

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 550.4

doi: 10.26907/2542-064X.2022.1.166-180

СТАДИЙНОСТЬ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ СТАНОВЛЕНИЯ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЮГО-ЗАПАДНОГО КАРАМАЗАРА (СЕВЕРНЫЙ ТАДЖИКИСТАН)

А.Р. Файзиев¹, Ф.А. Файзиев², С.Б. Ятимов¹, Н.К. Усмонов³

¹*Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии Академии наук
Республики Таджикистан, г. Душанбе, 734063, Республика Таджикистан*

²*Таджикский национальный университет, г. Душанбе,
734025, Республика Таджикистан*

³*Горно-металлургический институт Таджикистана,
г. Бустон, 735730, Республика Таджикистан*

Аннотация

Рассмотрены стадийность образования и физико-химические условия формирования полиметаллических месторождений Юго-Западного Карамазара на примере Такелийского, Куруксайского и Кансайского рудных полей. На этих объектах выделены четыре стадии гидротермального рудообразования: 1) сульфидная, 2) карбонатная, 3) кварц-сульфидная и 4) карбонат-барит-флюоритовая. Минералообразование в первой стадии происходило в диапазоне температур 450–300 °С из преимущественно гидрокарбонатно-кальциевых и сульфатно-кальциево-натриевых растворов. Образование второй карбонатной стадии минерализации происходило в интервале 360–160 °С с палеотемпературным градиентом 14 °С на 100 м глубины. Состав минералообразующих флюидов был сульфатно-хлоридно-кальциево-натриево-магниевый. Продукты третьей стадии образовались в широком диапазоне температур 350–90 °С из преимущественно сульфатных и гидрокарбонатных растворов с незначительным содержанием анионов хлора. Основными катионами были натрий, кальций и магний. Палеотемпературный градиент составлял 10–12 °С на 100 м глубины. Становление четвертой стадии протекало при температурах 190–115 °С из растворов преимущественно бикарбонатно-кальциевого состава с незначительным содержанием хлора, сульфат-иона, натрия и калия.

Ключевые слова: стадия, физико-химические условия, гидротермальное минералообразование, скарн, полиметаллические месторождения, температура, раствор, тройная водная вытяжка

Наиболее ранние сведения о последовательности проявления гипогенной гидротермальной минерализации в полиметаллических месторождениях Юго-Западного Карамазара содержатся в работах В.Н. Наследова [1], Ф.И. Вольфсона [2], Ю.С. Шихина [3], Х.М. Абдуллаева и др. [4], В.А. Жарикова [5], Ш.Х. Рахимова [6], В.Д. Сазонова [7, 8] и др. В последние десятилетия ряд исследований был посвящен изучению геологического строения рудно-формационных и структурных

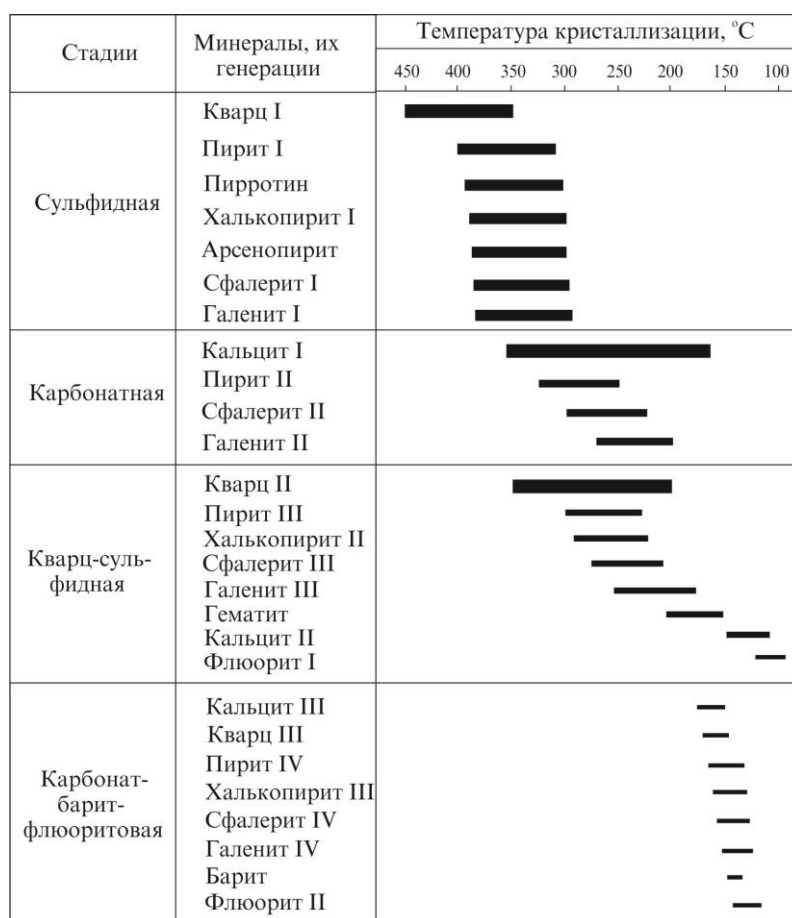


Рис. 1. Стадии минерализации в месторождениях Юго-Западного Карамазара

типов, а также минерального состава полиметаллических месторождений Юго-Западного Карамазара [9–17].

На наш взгляд, наиболее удачно и адекватно стадийность минералообразования отражает схема В.Д. Сазонова [8], согласно которой в Юго-Западном Карамазаре нами выявлены два этапа гипогенной (постмагматической) минерализации: скарновый (пневматолитовый) и гидротермальный. На пневматолитовом этапе выделены две стадии минерализации: первая – магнетитовая скарновая и вторая – сульфидная скарновая. Полученные нами данные свидетельствуют о том, что сульфидную стадию следует отнести к гидротермальному этапу, поскольку она не является собственно скарновой стадией, а наложена на скарны [18]. Таким образом, гидротермальный этап включает не три стадии, как у В.Д. Сазонова, а четыре: сульфидную, карбонатную, кварц-сульфидную и карбонат-барит-флюоритовую (рис. 1).

Ниже приведем характеристику последовательности образования минералов в полиметаллических месторождениях Юго-Западного Карамазара и их физико-химические особенности.

