УДК 553.4
МРНТИ 31.15.21

https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-3-347-355

[1]*Назирханов Э.Н.,
магистр, геолог, ORCID ID: 0009-0008-2768-6061,
*e-mail: eldornazirkhanov@mail.ru

[1]ТОО «KazMinerals Bozshakol», г. Экибастуз, Казахстан

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ВЗАИМОСВЯЗИ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО СОСТАВА И СОДЕРЖАНИЯ МЕДИ НА МЕСТОРОЖДЕНИИ БОЗШАКОЛЬ

Аннотация

В данной работе проведено всестороннее исследование содержания рудных компонентов в горных породах и их взаимосвязи с минералогическим составом. Целью исследования являлось выявление закономерностей распределения рудных элементов, в частности меди, в зависимости от состава первичных и вторичных минералов. Работа основывается на комплексном анализе, включающем как петрографические, так и минералогические методы изучения. В рамках исследования выполнено детальное изучение образцов пород, отобранных из керна буровых скважин. Основное внимание уделено микроскопическому анализу шлифов, который позволил определить текстурно-структурные особенности пород и провести количественную оценку содержания основных и вторичных минералов. С целью повышения точности были использованы методы геохимического анализа, позволившие уточнить содержание рудных компонентов и установить процентное соотношение различных минералов в породах. Результаты показали, что содержание меди может существенно варьироваться в зависимости от степени и типа вторичных изменений, а также от присутствия определенных минералов, таких как халькопирит, вторичный кварц, хлорит и серицит. Для выявления и количественной оценки взаимосвязей между содержанием меди и минералогическим составом использован коэффициент корреляции Пирсона. Это позволило установить статистически значимые зависимости между определенными минералами и концентрацией меди. В частности, выявлены положительные корреляции между содержанием меди и специфическими минералами и отрицательные связи с минералами, формирующимися в процессе интенсивного изменения пород. Полученные результаты имеют практическое значение для задач геологоразведки. Выявленные корреляционные зависимости могут быть использованы при описании керна и построении прогностических моделей рудоносности, что существенно повышает эффективность разведочных работ. Методика, примененная в исследовании, может быть адаптирована и для других месторождений с аналогичными условиями минералообразования.

Ключевые слова: петрографический анализ, коэффициент корреляции Пирсона, шлиф, керн, рудоносность.

Введение

Бозшакольское медно-порфировое месторождение представляет собой один из наиболее значимых и масштабных рудных объектов Казахстана, относящийся к классу порфировых медных месторождений. Оно характеризуется высокой степенью металлоносности, сложным строением и разнообразным минералогическим составом, обусловленным многостадийными геологическими процессами. Минералогический состав пород, слагающих месторождение, включает как первичные, так и вторичные минералы. Среди наиболее распространенных выделяются кварц, плагиоклаз, биотит, хлорит, халькопирит, серицит, карбонаты и эпидот [1].

Настоящая работа посвящена исследованию взаимосвязи между минералогическим составом горных пород и содержанием меди на Бозшакольском меднопорфировом месторождении. Целью исследования является выявление закономерностей распределения меди в зависимости от состава первичных и вторичных минералов. В рамках поставленной задачи проведен

комплексный анализ керновых образцов с использованием петрографических, минералогических и геохимических методов, а также статистической обработки данных для количественной оценки влияния отдельных минералов на рудоносность.

Актуальность темы определяется потребностью в повышении эффективности геологоразведочных работ при разработке медно-порфировых месторождений. Установление устойчивых корреляционных связей между минеральным составом пород и содержанием меди позволяет не только точнее прогнозировать рудоносные зоны, но и минимизировать затраты на разведку. Это особенно важно в условиях сложного геологического строения, характерного для месторождения Бозшаколь. Исследование соответствует приоритетным направлениям в области геологических наук и недропользования, таким как развитие методов прогноза и оценки минеральных ресурсов, совершенствование аналитических подходов в минералогии, а также внедрение статистических методов в интерпретацию геохимических данных. Работа также затрагивает вопросы рационального использования недр и повышения информативности геолого-разведочных данных.

Научная новизна исследования заключается в применении количественного корреляционного анализа с использованием коэффициента Пирсона для оценки влияния конкретных минералов, таких как кварц, халькопирит, эпидот, хлорит и карбонаты, на содержание меди в породах. Установлены статистически значимые зависимости, ранее недостаточно подробно освещенные для данного региона.

Оригинальность подхода заключается в интеграции микроскопического анализа шлифов, геохимического тестирования и математической обработки данных для комплексной оценки факторов, влияющих на распределение меди. Такой подход позволяет повысить точность интерпретации данных, а также адаптировать предложенную методику к другим месторождениям со схожими условиями минералообразования.

