mamaev S.A., Ataev Z.V., Ibaev Zh.G., Suleimanov V.K. Geoecological state of the upper reaches of the Avarskoye Koisu river basin. Geology and Geophysics of Russian South. 2024. Vol. 14. No. 4. pp. 100–112. DOI: 10.46698/VNC.2024.77.35.009.

12. Yusupov A.R., Mamaev S.A., Yusupov Z.A., Mamaev A.S. Zeolite-containing siliceous rocks of Dagestan as an additive for the production of ceramic wollastonite-containing facing tiles. Geology and Geophysics of Russian South. 2022. Vol. 12. No. 4. pp. 142–152. DOI:10.46698/VNC.2022.71.95.011.

13. Yusupov A.R., Mamaev S.A., Ataev Z.V. Adsorption properties of zeolite-containing siliceous-carbonate rocks of Dagestan. Geology and Geophysics of Russian South. 2025. Vol. 15. No. 1. pp. 141–150. DOI: 10.46698/VNC.2025.31.49.012.

14. Yusupov A.R., Mamaev S.A., Yusupov Z.A., Mamaev A.S., Features of zeolite-containing siliceous-carbonate rocks of Dagestan. Geology and Geophysics of Russian South. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 99–107. DOI: 10.46698/VNC.2023.55.96.008.

15. Yusupov T.S. Methods of diagnostics and quantitative determination of zeolite content in rocks. Novosibirsk. IGG SB of the USSR Academy of Sciences. 1985. pp. 161–168. (In Russ.)

16. Alam R., Ahmed Z., Howladar M.F. Evaluation of heavy metal contamination in water, soil and plant around the open landfill site Mogla Bazar in Sylhet, Bangladesh. Groundwater for Sustainable Development. 2020. Vol. 10. Art. No. 100311.

17. Alpat S.K., Ozbayrak O., Alpat S., Akcay M. The adsorption kinetics and removal of lead(II) ions from aqueous solutions with natural zeolite. Journal of Hazardous Materials. 2008. Vol. 153. No. 1-2. pp. 753–759. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.09.048.

18. Inglezakis V.J., Grigoropoulou H.P. Effects of operating conditions on the removal of heavy metals by zeolite in fixed bed reactors. Journal of Hazardous Materials. 2004. Vol. B112. No. 1-2. pp. 37–43. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2004.04.008.

19. Kumar R., Kaushik C.P., Kaushik A. Sorption of heavy metals on natural and modified Indian zeolites. Environmental Monitoring and Assessment. 2012. Vol. 185. No. 4. pp. 3339–3347. DOI: 10.1007/s10661-012-2788-7.

20. Li H., Watson J., Zhang Y., Lu H., Liu Z. Environment-enhancing process for algal wastewater treatment, heavy metal control and hydrothermal biofuel production: A critical review. Bioresource Technology. 2020. Vol. 298. Art. No. 122421.

21. Lin L., Lei Z., Wang L., Liu X., Zhang Y., Wan C., Lee D.J. Adsorption mechanisms of high-arsenic wastewater by natural zeolite. Environmental Science and Pollution Research. 2014. Vol. 21. No. 6. pp. 4408–4417. DOI: 10.1007/s11356-013-2386-2.

22. Malekian R., Abedi-Koupai J., Eslamian S. Effectiveness of natural zeolite in removing salinity and heavy metals from urban runoff in laboratory scale. Journal of Environmental Management. 2011. Vol. 92. No. 3. pp. 837–845. DOI: 10.1016/j.jenvman.2010.10.002.

23. Meshko V., Markovska L., Mincheva M., Rodrigues A.E. Adsorption of basic dyes on granular acivated carbon and natural zeolite. Water Research. 2001. Vol. 35. No. 14. pp. 3357–3366. DOI: 10.1016/S0043-1354(01)00056-2.

24. Milyutin V.V., Razmakhnin K.K., Khatkova A.N., Nekrasova N.A. Natural Zeolites of Eastern Transbaikalia in Technologies for Mining Enterprises Wastewater Treatment. Journal of Environmental Research, Engineering and Management. 2020. Vol. 76. No. 3. pp. 62–70.

25. Motsi T., Rowson N.A., Simmons M.J. Adsorption of heavy metals from acid mine drainage by natural zeolite. International Journal of Mineral Processing. 2009. Vol. 92. No. 1–2. pp. 42–48. DOI: 10.1016/j.minpro.2009.03.001.

26. Oren A.H., Kaya A. Factors affecting adsorption characteristics of Zn2+ on two natural zeolites. Journal of Hazardous Materials. 2006. Vol. 131. No. 1-3. pp. 59–65. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2005.09.022.

27. Razmakhnin K.K., Khatkova A.N. Role of mineralogical and technological evaluation in development of processing technologies for zeolite-containing rocks. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 262. Art. No. 012056. DOI: 10.1088/1755-1315/262/1/012056.

28. Sprynskyy M., Buszewski B., Terzyk A.P., Namiesnik J. Study of the selection mechanism of heavy metal (Pb2+, Cu2+, Ni2+, and Cd2+) adsorption on clinoptilolite. Journal of Colloid and Interface Science. 2006. Vol. 304. No. 1. pp. 21–28. DOI: 10.1016/j.jcis.2006.08.003.

29. Thakare Y.N., Jana A.K. Performance of high density ion exchange resin (INDION225H) for removal of Cu (II) from wastewater. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2015. Vol. 3. No. 2. pp. 1393–1398.

30. Wang S., Peng Y. Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment. Chemical Engineering Journal. 2010. Vol. 156. No. 1. pp. 11–24. DOI: 10.1016/j.cej.2009.10.029.

31. Wang Y., Yu Y., Li H., Shen C. Comparison study of phosphorus adsorption on different waste solids: Fly ash, red mud and ferric–alum water treatment residues. International Journal of Environmental Science. 2016. Vol. 50. pp. 79–86.