Стадии минерализации. Гидротермальное минералообразование на месторождениях Юго-Западного Карамазара началось с проявления сульфидной

стадии (рис. 1). Формирование минералов на этой стадии начинается с отложения из растворов первой генерации кварца. Последний встречается в виде жил и прожилков, сложенных агрегатом мелких зерен. В это время образовались основные сульфиды: пирит I, пирротин, арсенопирит, сфалерит I и галенит I, которые чаще всего присутствуют в виде сплошных агрегативных масс. Процессы минералогенеза происходили на фоне проявления слабых тектонических подвижек. Распространенными минералами данной стадии являются сфалерит и галенит. Сфалерит имеет темно-коричневый и черный цвет. В результате распада твердых растворов в нем наблюдаются многочисленные выделения пирротина и халькопирита. В качестве характерных элементов-примесей выступают Cu, Mn и Cd. Галенит замещает ранее образовавшиеся сульфиды. Реже локализуется в виде прожилков в рудных минералах или цементирует их. В нем установлены примеси Se, Te, Tl и других элементов.

В ходе второй стадии гидротермального минералообразования появляются жилы кальцита I, имеющие преимущественно крутое падение. Мощность их достигает нескольких метров. Несколько позднее начинают развиваться вторые генерации пирита, сфалерита и галенита. Рудные минералы с кальцитом находятся в сульфидной руде, что, вероятно, указывает на их происхождение в результате переотложения минералов ранней сульфидной стадии. Они пересекают скарновые образования и полиметаллические рудные тела и залечивают многие разрывные нарушения как северо-восточного, так и северо-западного простирания. В жилах кальцита I нередко встречаются маломощные прожилки и густая вкрапленность пирита II, а также редкая вкрапленность сфалерита II и галенита II.

После очередного перерыва в минерализации возобновляются тектонические подвижки, которые выразились в брекчировании ранних продуктов гидротермальной деятельности, возникновении новых и приоткрывании старых трещин. По этим ослабленным зонам поступали новые порции растворов, давшие продукты третьей кварц-сульфидной стадии минерализации, на которой выявляются значительные скопления кварца II, а также пирит III, халькопирит II, сфалерит III, галенит III, гематит, кальцит II и др. Наиболее распространенным минералом стадии является кварц II, который кристаллизовался на всем ее протяжении. Скопления данного минерала приурочены к зонам разрывных нарушений, где он образует жилы мощностью до нескольких метров, сложенные зернистыми агрегатами различной величины. В полостях жил нарастают хорошо образованные кристаллы аметиста размером от долей мм до 10 см по длинной оси, реже кальцита и галенита.

Вслед за кварцем II и вместе с ним из минералообразующих растворов начали кристаллизоваться сульфиды – халькопирит II, сфалерит III, галенит III и др., а после них – кальцит II, который представлен главным образом крупными (до 15 см по длинной оси) хорошо ограненными кристаллами скаленоэдрического габитуса. Минералообразование в сульфидно-кремнеземной стадии заканчивается кристаллизацией флюорита I (в виде мелкой вкрапленности).

Продукты четвертой стадии минералообразования обычно обособлены от мест размещения основных рудных тел месторождений и представлены жилами и прожилками кальцит (III)-барит-флюоритового (II), кварц (III)-барит-флюорит-кальцитового, кварц-флюорит-карбонат-баритового и других составов. Например,

на месторождениях Такелийского рудного поля минерализация связана с анкерит-кварц-баритовым составом пород. Максимальная концентрация продуктов четвертой стадии минералообразования наблюдается в пределах месторождения Западный Джангалык, где рудная зона достигает мощности нескольких метров. Это белый барит, серовато-бурый карбонат, серый кварц и фиолетовый флюорит. Кроме жильных минералов в продуктах карбонат-флюорит-баритовой стадии в небольшом количестве встречаются галенит IV, светлоокрашенный сфалерит (клеифан) IV, пирит IV, халькопирит III, блеклые руды и др. На некоторых месторождениях Юго-Западного Кармазара обнаружены жилы красно-коричневого барита, мощностью до 20 см.

Термобарогеохимия. Известно, что включения минералообразующих флюидов в минералах несут в себе информацию, которая может помочь ответить на различные геологические вопросы. В первую очередь они позволяют определить температуру и давление в момент минералообразования, а также получить достоверные данные о составе, концентрации и агрегатном состоянии минералообразующих растворов. В сочетании с традиционными геологическими методами исследования флюидных включений могут оказать неоценимую помощь при установлении генезиса месторождений.

Температуры образования минералов определялись методом гомогенизации газовой-жидких включений, основы которого заложены в работах Н.П. Ермакова ([19] и др.), А.В. Пизнюра ([20] и др.) и многих других исследователей. В его основе лежит утверждение о том, что газ, жидкость или расплав в момент их захвата минералом находились в гомогенном, однородном состоянии.

В настоящее время в литературе имеются лишь немногочисленные сведения о термобарических параметрах образования полиметаллического оруденения Юго-Западного Кармазара. В автореферате кандидатской диссертации В.Д. Сазонова [8] температура образования основных сульфидов месторождений Куруксайского рудного поля (пирита, арсенопирита, пирротина, халькопирита, сфалерита, галенита), которую измеряли методом декрепитации, определена интервалом 500–350 °С. По данным А.Р. Файзиева и др. [21], становление полиметаллических месторождений Кармазара, в том числе и Юго-Западного, происходило при температуре 460–50 °С и давлении 0.85–0.1 кбар. Продуктивная полиметаллическая минерализация формировалась в более узком интервале температур 300–150 °С и давления 0.45–0.20 кбар. В составе жидкой фазы газовой-жидких включений преобладают хлорид, бикарбонат и сульфат натрия, кальция и магния. Концентрация минералообразующих растворов составляет 35–5 вес. %. Газовая фаза представлена в основном углекислотой и азотом при подчиненном количестве метана.

Для определения температур кристаллизации минералов в полиметаллических месторождениях Юго-Западного Кармазара исследовались первичные газовой-жидкие включения в кварце, кальците, барите, флюорите, которые сопровождают рудную минерализацию, и в сфалерите, одном из основных рудных минералов месторождений.