Важнейшей особенностью Бозшакольского месторождения является активное проявление вторичных изменений пород, которые происходили в условиях гидротермальной активности [2]. К числу таких процессов относятся альбитизация – замещение плагиоклаза на альбит, хлоритизация – замещение темноцветных минералов на хлорит, карбонатизация – отложение карбонатов по трещинам и пустотам и серицитизация – образование мелкочешуйчатого серицита в результате разложения полевых шпатов. Эти преобразования существенно влияют на перераспределение рудных компонентов, в частности меди, поскольку вторичные минералы могут быть как индикаторами рудных зон, так и барьерами для рудной минерализации. Бозшакольское месторождение представляет собой типичный пример постколлизионной порфировой минерализации, развивавшейся в условиях затухания магматической активности [3]. В таких условиях магматические расплавы, насыщенные летучими компонентами, поднимаясь по трещинам и зонам разломов, инициировали формирование гидротермальных систем, насыщенных сульфидами меди. Эти процессы привели к отложению рудных минералов в зонах наибольшей проницаемости, где и формировались экономически значимые скопления медной руды [4]. Минералогическое и геодинамическое разнообразие месторождения Бозшаколь делает его ценным объектом для изучения процессов порфировой минерализации, взаимосвязи между вторичными изменениями и содержанием меди, а также для построения прогностических моделей при геологоразведке аналогичных рудных объектов.

Материалы и методы

Проведено исследование шести образцов керна, отобранных из различных литологических зон месторождения, а также их соответствующих шлифов. В шлифах детально описаны структура и текстура пород, а также проведена количественная оценка минерального состава с определением процентного соотношения отдельных минералов.

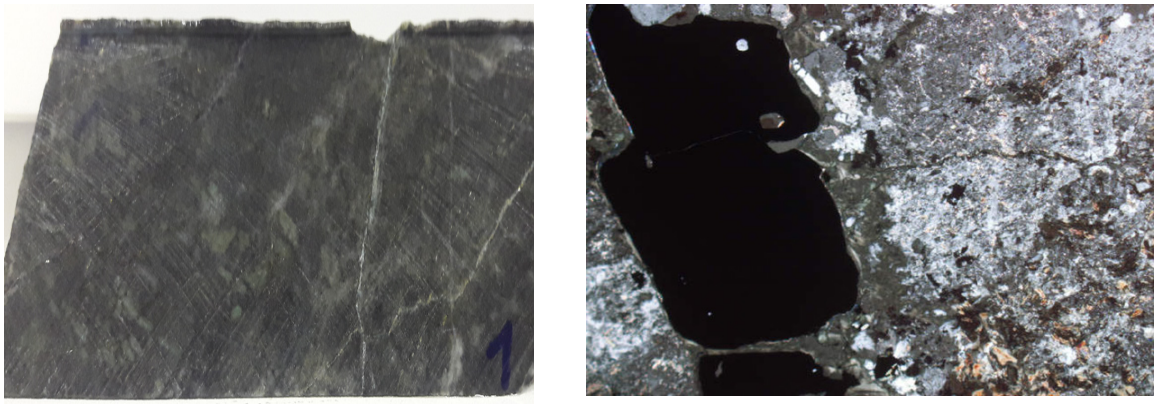

Рисунок 1 – Образец №1: диоритовый порфирит и его шлиф

Образец №1: диоритовый порфирит, порода с порфировидной структурой. Вкрапленники представлены широкотаблитчатыми и удлиненно-призматическими кристаллами плагиоклаза, испещренного включениями чешуек серицита, хлорита, редко эпидота. Основная масса довольно хорошо раскристаллизована, с реликтовой призматически-зернистой или гипидиоморфно-зернистой структурой. Состоит из призматических кристаллов интенсивно разложенного плагиоклаза, многочисленных чешуек эпигенетического биотита. По прожилкам развивается агрегат кварца, иногда совместно с рудным минералом и с небольшим количеством хлорита и карбоната. Порода претерпела значительные вторичные изменения, включающие серицитизацию плагиоклаза, хлоритизацию биотита, а также эпидотизацию и карбонатизацию в прожилках. Эти процессы могли происходить под воздействием гидротермальных флюидов.

