

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО ВОДОПРИТОКА В КАРЬЕР КАЛЬМАКЫР К МОМЕНТУ ЗАВЕРШЕНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ И ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Х.К. Халкулова¹, М.М. Пирназаров², Н.М. Ахмедова³, С.К. Кахаров³, Х.С. Ходжаев³

¹ Университет геологических наук ГУ «Институт минеральных ресурсов»,
Ташкент, Республика Узбекистан, e-mail: Xayotxonxalkulova@gmail.com

² Университет геологических наук, Ташкент, Республика Узбекистан

³ Филиал НИТУ МИСИС в г. Алмалык, Алмалык, Республика Узбекистан

Аннотация: Приведены результаты прогнозной оценки естественных водопритоков в объединенный карьер золото-меднопорфирового месторождения «Кальмакыр» на завершающей стадии отработки и исследования химического состава подземных и поверхностных вод в пределах зоны влияния горных работ. Месторождение разрабатывается открытым способом в сложных гидрогеологических условиях, обусловленных тектонической нарушенностью и развитием трещинных вод в верхней части массива. Прогноз водопритоков выполнен с учетом поступления атмосферных осадков (дождевые, ливневые и талые воды) и подземных трещинных вод. Расчеты атмосферных притоков проведены в соответствии с действующими нормативными документами с дифференциацией по обеспеченности и сезонам года. Для оценки притоков подземных вод разработана и откалибрована модель аналитических элементов; калибровка выполнена по фактическим межженным притокам. Получено значение эффективного коэффициента фильтрации коренных пород 0,01 м/сут. Установлено, что основная часть водопроводимости сосредоточена в верхних 400 м разреза, что ограничивает увеличение притоков при дальнейшем углублении карьера. Определены прогнозные величины притоков по расчетным участкам и суммарный водоприток на конец отработки. По результатам гидрохимических исследований установлено, что подземные и карьерные воды характеризуются преимущественно сульфатным составом и повышенной минерализацией; в отдельных пробах выявлены превышения предельно допустимых концентраций по сульфатам, нитратам и ряду микроэлементов. Показана связь повышенных концентраций нитратов с применением взрывчатых веществ на основе нитрата аммония. Полученные результаты могут быть использованы при обосновании параметров систем водоотлива, водопонижения и природоохранных мероприятий на завершающей стадии разработки карьера.

Ключевые слова: карьер, водоприток, гидрогеологическое моделирование, атмосферные осадки, подземные воды, химический состав, коэффициент фильтрации, водоотлив.

Для цитирования: Халкулова Х. К., Пирназаров М. М., Ахмедова Н. М., Кахаров С. К., Ходжаев Х. С. Прогнозирование естественного водопритока в карьер Кальмакыр к моменту завершения горных работ и исследование химического состава поверхностных и подземных вод // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 10-1. – С. 124–139. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_101_0_124.

Forecasting the natural water inflow into the kalmakyr quarry by the time of completion of mining works and studying the chemical composition of surface and groundwater

X.K. Xalkulova¹, M.M. Pirnazarov², N.M. Akhmedova³, S.K. Kakharov³, Kh.S. Khodzhaev³

¹ University of Geological Sciences GU «Institute of Mineral Resources», Tashkent, Republic of Uzbekistan, e-mail: Xayotxonxalkulova@gmail.com

² University of Geological Sciences, Tashkent, Republic of Uzbekistan,

³ Almalyk Branch of NUST MISIS, Almalyk, Republic of Uzbekistan

Abstract: This paper presents the results of a predictive assessment of natural water inflows into the Kalmakyr porphyry gold-copper deposit at the final stage of development and a study of the chemical composition of groundwater and surface water within the mining zone. The deposit is being mined using an open-pit method in complex hydrogeological conditions due to tectonic disturbances and the development of fissure waters in the upper part of the massif. The water inflow forecast was prepared taking into account precipitation (rain, stormwater, and meltwater) and groundwater from fissures. Atmospheric inflow calculations were conducted in accordance with current regulations, with differentiation based on occurrence and season. To estimate groundwater inflows, a model of analytical elements was developed and calibrated; the calibration was performed using actual low-water inflows. The obtained effective bedrock filtration coefficient was 0.01 m/day. It was established that the majority of water conductivity is concentrated in the upper 400 meters of the open pit, limiting the increase in inflows with further quarry deepening. Projected inflow values for the calculated sections and the total water inflow at the end of mining were determined. Hydrochemical studies revealed that groundwater and quarry water are characterized primarily by sulfate composition and high mineralization; some samples revealed exceedances of maximum permissible concentrations of sulfates, nitrates, and several trace elements. A correlation was demonstrated between elevated nitrate concentrations and the use of ammonium nitrate-based explosives. These results can be used to justify the design of drainage systems, dewatering systems, and environmental protection measures during the final stages of quarry development.

Key words: quarry, water inflow, hydrogeological modeling, precipitation, groundwater, chemical composition, filtration coefficient, water drainage

For citation: Xalkulova X. K., Pirnazarov M. M., Akhmedova N. M., Kakharov S. K., Khodzhaev Kh.S. Forecasting the natural water inflow into the kalmakyr quarry by the time of completion of mining works and studying the chemical composition of surface and groundwater. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(10-1):124-139. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_101_0_124.

Введение

Месторождение золото-меднопорфирового типа Кальмакыр, являющееся одним из крупнейших объектов Республики Узбекистан, функционирует в пределах промышленной зоны Алмалыкского горно-металлургического комбината на территории Ахангаранского района Ташкентской области.

В географическом отношении месторождение находится на северном склоне Кураминского хребта, в 1 км к юго-востоку от города Алмалыка, в пределах низкой надпойменной террасы левобережной части долины реки Ахангаран [1].

Месторождение по масштабам запасов меди относится к разряду уникаль-

ных (более 10 млн т) и имеет комплексный характер руд, пригодных для извлечения попутных полезных компонентов, таких как золото, серебро, молибден, рений, селен, теллур, осмий, палладий, сера и др. Основными минералами-концентраторами и носителями металлов являются среднетемпературные сульфидные минералы (халькопирит, борнит, пирит, галенит, сфалерит и др.), а также молибденит, относящийся к ранней высокотемпературной гидротермальной стадии рудообразования. Руды в основном существенно-сульфидные золотосодержащие, локализованы в виде крупного штокверка во фронтальных эндоконтактовых частях метасоматически преобразованных (березитизированных и гумбейтизированных) позднегерцинских интрузий кварцевых монзонит-порфиров и сиенито-диоритовых порфиров [2].