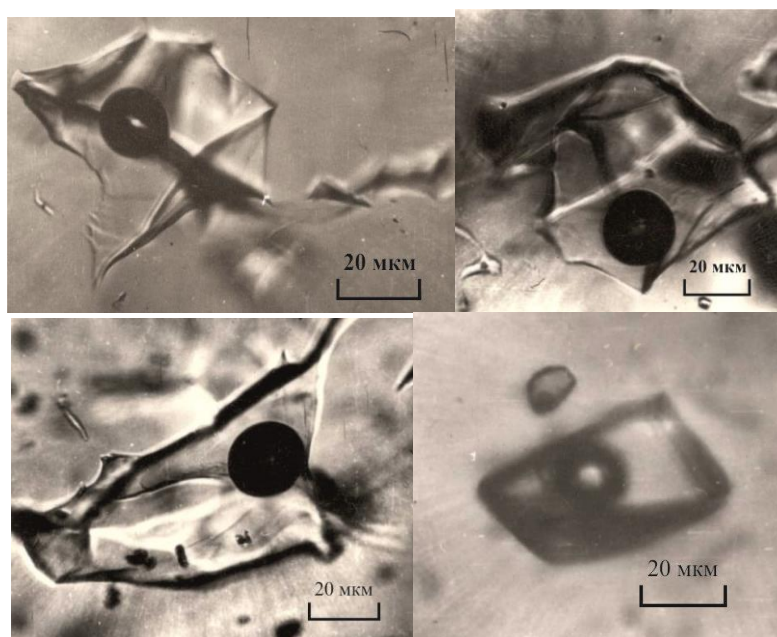


Рис. 2. Формы включений кварца первой генерации

Методика исследований. Термобарогеохимические исследования осуществлялись методами гомогенизации газовой-жидких и жидко-газовых включений и водной вытяжки. Для определения температур методом гомогенизации была использована камера конструкции Ю.Н. Пашкова [22] с применением объективов 20 \times , 40 \times . Точность измерения температур гомогенизации составляет $\pm 2-3$ $^{\circ}\text{C}$. Установка отградуирована по точкам плавления мочевины (123 $^{\circ}\text{C}$), олова (231.6 $^{\circ}\text{C}$), нитрата натрия (306.8 $^{\circ}\text{C}$), цинка (419.4 $^{\circ}\text{C}$).

Химический состав включений в минералах (кварце, кальците, барите, галените, сфалерите) устанавливали путем тройных водных вытяжек, выполненных по методике, описанной в [23]. Для проведения анализа были выбраны мономинеральные пробы в количестве 100 г. Эти пробы истирали до порошкообразного состояния в агатовых ступках, после чего промывали бидистиллятом (1:2), взбалтывали (15–30 мин), подогревали (1 ч до температуры 60–70 $^{\circ}\text{C}$), отстаивали (более 1 ч) и фильтровали. Затем с помощью специальных препаратов и индикаторов по очереди определяли количество каждого иона, присутствующего в составе растворов вытяжки. Далее для каждой навески проводили два повторных анализа. Полученные значения для третьей вытяжки вычитали из результатов первого анализа, при этом погрешность расчетов составляла до 10%.

В сульфидной стадии, как отмечено выше, было образовано основное количество сульфидов железа, меди, цинка, свинца и других элементов. Их отложению предшествовало выпадение из растворов ранней генерации кварца.

В кварце I обнаружены газовой-жидкие и жидко-газовые включения минералообразующих флюидов. Они очень мелкие (0.001–0.002 мм) и имеют главным образом изометрическую и неправильную формы (рис. 2). Редко вакуоли напоминают очертания отрицательных кристалликов. Гомогенизация включений происходит как в жидкую, так и в газовую фазы в широком диапазоне температур

450–350 °С. Вторичные включения преимущественно неправильной формы и гомогенизируются в жидкую фазу в интервале температур 290–255 °С.

В ходе изучения валового химического состава флюидных включений минералообразующих растворов в кварце I из месторождений Такелийского и Кансайского рудных полей установлены в целом близкие содержания анионов и катионов (табл. 1). Главным анионом в них является бикарбонат-ион, с содержанием 81.8 экв. % и 75.0 экв. % соответственно. Роль анионов хлора (13.6 экв. % и 20.0 экв. %) и сульфат-аниона (4.6 экв. % и 5.0 экв. %) незначительна. Из катионов в растворах вытяжек очень близки концентрации кальция (41.1 экв. % и 37.5 экв. %) и натрия (по 41.1 экв. %). Из других катионов присутствуют калий (13.7 экв. % и 11.9 экв. %) и магний (4.1 экв. % и 3.0 экв. %).

Среди сульфидов первым кристаллизовался пирит, затем последовательно образовались пирротин, халькопирит I, арсенопирит, сфалерит I и галенит I.

Температура образования сфалерита I, определенная методом Куллеруда [24], составила 490–320 °С, а методом гомогенизации – 400–300 °С [7]. Температуры кристаллизации пирита I, пирротина, халькопирита I, арсенопирита и галенита I приняты условно по их взаимоотношению и тесной ассоциации с кварцем I и сфалеритом I, для которых установлены температуры гомогенизации включений минералообразующих растворов.

Изучен химический состав флюидных включений галенита I. Оказалось, что для него преобладающим анионом растворов является сульфат-ион, содержание которого равно 66.7 экв. %. Концентрация других анионов – хлора (22.2 экв. %) и бикарбонат-аниона (11.1 экв. %) – заметно ниже. Главными катионами в растворах вытяжек являются кальций (52.6 экв. %) и магний (26.3 экв. %). Кроме этих катионов в незначительных количествах обнаружены натрий (15.8 экв. %) и калий (5.3 экв. %).

Вторая стадия полиметаллического рудообразования проходила с кристаллизацией кальцита. В кальците I найдены многочисленные включения минералообразующих растворов первичного и вторичного происхождения. Характерные формы включений приведены на рис. 3, их размер не превышает 0.01 мм. Включения двухфазовые газовой-жидкие и трехфазовые, где наряду с газом и жидкостью присутствует жидкая уголекислота. Гомогенизация первичных включений в кальците I в жидкую фазу растягивается в интервале 360–160 °С, причем она зависит от мощности жил и положения минерала относительно гипсометрического уровня. В кальците из зоны нарушения температура гомогенизации включений всегда более высокая (выше 300 °С), а с удалением от нее она постепенно уменьшается до 200 °С. Относительно гипсометрических высот отметим, что пробы из месторождения Куруксай с первого по девятый горизонты, разница которых по вертикали составляет 340 м, анализировались В.Д. Сазоновым [8]. В кальците с первого горизонта температура гомогенизации включений равняется 160–165 °С, а с девятого горизонта – 210–215 °С. Следовательно, палеотемпературный градиент равен 14 °С на 100 м глубины.

В тонких прожилках температура гомогенизации включений в кальците I снижается до 160 °С.

