

Халькозиновая минерализация как основа длительной эксплуатации месторождения Жезказган и её генетические особенности

Аннотация. Приведены результаты изучения наиболее богатой медью и серебром халькозиновой минерализации в процессе геолого-минералогического картирования месторождения Жезказган. Построена трёхмерная минералогическая модель месторождения Жезказган. Выявлены и установлены закономерности развития халькозиновой минерализации, её минералогические и генетические особенности. Определено важнейшее значение халькозиновой минерализации при формировании уникального месторождения Жезказган и его эксплуатации.

Ключевые слова: халькозин, минерализация, трёхмерное моделирование, генезис, месторождение Жезказган, качество руд, медь, серебро.

НУРЖАНОВ ГАЛЫМ ЖУМАБАЕВИЧ, генеральный директор

НИЦЕНКО ПАВЕЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ, кандидат геолого-минералогических наук, главный геолог,
Pavel.Nitsenko@Kazakhmys.kz

ГУСЕВ АРТЁМ ВАЛЕРЬЕВИЧ, директор департамента прогнозно-ревизионных работ

Товарищество с ограниченной ответственностью «Kazakhmys Barlau (Казахмыс Барлау)», г. Астана, Республика Казахстан

Chalcocite mineralization as the basis for long-term exploitation of the Zhezkazgan deposit and genetic features of this mineralization

G. Zh. NURZHANOV, P. A. NITSENKO, A. V. GUSEV

Kazakhmys Barlau LLP, Astana, Republic of Kazakhstan

Annotation. The article presents results of a study of the most copper- and silver-rich chalcocite mineralization, performed during geological and mineralogical mapping of the Zhezkazgan deposit. Results of constructing a 3D mineralogical model of the Zhezkazgan deposit are presented. Regularities in the development of the chalcocite mineralization, its mineralogical and genetic features have been identified and studied. The crucial importance have been determined of the chalcocite mineralization in the formation of the unique Zhezkazgan deposit and its exploitation.

Key words: Chalcocite, mineralization, 3D modeling, genesis, Zhezkazgan deposit, quality of ores, copper, silver.

Введение. Месторождение Жезказган находится на территории юго-западной части Центрального Казахстана (область Улытау). В геологическом плане объект расположен в пределах северного сегмента Чу-Сарысульской задуговой впадины (бассейна) Центрально-Казахстанского окраинно-континентального вулcano-плутонического пояса [1, 11].

Месторождение занимает площадь около 87 км² (площадь горного отвода), промышленное оруденение локализовано в девяти рудоносных горизонтах по латерали. Под рудоносными горизонтами понимаются пачки красноцветных и сероцветных

алевролитов, песчаников, гравелитов и конгломератов, объединённые схожими литолого-фациальными условиями образования. Рудоносные горизонты представлены двумя свитами – нижней таскудукской (257 м) и верхней жезказганской (393 м) средне-позднекаменноугольного возраста, объединёнными в жезказганскую рудоносную толщу.

Жезказганское месторождение медистых песчаников, уникальное по запасам меди и крупное по запасам свинца, цинка, серебра и рения, отрабатывается открытым и подземным способами с 1928 г. К настоящему времени отработаны около

80% запасов руды, вместе с тем остаточные запасы составляют более 700 млн т балансовых и забалансовых руд.

Сверхдлительная эксплуатация месторождения объясняется не только огромными запасами меди, но и качеством руд. Основное значение имеет широкое развитие халькозиновой минерализации. Халькозин является самым богатым медью природным сульфидом (Cu 79,8%), содержит значительную примесь серебра. Встречается как в зонах вторичного сульфидного обогащения медных месторождений, так и в рудах гидротермальных кварцево-сульфидных жильных месторождений медных руд, ассоциирует с борнитом, халькопиритом и другими сульфидами, обогащается в основном флотацией.

Халькозиновая минерализация развита практически на всей территории Жезказганского месторождения, во всех рудоносных горизонтах и ассоциирует с другими типами медной минерализации.

Фактический материал и методы исследования. Для выяснения минералогических особенностей медной минерализации месторождения Жезказган в 2020–2024 гг. были выполнены работы по изучению специфики минералогической зональности и созданию современной минералогической модели месторождения. Работы основывались на результатах изучения 1454 аншлифов исторического периода 1970–1974 гг., 92 малых технологических проб (МТП), 753 керновых проб, отобранных из 35 пробуренных заверочных скважин (11 993 пог. м.), проб шлама из скважин буровзрывных работ, отобранных в 32 подземных забоях месторождения, и изготовленных на данном материале 113 шлифов и 811 аншлифов периода 2020–2023 гг.

Вещественный состав малых технологических проб изучен методами химического анализа и оптической микроскопии в проходящем и отражённом свете. Для выявления особенностей химического состава проб применялись следующие методы: атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ICP-AES), пробирный анализ золота методом атомно-абсорбционной спектрометрии, инфракрасная спектроскопия для определения общих серы, углерода, сульфатной серы, органического углерода. Данный аналитический комплекс выполнен в лаборатории «Stewart Geochemical and Assay» (г. Москва).

Минералого-петрографические исследования проб (МТП) проводились с помощью поляризации

онного микроскопа Olympus BX53, оснащённого цифровой камерой SIMAGIS XS-3CU, ООО «Новомэк» (г. Санкт-Петербург). Для изучения особенностей минералого-петрографического состава использовался фазовый анализ, который выполнялся в Региональном аналитическом центре «Механобр Инжиниринг Аналит» (г. Санкт-Петербург) на рентгеновском дифрактометре D2 PHASER методом полнопрофильного анализа Ритвельда и путём сравнения с дифрактограммами стандартов (ICDD PDF-2), с применением программ DIFFRAC.TOPAS и DIFFRAC.EVA.

Для изучения особенностей вещественного состава керновых проб были измерены содержания основных химических элементов (51 элемент) методом ICP-AES после царсководочного разложения. Пробирным анализом с ААС окончанием в керновых пробах измерено содержание золота. Во всех керновых пробах методом инфракрасной спектроскопии определены общая сера (S), сульфатная сера ($S_{\text{сульф.}}$) и общий углерод (C) и органический углерод ($C_{\text{орг.}}$). В керновых пробах с признаками окисления методом фазового анализа определены общая, окисленная, первичная и вторичная медь. Минералого-петрографические исследования полированных шлифов и аншлифов керновых проб проводились под микроскопами марки LEICA DM 2500P в проходящем и отражённом свете, микрофотосъёмка – с использованием штатной ЦФК LEICA и ЦФК CANON-D 70 (г. Алматы).

Изготовленные из шламовых проб прессованные брикеты изучались методами оптической микроскопии в отражённом свете с использованием микроскопа марки Olympus BX53, оснащённого цифровой камерой SIMAGIS XS-3CU. Полученные результаты обрабатывались при помощи специализированного программного обеспечения – анализатора фрагментов микроструктуры твёрдых тел «Минерал С7» компании SIAMS. Минералого-петрографические исследования брикетов шламовых проб выполнялись ТОО «КазГидро-Медь» (г. Караганда).

На основании полученных результатов проанализированы минералого-петрографические особенности типов руд с определением минералогических разностей основных рудных компонентов, их количественных соотношений и минералогических типов оруденения. Удалось восстановить и смоделировать пространственное положение на месторождении двадцати одного минералогического типа медной минерализации в неотрабо-

таных запасах (табл. 1), а также в обработанных панелях, штреках, забоях – в оставшихся целиках. В целом по минералогическим типам классифицировано порядка 63 % площади всего месторождения.

Промышленная значимость халькозиновой минерализации. Как показало минералогическое моделирование, на месторождении из всех выделенных типов медных руд наиболее распространена халькозиновая минерализация, составляющая более 65 % объёма медного оруденения (см. табл. 1). Она развивается как самостоятельно, так и в ассоциации с не менее богатой борнитовой минерализацией. В остальных минералогических

типах халькозин встречается преимущественно в виде включений или замещает сульфиды меди, образуя псевдоморфозы.

В результате минералогического моделирования получена трёхмерная минералогическая модель месторождения, которая позволяет вести планирование добычных работ с учётом качества руды, зависящего от минералогического состава.