Перед началом разработки месторождения проводится исследование его геологического, гидрогеологического и инженерно-геологического состояния [3]. Гидрологическое изучение района месторождения начато в 1932 г. в долине реки Алмалык для целей хозяйственно-питьевого водоснабжения геологических разведочных партий и планируемого горнодобывающего предприятия. Для геологоразведочных партий в качестве источников водоснабжения были выявлены родники долины реки Алмалык.

По результатам выполненных исследований был составлен отчет по гидрогеологическим и инженерно-геологическим условиям всего Алмалыкского рудного узла в пределах контура объединенного карьера месторождений Кальмакыр.

В период с 1981 по 1983 гг. на территории Алмалыкского рудного района проводился комплекс гидрогеологических и инженерно-геологических изысканий, направленных на уточнение ранее

полученных данных. Программа исследований для детального изучения узла включала выполнение следующих видов работ:

- фильтрационные испытания и мониторинг гидрогеологического режима [4–7];
- анализ химического и качественного состава подземных и поверхностных водных ресурсов [8–10];
- проведение специализированных обследований бортов карьера «Кальмакыр»;
- прогнозирование влияния экзогенных процессов на безопасность и эффективность ведения горных работ [11];
- оценка степени трещиноватости и физико-механических параметров горных пород [12];
- выполнение геофизических (каротажных) исследований в проектных скважинах [13, 14].

Опытно-фильтрационные работы проводились для получения гидрогеологических параметров водоносных зон на различных участках Алмалыкского рудного узла — Карабулак, Центральный, Северо-Западный Балыкты, Кальмакыр. Выполнялось желонирование 20 скважин, из них 3 скважины на участке Карабулак, 7 скважин на участке Северо-Западный Балыкты, 3 скважины на месторождении Кальмакыр, 7 скважин на Центральном участке месторождения Ешлик, с последующим наблюдением за восстановлением уровня. Для опробования использовались в основном геологоразведочные и инженерно-геологические скважины. Откачка воды из скважин проводилась желонкой с замерами динамического уровня. По результатам опробования были проведены расчеты коэффициентов фильтрации аналитическим методом и по графикам временного прослеживания.

Режимные наблюдения представляли собой замеры уровней воды в сква-

жинах, расходов родников, поверхностных водотоков и водоотливов карьеров. Замеры уровней проводились в 40 скважинах в разное время, постоянно в режиме находились 12–15 скважин, поскольку часть скважин периодически выходили из строя. Замеры расходов родников проводились в двух точках. Расходы поверхностных родников измерялись вертушкой по гидростам № 1, 3, 4, 5, 9. Расходы карьерных водоотливов также измерялись вертушкой на месте сброса в речную сеть. Частота замеров по всем водопунктам составляла 3 раза в месяц. Результаты режимных наблюдений заносились в журналы, строились графики зависимости расходов от времени.

В процессе режимных наблюдений осуществлялся отбор проб воды из всех водопунктов на химический анализ. Химические анализы выполнялись в Центральной химической лаборатории Министерства геологии УзССР — общий химический анализ, определение тяжелых элементов, урана, радия и стронция.

В настоящее время осуществляется систематический мониторинг объемов водопритока в карьерную выемку месторождения Кальмакыр. Основное внимание в рамках данной работы уделено анализу закономерностей развития экзогенных геологических процессов и оценке их потенциального воздействия на эффективность добычи.

Реализация поставленных задач обеспечивалась через проведение специализированных полевых маршрутов, нацеленных на идентификацию зон зарождения селевых потоков и определение траекторий их распространения. В процессе детальной разведки очагов были получены количественные параметры состава и физико-механических свойств селеформирующих породных массивов. Заключительный этап включал каме-

ральную обработку данных для проектирования эффективных защитных инженерных мероприятий.

Для сбора полевых данных для Алмалыкского ГМК полевые гидрогеологические и инженерно-геологические работы проводились в 2023–2025 гг. Основное внимание при сборе гидрогеологических данных уделялось информации, относящейся к гидрогеологии карьера и управлению карьерными водами. В рамках программы проводилось бурение 16 гидрогеологических и 42 инженерно-геологических скважин, а также использовались существующие скважины на участке. Для большинства скважин проводились гидрогеологические испытания с размещением скважинных установок, выполнялся геофизический каротаж и проводился отбор проб для оценки качества вод [3].

Прогнозная оценка естественных водопритоков в карьер на конец отработки

Действующий карьер Кальмакыр расположен на водоразделах рек Алмалыксай и Накпайсай, на северном склоне Кураминского хребта в зоне пересечения тектонических нарушений, наиболее крупными из которых являются Карабулакский, Бургундинский и Кальмакырский (рис. 1). В границах месторождения Кальмакыр мощность аллювиального водоносного горизонта варьируется в пределах 18–24 м. Подземные воды, приуроченные к русловым отложениям, характеризуются гидрокарбонатным кальциево-натриевым составом. Показатели их минерализации составляют от 0,3 до 0,8 г/дм³, при этом общая жесткость воды фиксируется на уровне 7–8 мг-экв/дм³. Источниками обводнения карьера «Кальмакыр» являются атмосферные осадки и подземные воды [1].

На основании морфометрических и горнотехнических показателей общее

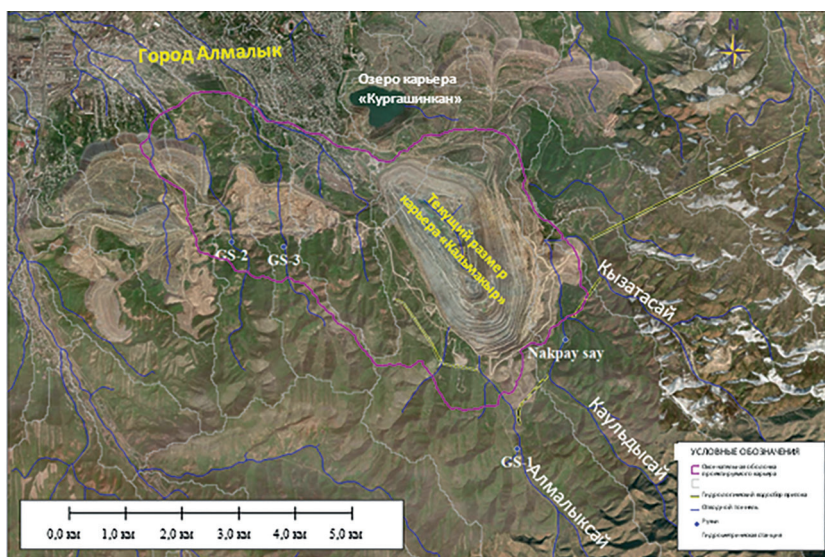


Рис. 1. Поверхностные водные объекты на карьере и вокруг него

Fig. 1. Surface water bodies in and around the quarry

поле карьера дифференцировано на три расчетных участка (участки 1, 2, 3) (рис. 2).

