

УДК 553.3

DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-4-3

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД МЕСТОРОЖДЕНИЯ ВОЛЬФРАМА ПОРОХОВСКОЕ (ЮЖНЫЙ УРАЛ) И ИХ РОЛЬ В КОНЦЕНТРИРОВАНИИ РУДНОГО ВЕЩЕСТВА

К.П. Мальцева¹, Е.В. Белогуб², К.А. Новоселов², Д.А. Рогов², Р.Р. Ирмаков³

¹ Санкт-Петербургский горный университет, 21-я линия Васильевского острова 2, г. Санкт-Петербург, 199106 Россия; kseniyam2018@yandex.ru

² Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, Институт минералогии, г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия

³ ООО «Уральская геологоразведочная экспедиция», ул. Вайнера стр. 55а, г. Екатеринбург, 620014 Россия

Статья поступила в редакцию 21.08.23 г., принята к печати 02.11.2023 г.

GEOCHEMICAL FEATURES OF HOST ROCKS OF THE POROKHOVSKOE TUNGSTEN DEPOSIT (SOUTH URALS) AND THEIR ROLE IN CONCENTRATION OF ORE MATTER

K.P. Maltseva¹, E.V. Belogub², K.A. Novoselov², D.A. Rogov², R.R. Irmakov³

¹ St. Petersburg Mining University, 21 liniya Vasil'evskogo ostrova 2, St. Petersburg, 199106 Russia; kseniyam2018@yandex.ru

² South-Ural Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Institute of Mineralogy, Miass, Chelyabinsk region, 456317 Russia

³ Urals Geological Exploration Expedition LLC, ul. Vaynera 55a, Yekaterinburg, 620014 Russia

Received 21.08.2023, accepted 02.11.2023

Аннотация. Статья содержит результаты статистической обработки геохимических данных для пород месторождения вольфрама Пороховское (Южный Урал), полученных при планомерных геологоразведочных работах. Статистические выборки формировались для различных типов вмещающих пород: андезитов и их туфов, сланцев, метасоматитов (включая серицит-кварцевые, эпидот и хлорит-содержащие) и скарнов. Установлено, что для всех пород Пороховского месторождения характерны повышенные содержания W, Mo и, в меньшей степени, Be, Cu, Li и Zn. Во всех типах пород присутствуют устойчивые группы коррелирующих между собой элементов, как связанные с процессом грейзенизации, так и группы элементов, унаследованные от протолита. Зональность в распределении элементов по отношению к Юго-Коневскому массиву лейкогранитов, считающимся рудогенерирующим для месторождения, отсутствует. Установлено отсутствие корреляции между W и Mo во всех типах вмещающих пород. Предложен комплекс статистических методов для выделения перспективных площадей при неявно выраженной W-Mo минерализации в породах.

Ключевые слова: вольфрам, метасоматиты, грейзенизация, статистический анализ, месторождение Пороховское, Южный Урал.

Abstract. The article contains the results of statistical processing of geochemical data for rocks of the Porokhovskoe tungsten deposit (South Urals) obtained during systematic geological exploration. Statistical samplings were formed for various types of host rocks: andesites and their tuffs, shales, metasomatites (including sericite-quartz, epidote and chlorite-bearing) and skarns. It is established that all rocks of the Porokhovskoe deposit are characterized by increased contents of W and Mo and, to a lesser extent, Be, Cu, Li, and Zn and by stable groups of correlated elements, both associated with greisenization process and those inherited from the

protolith. No zoning is revealed in the distribution of elements in relation to the Yugo-Konevsky leucogranitic pluton, which is considered the ore-generating for the deposit. No correlation between W and Mo was identified in all types of host rocks. A number of statistical methods is proposed for the identification of promising areas with unclear W-Mo mineralization in rocks.

Keywords: tungsten, metasomatites, greisenization, statistical analysis, Porokhovskoe deposit, South Urals.

Введение

Месторождения вольфрама на Южном Урале известны с конца XVIII века, но их систематическая разведка и разработка началась только в XX веке. Месторождение Пороховское, расположенное в Каслинском районе Челябинской области, разрабатывалось подземным способом с начала 40-х гг. Юго-Коневским рудником (Управление цветной металлургии и химической промышленности, Главвольфрамредмет), однако в 1957 г. в связи с аварией на ПО «Маяк» добыча была прекращена и месторождение было законсервировано (Золоев и др., 2004). Геохимическое изучение месторождения проводилось в 1950-е годы, однако полученные данные отличаются методикой определений и количеством элементов, что осложняет комплексную интерпретацию геохимической информации и ее использование для поиска и оценки сходных проявлений вольфрама.

В 2021–2022 гг. на участке месторождения Пороховское АО «Уральская геологоразведочная экспедиция» (АО УГЭ) (г. Екатеринбург) были проведены поисково-оценочные работы, в ходе которых получены систематические геохимические данные. Целью данной работы является статистическая обработка результатов геохимического анализа проб вмещающих пород, полученных в ходе ГРП для выявления особенностей распределения элементов в объеме месторождения.

Геологическое строение Пороховского месторождения

Пороховское вольфрамовое месторождение принадлежит к Коневско-Карасьевскому рудному узлу, который входит в Боевско-Биктимировскую редкометалльную зону. Строение месторождения определяется Кодинским надвигом западного падения и локальными субмеридиональными нарушениями сбросово-сдвигового характера. Вмещающие породы представлены измененными плагиоклазовыми и пироксен-плагиоклазовыми андезитовыми порфиритами и их туфами межевской толщи (S_1m). Андезиты преобразованы процессами регионального метаморфизма в мелкозернистые серицит-актинолит-эпидот-хлоритовые сланцы, часто с сохранением первичных порфириновых структур. В северной части месторождения скважинами вскрыты мелкозернистые мрамора, на контакте которых с вмещающими породами развиты эпидот-пироксеновые и эпидот-хлоритовые скарны и эпидозиты. Глинистая кора выветривания развивается на глубину 2–4 м, иногда до 10 м (Рогов и др., 2023).

На месторождении широко развиты хлорит-серицит-кварцевые метасоматиты грейзеновой формации, формирование которых связано со становлением массива постколлизийных лейкократовых гранитов Юго-Коневского комплекса, расположенного на 5 км северо-западнее (Золоев и др., 2004). В пределах массива различаются биотитовые порфирировидные мелкозернистые адамелиты первой фазы со средним содержанием SiO_2 69.5 мас. % и средне-крупнозернистые лейкократовые граниты второй фазы с содержанием SiO_2 73.6–75.5 мас. % В обрамлении массива распространены

Для цитирования: Мальцева К.П., Белогуб Е.В., Новоселов К.А., Рогов Д.А., Ирмаков Р.Р. Геохимические особенности вмещающих пород месторождения вольфрама Пороховское (Южный Урал) и их роль в концентрировании рудного вещества. *Минералогия*, 9(4), 37–49. DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-4-3