Минералогическая модель отражает 21 тип руд (см. табл. 1), но для изучения влияния халькозиновой минерализации на эффективность эксплуатации месторождения, особенностей распределения данного типа оруденения в структуре месторождения и её генезиса модель была усреднена

Табл. 1. Выделенные минералогические типы медной минерализации на месторождении Жезказган

№ п/п	Минералогические типы руды	Обозначение	Доля оруденения, %
1	Халькозиновый*	Cu (hz)	50,6
2	Халькопирит-галенит-сфалеритовый	Cu-Pb-Zn (cp-ga-sph)	1,1
3	Борнитовый	Cu (b)	0,4
4	Борнит-халькопиритовый	Cu (b-cp)	12,3
5	Борнит-халькозиновый	Cu (b-hz)	14,8
6	Халькопиритовый	Cu (cp)	10,5
7	Борнит-халькопирит-галенитовый	Cu-Pb (b-cp-ga)	1,0
8	Борнит-галенитовый	Cu-Pb (b-ga)	0,01
9	Борнит-галенит-сфалеритовый	Cu-Pb (b-ga-sph)	0,1
10	Борнит-халькозин-галенитовый	Cu-Pb (b-hz-ga)	0,4
11	Халькопирит-галенитовый	Cu-Pb (cp-ga)	2,2
12	Халькозин-галенитовый	Cu-Pb (hz-ga)	0,01
13	Борнит-халькопирит-галенит-сфалеритовый	Cu-Pb-Zn (b-cp-ga-sph)	0,6
14	Борнит-халькозин-галенит-сфалеритовый	Cu-Pb-Zn (b-hz-ga-sph)	0,1
15	Халькозин-галенит-сфалеритовый	Cu-Pb-Zn (hz-ga-sph)	0,1
16	Борнит-халькопирит-сфалеритовый	Cu-Zn (b-cp-sph)	0,2
17	Борнит-халькозин-сфалеритовый	Cu-Zn (b-hz-sph)	0,01
18	Халькопирит-сфалеритовый	Cu-Zn (cp-sph)	0,6
19	Галенитовый	Pb (ga)	2,8
20	Галенит-сфалеритовый	Pb-Zn (ga-sph)	0,7
21	Сфалеритовый	Zn (sph)	1,5

Примечание. * – халькозиновая минерализация учитывается только в тех типах, где она является основной.

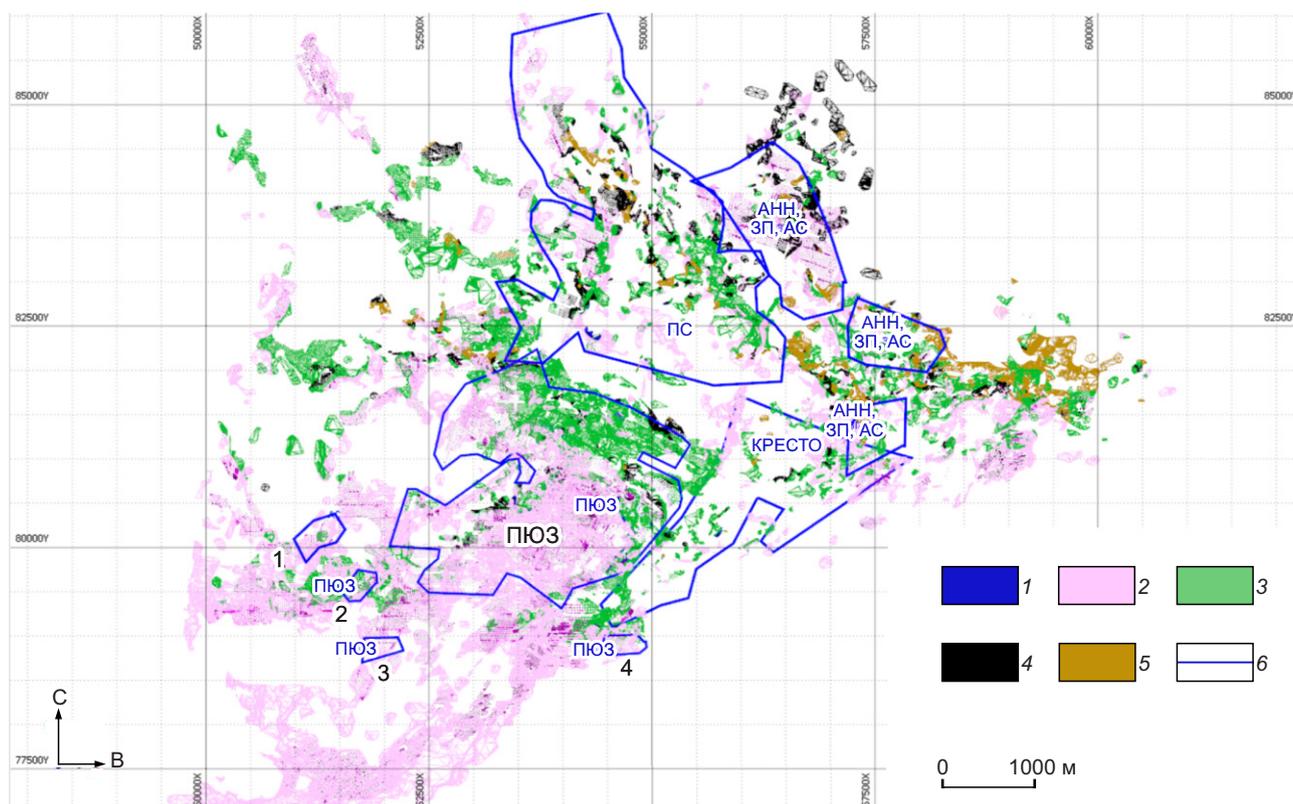


Рис. 1. Распределение основных типов минерализации месторождения Жезказган, согласно полученной трёхмерной минералогической модели (вид сверху). Синей линией указаны контуры отработки до 1987 г.:

1–5 – минерализация: 1 – борнитовая, 2 – халькозиновая, 3 – халькопиритовая, 4 – галенитовая, 5 – сфалеритовая; 6 – контуры отработки до 1987 г.

до основной минерализации: борнитовой, халькозиновой, халькопиритовой, галенитовой и сфалеритовой (рис. 1).

Как видно из рис. 1, халькозиновая минерализация простирается более чем на 12 км в северо-восточном направлении, развита на более чем 60 % площади распространения всей рудной жезказганской минерализации, во всех рудниках (Западный, шахты 73/75, 67/70; Восточно-Жезказганский рудник, шахты 55/31, 57, Анненская; Южно-Жезказганский, шахта 45/65) и, соответственно, играет основную роль в эксплуатируемых запасах.

В табл. 2 приведены основные параметры рудных тел, классифицированных по основным типам минерализации.

На месторождении преимущественно развита халькозиновая минерализация, которая действительно имеет основное значение в объёме запасов медных руд.

Наиболее эффективным этапом эксплуатации месторождения Жезказган считается период с 1974 по 1987 гг., когда были достигнуты максимальные показатели добычи меди и значительного компенсационного прироста запасов.

На рис. 2 показана динамика запасов промышленных категорий $A + B + C_1$ на месторождении Жезказган в 1928–2018 гг., иллюстрирующая эффективность его отработки.

Эффективность отработки месторождения в 1974–1988 гг. объясняется тем, что именно в 1974 г. были завершены обширные минералого-петрографические исследования, по результатам которых впервые была установлена минералогическая зональность природных минералогических типов руд (Г. Д. Младенцов, 1973).

Минералогическая зональность медных руд существенно влияет на их качество. Например, халькозиновая минерализация обеспечивает высокое содержание меди и серебра в добываемой руде.

Табл. 2. Основные параметры рудных тел на месторождении Жезказган*

Тип минерализации**	Суммарная площадь в плане, м ²	Доля от общей площади развития минерализации, %	Средняя вертикальная мощность рудных тел, м	Суммарный объём рудных тел, м ³	Доля от общего объёма руды, %
Борнитовая	120 522	0,5	7,2	589 514	0,4
Галенитовая	1 752 964	6,6	7,1	10 121 791	6,1
Сфалеритовая	1 268 902	4,8	7,0	8 247 486	5,0
Халькозиновая	16 316 116	61,7	7,0	107 485 743	65,1
Халькопиритовая	6 983 680	26,4	6,4	38 693 364	23,4
Общий итог	26 442 184	100,0	6,9	165 137 897	100,0

Примечание. * – состояние параметров на март 2023 г.; ** – параметры включают минерализацию в рудных телах и межкамерных целиках (МКЦ).