В кальците I гомогенизация включений в жидкую фазу имеет место только при температурах ниже 310–320 °С, а при более высокой температуре происходит

Табл. 1

Результаты анализов тройных водных вытяжек минералов из месторождений Юго-Западного Карамазара

№	Минерал	Месторож- дение	HCO ₃ ⁻		Cl ⁻		SO ₄ ²⁻		Σ an		Ca ²⁺		Mg ²⁺		Na ⁺		K ⁺		Σ кат
			мг/экв.	экв. %	мг/экв.	экв. %	мг/экв.	экв. %	мг/экв.	экв. %	мг/экв.	экв. %	мг/экв.	экв. %	мг/экв.	экв. %	мг/экв.	экв. %	
1	Кварц I	Такели	0.18	81.8	0.03	13.6	0.01	4.6	0.22	0.03	0.03	41.1	0.003	4.1	0.03	41.1	0.01	13.7	0.073
2	Кварц I	Кансай	0.15	75.0	0.04	20.0	0.01	5.0	0.20	0.03	0.03	37.5	0.004	3.0	0.04	47.6	0.01	11.9	0.084
3	Галенит I	Куруксай	0.02	11.1	0.04	22.2	0.12	66.7	0.18	0.10	0.10	52.6	0.05	26.3	0.03	15.8	0.01	5.3	0.19
4	Кальцит I	Турангли	0.04	12.5	0.09	28.13	0.19	59.37	0.32	0.16	0.16	36.36	0.06	13.64	0.21	47.7	0.01	2.3	0.44
5	Кварц II	Зона Желез- ного разлома	0.13	29.55	0.11	25.00	0.20	45.45	0.44	0.16	0.16	39.03	0.06	14.63	0.18	43.90	0.01	2.44	0.41
6	Кварц II	Куруксай	0.12	30.77	0.09	23.08	0.18	46.15	0.39	0.15	0.15	38.46	0.07	17.95	0.16	41.03	0.01	2.56	0.39
7	Сфалерит II	Орлиная горка	0.04	13.3	0.02	6.67	0.24	80.00	0.30	0.05	0.05	21.73	0.02	8.70	0.15	65.22	0.01	4.35	0.23
8	Сфалерит II	Турангли	0.03	8.57	0.02	5.72	0.30	85.71	0.35	0.08	0.08	38.1	0.06	28.6	0.06	28.6	0.01	4.7	0.21
9	Галенит III	Куруксай	0.01	7.2	0.03	21.4	0.10	71.4	0.14	0.03	0.03	13.04	0.01	4.37	0.18	78.26	0.01	4.35	0.23
10	Кальцит II	Такели	0.15	62.50	0.05	20.83	0.04	16.67	0.24	0.06	0.06	75.95	0.003	3.80	0.01	12.66	0.006	7.59	0.079
11	Кальцит II	Кансай	0.19	71.97	0.064	24.24	0.01	3.88	0.264	0.07	0.07	68.63	0.003	2.94	0.02	19.61	0.009	8.82	0.102
12	Барит	Такели	0.22	84.62	0.03	11.54	0.01	3.85	0.26	0.06	0.06	77.92	0.001	1.30	0.01	12.99	0.006	7.79	0.077

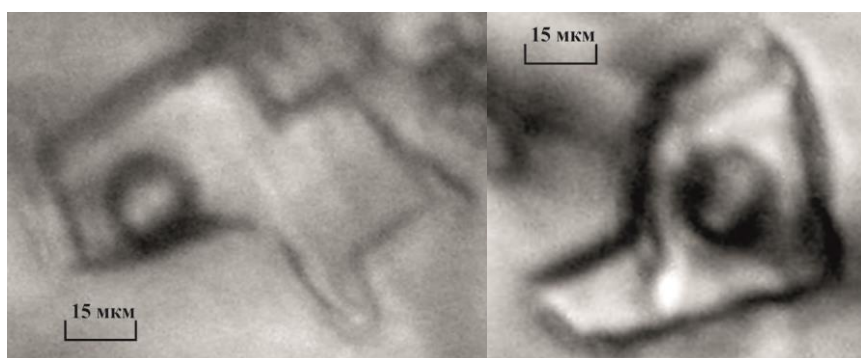


Рис. 3. Формы включений кальцита I

гомогенизация в газовую фазу. Из этого следует, что изначально минералообразование носило пневматолитовый характер, а потом при остывании минералы превращались в гидротермальные.

Вторичные включения в кальците I представлены двухфазовыми газожидкими и однофазовыми жидкими разностями. Первые гомогенизируются в жидкую фазу в диапазоне температур 160–115 °С.

Результаты анализа тройных водных вытяжек из кальцита I месторождения Туранглы показывают, что преобладающим анионом растворов включений является сульфат-ион с содержанием 59.37 экв. %. На долю аниона хлора приходится 28.13, а гидрокарбонат-иона – 12.5 экв. %. Из катионов в растворах вытяжек главную роль играют натрий (47.7 экв. %) и кальций (36.26 экв. %). Кроме них присутствуют магний (13.64 экв. %) и калий (2.3 экв. %).

Гомогенизация газожидких включений в сфалерите II происходит в температурном интервале 310–230 °С.

Кварц II слагает, как было отмечено, самостоятельные жилы и содержит много включений минералообразующих растворов в форме от неправильных до отрицательных кристалликов (рис. 4) размером обычно менее 0.01 мм. Встречаются и трубчатые включения. Вакуоли преимущественно двухфазовые газожидкие, реже трехфазовые (жидкость + жидкая углекислота + газ). Первичные включения гомогенизируются в интервале температур от 350 °С до 200 °С, причем в пределах температур от 350 °С до 310 °С – в газовую фазу, при температуре 310 °С и ниже – в жидкую фазу.

Вторичные включения в кварце II каплевидные и неправильные, гомогенизируются в жидкую фазу при температурах 190–110 °С. При этом наблюдается четкая зависимость температуры гомогенизации от гипсометрического положения образца. Например, включения кварца II с девятого горизонта месторождения Куруксай-1 гомогенизируются при 160–155 °С. В кварце, отобранном из верхних горизонтов месторождения Туранглы, включения гомогенизируются при 115–110 °С. Вертикальное превышение между точками отбора проб около 500 м. Следовательно, темп охлаждения растворов вторичных включений в кварце II равен 10 °С/100 м глубины.