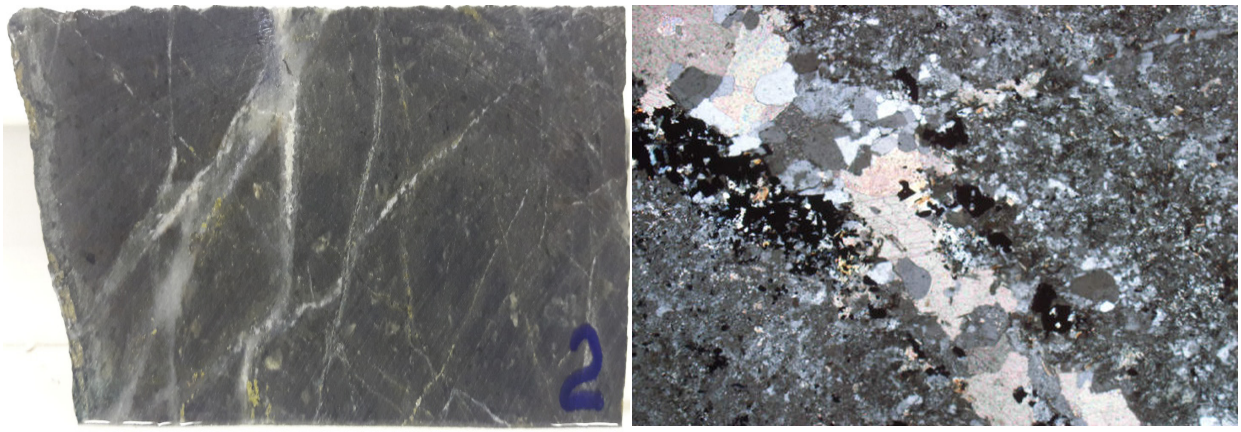

Рисунок 2 – Образец №2: пропилитизированный андезит и его шлиф

Образец №2: пропилитизированный андезит, текстура массивная. Структура порфировидная. Вкрапленники составляют около (5–8)% от общего объема породы, неравномерно распределены в ее массе, представлены в основном плагиоклазом, образующим удлиненно-призматические и таблитчатые кристаллы размером до 3 мм по удлинению, интенсивно альбитизированные и замещенные тонким гидросерицитовым агрегатом. Породу секут многочисленные разно ориентированные прожилки, выполненные минералами кварцем, карбонатом, хлоритом, редко с эпидотом [5]. Формирование карбонатных прожилков, что может указывать на позднюю стадию гидротермальной активности. Образование эпидота в трещинах и на контактах минералов, что также свидетельствует о метасоматической переработке породы.

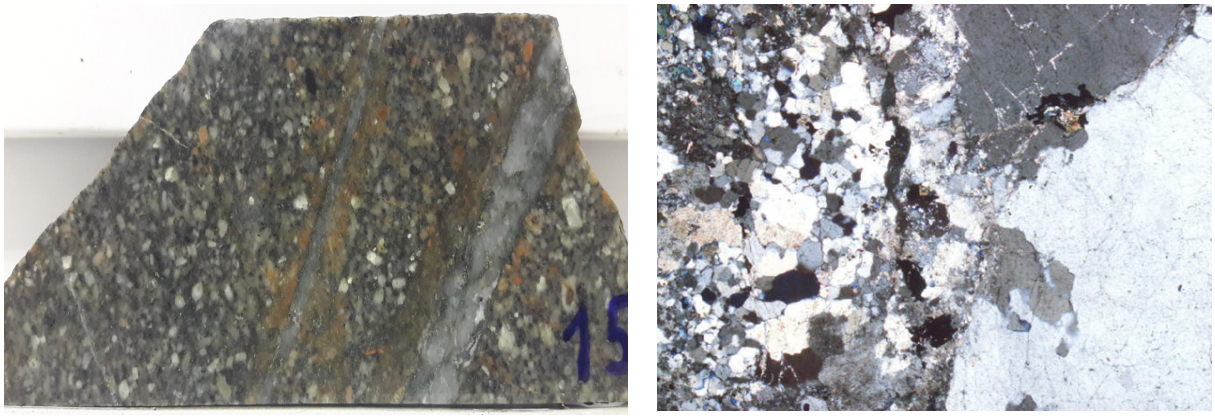

Рисунок 3 – Образец №3: гранодиорит (тоналит) и его шлиф

Образец №3: гранодиорит (тоналит), порода трещиноватая, большая часть шлифа занята мощным прожилком, выполненным кварцем, с небольшим количеством эпидота и его образованием в прожилках, сопровождает пропилитизацию. Основная масса мелкозернистая кварц-полевошпатового состава, неравномерно окварцована – проявляется в виде мощного прожилка кварца. Полевые шпаты разложены и альбитизированы, темноцветный минерал замещен хлоритом, таким образом, происходит процесс альбитизации. В значительных количествах содержится вкрапленность.