Технологические показатели обогащения также зависят от минералогических особенностей состава руд. Например, при одинаковых содержаниях меди борнит-халькозиновый тип отличается крупными взаимными сростаниями, легко отделяемыми при флотационной технологии, а соседствующий с ним халькопиритовый представлен уже мелковкрапленной минерализацией, часто в сростаниях со сфалеритом, оксидами железа и титана (рис. 3).

Принимая во внимание высокую важность минералогического состава медных руд, порядок его описания и учёта при первичной геологической документации был внесён в «Инструкцию по геологическому обслуживанию рудников Джезказганского ГМК», и минералогическая зональность стала учитываться при первичной геологической документации и планировании отработки. Такой подход и обусловил высокую эффективность отработки месторождения в 1974–1987 гг. В настоящее время минералогический состав медных руд при первичной документации не учитывается.

На полученной в 2024 г. трёхмерной минералогической модели месторождения Жезказган восстановлены контуры отработки до 1987 г. (см. рис. 1). В контуры отработки периода наибольшей эффективности эксплуатации попадают преимущественно площади развития халькозиновой минерализации, особенно шахтное поле Покро-Юго-Западный (ПЮЗ), повторяющее конфигурацию развития минерализации в юго-западном направлении. Кроме того, в поле развития халькозино-

вой минерализации проходились отдельные панели (1–4), вероятно, для поддержания высокого содержания меди в объёме добываемой руды.

Анализ исторического опыта эксплуатации месторождения Жезказган показывает, что учёт минералогической зональности при добыче повышает эффективность отработки, а правильное шихтование руд халькозиновой минерализации с другими типами позволяет эффективно контролировать содержание меди в добываемом сырье.

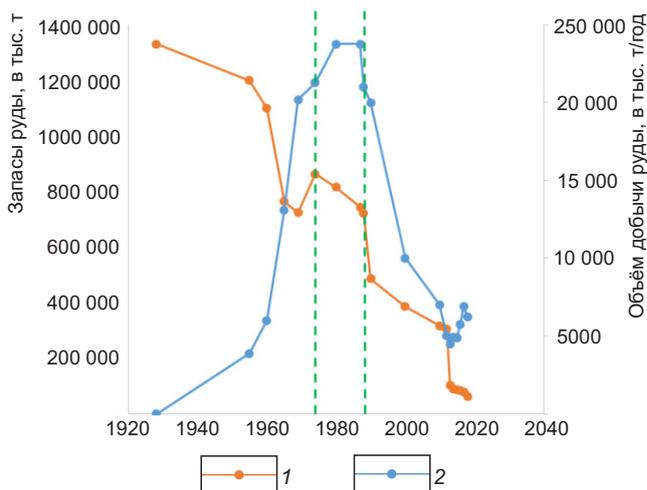


Рис. 2. Движение запасов категорий А + В + С₁ на месторождении Жезказган:

1 – запасы, 2 – добыча

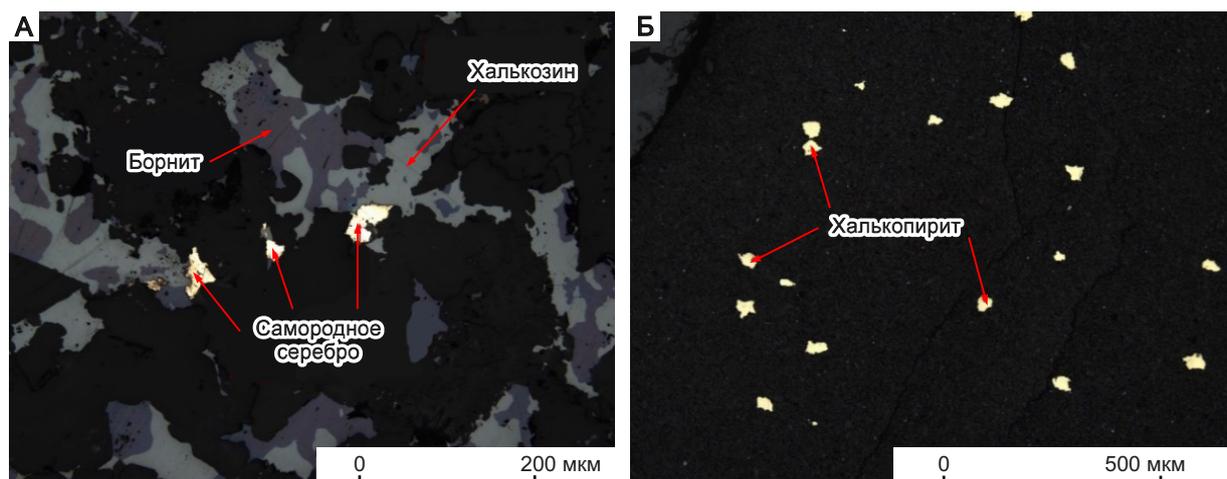


Рис. 3. Размерность медных минералов в аншлифах из МТП 2024 г.:

типы: А – борнит-халькозиновый – сростания (от первых мкм до 1,5 мм) и Б – халькопиритовый – зёрна и сростки с оксидами железа и титана (от первых мкм до 100 мкм)

Генетические особенности халькозиновой минерализации. Важным аспектом для понимания природы рудообразования, перспектив месторождения и правильного направления дальнейших поисков для восполнения добываемых запасов меди является генезис халькозиновой минерализации.

Как известно, халькозин может образовываться гипогенным или гипергенным путём, то есть либо при восстановлении из гипогенных низкотемпературных растворов, либо в процессе дообогащения первичных медных сульфидов медью за счёт миграции сульфатных растворов из зоны выщелачивания.

В гипергенных условиях месторождения Жезказган образование халькозина происходило преимущественно за счёт выщелачивания меди из следующей по распространённости халькопиритовой минерализации с переотложением её в виде халькозина в гипсометрически пониженные проницаемые места, как правило, с другой морфологией халькозиновых рудных тел: богатые маломощные линзы концентрации, натёчные формы, псевдоморфозы халькозина по другим медным сульфидам и др.

Такие проявления вторичной халькозиновой минерализации в рудной зоне месторождения обнаруживаются только в самых нижних залежах 2-I и 2-V нижнего рудоносного горизонта Злато-

уст, где они занимают весьма ограниченную общую площадь около 0,007 км². Основная халькозиновая минерализация обладает другими морфологическими особенностями.

Как видно из табл. 2, на месторождении Жезказган рудные тела с халькозиновой минерализацией сохраняют среднюю вертикальную мощность, аналогичную таковой других типов первичной сульфидной минерализации, в том числе и халькопиритовой.

На рис. 4 показан широтный разрез через халькозиновую и халькопиритовую минерализацию. Халькопиритовая и халькозиновая минерализации в разрезе совпадают по средним мощностям, аналогичны по морфологии и гипсометрически залегают как выше, так и ниже относительно друг друга. Выдерживание средней мощности и морфологии рудных тел с халькопиритовой и халькозиновой минерализацией – структурный признак единого процесса формирования минерализации.

Основная масса халькозиновой минерализации не является гипергенной производной первичных халькопиритовых руд, условия образования халькозина можно считать гипогенными.

Рассматривая особенности образования различных минералогических типов оруденения, нельзя не коснуться вопроса общей генетической модели формирования месторождения Жезказган. На настоящий момент существуют несколько

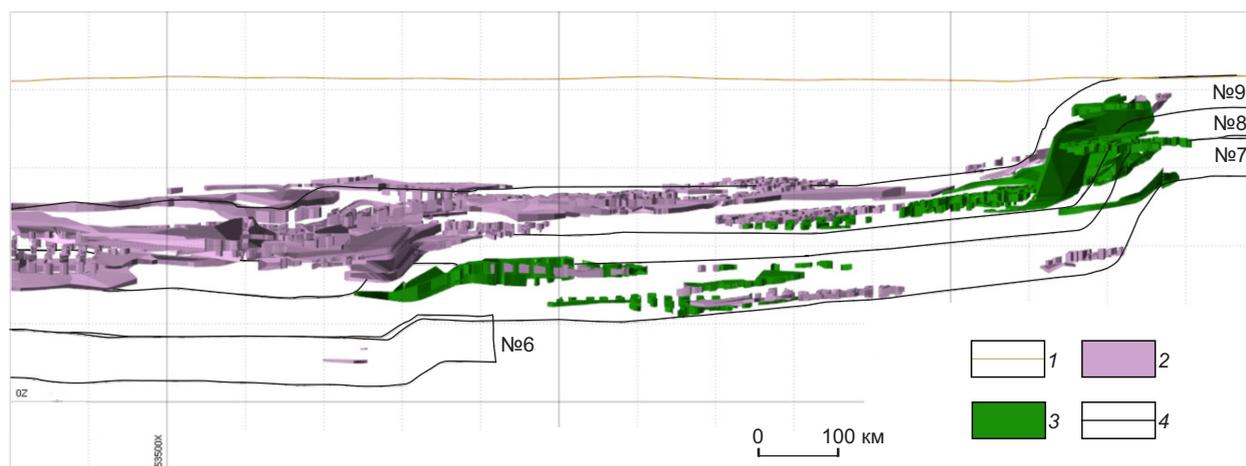


Рис. 4. Разрез рудных горизонтов с халькозиновой и халькопиритовой минерализацией (трёхмерная минералогическая модель месторождения Жезказган):