Проектные параметры карьера на конец отработки приведены в табл. 1.

При открытой разработке скальных массивов, перекрытых маломощным

чехлом осадочных пород, применение буровзрывных технологий неизбежно трансформирует естественный гидрогеологический режим [15]. Это провоцирует возникновение ряда инженерно-геологических проблем, связанных, в первую очередь, с сезонным характером обводнения карьера: интенсивным притоком талых вод в весенний период и дождевым стоком в летние месяцы.

Дождевые воды

При проектировании карьерного водоотлива приток дождевых вод расчетной интенсивности дождя принят на уровне сооружений обычного уровня ответственности:

- для расчета насосов — равным 0,33 года;
- для расчета зумпфов — равным 5 годам.

Суточный приток дождевых вод в карьер Q_d м³/сут определен по формуле

$$Q_5 = 10 \cdot k \cdot \psi \cdot H_5 \cdot F.$$

Для оценки суточного объема дождевого стока (Q_d , м³/сут), поступающего в

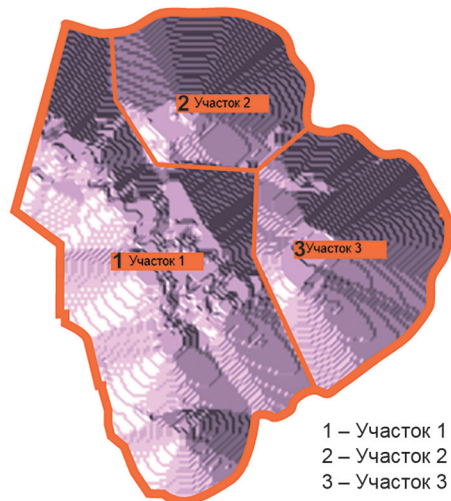


Рис. 2. План карьера на конец отработки с разделением на участки

Fig. 2. Quarry plan at the end of mining with division into sections

Таблица 1

Параметры карьера на конец отработки
Quarry parameters at the end of mining

Наименование показателей	Ед. изм.	Участок 1	Участок 2	Участок 3
Минимальная отметка дна карьера	м	2	32	92
Максимальная отметка по поверхности	м	872	770	901
Минимальная отметка по поверхности	м	715	685	707
Глубина карьера с учетом нагорной части	м	870	738	809
Глубина карьера по замкнутому контуру	м	713	653	615
Средняя глубина карьера	м	791,5	695,5	712
Площадь карьера по поверхности	тыс. м ²	6576	2317	3283
Площадь карьера по дну	тыс. м ²	1280	40	181
Ширина карьера по поверхности	м	2000	1600	1700
Длина карьера по поверхности	м	4600	1800	2400
Ширина карьера по дну	м	600	100	350
Длина карьера по дну	м	2300	100	600

карьерную выемку, использовалась расчетная зависимость, учитывающая морфометрические и климатические параметры региона.

$$Q_{0,33} = 10 \cdot k \cdot \psi \cdot H_{0,33} \cdot F.$$

Расчет выполнен с учетом следующих показателей: k — коэффициент пространственной изменчивости осадков. Для карьеров, чья площадь превышает 500 га, значение принимается равным 0,95, в иных случаях — 1; ψ — безразмерный коэффициент суточного стока, принятый на уровне 0,15; H_5 — расчетный слой атмосферных осадков при вероятности превышения $P = 5$ лет (для условий Ташкента составляет 35 мм, что соответствует 20% обеспеченности); $H_{0,33}$ — слой осадков при повторяемости $P = 0,33$ года; F — суммарная водосборная площадь исследуемых участков (га).

Величина слоя осадков $H_{0,33}$ определена из зависимости $H_{0,33} = 0,27 \cdot H_5$.

Ливневые воды

Суточный приток ливневых вод определен по формуле

$Q_n = 10 \cdot k \cdot \psi \cdot H_n \cdot F$,
где H_n — максимальный суточный приток ливневых вод, мм.

При определении экстремальных значений суточного притока ливневых стоков использовались нормативные показатели согласно КМК 2.01.01-94 (для метеостанции Ангрен) и сведения из научно-прикладного справочника по климату Узбекской ССР.

В расчет приняты следующие параметры интенсивности осадков:

$H_{100} = 60$ мм — максимальный суточный слой осадков при однопроцентной обеспеченности (вероятность повторения один раз в столетие); $H_{10} = 40$ мм — значение десятипроцентной обеспеченности (периодичностью один раз в 10 лет)

Талые воды

Для расчета суточного объема талого стока (Q_T), поступающего с водосборной площади карьера при 95% обеспеченности, применялась математическая зависимость

$$Q_T = 10 \cdot F \cdot h_c \cdot \psi_m \cdot k_y \cdot a.$$

Итоговое значение формировалось с учетом следующих расчетных параметров: h_c — величина слоя талых вод за 10-часовой дневной период. В расчетах использовались показатели $h_{c0,33} = 3$ мм (для 95% обеспеченности) и $h_{c5} = 16$ мм (для 20% обеспеченности); ψ_m — коэффициент, характеризующий интенсивность поверхностного стока талых вод, принятый на уровне 0,5; k_y — понижающий коэффициент (0,5), учитывающий частичное удаление снежного покрова (вывоз снега) с территории; a — поправочный коэффициент (0,8), отражающий пространственно-временную неравномерность процессов снеготаяния; F — площадь водосбора.

В соответствии с действующим климатическим районированием территории республики исследуемый объект по величине среднегогодового слоя талых вод классифицируется как относящийся к IV климатическому району. Результаты, полученные при исследовании водопритоков в карьер «Кальмакыр» за счет атмосферных осадков, приведены в табл. 2.

В работе исследованы водопритоки в карьер «Кальмакыр» за счет подземных вод (трещинных вод).

С целью прогноза водопритоков в карьер за счет подземных вод на конец отработки создана модель аналитических элементов с использованием программы ANSDIMAT.

Для построения модели использованы следующие характеристики: границы модели, мощность коренных пород, фильтрационные параметры, величина инфильтрации.