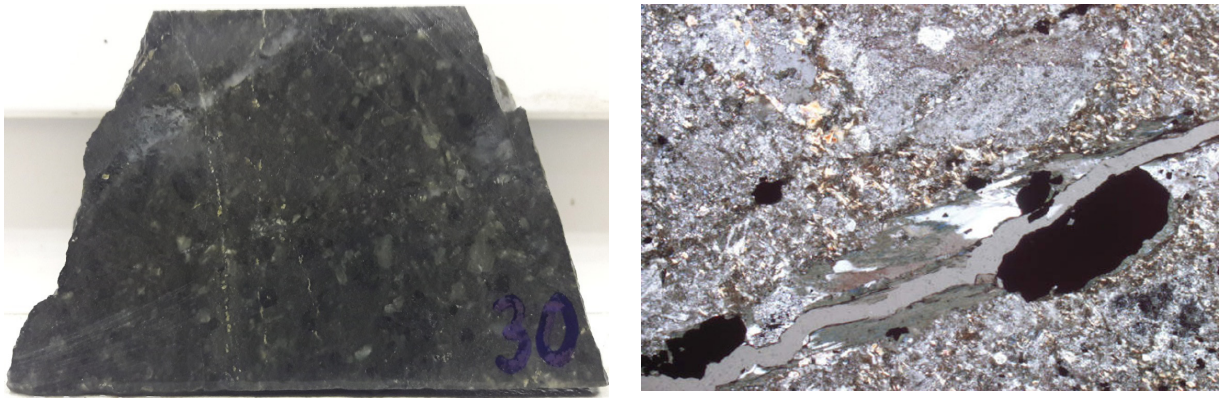

Рисунок 4 – Образец №4: андезитовый (диоритовый) порфирит и его шлиф

Образец №4: андезитовый (диоритовый) порфирит субвулканического или даечного облика, интенсивно амфиболизирован. Вкрапленники составляют около 30–35% от общего объема породы. Представлены таблитчатыми кристаллами серицитизированного и альбитизированного плагиоклаза и реже реликтами темноцветного минерала, псевдоморфно замещенного волокнистой бледно-зеленой уралитовой роговой обманкой. Размеры вкрапленников составляют (2–4) мм. Основная масса неплохо раскристаллизована, состоит из хаотично расположенных мелких призмочек и лейстовидных кристаллов альбитизированного плагиоклаза, большого количества иголочек бледно-зеленой вторичной роговой обманки, чешуек бурого биотита, иногда скапливающихся в агрегатах и прожилках [6]. По многочисленным широким прожилкам развиваются минералы, такие как хлорит, кварц.