1 – поверхность рельефа; 2–3 – минерализация: 2 – халькозиновая, 3 – халькопиритовая; 4 – рудные горизонты (номера)

рудогенетических моделей для месторождений типа «медистых песчаников и сланцев» – гидротермально-метасоматическая, эпигенетическая (гидрогенная), седиментационно-диагенетическая, седиментогенная и др. [8]. Наиболее общепризнана модель формирования медной минерализации в песчаниках, в ходе процессов миграции меди в составе рассолов, обогащённых хлоридом в объёме толщ красноцветных формаций, и осаждения медных сульфидов при попадании их в восстановительную сероводородную среду (на сероводородном геохимическом барьере) [4, 9]. При этом возникает вопрос об источнике меди для рассолов, в качестве которого обычно предполагают вмещающие породы – красноцветные толщи, однако сверхнизкие концентрации в них меди не позволяют объяснить огромные размеры месторождения Жезказган и широкое развитие на нём богатой медью халькозиновой минерализации. Для образования таких крупных объектов, как месторождение Жезказган, необходим промежуточный крупный концентратор меди, в качестве которого потенциально может выступать «законсервированная» рудно-магматическая система.

Изотопные данные указывают на биогенное происхождение сульфидной серы в рудах [2, 3, 7, 9 и др.]. При этом главной особенностью изотопии серы на месторождении является преобладание лёгких изотопов (абсолютное большинство

значений δS^{34} составляет от 13 до -15‰) с редкими отклонениями δS^{34} для отдельных проб. Общее изотопное единообразие серы сульфидов, слагающих рудные жилы и оруденелые песчаники, свидетельствует о едином источнике серы для всех рудных минеральных ассоциаций месторождения [7].

Можно говорить о едином генезисе основного объёма рудной минерализации на месторождении.

О генезисе халькозиновой минерализации также можно судить по косвенным факторам взаимодействия халькозинового минералогического типа с сульфидной серой.

В 2023 г. методом инфракрасной спектроскопии в 92 МТП и 753 керновых пробах были определены общая сера, углерод, сульфатная сера, органический углерод и рассчитаны показатели сульфидной серы для основной медной минерализации (табл. 3).

В МТП с халькозиновой минерализацией резко понижены содержания серы – среднее значение 0,149%, в то время как в других медных типах они составляют 0,268–0,9%, а в полиметаллических (галенитовый и сфалеритовый) – уже 0,644–1,499%.

Пониженные содержания серы в наиболее богатой медью и наиболее распространённой на месторождении халькозиновой минерализации могут свидетельствовать о том, что при её формировании

Табл. 3. Содержание сульфидной серы в МТП минералогических типов медной минерализации месторождения Жезказган

№ п/п	Основная минерализация / Минералогические типы руды*	Среднее S-сульфид %	Минимум S-сульфид %	Максимум S-сульфид %
1.	Борнитовая минерализация	0,268	0,110	0,480
1.1	Сфалерит-халькозин-халькопирит-борнит (+серебро)	0,480	0,480	0,480
1.2	Халькозин-халькопирит-борнит (+серебро)	0,230	0,230	0,230
1.3	Халькопирит-борнит (+серебро)	0,250	0,250	0,250
1.4	Халькопирит-халькозин-борнит	0,110	0,110	0,110
2.	Галенитовая минерализация	0,644	0,310	1,070
2.1	Сфалерит-борнит-халькопирит-галенит	0,520	0,520	0,520
2.2	Сфалерит-халькопирит-галенит	0,690	0,310	1,070
2.3	Теннантит (?) -сфалерит-халькопирит-галенит	0,750	0,750	0,750
2.4	Халькопирит-галенит	0,560	0,560	0,560
3.	Сфалеритовая минерализация	1,499	0,360	6,790
3.1	Борнит-теннантит (?) -халькопирит-галенит-сфалерит	2,270	2,270	2,270
3.2	Галенит-теннантит (?) -халькопирит-борнит-сфалерит	1,320	1,320	1,320
3.3	Галенит-халькопирит-сфалерит	0,923	0,560	1,470
3.4	Теннантит (?) -галенит-халькопирит-борнит-сфалерит	1,350	1,350	1,350
3.5	Теннантит (?) -галенит-халькопирит-сфалерит	0,703	0,360	1,040
3.6	Халькопирит-галенит-сфалерит	2,274	0,500	6,790
4.	Халькозиновая минерализация	0,149	0,080	0,630
4.1	Борнит-халькозин	0,080	0,080	0,080
4.2	Борнит-халькозин (+серебро)	0,135	0,130	0,140
4.3	Борнит-халькопирит-халькозин	0,100	0,100	0,100
4.4	Галенит-халькопирит-борнит-халькозин (+серебро)	0,150	0,150	0,150
4.5	Сфалерит-теннантит-халькопирит-борнит-халькозин (+серебро)	0,120	0,120	0,120
4.6	Халькопирит-борнит-халькозин	0,181	0,080	0,630**
4.7	Халькопирит-борнит-халькозин (+серебро)	0,145	0,090	0,230
5.	Халькопиритовая минерализация	0,901	0,210	2,950
5.1	Борнит-халькопирит	0,210	0,210	0,210
5.2	Галенит-сфалерит-халькопирит	1,276	0,330	2,950
5.3	Сфалерит-галенит-халькопирит	0,330	0,330	0,330
5.4	Халькозин-сфалерит-борнит-халькопирит	0,290	0,290	0,290
	Общий итог	0,746	0,080	6,790

Примечание. * – основные минералы приведены в порядке возрастания встречаемости в аншлифах, слева направо; ** – одна из восьми проб в минералогическом типе, показавшая максимальное содержание серы.

Табл. 4. Сравнительная характеристика высотного положения основной минерализации

Основная минерализация	Количество точек треугольников каркасов рудных тел, точки	Минимальная абс. высота точек, м	Максимальная абс. высота точек, м	Средняя абс. высота центроидов треугольников каркасов рудных тел
Борнитовая	39 737	-127,2	390,2	254,4
Галенитовая	212 162	-152,7	417,7	182,1
Сфалеритовая	122 187	-95,9	420,0	153,6
Халькозиновая	2056 875	-501,4	446,5	134,8
Халькопиритовая	753 491	-181,4	435,9	201,8

окружающая восстановительная обстановка была относительно низкосернистой, то есть отсутствовал дополнительный привнос серы в систему.

Можно предположить, что минерализация была сформирована за счёт инфильтрации медных гидротермальных растворов из богатого медью и бедного сульфидной серой рудного объекта – промежуточного концентратора меди. В качестве таких объектов, предположительно, могут быть более древние медно-порфировые и кварцево-сульфидные месторождения.

Гидротермальные растворы могли формироваться за счёт ювенильных вод рифтовой зоны и их взаимодействия с эвапоритовыми толщами, благодаря чему растворы обогащались хлор-ионом. В результате их циркуляции происходили выщелачивание и перенос меди из промежуточного концентратора. Ювенильные воды (флюиды) проникали сквозь древние зоны медной минерализации сульфидных руд, формировали подвижные формы меди и обеспечивали миграцию её вверх в зону благоприятного отложения, которая сложилась в жезказганской толще. Для протекания описанного процесса промежуточный концентратор меди должен быть «законсервированным», то есть погребённым отложениями задугового прогиба, и разрушение его происходило только гидрохимическим путём.

Механизмы выщелачивания и переноса минерального вещества ювенильными водными флюидами достаточно полно описаны в современной литературе. Ювенильные флюиды способны играть роль «транспортного средства» при переносе рудных компонентов к зоне рудоотложения [6]. Температура данных вод должна соответствовать диапазону 100–200 °С для взаимодействия и переноса с низко-умереннотемпературными халь-

козином и самородным серебром. Растворы формируются в глубинных очагах и поднимаются к поверхности по ослабленным зонам, образуя по мере остывания халькозиновую минерализацию с широким размахом по вертикали.