Внешняя граница модели, реки, а также разломы задавались с помощью пакета «Линейные границы». Граничные условия внешней границы заданы как барьер — стена заданной проницаемости и толщины. Реки реализованы на модели как граничное условие I рода

($H = \text{const}$). Разломы заданы как трещины — заданной проницаемости и высоты. Площадные водоемы задавались с помощью пакета «Полигоны».

Результаты исследований на карьере «Кальмакыр» показывают, что фильтрационные свойства коренных пород с глубиной уменьшаются. Так, приблизительно в первых 400 м толщи сосредоточено более 98% всей водопроницаемости.

Это означает, что при сохранении площади карьера его заглубление ниже 400 м практически не будет приводить к росту водопритоков.

На первом этапе проводилась калибровка модели. Калибровка численной модели (решение «обратной» задачи) выполнена в стационарной постановке. На модели подбирались такой эффективный коэффициент фильтрации, чтобы воспроизвести фактические меженные притоки в месторождении Кальмакыр. В результате калибровки получено следующее: при коэффициенте фильтрации коренных пород 0,01 м/сут и инфильтрации 0,00003 м/сут величина водопритока составила 8980 м³/сут, что согласуется с фактическими значениями. Карта модельных уровней подземных вод представлена на рис. 3.

Результаты калибровки модели уровней подземных вод показаны в табл. 3.

На втором этапе с использованием эффективного коэффициента фильтрации оценивались притоки в проектный контур карьера на конец отработки. Поскольку считаем, что отработка карьера ниже глубины 400 м уже не влияет на притоки, в аналитической модели нижняя граница дренирования всех карьеров задавалась на глубине 400 м. Карта прогнозных модельных уровней подземных вод представлена на рис. 4.

Распределение прогнозных водопритоков к участкам карьера приведено в табл. 4.

Таблица 2

Результаты прогнозной оценки естественных водопритоков в карьер «Кальмакыр» на конец отработки
Results of the forecast assessment of natural water inflows into the Kalmakyr quarry at the end of mining

Подземный водопристок (модельный расчет)		Водопритоки за счет атмосферных осадков 20% обеспеченности						Итого по сезонам года						
зимний период	трещинные воды	летний период			период снеготаяния		зимний период	летний период			период снеготаяния			
		дождевые воды	ливневые воды	талые воды	талые воды	трещинные + дождевые воды		трещинные + ливневые воды						
		Q_5	$Q_{0,33}$	Q_{100}	Q_{10}	Q_5	$Q_{0,33}$	Q_5	$Q_{0,33}$	Q_{100}		Q_{10}	Q_5	$Q_{0,33}$
Ед. изм.		м ³ /сут												
Участок 1														
3390		36 546,12	9867,45	56 224,8	37 483,0	21 043,2	3945,6	3390	39 936,12	13 257,45	59 614,8	40 873,2	24 433,2	7335,6
Участок 2														
380		13 902,0	3753,54	20 853,0	13 902,0	7414,4	1390,2	380	14 282,0	4133,54	21 233,0	14 282,0	7794,4	1770,2
Участок 3														
4857		20 190,45	5451,42	29 547	19 698,0	10 505,6	1969,8	4857	25 047,45	10 308,42	34 404,0	24 555,0	15 362,0	6826,8
Примечание: расчеты по водопритокам в пределах карьера выполнены с учетом того, что все внешние источники поступления воды ограничены и перехватываются нагорной канавой.														

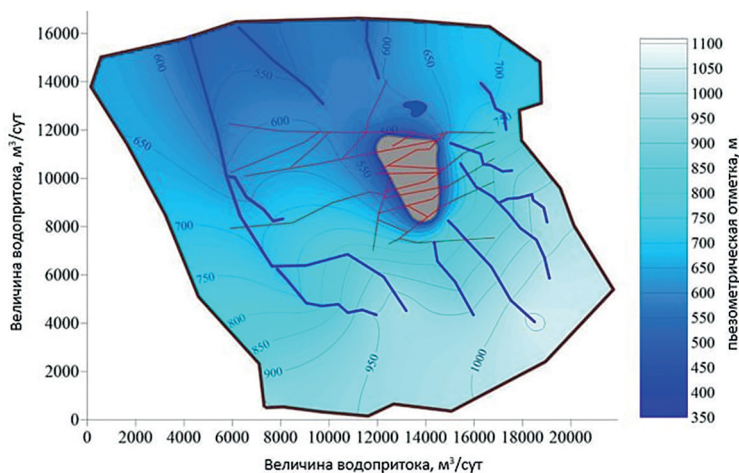


Рис. 3. Модельная карта уровней подземных вод карьера «Кальмакыр»
Fig. 3. Model map of groundwater levels of the Kalmakyr quarry

Таблица 3

Результаты калибровки модели
Model calibration results

Параметры	Значение
Коэффициент фильтрации коренных пород, м/сут	0,01
Коэффициент фильтрации разломов Карабулак и Кальмакыр, м/сут	0,1
Мощность разлома Карабулак, м	70
Мощность разлома Кальмакыр, м	45
Коэффициент фильтрации остальных разломов, м/сут	0,05
Мощность остальных разломов, м	8

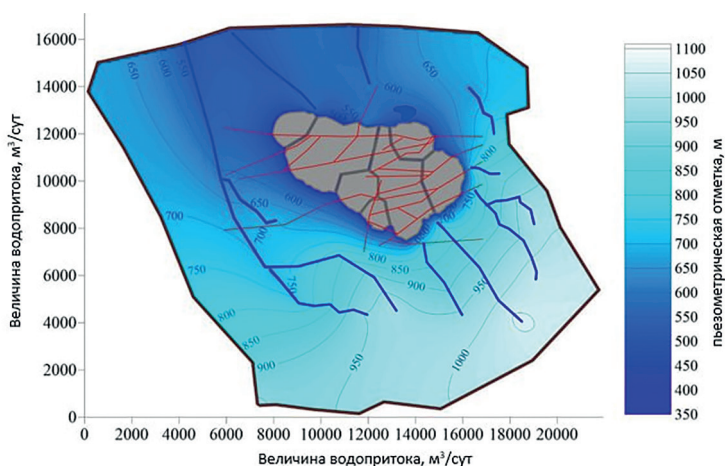


Рис. 4. Модельная карта прогнозных уровней подземных вод на конец отработки карьера «Кальмакыр»
Fig. 4. Model map of predicted groundwater levels at the end of the Kalmakyr quarry development

Таблица 4

Распределение прогнозных водопритоков к участкам карьера**за счет подземных вод на конец отработки****Distribution of predicted water inflows to quarry sections due to groundwater at the end of mining**

Наименование карьера	Участок	Водоприток, м ³ /сут
«Кальмакыр»	1	3390
	2	380
	3	4857
Всего «Кальмакыр»	1+2+3	8627

Следует отметить, что водопритоки в участки карьера существенным образом контролируются близостью контуров карьера к водотокам и геометрией разломных зон.