Проанализирован состав жидкой части включений кварца II из зоны Железного разлома и месторождения Куруксай (табл. 1). Полученные результаты говорят о сходстве на компонентом и количественном уровнях. Основным анионом

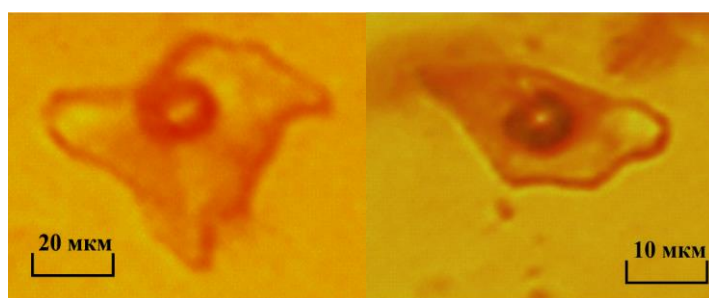


Рис. 4. Формы включений кварца II

в обоих случаях является SO_4^{2-} (среднее 45.8 экв. %), меньшее значение имеют HCO_3^- (30.16 экв. %) и Cl^- (24.04 экв. %). Содержание катионов следующее: Na^+ – 42.46, Ca^{2+} – 38.24, Mg^{2+} – 16.29, K^+ – 2.5 экв. %.

Температура гомогенизации первичных включений в сфалерите III варьирует в интервале 275–210 °С, что соответствует температуре гомогенизации кварца II, с которым тесно ассоциирует этот минерал. Примерно при таких же температурах и немногим ниже кристаллизуются и другие сульфиды.

Химический состав жидкой части газовой-жидких включений в сфалерите III из месторождений Орлиная горка и Куруксай характеризуется явным преобладанием сульфат-аниона (80.00 экв. % и 85.71 экв. % соответственно). На долю анионов гидрокарбоната и хлора приходится в среднем 10.93 и 6.20 экв. %. Основным катионом является натрий (65.22 экв. % и 78.26 экв. % соответственно). Другие катионы (Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+}) присутствуют в небольших количествах (см. табл. 1).

Анализ тройной водной вытяжки из галенита III показывает, что консерванты минералообразующих растворов имели преимущественно сульфатно-кальциевый характер, так же как и в галените I. Содержание сульфат-аниона равно 71.43 экв. %, а катиона кальция – 52.6 экв.%. Из других ионов присутствуют магний и натрий (по 28.6 экв. %), хлор (21.4 экв. %), гидрокарбонат (7.2 экв. %) и калий (4.7 экв. %).

В кальците II обнаружены первичные двухфазовые газовой-жидкие включения главным образом в виде негативных кристалликов (рис. 5). Гомогенизируются они по первому типу в диапазоне температур 150–120 °С, причем наблюдается изменение температуры с глубиной. Так, включения в кальците II из третьего горизонта месторождения Куруксай-1 гомогенизируются при 130–126 °С, а в минерале из девятого горизонта этого месторождения температура гомогенизации включений равна 150–148 °С. Гипсометрические превышения между первым и девятым горизонтами равны 240 м. Следовательно, палеотемпературный градиент равен 12 °С/100 м.

Анализ жидкой части флюидных включений кальцита II из месторождений Такели и Кансай показал, что общая минерализация в нем невысокая. Из анионов преобладает гидрокарбонат-ион. Его содержание в минерале из первого месторождения равно 62.50 экв. %, из второго – 71.97 экв. %. Анионы хлора и сульфата играют второстепенную роль. Если концентрации аниона хлора в кальцитах указанных месторождений близки между собой (20.83 экв. % и 24.24 экв. %

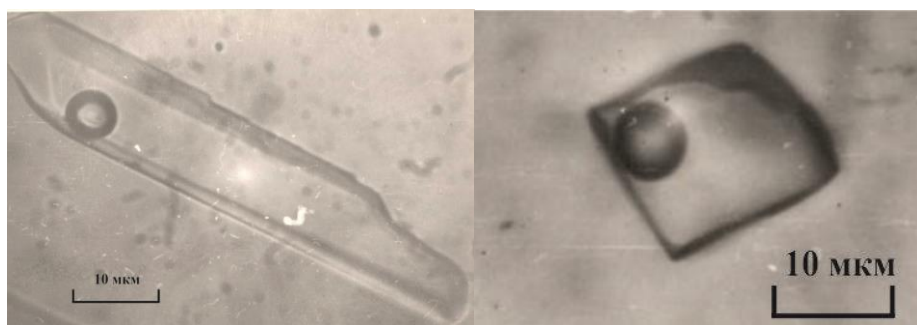


Рис. 5. Формы включений кальцита II

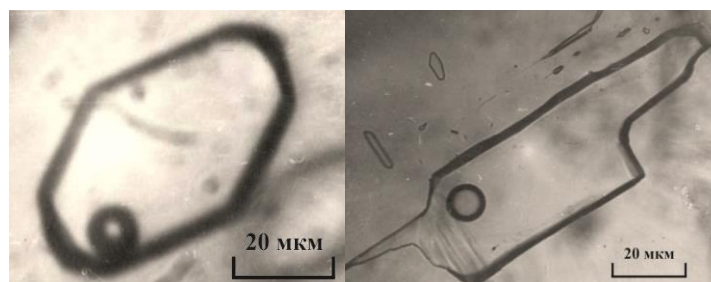


Рис. 6. Газово-жидкие включения в барите

соответственно), то значения для сульфат-аниона сильно отличаются: 16.67 экв. % и 3.83 экв. % для минерала из месторождения Такели и из Канса соответственно. Основным катионом в растворах вытяжек является кальций. Меньшее значение имеют катионы натрия, калия и магния.

Двухфазовые газово-жидкие включения во флюорите II гомогенизируются в жидкую фазу в диапазоне температур 125–90 °С. При этом наблюдается четкая зависимость температуры гомогенизации включений от гипсометрического уровня с палеотемпературным градиентом 10 °С на 100 м глубины.

Температура кристаллизации минералов четвертой стадии из месторождений Кансайского рудного поля следующая: кальцит III – 180–165 °С, кварц III – 175–160 °С, барит – 160–140 °С, флюорит II – 140–115 °С. В красно-коричневом барите обнаружены первичные двухфазовые газово-жидкие включения округлой, трубчатой и неправильной форм, размером 0.04–0.07 мм, гомогенизирующиеся в интервале температур 156–130 °С.

Более детально исследован барит из месторождения Такели (Такелийское рудное поле). Включения минералообразующих растворов в нем обычно мелкие (0.001–0.003 мм), в редких случаях достигают размера 0.05–0.1 мм. По форме они удлиненные, неправильные и трубчатые. Часто встречаются и ограненные вакуоли в виде отрицательных кристалликов (рис. 6). Включения в основном двухфазовые газово-жидкие, иногда во вторичных включениях встречаются однофазовые жидкие включения. Первичные включения в барите гомогенизируются в интервале температур 190–145 °С.