В табл. 4 приведены сравнительные характеристики высотных положений каркасов основных типов оруденения, показывающие размах развития халькозиновой минерализации по гипсометрическим уровням. Наиболее распространённая на месторождении халькозиновая минерализация (наибольшее число точек треугольников каркасов рудных тел) имеет наименьшую абсолютную высотную отметку (-501,4 м) и наибольшую максимальную (446,5 м) при схожей с другими типами минерализации средней высоте центроидов треугольников каркасов рудных тел. Это означает, что халькозиновая минерализация расположена, большей частью, на схожем гипсометрическом уровне с другими типами минерализации, но в отличие от них характеризуется широким размахом по вертикали и связана с глубинными зонами геологического разреза территории. Такая связь может быть проинтерпретирована как каналы доставки меди гидротермальными растворами при формировании халькозиновой минерализации.

Для выявления потенциальных каналов поступления растворов использован гипсометрический метод, основанный на построении в ПО «Micromine» изолиний высотных отметок поверхностей каркасов рудных тел халькозиновой минерализации. Трёхмерный рисунок изолиний (горизонталей) кровли рудных тел для осадочных или стратиформных месторождений отражает «подземный рельеф» проницаемых зон, по которым происходили миграция и разгрузка обогащённых медью растворов. В результате моделирования

удалось установить гипсометрическое положение халькозиновой минерализации и определить возможные пути миграции растворов, образующих её (рис. 5).

Как видно на рис. 4, халькопиритовая минерализация расположена примерно на том же гипсометрическом уровне, что и халькозиновая, но последняя имеет более крутые профили склонов, особенно в зонах разломов, залегает как выше, так и ниже халькопиритовой. Халькозиновая минерализация формирует сложнопостроенную поверхность, охватывающую разные гипсометрические уровни между Восточно-Улытауским и Теректинским разломами. На поверхности выявляются зоны вблизи разломов, где горизонталы халькозиновой минерализации значительно погружаются, а также район Акчий-Спасского карьера, где наблюдается значительное вздымание горизонталей халькозиновой минерализации, с выходом на дневную поверхность. Гипсометрическая модель халькозиновой минерализации позволяет в общих чертах определить направления поступления обогащённых медных растворов из глубинных частей, а зоны погружения горизонталей, вероятно, служат каналами их миграции.

На рис. 5 синими пунктирными стрелками указаны предварительные направления соединения наиболее низких и высоких частей поверхностей халькозиновой минерализации – возможные направления проникновения медных растворов из очагов генерации.

На месторождении Жезказган локализованы (на современном уровне развития минерализации) пять участков вероятных зон генерации гидротермальных медных растворов. Это зоны вдоль Теректинского и Восточно-Улытауского разломов, и зона восточней Акчий-Спасского карьера» (на рис. 5 показаны условными номерами).

Характер распределения халькозиновой минерализации в структуре месторождения может рассматриваться как своеобразный поисковый признак, а зоны возможного развития каналов миграции гидротермальных растворов служить перспективными направлениями для поисков более глубоких залежей, которые потенциально могли выступать в роли промежуточных концентраторов меди.

Гидротермальные растворы в очагах их генерации находятся под литостатическим давлением и отличаются большей тепловой энергией, чем перекрывающие горные породы, поэтому их дви-

жение к поверхности происходит в результате естественной конвекции и инфильтрации. Растворы должны мигрировать по поровому пространству и трещинам в породах, зонам разломов и при остывании до температуры кристаллизации халькозина, формировать халькозиновую минерализацию в условиях восстановительной обстановки.

Формирование халькозиновой минерализации за счёт привноса и отложения меди из растворов оказывает специфическое влияние на особенности рудной минерализации и петрографию вмещающих горных пород.

Минералогические особенности халькозиновой минерализации. Собственно, халькозиновый минералогический тип оруденения представлен мелкозернистыми агрегатами халькозина в интерстициях зёрен нерудных минералов, в виде гнезд и кайм вокруг обломков пород, в виде халькозинового цемента вдоль слоистости или в виде прожилков в трещинах горных пород, в которых происходила разгрузка раствора (рис. 6).

Проиллюстрированные на рис. 6 формы выделения халькозиновой минерализации развиты во всех девяти рудных горизонтах месторождения Жезказган, формируя своеобразную основу, куда «вложены» борнит-халькозиновый и халькопиритовый минералогические типы руд.

В мономинеральной халькозиновой минерализации очень редки или полностью отсутствуют другие сульфиды меди и железа. Вероятно, это связано с относительной нехваткой железа в халькозиновой минерализации, поскольку она пересыщена медью.

Халькопирит в пробах халькозинового типа руды встречается редко, в виде единичных ксеноморфных изометричных зёрен и в сростках с борнитом, пиритом, ковеллином, оксидами железа и титана и раздельно от халькозиновой минерализации. Борнит присутствует преимущественно в мирмекитовых сростках с халькозином с волнистыми и извилистыми границами прорастания.

Халькозиновая минерализация наиболее обогащена серебром, его среднее содержание серебра составляет 8,7 г/т (при максимальном 82,2 г/т), что является наиболее высоким среди всех типов медной минерализации. Серебро в медных рудах месторождения находится в самородном виде, а в минеральной форме фиксируется редко.

Тесная связь серебра с медью именно в халькозиновой руде установлена ещё в 1970-х гг.

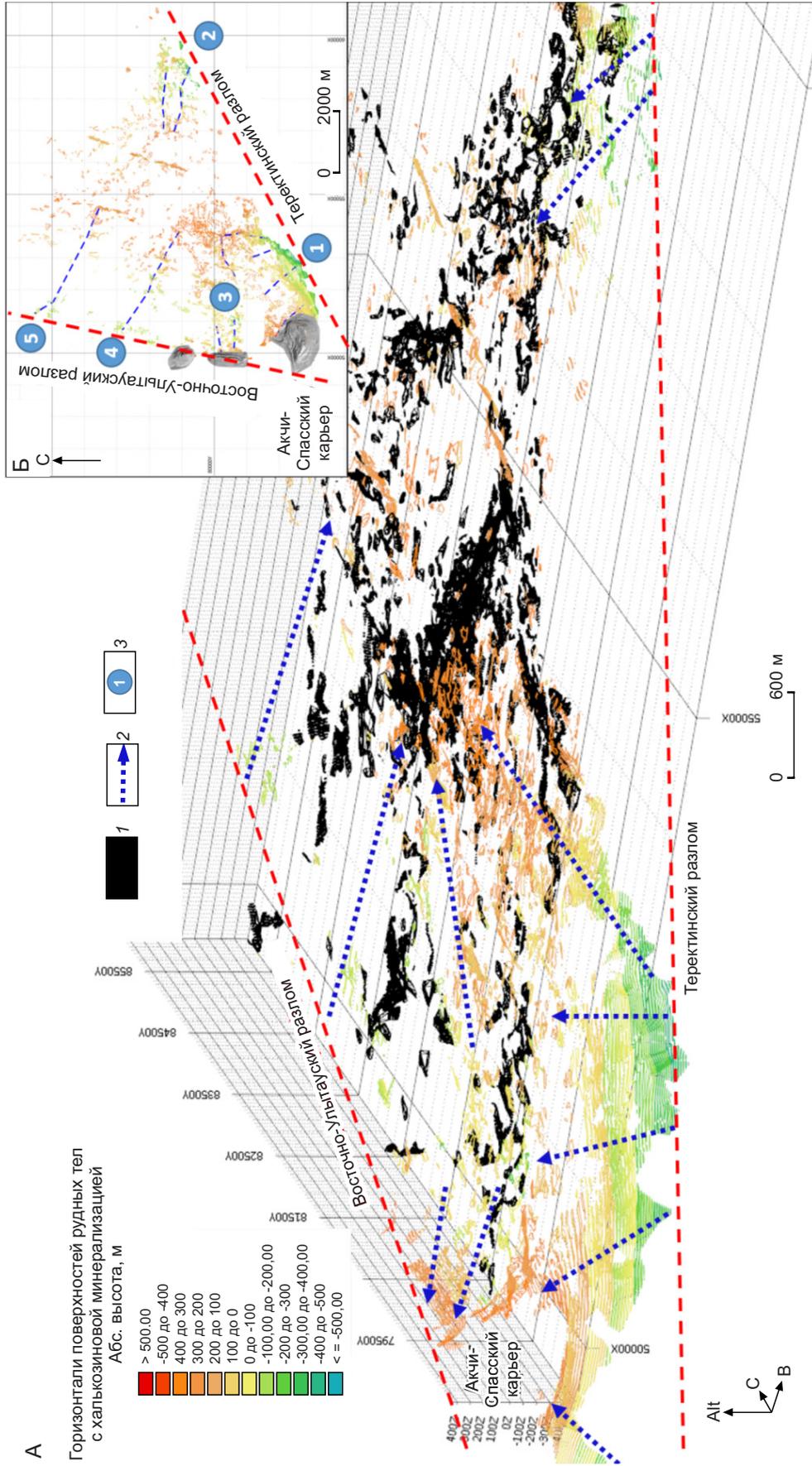


Рис. 5. Гипсометрическая модель образования халькозеновой минерализации:

А – 3D-модель, Б – план; 1 – халькопиритовая минерализация; 2 – направление проникновения низкотемпературных медных растворов; 3 – участки вероятных зон генерации гидротермальных медных растворов

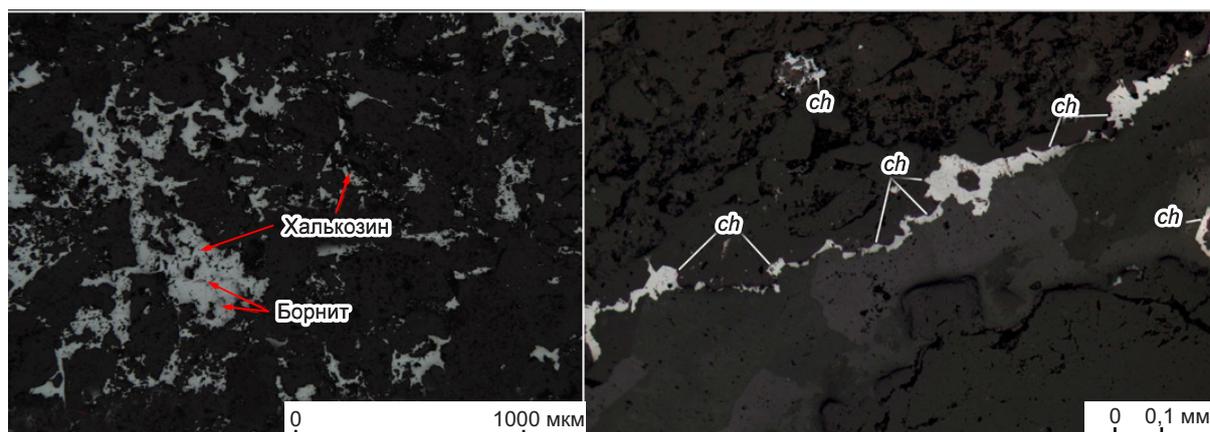


Рис. 6. Халькозиновая минерализация в аншлифах из МТП 2024 г.

в результате изучения закономерностей распределения серебра в рудах месторождения Джек-казган (Ш. Е. Есенов, 1976). Серебро спорадически встречается во всех типах медной минерализации, но наибольшая корреляция его с халькозином». Объяснения этому тогда не были даны. При этом также было установлено, что одни и те же сульфиды меди в разных частях месторождения обладают разной сереброносностью. Сегодня спорадический характер нахождения серебра в руде выявляется при обогащении, на фабрике.

Рассматриваемый в настоящей работе вариант формирования халькозиновой минерализации за счёт гидрохимического разрушения законсервированной древней медно-порфировой системы (промежуточного концентратора меди) косвенно объясняет спорадическую сереброносность халькозиновых руд тем, что растворы растворяли и переносили серебро из эпитермальных, жильных образований, сопровождающих медно-порфировую систему.

На рис. 7 показаны взаимоотношения халькозиновой минерализации с борнитом, халькопиритом и самородным серебром. Как видно на рисунках 6 и 7, халькозиновая минерализация, выполняющая основной объём месторождения, представлена либо мономинеральным, халькозиновым агрегатом, либо агрегатами с богатым медью борнитом и самородным серебром. Серебро обычно присутствует в халькозиновой минерализации в виде изоморфной примеси, повторяет форму выделений халькозина, что может говорить о едином

временном поступлении меди и серебра в растворах и их совместном отложении.

Петрографические особенности вмещающих пород. Известно, что в рудоносных песчаниках месторождения Жезказган имеются прослои «раймундовских» конгломератов, галька которых состоит из окремнённых известняков, кварца, эффузивных и метаморфических пород, гранитоидов из области сноса. По данным петрографических исследований МТП в 2022–2024 гг., халькозиновая минерализация развивается в средне-мелкозернистых и мелкозернистых аркозовых песчаниках. Цемент – преимущественно глинистый, реже гидрослюдисто-глинистый, карбонатный, кварцевый.

Породообразующие минералы – обломки кварца, калиевых полевых шпатов, микрокварцитов, эффузивов, глинистых, гидрослюдисто-глинистых и карбонатных пород разной окатанности.

В табл. 5 приведены результаты качественного и полуколичественного рентгенофазового анализа по определению породообразующих минералов в МТП из разных типов основной минерализации.

Как видно из табл. 5, основным породообразующим минералом вмещающих пород месторождения Жезказган является кварц, а количество в целом первичных минералов магматического происхождения более 90%.

Основные характерные обломки минералов, явно интрузивного, гидротермального и метасоматического происхождения. Кварц в породах представлен либо мономинеральными слабоокатанными

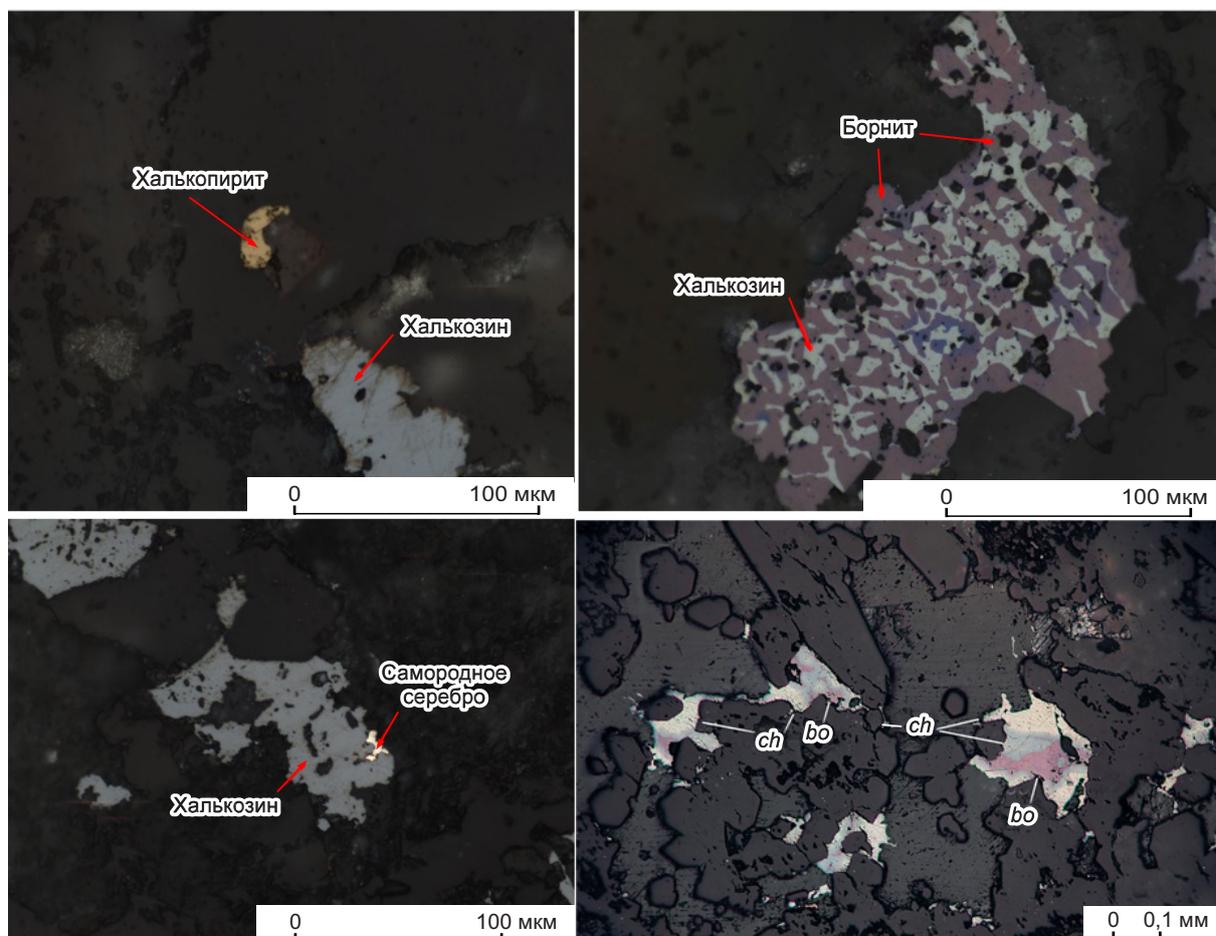


Рис. 7. Взаимоотношения халькозиновой минерализации с другими минералами в аншлифах из МТП 2024 г.