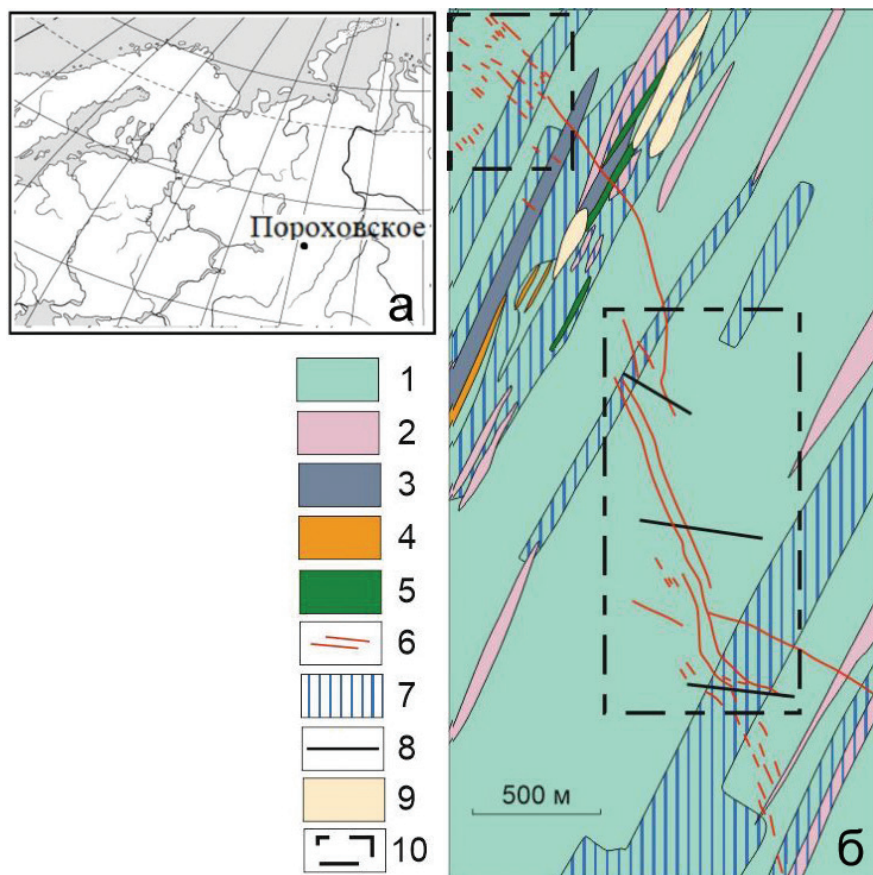
For citation: Maltseva K.P., Belogub E.V., Novoselov K.A., Rogov D.A., Irmakov R.R. Geochemical features of host rocks of the Porokhovskoe tungsten deposit (South Urals) and their role in concentration of ore matter. *Mineralogy*, 9(4), 37–49. DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-4-3.

Рис. 1. Географическая позиция месторождения Пороховское (а) и схема геологического строения месторождения (Чистяков, 1964ф, с дополнением АО УГЭ) (б).

1 – туфы порфириров; 2 – пироксен-плагиоклазовые порфириды; 3 – мраморы; 4 – эпидозиты и эпидот-хлоритовые, эпидот-актинолитовые породы; 5 – скарны; 6 – карстовые полости; 7 – вольфрамоносные кварцевые и кварц-мусковитовые жилы; 8 – зоны эпидотизации; 9 – тектонические нарушения; 10 – границы участков.

Fig. 1. Geographical position of the Porokhovskoe deposit (a) and scheme of geological structure of the deposit (Chistyakov, 1964, modified by UGE Company) (b).

1 – tuff of porphyrites; 2 – pyroxene-plagioclase porphyrite; 3 – marble; 4 – epidosite, epidote-chlorite, epidote-actinolite rocks; 5 – skarn; 6 – karst cavities; 7 – W-bearing quartz and quartz-muscovite veins; 8 – epidotization zones; 9 – faults; 10 – boundaries of areas.



продукты ороговикования – амфиболиты и биотит-амфиболовые сланцы. С гранитами связывают скарны и грейзены, продуктивные на вольфрамовое и вольфрам-бериллиевое оруденение (Коровко и др., 2015).

Пороховское месторождение относится к вольфрам-кварцево-жильной грейзеновой рудной формации, и в его пределах выделяются Центральный и Северный участки (рис. 1). Главный промышленный тип оруденения – жилы, которые образуют две системы: северо-западную (аз. простирания 310–330°) и субширотную (аз. простирания 280–290°). Мощность жил варьирует от первых сантиметров до 0.5 м. Жилы имеют кварц-мусковитовый состав с второстепенными карбонатами (преимущественно, доломитом и реже кальцитом), флюоритом, реже альбитом. Рудная минерализация представлена вольфрамитом (рис. 2а), шеелитом, пиритом (рис. 2б), халькопиритом и более редкими молибденитом и халькогенидами W_i . Жилы иногда окружены каймами осветления и серицитизации. Скарновые руды развиты локально и связаны с мраморами. Рудная минерализация в скарнах пред-

ставлена шеелитом, сульфидами (пиритом, менее распространенными молибденитом, сфалеритом, халькопиритом, галенитом) (рис. 2в), и редко – бериллом (Рогов и др., 2023).

Методика исследований

В работе использованы данные химического состава 2050 керновых проб месторождения Пороховское, полученные методом ИСП-МС в лаборатории АО «СЖС Восток Лимитед» (г. Чита). Анализ проведен для петрогенных (K, Ca, Mg, Fe, Ti, Al, Si, P) и редких (Be, Mo, W, Sr, Li, Ba, Mn, Cr, Cu, Ni, Co, Zn, V, Cd, Pb, Sb, Sc, Sn, As, La, Y) элементов. Содержания Cd, Pb, Sb, Sn и As в пробах оказались ниже предела обнаружения и в статье не рассматриваются. Для определения геохимической специализации оценен характер распределения и рассчитаны кларки концентрации химических элементов (табл. 1), кларковые содержания в земной коре взяты из (Волочкович и др., 1999). Распределение основных элементов в объеме месторождения визуализировано при помощи программы RockWorks.

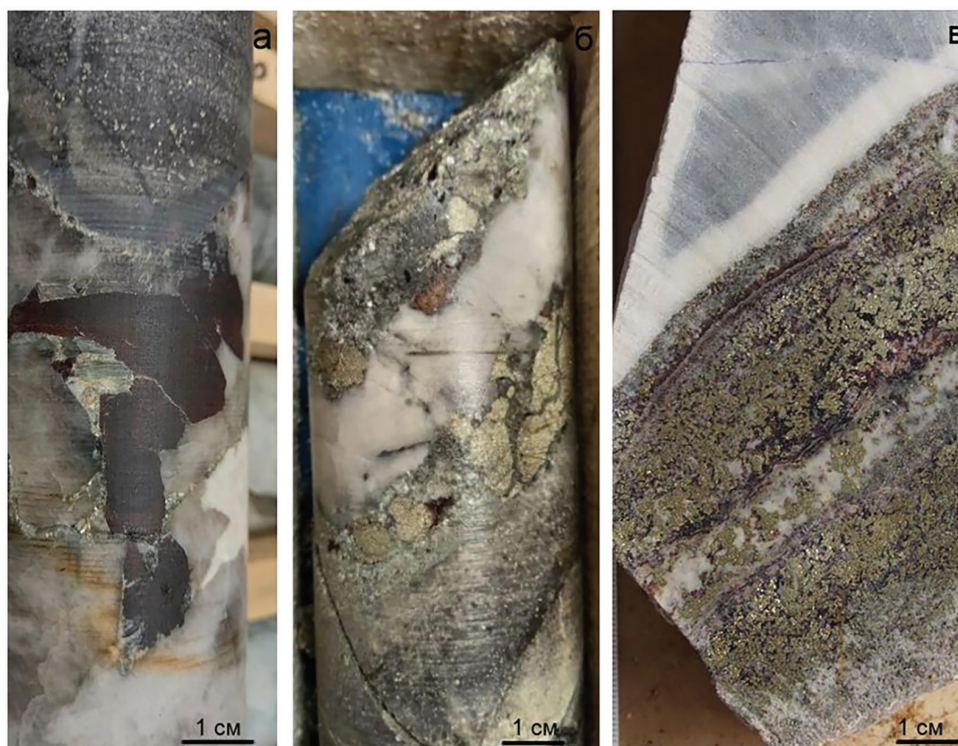


Рис. 2. Основные типы рудных жил: а – крупнокристаллический гюбнерит в мусковит-кварцевой жиле (обр. 2041А/130.1); б – обогащенный сульфидами карбонат-флюорит-кварцевый прожилок (обр. 2051/49.6); в – флюорит-пиритовая жила в мраморе (обр. 2013/129.6).