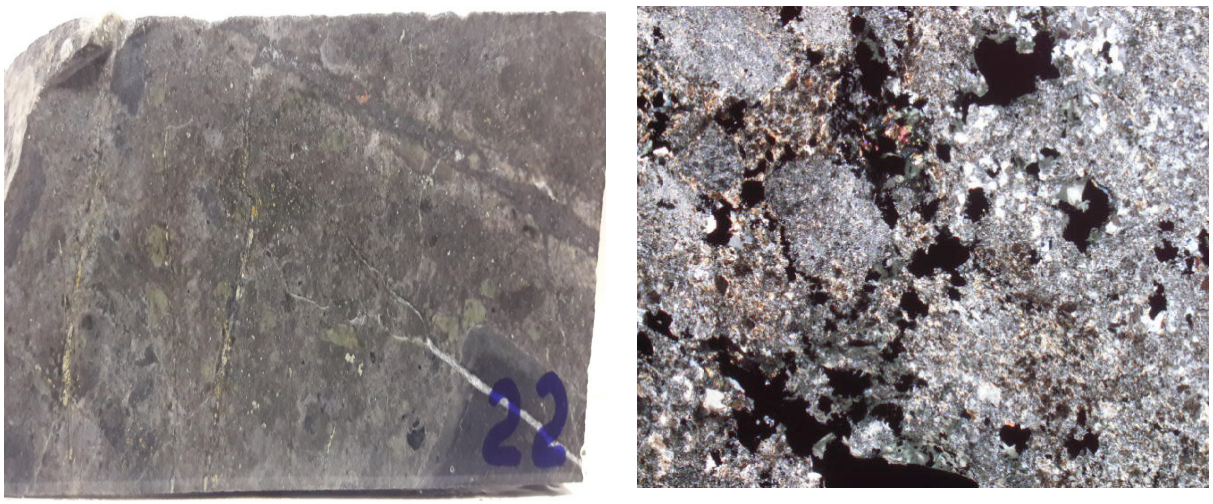

Рисунок 5 – Образец №5: хлорит-кварц-полевошпатовый метасоматит и его шлиф

Образец №5: хлорит-кварц-полевошпатовый метасоматит, текстура породы брекчиевидно-такситовая. Она состоит из фрагментов с разнородной структурой и текстурой. В некоторых наблюдается реликтовая пузыристая текстура и реликтовая микролитовая основная масса или массивная текстура и реликтовая порфировая структура. В других участках порода полнокристаллическая, вероятно диоритового состава, никаких реликтов исходных структур не сохранилось, и порода сложена неравномернозернистым агрегатом полевого шпата, кварца, многочисленными листочками хлорита и биотита. По многочисленным разно ориентированным прожилкам развивается рудный минерал, кварц, реже карбонат. Развитие карбонатных прожилков может быть связано с гидротермальной активностью. Присутствие эпидота указывает на метасоматическую переработку породы.

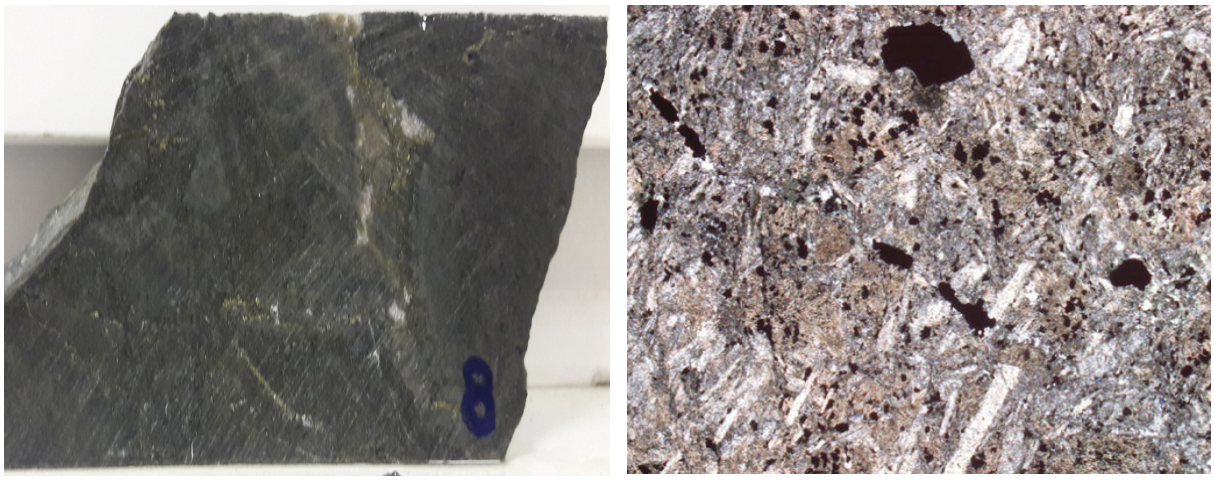

Рисунок 6 – Образец №6: андезит и его шлиф

Образец №6: андезит, интенсивно измененный. Структура линофировая, обусловленная субпараллельной ориентировкой удлиненных компонентов породы, и реликтовая сериально-порфировая, обусловленная постепенными взаимопереходами по величине между вкрапленниками и индивидами основной массы. Состоит порода из удлиненных призм, неравномерно

карбонатизированного плагиоклаза размером от 0,05 мм до 0,5 мм по удлинению, псевдоморфоз волокнистого бесцветного амфибола и карбоната, развитых по темноцветному минералу, чешуек хлорита, многочисленной рудной вкрапленности [7]. По немногочисленным микротрещинам развивается кварц, хлорит и карбонат.