обломками, либо обломками кварцитов. Отмечается наличие скрытокристаллической разновидности кварца – халцедона, который образует сноподобные агрегаты низких цветов интерференции, имеет сферолитовое погасание и в общей структуре образует линзовидные включения. Размер зёрен халцедона достигает 0,14 мм. Халцедон может быть связан с низкотемпературными гидротермальными процессами, характерными для медно-порфиновых систем.

Преобладание кислого плагиоклаза альбита над олигоклазом и средним андезином говорит о разрушении кислых магматических пород (возможно, более близких к гранодиоритам).

По плагиоклазу развивается мусковит. Мусковит в пробах в основном представлен серицитом и развивается как вторичный минерал по плагиоклазам, так и в основной хлорит-серицитовой массе. Образует тонкочешуйчатые, игольчатые

агрегаты с яркими цветами интерференции. Серицитизация неравномерная: от точечных включений до полного замещения. Интенсивность серицитизации основной массы – от средней до сильной. Почти все обломки плагиоклазов и полевых шпатов замещаются вторичными минералами – хлоритом, серицитом, оксидами и гидроксидами железа.

Хлорит встречается в тонкочешуйчатой массе совместно с серицитом, образует радиально-лучистые, тонковолокнистые агрегаты, замещает темноцветные минералы в обломках эффузивных пород.

Группа калиевого полевого шпата (ортоклаз и микроклин) занимает подчинённое значение – не более 6%, что говорит о разрушении магматических пород нормального ряда, а также об уничтожении этих неустойчивых минералов в экзогенных условиях.

Табл. 5. Содержание породообразующих минералов в МТП минералогических типов минерализации месторождения Жезказган

МТП из минерализации	Содержание, в %								
	Qtz	Or	Mc	Ab	And	Olig	Cal	Ms	Всего
Галенитовой	36,5	1,2	5,6	21,0	3,1	0,6	13,7	9,9	91,5
Сфалеритовой	35,7	1,5	4,6	23,8	2,1	0,9	12,1	10,2	90,9
Халькозиновой	36,2	1,2	2,4	24,3	2,0	0,6	10,5	14,5	91,7
Халькопиритовой	35,2	1,5	3,0	23,1	2,2	1,8	11,0	13,2	91,1
Общий итог	35,9	1,3	3,0	23,6	2,2	0,9	11,0	13,5	91,5

Примечание. Qtz – кварц, Or – ортоклаз, Mc – микроклин, Ab – альбит, And – андезин, Olig – олигоклаз, Cal – кальцит, Ms – мусковит; в расчётах участвуют 59 МТП: 5 – галенитовая, 4 – сфалеритовая, 34 – халькозиновая и 16 – халькопиритовая минерализация.

Вмещающие породы преимущественно являются продуктом разрушения кислых интрузивных пород. Наличие обломков, неустойчивых минералов в зоне гипергенеза типа ортоклаза или микроклина говорит о незначительном расстоянии переноса.

На основании комплексного анализа особенностей геологического строения, петрографии вмещающих пород и рудной минералогии месторождения можно предположить, что источником медных растворов, ответственных за формирование гипогенной минерализации, служат потенциально медьсодержащие образования, предположительно медно-порфировой природы, особенно учитывая тот факт, что область изучаемого месторождения сформировалось в задуговом прогибе

Вмещающие породы преимущественно являются продуктом разрушения кислых интрузивных пород. Наличие обломков, неустойчивых минералов в зоне гипергенеза типа ортоклаза или микроклина говорит о незначительном расстоянии переноса.

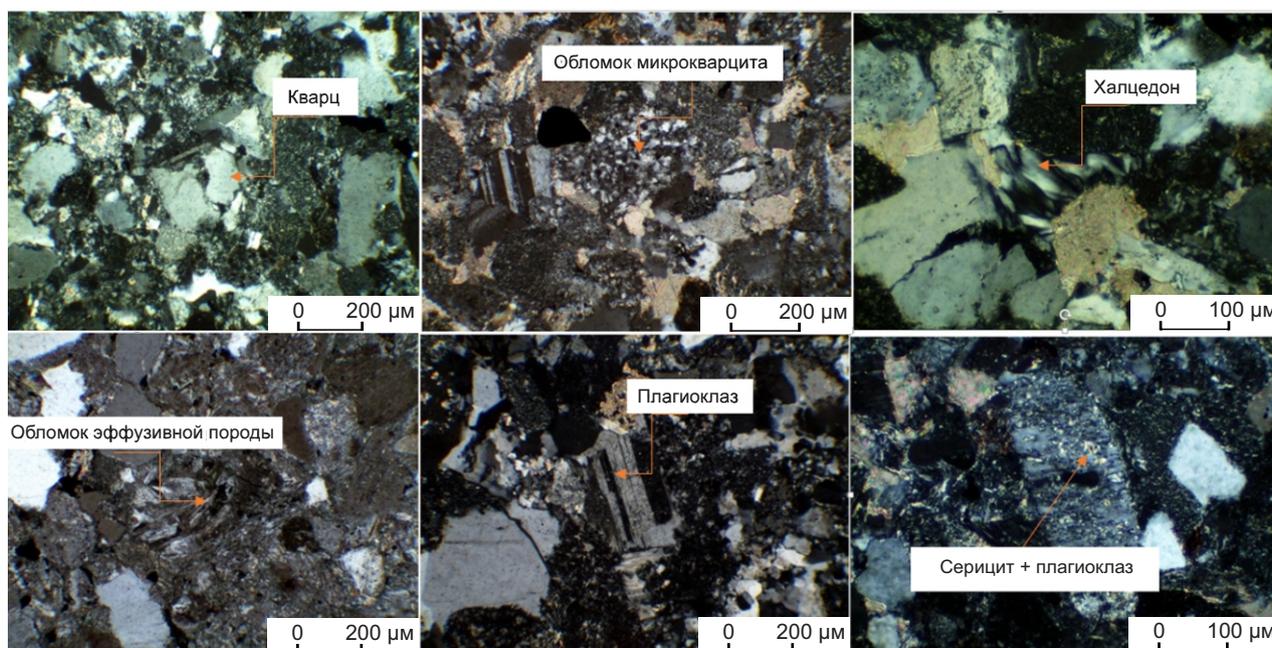


Рис. 8. Характерные обломки во вмещающих породах (фотографии петрографических шлифов из МТП 2024 г.)

в зоне сопряжения с девонской вулканической дугой, являющейся благоприятной геодинамической обстановкой для локализации объектов медно-порфиrowого типа [5, 12].

Источник медных гидротермальных растворов – промежуточный концентратор меди – медно-порфиrowая система, скорее всего, обеднён медью в связи с её длительным и интенсивным выносом в жезказганскую толщу, но при этом он должен оставаться богатым попутным серебром и, возможно, золотом. На это указывают спорадические находки самородного золота в отвалах месторождения Жезказган [10]. В 2022 г. в ходе исследований минеральных форм нахождения редких металлов в техногенных минеральных образованиях ТОО «Корпорация Казахмыс» в отвалах месторождения Жезказган было обнаружено золото в сложной связи с теллуrom и кадмием (ЕНИ ПГНИУ, Пермь, 2022), что указывает на низкотемпературный характер его образования (теллураты). В 2023 г. в районе Восточно-Улытауского разлома, на периферии месторождения Итауз (17 км от месторождения Жезказган) в структурно-поисковой скважине на глубине 425 м в сероцветных песчаниках было найдено самородное золото в виде гипидиоморфных и ксеноморфных золотинок с неровными, зазубренными краями.