Fig. 2. Main types of ore veins: а – coarse-crystalline hübnerite in muscovite-quartz vein (sample 2041A/130.1); б – sulfide-enriched carbonate-fluorite-quartz vein (sample 2051/49.6); в – fluorite-pyrite vein in marble (sample 2013/129.6).

Таблица 1

Средний химический состав вмещающих пород месторождения Пороховское

Table 1

Average chemical composition of host rocks of the Porokhovskoe deposit

	Al	Fe	Ti	K	Ca	Li	Sr	Be	W	Mo
	мас. %				г/т					
Андезиты и их туфы (n = 1600)	8.32	5.67	0.40	3.07	4.70	242.18	268.65	34.02	618.64	23.97
Сланцы (n = 83)	7.53	4.53	0.30	2.96	3.10	238.67	171.20	27.62	480.36	11.27
Метасоматиты (n = 155)	8.51	5.78	0.37	3.66	4.91	312.19	221.42	43.87	993.68	40.61
Скарны (n = 98)	4.38	3.34	0.22	1.18	21.45	139.55	311.96	54.98	605.18	1091.16

	Ba	Mn	Cr	Ti	V	Zn	Ni	Co	La	Y
	г/т									
Андезиты и их туфы (n = 1600)	367.40	1665.13	176.77	4000.00	201.12	324.69	40.33	30.31	13.61	18.83
Сланцы (n = 83)	384.10	1550.00	224.70	3000.00	99.16	211.20	38.07	18.43	17.11	27.70
Метасоматиты (n = 155)	341.61	1808.00	162.84	3700.00	194.06	245.48	28.32	31.77	12.71	16.43
Скарны (n = 98)	416.25	1674.94	288.39	3400.00	110.98	364.11	96.96	31.25	14.82	13.73

Примечание. Здесь и в табл. 2, n – количество проб.

Note. Here and in Table 2, n – sample number.

Корреляционный анализ проведен для гомогенных выборок по отдельным типам вмещающих пород, включая андезиты и их туфы, сланцы, метасоматиты, скарны. Типы вмещающих пород выделены на основе описания АО УГЭ. Уровень значимости корреляционных связей принят 95 %. Статистический анализ выполнен в программе STATISTICA. Корреляционные матрицы приведены в электронном приложении.

Для факторного анализа уровень значимости принят 5 %, аномальные значения, превышавшие три стандартных отклонения, заменены на предельно допустимые значения. В результате проверки закона распределения установлено, что только переменные выборок «сланцы» (83 пробы) и «метасоматиты» (155 проб) отвечают нормальному или логнормальному распределению. В выборке «сланцы» нормальное распределение характеризует содержания K, Al, Ti, Si, Sr, Be, Li, Ba и Y и логнормальное – Mg, Ca, Fe, P, Cu, Sc, V, Mn, Zn, Cr и W. В выборке «метасоматиты» нормальному отвечают распределения содержаний K, Al, Ti, Fe, Ca, Mg, Si, Sc, Ba, V и Sr и логнормальному – Be, W, Cr, Mn, Zn, Cu, Li и Y. Для перечисленных элементов проведен факторный анализ (Белонин и др., 1982). Для сланцев выделены два значимых фактора, которые в совокупности описывают 60 % изменчивости их химического состава: вклад фактора 1 – 43 %, фактора 2 – 17 %. Для метасоматитов выделены три значимых фактора, которые в совокупности описывают 56 % изменчивости. Вклад фактора 1 – 28 %, фактора 2 – 18 %, фактора 3 – 11 %.

Результаты работ

Геохимическая специализация пород. Средний химический состав вмещающих пород месторождения Пороховское приведен в табл. 1, вариации содержаний химических элементов на рис. 3.

Андезиты и их туфы, составляющие большую часть площади Пороховского месторождения, имеют геохимическую специализацию на W, в меньшей степени – Mo, Be, Li, Zn и Cu. В повышенных концентрациях присутствуют V, Mn, Cr, Co. Содержания Ni, La, Y, Ba и Ti – ниже кларковых (рис. 4). Распределение петрогенных элементов равномерное, за исключением Ca и Mg. Распределение редких элементов неравномерное, а Mo, W, Ni, Co и Zn – крайне неравномерное (табл. 2).

Геохимическая специализация сланцев сходна со специализацией андезитов и их туфов: W, Be, Mo, Li и Zn. Однако в сланцах повышены содержания Cr, а содержания Cu, Co и V сравнительно ниже и отвечают кларковым. Ниже кларковых содержания Ni, Ti, La, Y, Ba и Sr (рис. 4). Распределение петрогенных элементов равномерное, за исключением Ca и Mg. Распределение редких элементов неравномерное; W и Zn – крайне неравномерное. Распределение редких элементов в сланцах, в целом, более равномерное, чем в андезитах (табл. 2).

В метасоматитах наблюдаются самые высокие концентрации W и, в меньшей степени, Mo и Li. Выше кларковых концентрации Zn, Cu, Mn и Co, ниже кларковых – Ni, Ti, La, Y, Ba и Sr (рис. 4). Распределение Ti, V и Y равномерное. Остальные редкие элементы распределены неравномерно, а W, Cu и Zn – крайне неравномерно (табл. 2).

Для скарнов Пороховского месторождения характерны высокие содержания Mo и W. Также в повышенных концентрациях отмечены Be, Cu, Zn, Li и Cr. Содержания V, Ti, Ba, Sr, La и Y значительно ниже кларковых (рис. 4). В скарнах все элементы распределены неравномерно, а Mo, Cu и W – крайне неравномерно, при этом Mo имеет самый высокий коэффициент вариации равный 409 % (табл. 2).

Распределение W, Mo, Be и Cu в объеме месторождения коррелирует с типом вмещающих пород, при этом конфигурация зон повышенных концентраций согласна с простиранием пород (рис. 1, 5, 6). Наиболее высокие содержания W и Be наблюдаются в андезитах и туфах, наиболее подверженных процессам грейзенизации с образованием рудных жил. Высокие содержания Mo и Cu характерны для участков скарнирования мраморов. Отчетливая зональность распределения элементов по отношению к Юго-Коневскому гранитному массиву не обнаружена.