Поэтому прогнозы могут быть актуализированы в случае появления дополнительной информации.

Дополнительно приведем оценку прогнозных водопритоков в карьер за счет подземных вод аналитическими расчетами.

В качестве расчетной схемы принята модель неограниченного в плане безнапорного водоносного горизонта. Оценка величины водопритока в карьерную выемку осуществлялась с применением аналитической зависимости [16]:

$$Q = \pi k \frac{(2m - s_0) s_0}{\ln R_{inv} - \ln r_0}.$$

Параметры, использованные в расчетной модели: k — коэффициент фильтрации водовмещающих пород, м/сут; m — естественная (начальная) мощность обводненной толщи безнапорного пласта, м; Q — расчетный объем притока подземных вод в карьер, м³/сут; R_{inv} — радиус депрессионной воронки (радиус влияния), установленный на основе натурных данных, м; r_0 — приведенный радиус карьерного поля, м; s_0 — проектная величина понижения уровня подземных вод в карьере, м.

Значение радиуса влияния R_{inv} было принято в качестве фиксированного параметра на основе эмпирических данных.

Расчет приведенного радиуса карьера по его площади [17, 18]:

$$r_0 = \sqrt{\frac{F}{\pi}}.$$

где F — площадь карьера, м².

Таблица 5

Расчетные параметры**Calculation parameters**

Параметр	Значение		
Коэффициент фильтрации, k , м/сут	0,01	0,02	0,03
Начальная обводненная мощность безнапорного пласта, m , м	200	200	200
Радиус влияния, R_{inv} , м	2000	2000	2000
Площадь карьера, F , м ²	12 167 000	12 167 000	12 167 000
Приведенный радиус карьера, r_0 , м	1968	1968	1968
Понижение в карьере, s_0 , м	400	400	400
Приток в карьер, Q , м ³ /сут	15 708	31 416	47 124

Расчетные параметры приведены в табл. 5.

Как было выше указано, по результатам калибровки модели аналитических элементов получено значение коэффициента фильтрации коренных пород, равное 0,01 м/сут. Данное значение использовалось и в оценке прогнозных водопритоков в карьер за счет подземных вод аналитическими расчетами. Величина водопритоков составила 15 708 м³/сут, что практически совпадает с величиной суммарных водопритоков (15 827 м³/сут), полученных по модели аналитических элементов.

Поскольку аналитический расчет наиболее чувствителен к коэффициенту фильтрации, он выполнен для нескольких значений данного параметра, отличающихся незначительно. Из табл. 5 следует, что даже незначительное увеличение коэффициента фильтрации коренных пород сильно влияет на величину прогнозных водопритоков.

Дополнительно к расчетам прогнозного естественного водопритока в карьер необходимо учитывать технологический водоприток.

Анализ архивных данных многолетнего мониторинга системы карьерного водоотлива на месторождении Кальмакыр показывает, что в летний сезон от 30% до 50% поверхностного стока, формирующегося за счет атмосферных осадков, безвозвратно теряется в результате интенсивного испарения.

Химический состав

поверхностных и подземных вод

На химические свойства грунтовых вод влияют климат, характер взаимодействия между минералами, физические свойства горных пород в водоносном горизонте, а также эволюция потока грунтовых вод в системе [19].

Показатели pH для всех проб грунтовых вод оказались практически нейтральными или слабощелочными в диа-

пазоне от 6,8 до 7,9 с медианным показателем 7,5. Ни в одной из проб не обнаружено преобладающих катионов.

Преобладающими анионами для всех проб оказались сульфаты с концентрацией от 257 до 2047 мг/л (в среднем 1507 мг/л) и хлориды с концентрацией от 43 до 340 мг/л (в среднем 123 мг/л). Подобные анионы считаются характерными для территорий с высокими показателями эвапотранспирации.

Концентрации нитратов, как правило, были низкими, ниже предельно допустимой концентрации (ПДК) 45 мг/л, однако в двух скважинах наблюдались повышенные концентрации (76 и 46 мг/л). Обе скважины расположены восточнее карьера «Кальмакыр». Как правило, это объясняется использованием взрывчатых материалов на основе нитрата аммония. При этом аммоний превращается в нитрат во время взрывных работ, поэтому наблюдаются низкие концентрации аммония и более высокие концентрации нитратов. Такая картина нередко наблюдается в грунтовых водах вблизи карьеров [20, 21].

Концентрации алюминия (Al), хрома (Cr), железа (Fe), ртути (Hg), марганца (Mn), молибдена (Mo), никеля (Ni), свинца (Pb), селена (Se) и стронция (Sr) превысили соответствующие показатели ПДК не менее чем в одной пробе подземных вод.

Пробы отбирались на карьере «Кальмакыр» для контроля качества воды из водоотлива. Данные о качестве воды из водоотлива карьера «Кальмакыр» представлены в табл. 6.

Таким образом, определены концентрации микроэлементов в различных водотоках и объектах поверхностных вод. Концентрации микроэлементов (бора, марганца, свинца и селена) варьировались в разных пробах поверхностных вод и превышали соответствующий предел

Таблица 6

Данные о качестве воды из водоотлива карьера Кальмакыр**Data on the quality of water from the Kalmakyr quarry drainage system**