То есть можно заключить, что золото не подвергалось окатыванию при образовании песчаника, а золотины образовались вследствие внедрения и осаждения в мелкопоровой структуре песчаника из гипогенных гидротермальных растворов.

Выводы. 1. Богатая халькозиновая минерализация обеспечила длительную и эффективную эксплуатацию месторождения Жезказган, развитая на всей территории объекта и играет основную роль в объёме запасов медных руд.

2. В период истощения и доработки запасов месторождения переход к селективной добыче минералогических типов руд с последующим шихтованием обеспечит эффективное управление содержанием меди и серебра в добываемой руде.

3. Богатая гипогенная халькозиновая минерализация месторождения могла сформироваться за счёт инфильтрации меди и серебра из промежуточного концентратора – древней законсервированной медно-порфиrowой системы в результате её гидрохимического разрушения.

4. Возможность выявления эпitherмальной серебряной (с золотом) минерализации повышает перспективы глубоких горизонтов при проведении глубинных поисковых работ в Жезказганском рудном районе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аубакиров Х. Б. О глубинном происхождении рудообразующих растворов на урановых месторождениях в платформенных отложениях депрессивных структур (на примере Шу-Сарысуйской провинции) // Геология Казахстана. – 1998. – № 2. – С. 40–47.
2. Банникова Л. А., Белый В. М., Наумов В. Б. Особенности формирования стратиформных медных руд Жезказгана по изотопным данным и результатам изучения флюидных включений в минералах // Геохимия. – 1982. – № 2. – С. 198–208.
3. Богданов Ю. В., Голубчина М. Н., Прилуцкий Р. Е. [и др.] О некоторых особенностях изотопного состава сульфидов железа в палеозойских отложениях Жезказгана // Геохимия. – 1971. – № 11. – С. 1376–1379.
4. Габлина И. Ф. Роль геохимических барьеров при формировании сульфидных руд в различных геологических обстановках // Вестник Геологического института РАН. – 2021. – № 3. – С. 45–57.
5. Звездов В. С. Обстановки формирования крупных и сверхкрупных медно-порфиrowых месторождений // Отечественная геология. – 2019. – № 5. – С. 16–35.
6. Мартынова М. А., Хаустов В. В., Диденков Ю. Н. Ювенильные воды // Пространство и Время. – 2013. – № 1(11). – С. 132–139.
7. Сампаева М. К. Руды Джебказгана и условия их формирования. – Алма-Ата : Наука, 1985. – 208 с.
8. Трубачев А. И. Генетические модели формирования руд медистых песчаников и сланцев // Вестник ЧитГУ. – 2010. – № 7 (64). – С. 106–113.
9. Box S. E., Syusyura B., Seltmann R., Creaser R. A., Dolgoplova A., Zientek M. L. Dzhezkazgan and Associated Sandstone Copper Deposits of the Chu-Sarysu Basin, Central Kazakhstan // Geology and Genesis of Major Copper Deposits and Districts of the World: A Tribute to Richard H. Sillitoe / Hedenquist J. W., Harris M., Camus F. (Eds.). – Society of Economic Geologists. – 2012. – P. 303–328.

10. *Duczmal-Czernikiewicz A., Baibatsha A., Bekbotayeva A., Omarova G., Baisalova A.* Ore Minerals and Metal Distribution in Tailings of Sediment-Hosted Stratiform Copper Deposits from Poland and Kazakhstan // *Minerals*. – 2021. – V. 11, № 7. – P. 752.
11. *Korobkin V. V., Buslov M. M.* Tectonics and Geodynamics of the Western Central Asian Fold Belt (Kazakhstan Paleozoides) // *Russian Geology and Geophysics*. – 2011. – V. 52, № 12. – P. 1600–1618.
12. *Sillitoe R. H.* Copper Provinces // *Geology and Genesis of Major Copper Deposits and Districts of the World: A Tribute to Richard H. Sillitoe / Hedenquist J. W., Harris M., Camus F. (Eds.)*. – Society of Economic Geologists. – 2012. – P. 1–18.

REFERENCES

1. *Aubakirov Kh. B.* O glubinnom proiskhozhdenii rudoobrazuyushchikh rastvorov na uranovykh mestorozhdeniyakh v platformennykh otlozheniyakh depressivnykh struktur (na primere Shu-Sarysuyskoy provintsi) [On the deep origin of ore-forming solutions at uranium deposits in platform deposits of depressive structures (using the Shu-Sarysu province as an example)], *Geologiya Kazakhstana [Geology of Kazakhstan]*, 1998, No. 2, pp. 40–47. (In Russ.)
2. *Bannikova L. A., Belyy V. M., Naumov V. B.* Osobennosti formirovaniya stratiformnykh mednykh rud Dzhezkazgana po izotopnym dannym i rezul'tatam izucheniya flyuidnykh vklucheniy v mineralakh [Features of the formation of stratiform copper ores of Dzhezkazgan according to isotope data and the results of studying fluid inclusions in minerals], *Geokhimiya [Geochemistry]*, 1982, No. 2, pp. 198–208. (In Russ.)
3. *Bogdanov YU. V., Golubchina M. N., Prilutskiy R. Ye.* [et al.] O nekotorykh osobennostyakh izotopnogo sostava sul'fidov zheleza v paleozoyskikh otlozheniyakh Dzhezkazgana [On some features of the isotopic composition of iron sulfides in the Paleozoic deposits of Dzhezkazgan], *Geokhimiya [Geochemistry]*, 1971, No. 11, pp. 1376–1379. (In Russ.)
4. *Gablina I. F.* Rol' geokhimicheskikh bar'yerov pri formirovanii sul'fidnykh rud v razlichnykh geologicheskikh obstanovkakh [The role of geochemical barriers in the formation of sulfide ores in various geological settings], *Vestnik Geologicheskogo instituta RAN*, 2021, No. 3, pp. 45–57. (In Russ.)
5. *Zvezdov V. S.* Obstanovki formirovaniya krupnykh i sverkhkrupnykh medno-porfirovykh mestorozhdeniy [Formation environments of large and super-large copper-porphyry deposits], *Otechestvennaya geologiya [Domestic geology]*, 2019, No. 5, pp. 16–35. (In Russ.)
6. *Martynova M. A., Khaustov V. V., Didenkov YU. N.* Yuvenil'nyye vody [Juvenile waters], *Prostranstvo i Vremya [Space and Time]*, 2013, No. 1(11), pp. 132–139. (In Russ.)
7. *Satpayeva M. K.* Rudy Dzhezkazgana i usloviya ikh formirovaniya [Ores of Dzhezkazgan and the conditions of their formation], *Alma-Ata, Nauka publ.*, 1985, 208 p. (In Russ.)
8. *Trubachev A. I.* Geneticheskiye modeli formirovaniya rud medistykh peschanikov i slantsev [Genetic models of formation of ores of copper sandstones and shales], *Vestnik ChitGU*, 2010, No. 7 (64), pp. 106–113. (In Russ.)
9. *Box S. E., Syusyura B., Selmann R., Creaser R. A., Dolgoplova A., Zientek M. L.* Dzhezkazgan and Associated Sandstone Copper Deposits of the Chu-Sarysu Basin, Central Kazakhstan, *Geology and Genesis of Major Copper Deposits and Districts of the World: A Tribute to Richard H. Sillitoe*, Society of Economic Geologists, 2012, pp. 303–328.
10. *Duczmal-Czernikiewicz A., Baibatsha A., Bekbotayeva A., Omarova G., Baisalova A.* Ore Minerals and Metal Distribution in Tailings of Sediment-Hosted Stratiform Copper Deposits from Poland and Kazakhstan, *Minerals*, 2021, V. 11, No. 7, pp. 752.
11. *Korobkin V. V., Buslov M. M.* Tectonics and Geodynamics of the Western Central Asian Fold Belt (Kazakhstan Paleozoides), *Russian Geology and Geophysics*, 2011, V. 52, No. 12, pp. 1600–1618.
12. *Sillitoe R. H.* Copper Provinces, *Geology and Genesis of Major Copper Deposits and Districts of the World: A Tribute to Richard H. Sillitoe*, Society of Economic Geologists, 2012, pp. 1–18.

Статья поступила в редакцию 09.09.24; одобрена после рецензирования 16.09.24; принята к публикации 16.09.24.
The article was submitted 09.09.24; approved after reviewing 16.09.24; accepted for publication 16.09.24.