Корреляционный анализ. В результате корреляционного анализа для андезитов и туфов месторождения сильные (коэффициент корреляции $r > 0,6$) положительные связи выявлены в следующих группах химических элементов: W-Mn, Li-K, Co-V-Ni, Mg-Fe-Ca, P-Ti. Сильные отрицательные связи наблюдаются между Si и группой Fe-Ca-Mg-V, а также Mg и Y. Обособливаются группы Li-K-Be и Cu-Zn, которые имеют слабые или незначимые связи с другими элементами. Вольфрам и Mn имеют положительную связь с Ca. Молибден и Be не имеют значимых связей с другими элементами (электронное приложение 1). Выделенные группы

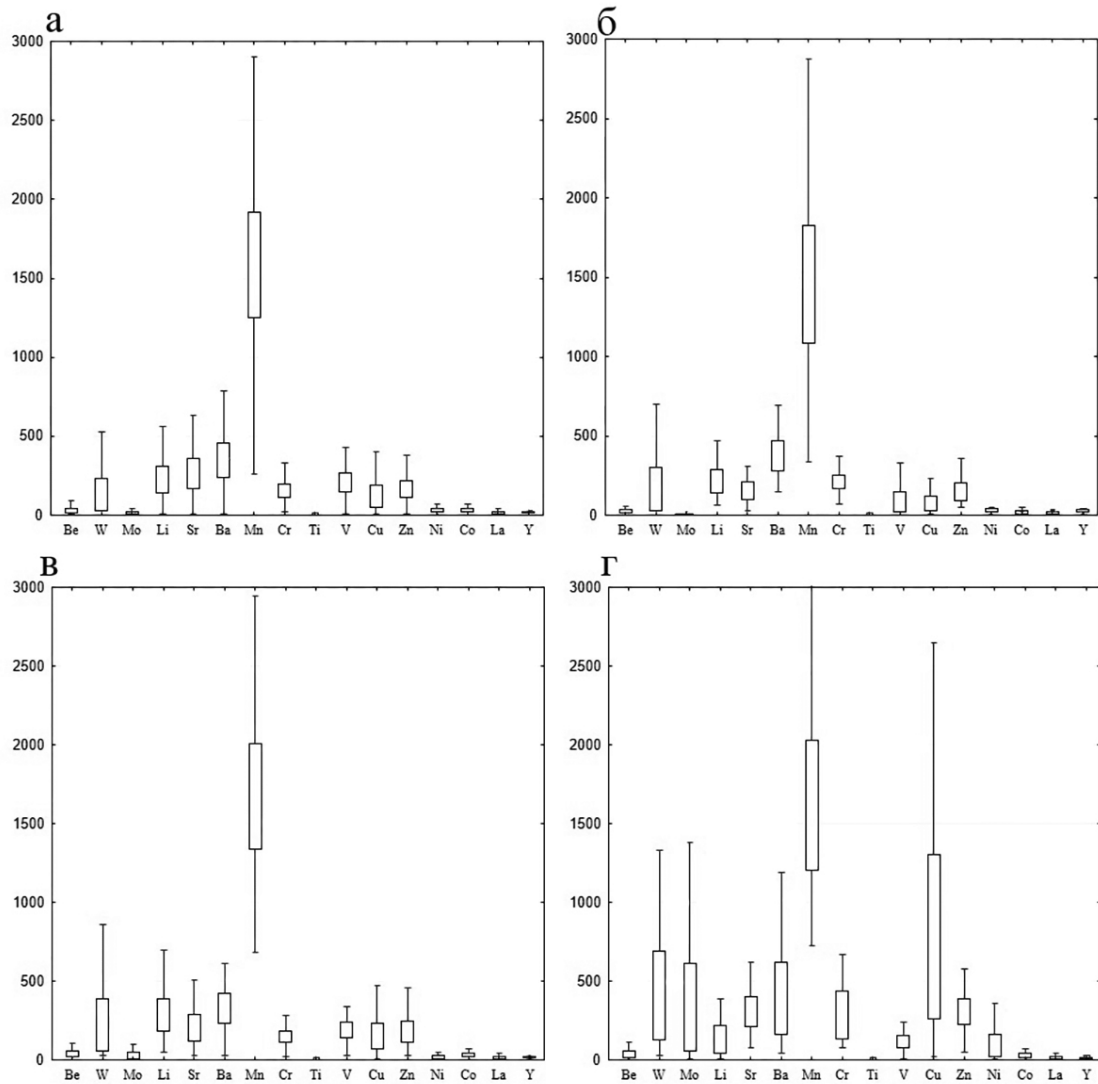


Рис. 3. Вариации содержаний химических элементов во вмещающих породах месторождения Пороховское: а – андезитов и их туфов; б – сланцев; в – метасоматитов; г – скарнов.

Границами боксов служат первый и третий квартили, «усы» показывают полный размах содержаний.

Fig. 3. Variations in contents of chemical elements in host rocks of the Porokhovskoe deposit: а – andesite and andesitic tuff; б – shale; в – metasomatite; г – skarns.

The boundaries of boxes are the first and third quartiles and the whiskers show a range of contents.

и предположительные минералы и минеральные ассоциации, их обуславливающие, приведены на рис. 7а.

В сланцах выявляется сильная положительная связь в группах Mg-Co-Fe-Ti-V-Ca, при этом Fe и Ti связаны с P, Mg – с Li-K, Zn, Cr-Ni, Si-Y-La. Сильные отрицательные связи наблюдаются между группами Si-Y-La и Mg-Co-Fe-Ti-V-Ca-Li-Co. Обособлен Zn, который не имеет значимых связей с другими элементами. Вольфрам и Mn имеют связь с группой Li-K-Be и Mg-Co-Fe-Ti-V-Ca (рис. 7б).

В метасоматитах сильные положительные связи наблюдаются в группах Li-K, Mn-W-Zn, Fe-Co-Cu, V-Mg. Сильные отрицательные связи наблюдаются между Si и V, K и Sr. Молибден имеет слабые или незначимые связи с другими элементами. Группа Mn-W-Zn положительно связана с Li-K и Fe-Co-Cu (рис. 7в).

В скарнах наблюдается сильный антагонизм между Ca и группой Al-Si-Fe-K-Li-Ba-V-Y. Вольфрам имеет сильную положительную связь с Cu и более слабую – с группой Fe-Co-Zn. Бериллий положительно связан с группой Mn-Sr-P и не имеет,

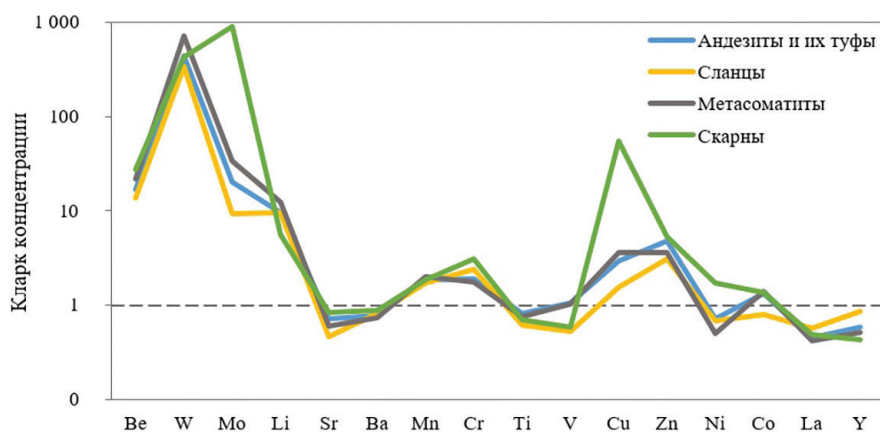


Рис. 4. Спайдер-диаграмма кларков концентрации химических элементов во вмещающих породах месторождения Пороховское.

Fig. 4. Spider-diagram of global mean contents of chemical elements in host rocks of the Porokhovskoe deposit.