Состав жидкой части растворов преимущественно бикарбонатный (84.62 экв. %) с незначительным содержанием хлора (11.54 экв. %) и сульфата

(3.84 экв. %). Из катионов главным является кальций, концентрация которого более чем в два раза выше, чем других катионов вместе взятых (см. табл. 1).

Таким образом, на основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Полиметаллическое оруденение в месторождениях Юго-Западного Карамазара происходило в результате стадийного процесса минералообразования при неоднократном приоткрывании систем разрывных нарушений.

2. Выделены четыре стадии рудообразования: сульфидная, карбонатная, кварц-сульфидная и карбонат-барит-флюоритовая. Основная масса полиметаллического оруденения связана с сульфидной стадией.

3. Данные термобарогеохимических исследований позволяют утверждать, что процесс постмагматического минералообразования шел в интервале температур 450–115 °С с палеотемпературным градиентом 10–14 °С на 100 м глубины. Изучение водных вытяжек показало, что растворы сначала были гидрокарбонатно-кальциевыми, сульфатно-кальциево-натриевыми и сульфатно-хлоридно-кальциево-натриево-магниевыми и только на заключительной стадии бикарбонатно-кальциевыми.

Литература

1. *Наследов В.Н.* Кара-Мазар // Таджикиско-Памирская экспедиция 1933 г.: Материалы экспедиции. – Л., 1935. – Вып. XIX. – 402 с.
2. *Вольфсон Ф.И.* Структура и генезис свинцово-цинковых месторождений Юго-Западного Карамазара. – М.: Изд-во АН СССР, 1951. – 184 с.
3. *Шихин Ю.С.* Методика количественной оценки эндогенного оруденения по геологическим факторам (на примере Такелийского рудного поля в Юго-Западном Карамазаре): Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Л.: 1967. – 20 с.
4. *Абдуллаев Х.М., Аделунг А.С., Воронин В.А., Горьковой О.П., Калабина М.Г., Малаков А.А., Мацоккина Т.М., Мирходжаев И.М., Раджабов Ф.Ш.* Основные черты магматизма и металлогении Чаткало-Кураминских гор. – Ташкент: Изд-во АН УзССР, 1958. – 289 с.
5. *Жариков В.А.* Геология и метасоматические явления скарново-полиметаллических месторождений Западного Карамазара. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – 371 с.
6. *Рахимов Ш.Х.* Геолого-структурные особенности свинцово-цинкового месторождения Куруксай I и вопросы поисков скрытых рудных тел (Юго-Западный Карамазар, ТаджССР): Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Душанбе, 1965. – 22 с.
7. *Сазонов В.Д.* К вопросу об определении температур отложения цинковых обманок по содержанию в них железа // Тр. Ин-та геологии АН ТаджССР. – 1961. – Вып. 4. – С. 215–233.
8. *Сазонов В.Д.* Некоторые физико-химические особенности процессов гипогенной минерализации: Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Душанбе, 1962. – 24 с.
9. *Шихин Ю.С.* Состав горных пород как фактор контроля гидротермального оруденения (на примере Карамазара) // Геология рудных месторождений. – 1992. – Т. 34, № 3. – С. 31–46.
10. *Некрасов Е.М.* Геология и структурные особенности жильных месторождений свинца и цинка // Геология рудных месторождений. – 2007. – Т. 49, № 6. – С. 559–570.

11. *Файзиев А.Р., Файзиев Ф.А.* Рудноформационные типы серебряных месторождений Таджикистана // Изв. Акад. наук Республики Таджикистан. Отд-ние физ.-мат., хим., геол. и техн. наук. – 2015. – № 3. – С. 92–99.
12. *Файзиев А.Р., Файзиев Ф.А.* Серебро-полиметаллический рудно-формационный тип оруденения в Таджикистане // Вестн. Тадж. нац. ун-та. Сер. естеств. наук. – 2015. – № 1-5-2. – С. 271–279.
13. *Файзиев Ф.А., Файзиев А.Р., Ятимов С.Б.* О сереброносности скарново-полиметаллических месторождений Западного Карамазара (Северный Таджикистан) // Изв. Акад. наук Республики Таджикистан. Отд-ние физ.-мат., хим., геол. и техн. наук. – 2018. – № 1. – С. 97–106.
14. *Файзиев Ф.А.* Структурно-геологические типы эндогенных серебряных и серебро-содержащих месторождений Таджикистана // Докл. Акад. наук Республики Таджикистан. – 2018. – Т. 61, № 11–12. – С. 888–892.
15. *Файзиев Ф.А.* Серебряная минерализация месторождения Канджол (Северный Таджикистан) // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9, № 2. – С. 69–82. – doi: 10.23671/VNC.2019.2.31978.
16. *Файзиев Ф.А., Ятимов С.Б., Усмонов Н.К., Саидов А.И., Назаров Х.Ё., Файзиев А.Р.* Серебросодержащие минералы месторождений Такелийского рудного поля (Юго-Западный Карамазар) // Докл. Акад. наук Республики Таджикистан. – 2019. – Т. 62, № 9–10. – С. 581–587.
17. *Файзиев Ф.А., Ятимов С.Б., Файзиев А.Р.* Серебряная минерализация Кансайского рудного поля (Северный Таджикистан) // Докл. Акад. наук Республики Таджикистан. – 2019. – Т. 62, № 11–12. – С. 696–703.
18. *Файзиев Ф.А.* Структурный фактор контроля оруденения на некоторых серебряных и серебросодержащих месторождений Северного и Центрального Таджикистана // Наука и инновация. Сер. геол. и техн. наук. – 2020. – № 1. – С. 56–60.
19. *Файзиев А.Р., Дзайнуков А.Б., Таджибаев Г.Т.* Об идентичности скарново-полиметаллической и гидротермально-полиметаллической минерализации в месторождениях Карамазара (Срединный Тянь-Шань) // Докл. АН СССР. – 1991. – Т. 318, № 5. – С. 1199–1202.
20. *Ермаков Н.П.* Исследование минералообразующих растворов. – Харьков: Изд-во Харьков. ун-та, 1950. – 460 с.
21. *Пизнюр А.В.* Основы термобарогеохимии. – Львов: Вища шк., Изд-во при Львов. ун-те, 1986. – 199 с.
22. *Файзиев А.Р., Морозов С.А., Могаровский В.В., Алидодов Б.А., Искандаров Ф.Ш.* Термобарогеохимические условия становления гипогенных месторождений Таджикистана // Термобарогеохимия эндогенных систем: Материалы Международ. симпозиума по термобарогеохимии. – Душанбе, 1998. – С. 20–26.
23. *Пашков Ю.Н.* Термометрия по включениям минералообразующих сред // Методы и аппаратура для исследования включений минералообразующих сред / Отв. ред. В.И. Рехарский. – М.: Наука, 1980. – С. 12–31.
24. *Москалюк А.А.* Применение метода водных вытяжек и изучение состава включений в минералах // Труды ВНИИСИМС. – 1971. – Т. 14: Исследование минералообразующих растворов и расплавов по включениям в минералах. – С. 102–106.
25. *Kullerud G.* The FeS-ZnS system: A geological thermometer // Nor. Geol. Tidsskr. – 1953. – V. 32, No 2/4. – P. 61–147.