Параметр, ед. изм.	№ 149 от 01.04.21	№ 204 от 01.04.22	№ 195 от 01.04.23	№ 259 от 04.04.24	№ 526 от 02.10.25
Калий, мг/л	12	14,2	14,1	17	12,9
Натрий, мг/л	183	170	154	216	175
Аммоний, мг/л	3,46	3,2	4,8	3,2	1,06
Кальций, мг/л	409,74	358	407	596	457
Магний, мг/л	160	145	567	228	169
Железо, мг/л	0,01	0,027	0,0243	0,0014	0,012
Хлориды, мг/л	100,82	177,5	191,7	213	109,34
Сульфаты, мг/л	1177,68	1686,78	2205,64	2250,91	1935,67
Нитриты, мг/л	0,695	0,25	0,96	0,435	0,26
Нитраты, мг/л	48,83	48,82	75,6	60,64	39,38
Гидрокарбонаты, мг/л	134,2	180,56	104,92	170,8	217,16
pH, ед.	7,25	6,64	7,42	7,19	7,55
Сухой остаток, мг/л	2814	40	16	80	12
Взвешенные вещества, мг/л	12	2718	3778	3777	3097
Жесткость общая, мг-экв/л	33,61	9	16	15	22
Медь, мг/л	0,01	29,78	66,94	48,49	36,7
Цинк, мг/л	0,29	0,0014	0,0376	0,0625	0,0075
Свинец, мг/л	0	0,114	2,64	2,48	0,41
Молибден, мг/л	0	0,164	0,0243	0,0293	0,016
Мышьяк, мг/л	0	0,049	0,0372	0,0559	0,032
Нефтепродукты, мг/л	0	0,0044	0,0013	н/о	н/о
Кадмий, мг/л	0	н/о	0,0113	0,0097	0,0031
Марганец, мг/л	7	5,23	17,3	18,7	5,49
Хром, мг/л		н/о	0,0093	0,0026	0,0012
Алюминий, мг/л		0,0004	0,0958	0,0132	0,012

ПДК не менее чем в одной пробе. Также были обнаружены концентрации цианидов выше предела лабораторного учета (от 0,03 до 0,13 мг/л), в трех пробах зарегистрировано превышение ПДК 0,035 мг/л [ГН 2.1.5.1315-03].

Заключение

В ходе выполнения расчетов определены количественные показатели поверхностного стока в контуры проекти-

руемых участков карьера «Кальмакыр». Установлено, что формирование водного режима объекта имеет ярко выраженный сезонный характер.

Анализ распределения водопритоков по площади (участок 1 — 657,6 га, участок 2 — 231,7 га, участок 3 — 328,3 га) показал следующие результаты.

Участок № 1 является наиболее водообильным. Максимальный расчетный приток ливневых вод ($Q_{л100}$) здесь до-

стигает 56 224,8 м³/сут, что обусловлено наибольшей водосборной площадью и применением коэффициента неравномерности $k = 0,95$.

Участки № 2 и № 3 имеют пропорционально меньшие объемы стока, однако требуют устройства локальных систем водоотлива, рассчитанных на приток ливневых вод до 20 853 и 29 547 м³/сут соответственно.

Наибольшую угрозу для стабильной работы карьера представляют ливневые воды однопроцентной обеспеченности ($P = 1\%$). Суммарный объем ливневого стока по трем участкам при экстремальных осадках ($H_{100} = 60$ мм) превышает 106 600 м³/сут.

Дождевой сток: расчетные значения для выбора насосного оборудования ($Q_{0,33}$) значительно ниже пиковых ливневых нагрузок, что указывает на необходимость резервирования мощностей.

Талые воды: весенний период характеризуется умеренными притоками (максимум 21 043,2 м³/сут на участке 1), что позволяет использовать штатную систему водоотлива без задействования аварийных резервов.

По результатам гидрохимического мониторинга, вода из водоотлива карьера «Кальмакыр» относится к категории высокоминерализованных сульфатных вод и не соответствует нормативам по содержанию сульфатов, нитратов и ряда тяжелых металлов.

Основными факторами, определяющими состав воды, являются природный климатический режим (испарение) и техногенные процессы (взрывные работы, выщелачивание рудных минералов).

Для предотвращения загрязнения соприкасаемых территорий при сбросе данных вод требуется обязательная предварительная очистка (деминерализация и нейтрализация нитратов/металлов) или использование в замкнутых технологических циклах предприятия.

На основе результатов мониторинга поверхностных вод вокруг карьера «Кальмакыр» установлено, что поверхностные воды характеризуются как высокоминерализованные сульфатные с превышением ПДК по сульфатам и общему солесодержанию (TDS до 1432 мг/л). Критические концентрации нитратов (до 276 мг/л) и обнаружение цианидов (до 0,13 мг/л) свидетельствуют о прямом влиянии производственного цикла: взрывных работ и процессов выщелачивания из отвалов. Стабильное превышение нормативов по бору, марганцу, свинцу и селену классифицирует данные воды как загрязненные объектами горнодобывающей промышленности.

Для минимизации экологического ущерба требуется внедрение систем локальной очистки поверхностного стока и проведение детального аудита источников попадания цианидов в водную среду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Косимов М. О., Халкулова Х. К., Эрматов Н. М. Гидрогеологическая обстановка на карьере «Кальмакыр» // Евразийский журнал технологий и инноваций. — 2024. — Т. 2. — № 4. — С. 52–58.
2. Пирназаров М. М., Пирназаров М., Мирабдуллаев А. Х. Систематика золоторудных и золотосодержащих месторождений Узбекистана: подходы к типизации, информативность и научно-прикладные следствия // Геология и минеральные ресурсы. — 2008. — № 3. — С. 26–33.
3. Екимова О. А., Парфенова Л. П., Бичукина И. А. Оценка притоков подземных вод в карьер при разработке медно-железо-ванадиевого месторождения на Среднем Урале // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 5-1. — С. 70–81. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_70.