Таблица 2

Распределение химических элементов в породах месторождения Пороховское

Table 2

Distribution of chemical elements in rocks of the Porokhovskoe deposit

Тип пород и количество анализов	Характер распределения по (Крейтер, 1969)			
	Равномерный (20–40)	Неравномерный (40–100)	Весьма неравномерный (100–150)	Крайне неравномерный (>150)
Андезиты и их туфы (n = 1600)	Ti (33)	V (78), La (71), Cr (65), Li (59), Mn (50), Ba (49), Y (43)	Cu (144)	Ni (643), W (430), Zn (331), Co (323), Mo (175)
Сланцы (n = 83)	Ti (36), Y (28)	Co (75), Li (61), Cr (58), Mn (48), Ba (45), La (41)	Ni (114), V (104), Cu (101)	W (312), Zn (155)
Метасоматиты (n = 155)	V (39), Y (35), Ti (31)	Co (92), La (74), Cr (56), Li (53), Mn (47), Ba (48)	Ni (136)	W (332), Zn (183), Cu (150)
Скарны (n = 56)		Ni (95), Li (80), Ba (76), Zn (68), Cr (59), Ti (52), V (49), Y (44), Mn (40)	Be (135), Co (112)	Mo (409), Cu (369), W (170)

Примечание. В скобках указаны коэффициенты вариации.

Note. The variation coefficients are indicated in parentheses.

так же как Mo, значимых связей с другими элементами (рис. 7г).

Факторный анализ позволил выделить несколько факторов, описывающих распределение химических элементов в породах месторождения.

Для сланцев выделено два фактора, значимо описывающих изменчивость распределения элементов ($R = 0.21$) (табл. 3). На фактор 1 наибольшее положительное влияние оказывают Si и Y, отрицательное – Mg, V, Fe, Ca, Ti и P. Незначимо влияют K, Cr, Zn и W. На фактор 2 наибольшее положительное влияние оказывает Sr, отрицательное – W и K.

По фактору 1 наблюдается разделение сланцев на таковые с богатой жильной рудной минерализацией в области отрицательных значений фактора и сланцы, бедные жилами, в области положительных значений фактора. По значениям фактора 2 сланцы явно не разделяются. В области положительных значений фактора 1 находятся сланцы, не содержащие рудных кварцевых жил (рис. 8). По значениям фактора 2 сланцы с потенциально рудными жилами и пустые не отличаются.

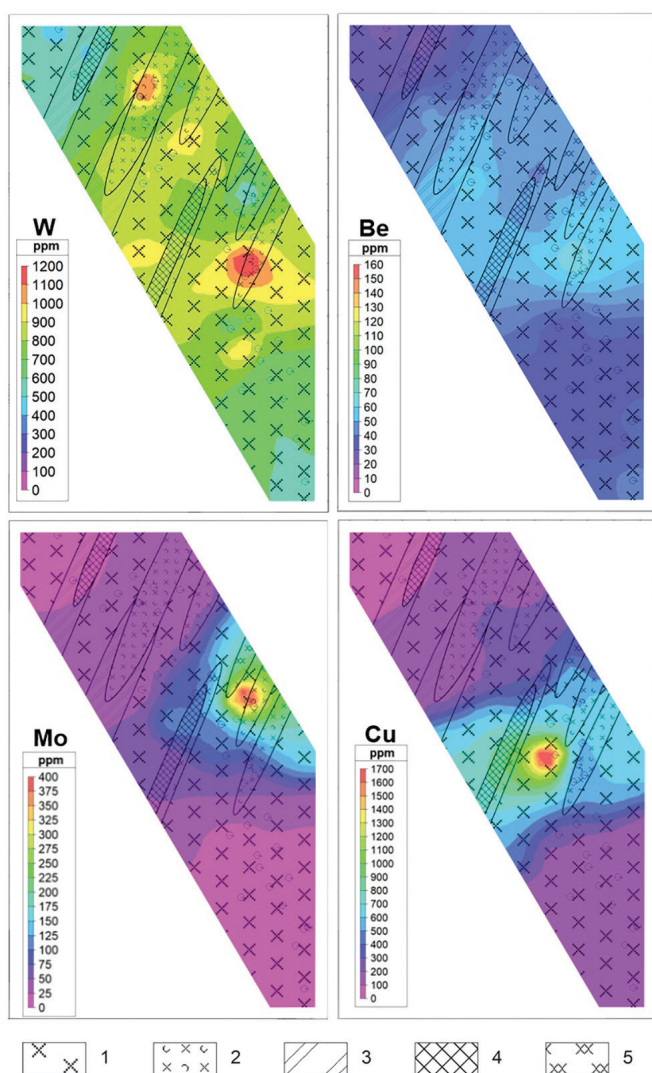


Рис. 5. Схемы распределений средних содержаний W, Be, Mo и Cu (г/т).

Уровень среза +30 м.

1 – андезиты; 2 – туфы андезитов; 3 – сланцы; 4 – метасоматиты; 5 – скарны.

Fig. 5. Distribution of average W, Be, Mo and Cu contents (ppm).

The level of section is +30 m.

1 – andesite; 2 – andesitic tuff; 3 – shale; 4 – metasomatite; 5 – skarn.

Для метасоматитов изменчивость распределения химических элементов описывают три фактора ($R = 0.16$) (табл. 4). На фактор 1 наибольшее положительное влияние оказывают Si и Y, отрицательное – Mg, V и Sc. Незначимо влияют K, Ba, Cr и W. На фактор 2 наибольшее положительное влияние оказывают K и Li, отрицательное – Sr. На фактор 3 наибольшее положительное влияние оказывает

W и Ca, отрицательное – Ba, Al и Ti. На графике значений фактора 1 и фактора 2 фигуративные точки частных проб разделяются по минеральному составу: в область положительных значений фактора 1 попадают серицитовые метасоматиты, а в область отрицательных значений – хлорит-эпидотовые метасоматиты. В положительной области фактора 2 на диаграмме находятся точки метасоматитов с пирит-мусковит-флюорит-кварцевыми прожилками, а в отрицательной – хлорит-эпидотовых пород без мусковита (рис. 9).

Интерпретация результатов

По литературным данным (Золоев и др., 2004) формирование всех молибден-вольфрамовых месторождений Коневско-Карасьевского рудного узла связано со становлением Юго-Коневского гранитного массива, выступающего источником постмагматических гидротермальных растворов. Ранее предполагалось, что минералогические особенности рудных жил определяются удаленностью от материнской интрузии, вмещающими породами и локальными разрывными структурами (Золоев и др., 2004).

Вмещающие породы месторождения Пороховское по химическому составу условно можно разделить на породы, протолит которых отвечал среднему составу – андезиты и их туфы, сланцы, серицитсодержащие метасоматиты, а также известняки и образованные по ним скарны. Исходя из этого, можно ожидать наличие связей между химическими элементами, присущих как исходному протолиту, так и возникающих в процессе его изменения.

Из анализа кларков концентраций и характера распределения элементов во всех типах вмещающих породах можно сделать вывод об их близкой геохимической специализации на W и Mo и, в меньшей степени, на Be, Cu, Li и Zn. Для всех пород характерны содержания Ti, V, Sr, Ba, Ni, La и Y ниже кларковых. Повышенные концентрации W характерны для метасоматитов, а Be и Mo – для скарнов. Такие геохимические черты характерны для месторождений связанных с лейкократовыми гранитами, специализированных на Be-W-Mo (Метасоматизм..., 1998).