Файзиев Абдулхак Раджабович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий лабораторией полезных ископаемых

Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии Академии наук Республики Таджикистан
ул. Айни, д. 267, г. Душанбе, 734063, Республика Таджикистан
E-mail: faiziev38@mail.ru

Файзиев Фотех Абдувакилович, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии и горно-технического менеджмента

Таджикский национальный университет
пр. Рудаки, д. 17, г. Душанбе, 734025, Республика Таджикистан
E-mail: foteh81@mail.ru

Ятимов Содикдjon Бакоходжаевич, соискатель лаборатории полезных ископаемых

Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии Академии наук Республики Таджикистан
ул. Айни, д. 267, г. Душанбе, 734063, Республика Таджикистан
E-mail: yatimov.s.b@mail.ru

Усмонов Норали Киямович, аспирант кафедры геологии и нефтегазовых работ

Горно-металлургический институт Таджикистана
ул. Московская, д. 6, г. Бустон, 735730, Республика Таджикистан
E-mail: noraliusmonov@mail.ru

ISSN 2542-064X (Print)
ISSN 2500-218X (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA. SERIYA ESTESTVENNYE NAUKI
(Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series)

2022, vol. 164, no. 1, pp. 166–180

ORIGINAL ARTICLE

doi: 10.26907/2542-064X.2022.1.166-180

**Stages and Physicochemical Conditions of Polymetallic Deposits Formation
in the Southwestern Karamazar (Northern Tajikistan)**

A.R. Fayziev^{a*}, F.A. Fayziev^{b**}, S.B. Yatimov^{a***}, N.K. Usmonov^{c****}

^a*Institute of Geology, Seismological Construction and Seismology, National Academy of Sciences of
Tajikistan, Dushanbe, 734063 Republic of Tajikistan*

^b*Tajik National University, Dushanbe, 734025 Republic of Tajikistan*

^c*Tajikistan Mining Metallurgical Institute, Buston, 735730 Republic of Tajikistan*

E-mail: ^{*}faiziev38@mail.ru, ^{**}foteh81@mail.ru, ^{***}yatimov.s.b@mail.ru, ^{****}noraliusmonov@mail.ru

Received March 16, 2020

Abstract

This article discusses the stages and physicochemical conditions of polymetallic deposits formation in the Southwestern Karamazar, Northern Tajikistan. The Takeli, Kuruksay, and Kansay ore fields are considered here as an example. The data obtained show that these ore fields are all characterized by the following four stages of hydrothermal ore formation: 1) sulfide, 2) carbonate, 3) quartz-sulfide, and 4) carbonate-barite-fluorite. In the first stage, the mineral formation occurred at the temperature of 450–300 °C from mainly calcium bicarbonate and calcium sulfate-sodium solutions. The second calcite stage of mineralization occurred at the temperature of 360–160 °C with a paleotemperature gradient of 14 °C/100 m. The composition of ore-forming fluids was sulfate-chloride-calcium-sodium-magnesium. The products of the third stage formed in the wide temperature range of 350–90 °C from predominantly sulfate and hydrocarbonate solutions with a low content of chlorine anions. The main cations were sodium, calcium, and magnesium. The paleotemperature gradient was 10–12 °C/100 m. The fourth stage proceeded at the temperature

of 180–115 °C from solutions of mainly bicarbonate-calcium composition and low content of chlorine, sulfate ion, sodium, and potassium.

Keywords: stage, physicochemical conditions, hydrothermal mineral formation, skarn, polymetallic deposits, temperature, solution, triple aqueous extract

Figure Captions

Fig. 1. Stages of mineralization in the Southwestern Karamazar deposits.

Fig. 2. Forms of inclusions of first-generation quartz.

Fig. 3. Forms of calcite I inclusions.

Fig. 4. Forms of quartz II inclusions.

Fig. 5. Forms of calcite II inclusions.

Fig. 6. Gas and liquid inclusions in barite.