4. Кузеванов К. И., Кузеванов К. К., Дутова Е. М., Покровский В. Д. Гидрогеологические условия Бакчарского железорудного месторождения и предварительная оценка водопритоков // Геология и поиски месторождений твердых полезных ископаемых. — 2018. — № 41 (4). — С. 22–36. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-4-22-36.
5. Едигенов М. Б. Прогноз водопритоков в горные выработки и оценка запасов рудничных вод месторождения олова Сырымбет в Северном Казахстане // Геология и охрана недр. — 2018. — № 1 (66). — С. 56–64.
6. Норватов Ю. А., Сергутин М. В. Прогнозирование водопритоков в горные выработки при разработке рудных месторождений комбинированным открыто-подземным способом // Записки Горного института. — 2015. — Т. 212. — С. 89–94.
7. Иванов Ю. К. Обоснованность необходимых гидрогеологических исследований при разведке месторождений твердых полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 5-1. — С. 92–106. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_92.
8. Даувальтер В. А., Денисов Д. Б., Даувальтер М. В., Сандимиров С. С., Слуковский З. Химический состав поверхностных вод в зоне влияния горно-обогатительного комбината «Олений Ручей» // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. — 2024. — Т. 21. — С. 76–85. DOI: 10.31241/FNS.2024.21.010.
9. Даувальтер М. В., Даувальтер В. А., Сандимиров С. С., Денисов Д. Б., Слуковский З. И. Гидрохимический мониторинг поверхностных вод в зоне влияния деятельности ГОК «Олений Ручей» // Труды ФНС ГИ КНЦ РАН. — 2022. — № 19. — С. 80–85. DOI: 10.31241/FNS.2022.19.015.
10. Kidder J. A., McClenaghan M. B., Leybourne M. I., McCurdy M. W., Pelchat P., Layton-Matthews D., Voinot A. Hydrogeochemistry of porphyry-related solutes in ground and surface waters; an example from the Casino Cu–Au–Mo deposit, Yukon, Canada // *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. 2022, vol. 22, no. 2. DOI: 10.1144/geochem.2021-058.
11. Sobko B., Drebenstedt C., Lozhnikov O. Selection of environmentally safe openpit technology for mining water-bearing deposits // *Mining of Mineral Deposits*. 2017, vol. 11, no. 3, pp. 70–75. DOI: 10.15407/mining11.03.070.
12. Апанасенко Д. С. Формирование ресурсов подземных вод на золоторудных месторождениях Приамурья в естественных условиях и в процессе их разработки (на примере месторождений Пионер и Албын): Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. — М.: ИВП РАН, 2013. — 30 с.
13. Васильев И. О., Тирский О. Н. Результаты ГИС при исследовании гидрогеологических скважин на золоторудном месторождении Погромное (Забайкалье) // *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН*. — 2012. — № 2 (41).
14. Гавейш В. Р., Мараев И. А., Сультан С. А., Новиков П. В., Иванов А. А. Поиски подземных вод в оазисе Эль-Бахария в Западной пустыне Египта по результатам интерпретации данных каротажа и кривых ВЭЗ // *Известия Уральского государственного горного университета*. — 2019. — № 4(56). — С. 25–32.
15. Зинюков Ю. М., Золотарев А. В., Воронин В. В. Проблема водопритока в карьер при разработке месторождения гранитов на участке «Тихий Дон» // *Вестник ВГУ, Серия: Геология*. — 2009. — № 1. — С. 157–163.
16. Гальперин А. М., Зайцев В. С., Харитonenko Г. Н., Норватов Ю. А. Геология. Ч. III. Гидрогеология. — М.: Мир горной книги, 2008. — С. 334–336.
17. Синдаловский Л. Н. Гидрогеологические расчеты с использованием программы ANSDIMAT. — СПб.: Наука, 2021. — 891 с.
18. Исоматов Ю. П., Гайбназаров Б. А. Об особенностях изменения гидрогеологических условий при разработке месторождения Ёшлик // *International Journal of Advanced Technology and Natural Sciences*. 2021. — Т. 2. — № 1. — С. 4–8. DOI: 10.24412/2181-144X-2021-1-4-8.
19. Исоматов Ю. П., Ахмедов М. К. Особенности формирования химического состава подземных вод Алмалыкского рудного района и его влияние на гидрогеологические условия // *Central Asian Research Journal For Interdisciplinary Studies (CARJIS)*. 2022. — Т. 2. — № 11. DOI: 10.24412/2181-2454-2022-11-38-49.
20. Клецкина О. В., Минькевич И. И. Азотное загрязнение подземных вод и управление качеством в промышленных районах // *Вестник Пермского университета. Геология*. — 2013. — № 4(21). — С. 8–20.
21. Косинова И. И., Сигора Г. А., Ничкова Л. А., Добровольская Е. В., Симонова Е. С. Мониторинг загрязненности нитрат-ионами подземных вод территории городов Севастополь и Бахчисарай // *Вестник ВГУ. Серия: Геология*. — 2016. — № 3. — С. 124–127. **ПЛАБ**

REFERENCES

1. Kosimov M. O., Khalkulova H. K., Ermatov N. M. Hydrogeological situation at the Kalmakyr quarry. *Eurasian Journal of Technology and Innovation*. 2024, vol. 2, no. 4, pp. 52 – 58. [In Russ].
2. Pirnazarov M. M., Pirnazarov M., Mirabdullaev A. Kh. Systematics of gold ore and gold-bearing deposits of Uzbekistan: approaches to typification, information content and scientific and applied consequences. *Geology and mineral resources*. 2008, no. 3, pp. 26 – 33. [In Russ].
3. Ekimova O. A., Parfenova L. P., Bichukina I. A. Assessment of groundwater inflows into the opencast mine during the development of a copper-iron-vanadium deposit in the Middle Urals. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 5-1, pp. 70 – 81. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_70.
4. Kuzevanov K. I., Kuzevanov K. K., Dutova E. M., Pokrovskiy V. D. Hydrogeological conditions of the Bakchar iron ore deposit and a preliminary assessment of water inflows. *Geology and prospecting for solid mineral deposits*. 2018, no. 41 (4), pp. 22 – 36. [In Russ]. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-4-22-36.
5. Edigenov M. B. Forecast of water inflows into mine workings and assessment of mine water reserves of the Syrymbet tin deposit in Northern Kazakhstan. *Geology and Subsoil Conservation*. 2018, no. 1 (66), pp. 56 – 64. [In Russ].
6. Norvatov Yu. A., Sergutin M. V. Forecasting water inflows into mine workings during combined open-underground mining of ore deposits. *Journal of Mining Institute*. 2015, vol. 212, pp. 89 – 94. [In Russ].
7. Ivanov Yu. K. Validity of the necessary hydrogeological studies in the exploration of solid minerals deposits. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 5-1, pp. 92 – 106. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_92.
8. Dauvalter V. A., Denisov D. B., Dauvalter M. V., Sandimirov S. S., Slukovskiy Z. Chemical Composition of Surface Waters in the Influence Zone of the Oleniy Ruchey Mining and Processing Plant. *Proceedings of the Fersman Scientific Session of the Mining Institute of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences*. 2024, vol. 21, pp. 76 – 85. [In Russ]. DOI: 10.31241/FNS.2024.21.010.
9. Dauvalter M. V., Dauvalter V. A., Sandimirov S. S., Denisov D. B., Slukovskiy Z. I. Hydrochemical monitoring of surface waters in the zone of influence of the Oleniy Ruchey Mining and Processing Plant. *Proceedings of the Federal Research Institute of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences*. 2022, no. 19, pp. 80 – 85. [In Russ]. DOI: 10.31241/FNS.2022.19.015.
10. Kidder J. A., McClenaghan M. B., Leybourne M. I., McCurdy M. W., Pelchat P., Layton-Matthews D., Voinot A. Hydrogeochemistry of porphyry-related solutes in ground and surface waters; an example from the Casino Cu – Au – Mo deposit, Yukon, Canada. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. 2022, vol. 22, no. 2. DOI: 10.1144/geochem.2021-058.
11. Sobko B., Drebenstedt C., Lozhnikov O. Selection of environmentally safe openpit technology for mining water-bearing deposits. *Mining of Mineral Deposits*. 2017, vol. 11, no. 3, pp. 70 – 75. DOI: 10.15407/mining11.03.070.
12. Apanasenko D. S. *Formirovanie resursov podzemnykh vod na zolotorudnykh mestorozhdeniyakh Priamur'ya v estestvennykh usloviyakh i v protsesse ikh razrabotki (na primere mestorozhdeniy Pioneer i Albyn)* [Formation of groundwater resources at gold ore deposits of the Amur region under natural conditions and during their development (using the Pioneer and Albyn deposits as an example)], Candidate's thesis, Moscow, 2013, 30 p.
13. Vasiliev I. O., Tirskiy O. N. GIS Results in the Study of Hydrogeological Wells at the Pogromnoe (Transbaikalia) Gold Field. *Bulletin of the Siberian Branch of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Sciences*. 2012, no. 2 (41). [In Russ].
14. Gaveish V. R., Marayev I. A., Sultan S. A., Novikov P. V., Ivanov A. A. Exploration of groundwater in the Al-Bahariya oasis in the Western Desert of Egypt based on the results of interpretation of well logging data and VEZ curves. *News of the Ural State Mining University*. 2019, no. 4(56), pp. 25 – 32. [In Russ].
15. Zinyukov Yu. M., Zolotarev A. V., Voronin V. V., Problem of water inflow into the quarry during the development of the granite deposit in the «Tinch Don» section. *Proceedings of Voronezh state university. Series: Geology*. 2009, no. 1, pp. 157 – 163. [In Russ].
16. Gal'perin A. M., Zaytsev V. S., Kharitonenko G. N., Norvatov Yu. A. *Geologiya. Ch. III. Gidrogeologiya* [Geology, Part III. Hydrogeology], Moscow, Mir gornoy knigi, 2008, pp. 334 – 336.
17. Sindalovskiy L. N. *Gidrogeologicheskie raschety s ispol'zovaniem programmy ANSDIMAT* [Hydrogeological calculations using the ANSDIMAT program], Saint-Petersburg, Nauka, 2021, 891 p.