Неравномерное и крайне неравномерное распределение основных элементов, представляющих экономический интерес (W, Mo) отражает прожилковый характер оруденения. Наиболее высокий ко-

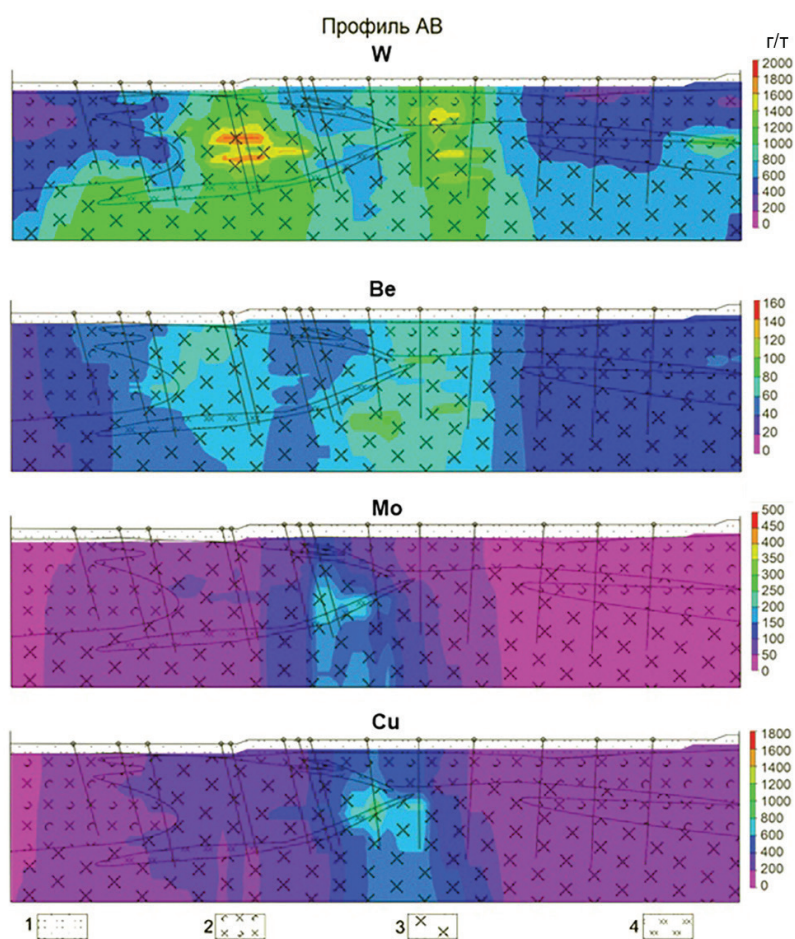


Рис. 6. Распределение содержаний W, Mo, Be и Cu по профилю АВ (г/т).

1 – кора выветривания; 2 – туфы андезитов; 3 – андезиты; 4 – скарны.

Fig. 6. Distribution of W, Mo, Be and Cu contents along the profile AB (ppm).

1 – weathering crust; 2 – andesitic tuff; 3 – andesite; 4 – skarn.

эффицент распределения Mo связан с гнездовым характером выделений молибденита – единственного концентратора Mo на месторождении (Рогов и др., 2023). Отсутствие зональности распределения элементов по отношению к Юго-Коневскому массиву указывает на определяющую роль локальных тектонических структур и типа вмещающих пород как рудоконтролирующих факторов.

Наблюдаемые корреляционные связи во всех типах пород предположительно определяются минералами – основными концентраторами данных химических элементов. Сильная положительная корреляция содержаний W и Mn обязана гюбнериту, W-Ca – шеелиту, Y-La – флюориту. Устойчивая для силикатных пород корреляция Li-K может быть объяснена входением этих элементов в слюды. В эту же группу может также входить Be. В целом, взаимосвязанные группы (W-Mn ± Zn) и (K-Li-Be) характеризуют процесс грейзенизации. Положительная корреляция Si с Y и La в сланцах и скарнах может быть объяснена присутствием в этих породах кварц-флюоритовых жил. Отрицательная корреляционная связь Ca с группой (Al-Si-Fe-K-

Li-Ba-V-Y) в скарнах, предположительно, связана с перераспределением Ca между кальцитом скарнов и флюоритом кварцевых жил. В большинстве типов пород выделяется группа Cu-Zn или Cu-Fe-Co, обусловленная сульфидной минерализацией. Примечательно отсутствие связи Mo как с W, так и с элементами-индикаторами процесса грейзенизации. Аналогичное разделение в пространстве W и Mo ранее было доказано на примере Коклановского вольфрам-молибденового месторождения в Зауралье (Новоселов и др., 2022).

Если предполагать, что остальные наблюдаемые ассоциации химических элементов отражают минеральный состав протолита (пироксен, плагиоклаз, хлорит и т. д.), то перечисленные выше группы элементов указывают на влияние постмагматических гранитных растворов, обогащенных рудными элементами, на все типы пород. Источником растворов может служить Юго-Коневский гранитный массив, внедрение которого, предположительно, сопровождалось формированием трещиноватости боковых пород и их грейзенизацией, скарнированием карбонатных пород.