Результаты и обсуждение

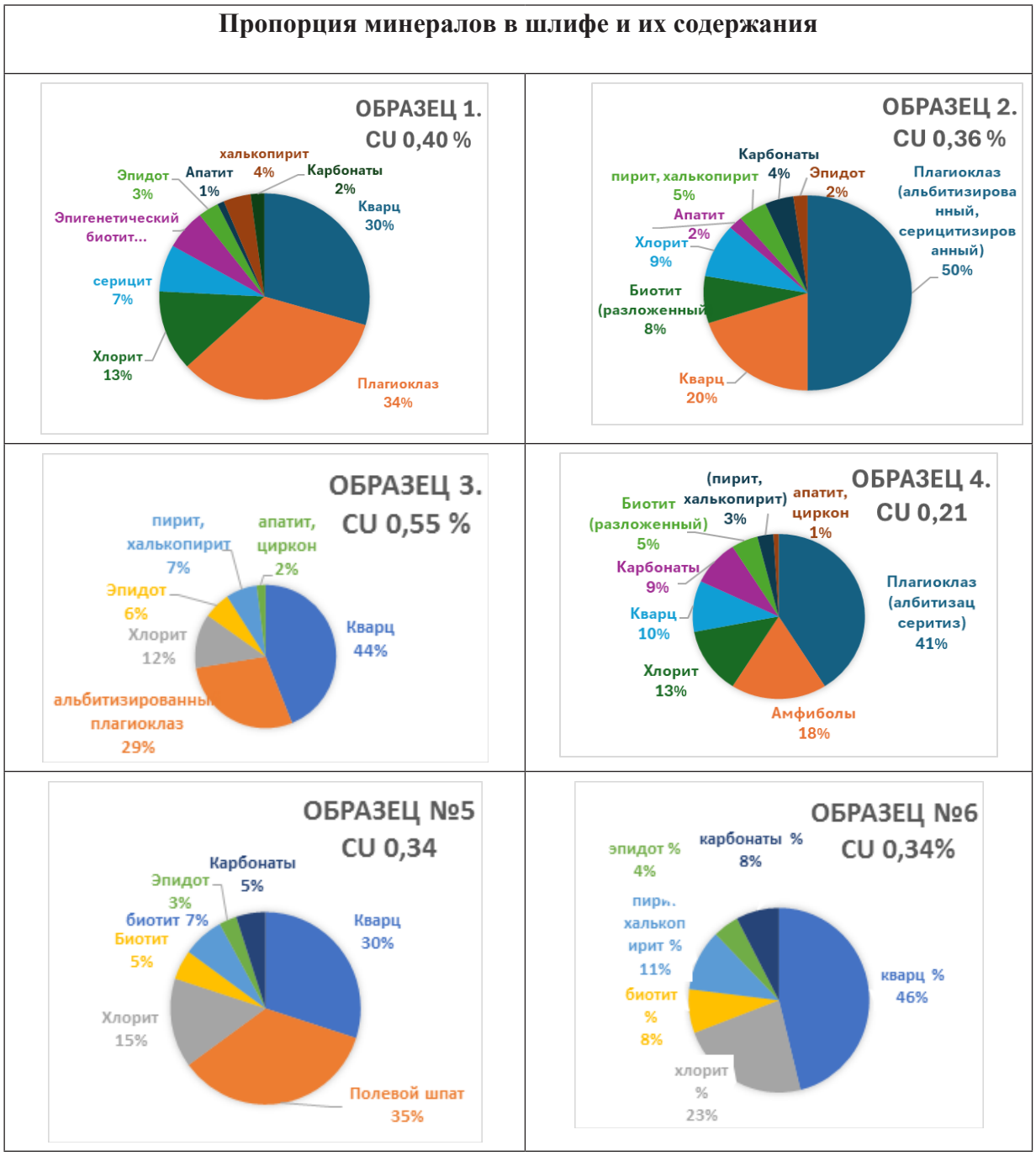

Рисунок 7 – Пропорция минералов в шлифе и их содержания

Для оценки влияния наиболее распространенных минералов на содержание рудных компонентов применяется коэффициент корреляции Пирсона (1). На основании данных, представленных в таблице 1, выполняется расчет степени влияния каждого минерала на содержание меди, что позволяет выявить закономерности распределения рудных элементов в породе.

$$r_{xy} = \frac{\sum(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

где,

x_i, y_i – значения двух переменных;
$\bar{x}, \bar{y}$ – средние значения этих переменных;
r – коэффициент корреляции Пирсона;
Интерпретация коэффициента r:
r = 1 полная положительная линейная зависимость;
r = –1 полная отрицательная линейная зависимость;
r = 0 отсутствие линейной зависимости.

Таблица 1 – Процентные показатели часто встречающихся минералов и их содержания

Cu%	0,40%	0,36%	0,55%	0,21%	0,34%	0,34%	Коэффициент корреляции
кварц %	30	20	44	10	30	46	0,702
плагиоклаз %	34	50	29	41	0	0	-0,026
хлорит %	13	9	12	13	15	23	-0,174
биотит%	6	8	0	5	5	8	-0,606
(пирит) халькопирит %	4	5	7	3	0	10	0,342
эпидот %	3	2	6	0	3	4	0,907
карбонаты %	2	4	0	9	5	8	-0,906

Заключение

Как видим в таблице 1, есть корреляция меди с кварцем, эпидотом и халькопиритом. Кварц влияет на распределение меди в меднопорфировых месторождениях только тогда, когда он образуется в результате заполнения трещин гидротермальными растворами, сопровождающими сульфидную минерализацию. В таких случаях кварц может служить индикатором рудоносных процессов [8]. Однако не весь кварц связан с накоплением меди – например, кварц пропилитовой альтерации или поздний кварц, сформировавшийся после основного этапа минерализации, не всегда указывает на высокое содержание медных руд. Здесь важно учитывать вторичные изменения. Эпидот сам по себе не является рудным минералом меди, часто образуется при метасоматических и гидротермальных процессах, особенно в зонах скарнов, где также могут присутствовать сульфиды меди.