References

1. Nasledov V.N. Kara-Mazar. In: *Tadzhiksko-Pamirskaya ekspeditsiya 1933 g.: Materialy ekspeditsii* [Tajik-Pamir Expedition of 1933: Expedition Report]. Leningrad, 1935, no. XIX. 402 p. (In Russian)
2. Vol'fon F.I. *Struktura i genezis svintsovo-tsinkovykh mestorozhdenii Yugo-Zapadnogo Karamazara* [Structure and Genesis of the Southwestern Karamazar Lead-Zinc Deposits]. Moscow, Izd. Akad. Nauk SSSR, 1951. 184 p. (In Russian)
3. Shikhin Yu.S. Methods for quantitative assessment of endogenic mineralization by geological factors (using the Takeli ore field of the Southwestern Karamazar as an example). *Extended Abstract of Cand. Geol.-Mineral. Sci. Diss.* Leningrad, 1967. 20 p. (In Russian)
4. Abdullaev Kh.M., Adelong A.S., Voronin V.A., Gor'kovoi O.P., Kalabina M.G., Malakov A.A., Matsokina T.M., Mirkhodzhaev I.M., Radzhabov F.Sh. *Osnovnye cherty magmatizma i metallogenii Chatkalo-Kuraminskikh gor* [The Main Features of Magmatism and Metallogeny of the Chatkal-Qurama Mountains]. Tashkent, Izd. Akad. Nauk UzSSR, 1958. 289 p. (In Russian)
5. Zharikov V.A. *Geologiya i metasomaticheskie yavleniya skarnovo-polimetallicheskikh mestorozhdenii Zapadnogo Karamazara* [Geology and Metasomatic Events of the Skarn Polymetallic Deposits of the Western Karamazar]. Moscow, Izd. Akad. Nauk SSSR, 1959. 371 p. (In Russian)
6. Rakhimov Sh.Kh. Geological and structural features of the Kurusay I lead-zinc deposit and problems of exploring concealed ore bodies (Southwestern Karamazar, Tajik SSR). *Extended Abstract of Cand. Geol.-Mineral. Sci. Diss.* Dushanbe, 1965. 22 p. (In Russian)
7. Sazonov V.D. On the determination of sphalerite deposition temperatures based on iron content. *Tr. Inst. Geol. Akad. Nauk TadzhSSR*, 1961, no. 4, pp. 215–233. (In Russian)
8. Sazonov V.D. Some physicochemical features of hypogene mineralization processes. *Extended Abstract of Cand. Geol.-Mineral. Sci. Diss.* Dushanbe, 1962. 24 p. (In Russian)
9. Shikhin Yu.S. Rock composition as a guide to hydrothermal mineralization control (using the Karamazar as an example). *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, 1992, vol. 34, no. 3, pp. 31–46. (In Russian)
10. Nekrasov E.M. Geology and structural features of vein-type lead and zinc deposits. *Geol. Ore Deposits*, 2007, vol. 49, no. 6, pp. 487–496. doi: 10.1134/S1075701507060049.
11. Fayziev A.R., Fayziev F.A. Ore-formation types silver deposits in Tajikistan. *Izv. Akad. Nauk Resp. Tadzh. Otd. Fiz.-Mat., Khim., Geol., Tekh. Nauk*, 2015, no. 3, pp. 92–99. (In Russian)
12. Fayziev A.R., Fayziev F.A. Silver polymetallic ore-formation type of mineralization in Tajikistan. *Vestn. Tadzh. Nats. Univ. Ser. Estestv. Nauk*, 2015, no. 1-5-2, pp. 271–279. (In Russian)
13. Fayziev F.A., Fayziev A.R., Yatimov S.B. On the silver content of skarn polymetallic deposits of the Western Karamazar (Northern Tajikistan). *Izv. Akad. Nauk Resp. Tadzh. Otd. Fiz.-Mat., Khim., Tekh. Nauk*, 2018, no. 1, pp. 97–106. (In Russian)
14. Fayziev F.A. Structural and geological types of the endogenic silver and argentiferous deposits of Tajikistan. *Dokl. Akad. Nauk Resp. Tadzh.*, 2018, vol. 61, nos. 11–12, pp. 888–892. (In Russian)
15. Fayziev F.A. Silver mineralization of the Kanjol deposit (Northern Tajikistan). *Geol. Geofiz. Yuga Ross.*, 2019, vol. 9, no. 2, pp. 69–82. doi: 10.23671/VNC.2019.2.31978.

16. Fayziev F.A., Yatimov S.B., Usmonov N.K., Saidov A.I., Nazarov Kh.E., Fayziev A.R. Silver-containing minerals of the deposits of the Takeli ore field (Southwestern Karamazar). *Dokl. Akad. Nauk Resp. Tadzh.*, 2019, vol. 62, nos. 9–10, pp. 581–587. (In Russian)
17. Fayziev F.A., Yatimov S.B., Fayziev A.R. Silver mineralization of the Kansay ore field (Northern Tajikistan). *Dokl. Akad. Nauk Resp. Tadzh.*, 2019, vol. 62, nos. 11–12, pp. 696–703. (In Russian)
18. Fayziev F.A. Structural factor of ore mineralization control at some silver and argentiferous deposits of Northern and Central Tajikistan. *Nauka Innovatsiya. Ser. Geol. Tekh. Nauk*, 2020, no. 1, pp. 56–60. (In Russian)
19. Fayziev A.R., Dzainukov A.B., Tadzhibaev G.T. on the identity of skarn polymetallic and hydrothermal polymetallic mineralization in the Karamazar deposits (Central Tian Shan). *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1991, vol. 318, no. 5, pp. 1199–1202. (In Russian)
20. Ermakov N.P. *Issledovanie mineraloobrazuyushchikh rastvorov* [Research on Ore-Forming Solutions]. Kharkiv, Izd. Khark. Univ., 1950. 460 p. (In Russian)
21. Piznyur A.V. *Osnovy termobarogeokhimii* [Fundamentals of Thermobarogeochemistry]. Lvov, Vishcha Shk., Izd. L'vov. Univ., 1986. 199 p. (In Russian)
22. Fayziev A.R., Morozov S.A., Mogarovskii V.V., Alidodov B.A., Iskanderov F.Sh. Thermobarogeochemical conditions for the formation of hypogene deposits in Tajikistan. *Termobarogeokhimiya endogennykh sistem: Materialy Mezhdunar. simpoziuma po termobarogeokhimii* [Thermobarogeochemistry of Endogenic Systems: Proc. Int. Symp. on Thermobarogeochemistry]. Dushanbe, 1998, pp. 20–26. (In Russian)
23. Pashkov Yu.N. Thermometry of ore-forming media inclusions. In: Rekharskii V.I. (Ed.) *Metody i apparatura dlya issledovaniya vklyucheni mineraloobrazuyushchikh sred* [Methods and Tools for Studying Ore-Forming Media Inclusions]. Moscow, Nauka, 1980, pp. 12–31. (In Russian)
24. Moskalyuk A.A. Using the water extraction method and studying the composition of inclusions in minerals. *Tr. VNIISIMS*, 1971, vol. 14: Research on ore-forming solutions and melts by inclusions in minerals, pp. 102–106. (In Russian)
25. Kullerud G. The FeS-ZnS system: A geological thermometer. *Nor. Geol. Tidsskr.*, 1953, vol. 32, no. 2/4, pp. 61–147.

Для цитирования: Файзиев А.Р., Файзиев Ф.А., Ятимов С.Б., Усмонов Н.К. Стадийность и физико-химические условия становления полиметаллических месторождений Юго-Западного Карамазара (Северный Таджикистан) // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2022. – Т. 164, кн. 1. – С. 166–180. – doi: 10.26907/2542-064X.2022.1.166-180.

For citation: Fayziev A.R., Fayziev F.A., Yatimov S.B., Usmonov N.K. Stages and physico-chemical conditions of polymetallic deposits formation in the Southwestern Karamazar (Northern Tajikistan). *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2022, vol. 164, no. 1, pp. 166–180. doi: 10.26907/2542-064X.2022.1.166-180. (In Russian)