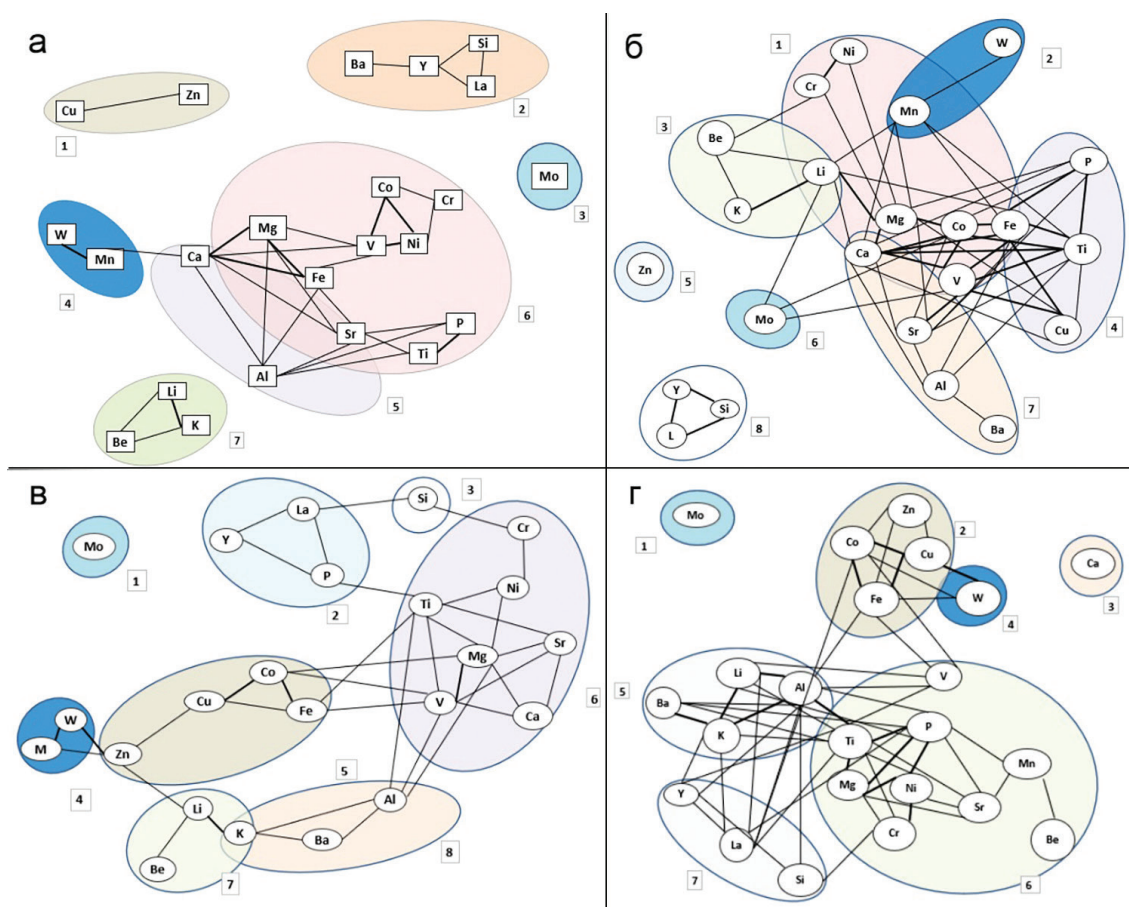


Рис. 7. Схемы корреляционных связей между элементами для разных типов вмещающих пород: а – андезитов и их туфов: 1 – сульфиды, 2 – флюорит + кварц, 3 – молибденит, 4 – вольфрамит, 5 – плагиоклаз, 6 – пироксен (авгит), 7 – мусковит; б – сланцев: 1 – хлорит, 2 – вольфрамит, 3 – мусковит, 4 – пирит, 5 – сфалерит, 6 – молибденит, 7 – плагиоклаз, 8 – флюорит + кварц; в – метасоматитов: 1 – молибденит, 2 – апатит, 3 – кварц, 4 – вольфрамит, 5 – сульфиды, 6 – актинолит, 7 – мусковит, 8 – щелочной полевоы шпат; г – скарнов: 1 – молибденит, 2 – сульфиды, 3 – кальцит, 4 – вольфрамит, 5 – мусковит, 6 – пироксен, 7 – флюорит + кварц.

Представлены связи с коэффициентом корреляции (r) >0.3 , жирным выделены сильные связи с $r >0.6$. Цифрами на схеме обозначены минералы и минеральные ассоциации, предположительно, ответственные за выделенные группы.

Fig. 7. Correlations between elements for different types of host rocks: а – andesite and andesitic tuff: 1 – sulfides, 2 – fluorite + quartz, 3 – molybdenite, 4 – wolframite, 5 – plagioclase, 6 – pyroxene (augite), 7 – muscovite; б – shale: 1 – chlorite, 2 – wolframite, 3 – muscovite, 4 – pyrite, 5 – sphalerite, 6 – molybdenite, 7 – plagioclase, 8 – fluorite + quartz; в – metasomatite: 1 – molybdenite, 2 – apatite, 3 – quartz, 4 – wolframite, 5 – sulfides, 6 – actinolite, 7 – muscovite, 8 – alkali feldspar; г – skarn: 1 – molybdenite, 2 – sulfides, 3 – calcite, 4 – wolframite, 5 – muscovite, 6 – pyroxene, 7 – fluorite + quartz.

The figure shows the correlations $r >0.3$ and strong correlations with $r >0.6$ are highlighted in bold. The numbers indicate minerals and mineral assemblages probably responsible for the distinguished groups.

Факторный анализ, выполненный для сланцев и серицит-содержащих метасоматитов, позволил более четко выделить процессы, влияющие на химический состав пород. Фактор 1, описывающий изменчивость химического состава сланцев и метасоматитов, в наибольшей степени определяется поведением Si и Y, т. е. элементов, соответствующих минералам пикового этапа грейзенизации – кварцу и флюориту. Отрицательное влияние на этот фактор оказывают элементы, которые могут быть свя-

заны с протолитом. Для серицитсодержащих метасоматитов влияние грейзенизации также отражено в факторе 2, который определяется поведением K, Li, Be и Zn. Выделенные факторы можно предположительно интерпретировать как отражающие деятельность гидротермальных растворов на различных этапах их эволюции в соответствии со схемой эволюции кислотности и температуры постмагматических растворов во времени (Метасоматизм..., 1998). В рамках этой схемы фактор 1 отражает

Таблица 3

Факторные нагрузки элементов для сланцев месторождения Пороховское

Table 3

Factor loads of elements for shales of the Porokhovskoe deposit

Фактор	Положительно			Отрицательно		
	Сильно (>0.7)	Средне (0.4–0.7)	Слабо (0.21–0.4)	Сильно (>0.7)	Средне (0.4–0.7)	Слабо (0.21–0.4)
1	Si (0.95)	Y (0.68)		Mg (-0.96) V (-0.93) Fe (-0.91) Ca (-0.89) Ti (-0.80) P (-0.72)	Mn (-0.63) Li (-0.62) Sr (-0.60) Al (-0.57) Cu (-0.45)	Be (-0.38) Ba (-0.25)
2		Sr (0.59)	Al (0.38) Ti (0.23)	W (-0.72) K (-0.72)	Be (-0.65) Zn (-0.63) Cr (-0.60) Li (-0.57)	Mn (-0.39)

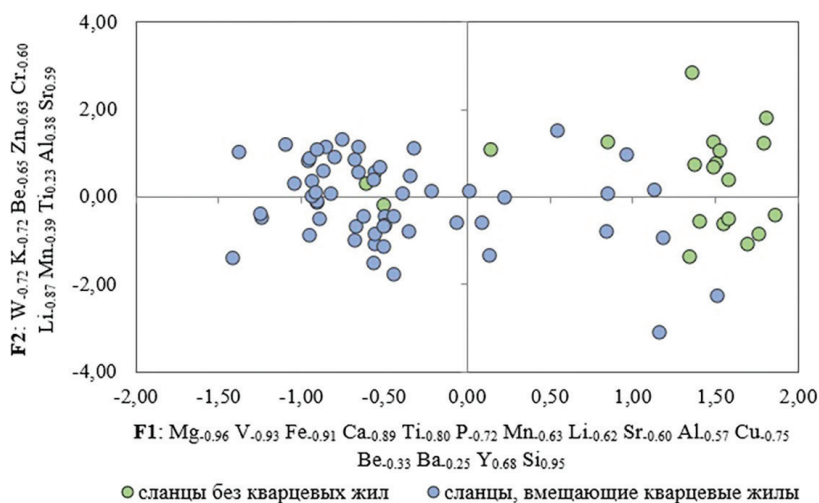


Рис. 8. Факторная диаграмма для сланцев.

Fig. 8. Factor diagram for shale.

завершающий этап процесса грейзенизации, что вещественно выразилось в образовании кварц-флюоритовых жил. Фактор 2, значимо определяющий поведение элементов в метасоматитах, вероятно, связан с начальными этапами грейзенизации, когда мобилизуются наиболее подвижные в кислых растворах щелочные элементы (K, Na, Li). Фактор 3, выявленный в метасоматитах, вероятно связан с завершающими этапами гидротермальной деятельности, проявленными в замещении вольфрамита шеелитом и накоплением в системе Cu, Zn, Mn и Be (Метасоматизм..., 1998).

Выводы

Таким образом, с учетом различного протолита все типы вмещающих пород на месторождении Пороховское (Южный Урал), имеют близкую геохимическую специализацию на W и Mo и, в меньшей степени, на Be, Cu, Li и Zn, которая сформирована при участии эволюционирующих постмагматических растворов, связанных со становлением Юго-Коневского гранитного массива. Деятельность растворов отразилась в присутствующих во всех типах пород устойчивых геохимических ассоциациях, связанных с мусковит-флюорит-кварцевыми жилами (Si-Y-La, K-Li-Al) и сульфидной минерализацией в них (Cu-Zn, Cu-Fe-Co). Вольфрам