ЛИТЕРАТУРА

1 Даулеев С.Ж., Водолецкий Э.С., Ужкенов Б.С. и др. Глубинное строение и минеральные ресурсы Казахстана: в 3 т. – Алматы, 2002. – Т. 1. – 248 с.

2 Геология СССР, Центральный Казахстан. – М: Недра, 1972. – Т. XX, кн. 2. – 380 с.

3 Атлас литолого-палеогеографических, структурных, палеоспластических и геоэкологических карт Центральной Евразии / Под ред. Федоренко О.А., Милетенко Н.В. – Алматы: ЦГОВС РК, 2002.

4 Коробкин В.В. Буслов М.М. Тектоника и геодинамика западной части Центрально-Азиатского складчатого пояса (палеозоиды Казахстана) // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52. – № 12. – С. 2032–2055.

5 Сидоренко А.В. Оптическое распознавание рудных минералов в отраженном свете. – М: Недра, 1975. – 264 с.

6 Атлас рудных минералов в отраженном свете / Под ред. А. Я. Кедрова. – М: Недра, 1990. – 200 с.

7 Сафонов Ю.Г., Григорьев В.Н., Смирнов В.Н. Металлогения и геодинамика Центрального Казахстана: новые данные и интерпретации // Геология и полезные ископаемые Центральной Азии. – 2021. – № 2. – С. 45–67.

8 Nghipulile T., Moongo T.E, Dzinomwa G., Maweja K., Mapani B., Kurasha J., Amwaama M. Effect of mineralogy on grindability – A case study of copper ores // Журнал Южноафриканского института горного дела и металлургии. – 2023. – Вып. 123. – №3. – С. 133–140.

REFERENCES

1 Dauleev, S.Zh., Vodoleckiy, E.S, Uzhkenov, B.S. Glubinnoe stroenie i mineral'nye resursy Kazakhstana: v 3 t. [Deep structure and mineral resources of Kazakhstan: in 3 vols.] (Almaty, 2002), vol. 1, 248 p. [in Russian].

2 Geologiya SSSR. Tsentral'nyi Kazakhstan [Geology of the USSR. Central Kazakhstan] (Moscow: Nedra, 1972), vol. 20, Book 2, 380 p. [in Russian].

3 Fedorenko, O.A. Miletenko, N.V. (Eds.) Atlas litologo-paleogeograficheskikh, strukturnykh, paleosplasticheskikh i geoekologicheskikh kart Tsentral'noi Evrazii [Atlas of lithological-paleogeographic, structural, paleosplastic and geo-ecological maps of Central Eurasia] (Almaty: TsGOVS RK, 2002). [in Russian].

4 Korobkin, V.V. Tectonics and geodynamics of the western part of the Central Asian fold belt (Paleozoids of Kazakhstan), Geologiya i Geofizika, 52(12), 2032–2055 (2011). [in Russian].

5 Sidorenko, A.V. Opticheskoe raspoznavanie rudnykh mineralov v otrazhennom svete [Optical recognition of ore minerals in reflected light] (Moscow: Nedra, 1975), 264 p. [in Russian].

6 Kedrov, A.Ya. (Ed.) Atlas rudnykh mineralov v otrazhennom svete [Atlas of ore minerals in reflected light] (Moscow: Nedra, 1990), 200 p. [in Russian].

7 Safonov, Yu.G, Grigoryev, V.N. Smirnov, V.N. Metallogeny and geodynamics of Central Kazakhstan: new data and interpretations, Geologiya i poleznye iskopaemye Tsentral'noi Azii, 2, 45–67 (2021). [in Russian].

8 Nghipulile, T., Moongo, T.E., Dzinomwa, G., Maweja, K, Mapani, B., Kurasha, J., Amwaama, M. Effect of mineralogy on grindability – A case study of copper ores. The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 123(3), 133–140 (2023).