18. Isomатов Y. P., Gaibnazarov B. A. On the peculiarities of changes in hydrogeological conditions during the development of the yoshlik field. *International Journal of Advanced Technology and Natural Sciences*. 2021, vol. 2, no. 1, pp. 4–8. DOI: 10.24412/2181-144X-2021-1-4-8.

19. Isomатов Yu. P., & Akhmedov M. K. Features of the formation of the chemical composition of groundwater in the Almalyk ore district and its effect on hydrogeological conditions. *Central Asian Research Journal For Interdisciplinary Studies (CARJIS)*. 2022, vol. 2, no. 11. DOI: 10.24412/2181-2454-2022-11-38-49.

20. Kletskina O. V., Minkevich I. I. Nitrogen pollution of groundwater and quality management in industrial regions. *Bulletin of Perm University. Geology*. 2013, no. 4(21), pp. 8–20. [In Russ].

21. Kosinova I. I., Sigora G. A., Nichkova L. A., Dobrovolskaya E. V., Simonova E. S. Monitoring of groundwater contamination with nitrate ions in the territories of the cities of Sevastopol and Bakhchisaray. *Proceedings of Voronezh state university. Series: Geology*. 2016, no. 3, pp. 124–127. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Халкулова Хаётхон Кахрамоновна — докторант,
Университет геологических наук ГУ «Институт минеральных ресурсов»,
Ташкент, Республика Узбекистан, e-mail: Xayotxonxalkulova@gmail.com,
ORCID ID: 0009-0003-5586-1991,

Пирназаров Мажид Махкамович — д-р геол.-минерал. наук, (DSn),
Университет геологических наук, Ташкент, Республика Узбекистан,
e-mail: pirnazarov1959@gmail.com, ORCID ID: 0009-0008-8974-4677,

Ахмедова Назира Махмудовна¹ — PhD, доцент,
e-mail: nazira.akhmedova.68@bk.ru, ORCID ID: 0009-0008-3432-3664,

Кахаров Сергей Каримович¹ — канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой,
e-mail: info@misis.uz, ORCID ID: 0009-0007-0433-3186,

Ходжаев Хабибхон Садирович¹ — доцент,
e-mail: hodzaevhabibhon@gmail.com, ORCID ID: 0009-0007-2604-0253,

¹ Филиал НИТУ МИСИС в г. Алмалык, Алмалык, Республика Узбекистан.

Для контактов: Халкулова Х.К., e-mail: Xayotxonxalkulova@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

X.K. Xalkulova, PhD Student, University of Geological Sciences
GU «Institute of Mineral Resources», 100164, Tashkent,
Republic of Uzbekistan, e-mail: Xayotxonxalkulova@gmail.com,
ORCID ID: 0009-0003-5586-1991,

M.M. Pirnazarov, Dr. Sci. (Geol. Mineral.), (DSn),
University of Geological Sciences, 100164,
Tashkent, Republic of Uzbekistan,

e-mail: pirnazarov1959@gmail.com, ORCID ID: 0009-0008-8974-4677,

N.M. Akhmedova¹, PhD, Associate Professor,
e-mail: nazira.akhmedova.68@bk.ru, ORCID ID: 0009-0008-3432-3664,

S.K. Kakharov¹, Cand. Sci. (Eng.), PhD, Associate Professor,
Head of Chair, e-mail: info@misis.uz, ORCID ID: 0009-0007-0433-3186,

Kh.S. Khodzaev¹, PhD, Associate Professor,
e-mail: hodzaevhabibhon@gmail.com, ORCID ID: 0009-0007-2604-0253,

¹ Almalyk Branch of NUST MISIS, 110101, Almalyk, Republic of Uzbekistan.

Corresponding author: X.K. Xalkulova, e-mail: Xayotxonxalkulova@gmail.com.

Получена редакцией 24.02.2026; получена после рецензии 25.08.2026; принята к печати 20.09.2026.

Received by the editors 24.02.2026; received after the review 25.08.2026; accepted for printing 20.09.2026.