Таблица 4

Факторные нагрузки элементов для метасоматитов месторождения Пороховское

Table 4

Factor loads of elements for metasomatites of the Porokhovskoe deposit

	Положительно			Отрицательно		
	Сильно (>0.7)	Средне (0.4–0.7)	Слабо (0.16–0.4)	Сильно (>0.7)	Средне (0.4–0.7)	Слабо (0.16–0.4)
Фактор 1	Si (0.81)	Y (0.35)		V (-0.91) Sc (-0.89) Mg (-0.53)	Ca (-0.62) Fe (-0.60) Al (-0.53) Zn (-0.53) Ti (-0.50) Mn (-0.49)	Sr (-0.34) Be (-0.33) Cu (-0.20) Li (-0.19)
Фактор 2	Li (0.87) K (0.86)	Be (0.57) Ba (0.41) Zn (0.40)	Mn (0.37) W (0.28) Al (0.21)	Sr (-0.81)		Ca (0.31) Y (-0.24) Mg (-0.22) Si (-0.16)
Фактор 3		W (0.62). Ca (0.40)	Cr (0.39) Be (0.37) Mn (0.36) Zn (0.24) Si (0.21) Cu (0.16)		Al (-0.78) Ba (-0.65) Ti (-0.42)	K (-0.28) Y (-0.18)

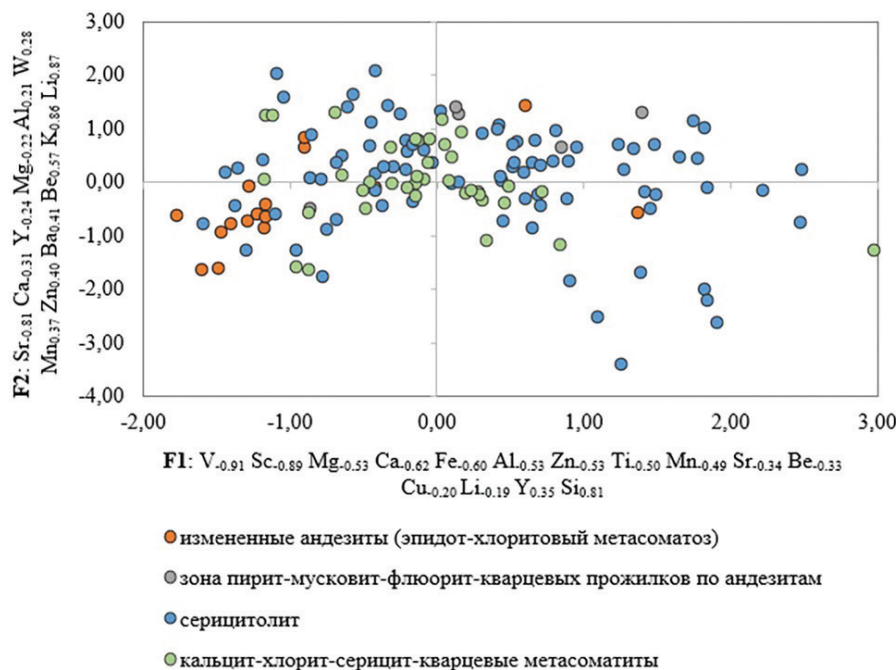


Рис. 9. Диаграмма значений фактора 1 и фактора 2 для метасоматитов.

Fig. 9. Diagram of Factor 1 and Factor 2 values for metasomatite.

характеризуется положительной корреляцией с Mn, обусловленной его преимущественной концентрацией в гюбнерите. Также W связан с геохимической ассоциацией халькофильных элементов, что отражает минеральную ассоциацию вольфрамита и ше-

елита с сульфидами. Молибден не имеет значимых связей с W и другими элементами во вмещающих породах, что объясняется крайне неравномерным характером распределения молибденита с его преимущественной концентрацией в скарнах.

Результаты проведенного анализа с применением комплекса статистических методов предлагается применять для выделения перспективных площадей при неявно выраженной W-Mo минерализации в породах.

Авторы благодарны руководству АО УГЭ за предоставленные материалы. Работа выполнена в рамках государственного задания ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, тема № 22031600292-6.

Литература

Белонин М.Д., Голубева В.А., Скублов Г.Т. (1982) Факторный анализ в геологии. М., Недра, 269 с.

Волочкович К.Л., Гусев Г.С., Иванов В.В., Морозова И.А. (1999) Геохимическая и металлогеническая специализация структурно-вещественных комплексов. М., ИМГРЭ, 538 с.

Елохин В.А. (2009) Эндогенные молибденосодержащие редкометалльные формации Урала. *Литосфера*, (3), 47–63.

Золоев К.К., Левин В.Я., Мормиль С.И., Шардакова Г.Ю. (2004) Минерагения и месторождения редких металлов, молибдена, вольфрама Урала. Екатеринбург, ИГГ УрО РАН, 336 с.

Коровко А.В., Двоглазов Д.А., Кузовков Г.Н. и др. (2015) Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000. Издание второе. Серия Среднеуральская. Лист О-41-XXXII. Объяснительная записка. М., МФ ВСЕГЕИ, 275 с.

Крейтер В.М. (1969) Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых. Издание второе. М., Недра, 384 с.

Метасоматизм и метасоматические породы. (1998) Отв. ред. В.А. Жариков и В.Л. Русинов. М., Научный мир, 489 с.

Новоселов К.А., Белогуб Е.В., Паленова Е.Е., Заботина М.В., Котляров В.А. (2022) Коклановское W-Mo месторождение (Зауралье): минералого-геохимическая зональность. *Геология рудных месторождений*, 63(3), 1–24.

Рогов Д.А., Белогуб Е.В., Новоселов К.А., Рассомахин М.А., Ирмаков Р.Р., Чугаев А.Е. (2023) Минеральные формы вольфрама на Пороховском и Юго-Конеvском месторождениях (Южный Урал). *Минералогия*, 9(2), 41–59.

Чистяков Н.Е. и др. (1964ф) Отчет Пороховской партии за 1964 год о результатах поисковых работ на редкие металлы. Свердловск.

References

Belonin M.D., Golubeva V.A., Skublov G.T. (1982) [Factor analysis in geology]. Moscow, Nedra, 269 p. (in Russian).

Chistyakov N.E. et al. (1964) [Unpublished report of the Porokhovskaya Party for 1964 on results of searching works for rare metals]. Sverdlovsk. (in Russian)

Elokhin V.A. (2009) [Endogenous molybdenum-containing rare metal formations of the Urals]. *Lithosrhera [Lithosphere]*, (3), 47–63. (in Russian)

Korovko A.V., Dvoeglazov D.A., Kuzovkov G.N. et al. (2015) [State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 200,000. Second edition. The Sredneuralskaya series. Sheet O-41-XXXIII. Explanatory note]. Moscow, MF VSEGEI, 275 p. (in Russian)

Kreyter V.M. (1969) [Searches and exploration of mineral deposits. Second edition]. Moscow, Nedra, 384 p. (in Russian)

[Metasomatism and metasomatic rocks] (1998) Eds. by V.A. Zharikov and V.L. Rusinov. Moscow, Nauchny mir, 489 p. (in Russian)

Novoselov K.A., Belogub E.V., Palenova E.E., Zabolina M.V., Kotlyarov V.A. (2022) The Koklan W-Mo deposit, Transuralia: mineralogical–geochemical zoning. *Geology of Ore Deposits*, 63(3), 221–242.

Rogov D.A., Belogub E.V., Novoselov K.A., Rassomakhin M.A., Irmakov R.R., Chugaev A.E. (2023) [Mineral forms of tungsten at the Porokhovskoe and Yugo-Konevskoe deposits (South Urals)]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, 9(2), 41–59. (in Russian)

Volochkovich K.L., Gusev G.S., Ivanov V.V., Morozova I.A. (1999) [Geochemical and metallogenic specialization of structural-compositional complexes]. Moscow, IMGRE, 538 p. (in Russian)

Zoloev K.K., Levin V.Ya., Mormil S.I., Shardakova G.Yu. (2004) [Minerageny and deposits of rare metals, molybdenum, and tungsten of the Urals]. Yekaterinburg, IGG UrO RAS, 336 p. (in Russian)