[1]*Назирханов Э.Н.,
магистр, геолог, ORCID ID: 0009-0008-2768-6061,
*e-mail: eldornazirkhanov@mail.ru

[1]«KazMinerals Bozshakol» ЖШС, Екібастұз қ., Қазақстан

БОЗШАКӨЛ КЕН ОРНЫНДАҒЫ МИНЕРАЛОГИЯЛЫҚ ҚҰРАМ МЕН МЫС МӨЛШЕРІНІҢ ӨЗАРА БАЙЛАНЫСЫН КОРРЕЛЯЦИЯЛЫҚ ТАЛДАУ

Аңдатпа

Бұл жұмыста тау жыныстарындағы рудалық компоненттердің мөлшері мен олардың минералогиялық құрамымен өзара байланысы жан-жақты зерттелді. Зерттеудің мақсаты – бастапқы және екінші минералдардың құрамына байланысты, әсіресе мыс элементінің таралу заңдылықтарын анықтау. Жұмыс петрографиялық және минералогиялық зерттеу әдістерін қамтитын кешенді талдауға негізделген. Зерттеу аясында бұрғылау ұңғымаларынан алынған тау жынысы үлгілері егжей-тегжейлі зерттелді. Негізгі назар шлифтерді микроскопиялық талдауға аударылды, бұл тау жыныстарының құрылымдық-текстуралық ерек-

шеліктерін анықтап, негізгі және екінші минералдардың құрамын сандық бағалауға мүмкіндік берді. Дәлдікті арттыру мақсатында геохимиялық талдау әдістері қолданылды, нәтижесінде рудалық компоненттердің мөлшері нақтыланып, жыныстардағы әртүрлі минералдардың пайыздық үлесі анықталды. Нәтижелер мыс құрамының екінші өзгерістердің дәрежесі мен түріне, сондай-ақ халькопирит, екінші кварц, хлорит және серицит сияқты минералдардың болуына байланысты айтарлықтай өзгеретінін көрсетті. Мыс құрамының минералогиялық құраммен өзара байланысын анықтау және сандық бағалау үшін Пирсонның корреляция коэффициенті қолданылды. Бұл кейбір минералдар мен мыс концентрациясы арасындағы статистикалық маңызды тәуелділіктерді анықтауға мүмкіндік берді. Атап айтқанда, мыс құрамымен оң корреляциялар және жыныстардың қарқынды өзгерісі кезінде түзілетін минералдармен теріс байланыстар байқалды. Алынған нәтижелер геологиялық барлау жұмыстары үшін практикалық тұрғыдан маңызды. Айқындалған корреляциялық байланыстар керн сипаттамаларын талдау мен рудалылықты болжау модельдерін құруда қолдануға болады. Бұл барлау жұмыстарының тиімділігін айтарлықтай арттыруға мүмкіндік береді. Зерттеу барысында пайдаланылған әдістеме ұқсас минералдану жағдайлары бар басқа кен орындарында да бейімделіп қолданылуы мүмкін.

Тірек сөздер: петрографиялық талдау, Пирсон корреляция коэффициенті, шлиф, керн, кенділік.

[1]*Nazirkhanov E.N.
Master, Geologist, ORCID ID: 0009-0008-2768-6061,
*e-mail: eldornazirkhanov@mail.ru

[1]LLP “KazMinerals Bozshakol”, Ekibastuz, Kazakhstan

CORRELATION ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP BETWEEN MINERALOGICAL COMPOSITION AND COPPER CONTENT AT THE BOZSHAKOL DEPOSIT

Abstract

This survey presents a comprehensive investigation of the ore component content in rocks and its relationship with the mineralogical composition. The aim of the research was to identify patterns in the distribution of ore elements, particularly copper, depending on the composition of primary and secondary minerals. The work is based on an integrated analysis involving both petrographic and mineralogical research methods. As part of the study, a detailed examination of rock samples taken from borehole core was carried out. Particular attention was given to the microscopic analysis of thin sections, which made it possible to determine the textural and structural features of the rocks and perform a quantitative assessment of the content of primary and secondary minerals. To improve accuracy, geochemical analysis methods were used to refine the content of ore components and determine the percentage of various minerals in the rocks. The results showed that copper content can vary significantly depending on the degree and type of secondary alteration, as well as the presence of specific minerals such as chalcopyrite, secondary quartz, chlorite, and sericite. To identify and quantitatively assess the relationships between copper content and mineralogical composition, Pearson’s correlation coefficient was applied. This made it possible to establish statistically significant correlations between certain minerals and copper concentration. Positive correlations between copper content and specific minerals were identified, as well as negative correlations with minerals formed during intense alteration processes. The obtained results have practical significance for geological exploration. The revealed correlation relationships can be used during core description and in the development of predictive models of ore-bearing potential, which significantly increases the efficiency of exploration work. The methodology applied in this research can also be adapted for other deposits with similar mineralization conditions.

Keywords: petrographic analysis, Pearson correlation coefficient, thin section, core, ore potential.

Дата поступления статьи в редакцию: 11.05.2025