



Минералогические особенности вольфрамовых руд, влияющие на их обогатимость

В. Е. Жукова, Е. Г. Ожогина, Н. А. Сычева, Ю. Н. Шувалова

Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского (ВИМС), Москва, Россия; zhukova@vims-geo.ru

Вольфрам является дефицитным минеральным сырьем, необходимым для важнейших отраслей промышленности. Страна остро нуждается в освоении новых месторождений вольфрама. Шауырхыгская перспективная площадь на данный момент является объектом, который требует пристального изучения. Исследование состава и строения руды комплексом методов технологической минералогии (оптико-минералогический, рентгенографический, химический и электронно-микроскопический) позволило определить перспективы ее обогащения.

Ключевые слова: шеелитовая руда, шеелит, тунгстит, минералогические особенности

Mineralogical features of tungsten ores affecting their processability

V. E. Zhukova, E. G. Ozhogina, N. A. Sycheva, Y. N. Shuvalova

Fedorovsky All-Russian Research Institute of Mineral Resources, Moscow, Russia

Tungsten is a scarce mineral raw material essential for critical industries. The country is in acute need of developing new tungsten deposits. The Shauyrkhyg prospective area is currently a site that requires detailed study. Investigating the composition and structure of the ore using a set of technological mineralogy methods (optical-mineralogical, X-ray diffraction, chemical, and electron microscopy analysis) allows determining its processing prospects.

Keywords: scheelite ore, scheelite, tungstite, mineralogical features

Введение

Вольфрам относится к стратегическому минеральному сырью, перечень которого утвержден Распоряжением Правительства Российской Федерации от 30.08.2022 № 2473-р (Об утверждении..., 2022). Он необходим для производства продуктов важнейших отраслей отечественной промышленности благодаря своим специфическим характеристикам: твердости, износостойкости, стойкости к высоким температурам и высокой плотности (Хатков, Боярко, 2019). Вольфрам и продукты его передела настолько востребованы, что включены в нашей стране в перечни стратегического сырья. Запасов руд с преобладающими минералами вольфрама, вовлеченных в отработку, немного. Это связано с тем, что большинство месторождений уже в значительной степени отработано. К категории разрабатываемых относится только 4 % месторождений, 0.6 % приходится на комплексные руды, содержащие и другие полезные компоненты. 64.4 % сосредоточено в подготавливаемых к освоению и разведываемых месторождениях. В нераспределенном фонде находится 31 % запасов (по состоянию на 01.01.2023 г.). В настоящее время крайне важно иметь резервные объекты, которые могут быть оперативно лицензированы, подготовлены и введены в эксплуатацию. За счет таких месторождений может быть увеличен прирост добычи из недр в 4.5–5 раз (Государственный..., 2023; 2024).

Одним из перспективных объектов вольфрамового оруденения представляется Шауырхыгская площадь, расположенная на территории Республики Северная Осетия — Алания (РСО — Алания) Северо-Кавказского федерального округа. Вольфрамовая минерализация связана с крутопадающими кварцевыми и карбонат-кварцевыми жилами и прожилками, которые образуют линейную штокверковую зону, вытянутую в субширотном направлении. Предполагается пространственная связь вольфрамового оруденения кварц-шеелитовой формации с белореченским гранитным комплексом. Штокверковые объекты занимают в структуре минерально-сырьевой базы России ведущее положение, для них характерны значительные масштабы оруденения, но низкое качество руд (Лаптева, Чекмарев, 2024).

Целью исследования является изучение вещественного состава и морфоструктурных особенностей вольфрамовых руд Шауырхыгской площади, позволяющих прогнозировать их поведение в процессах обогащения и качество ожидаемых продуктов.

Методы исследования

Объект исследования — технологические пробы шеелитовой руды вольфрамового оруденения Шауырхыгской площади. Работы включали макроскопическое изучение, световую микроскопию, электронную микроскопию и рентгенографический количе-

Для цитирования: Жукова В. Е., Ожогина Е. Г., Сычева Н. А., Шувалова Ю. Н. Минералогические особенности вольфрамовых руд, влияющие на их обогатимость // Вестник геонаук. 2026. 2(374). С. 11–16. DOI: 10.19110/geov.2026.2.2

For citation: Zhukova V. E., Ozhogina E. G., Sycheva N. A., Shuvalova Y. N. Mineralogical features of tungsten ores affecting their processability. Vestnik of Geosciences, 2026, 2(374), pp. 11–16. DOI: 10.19110/geov.2026.2.2

ственный фазовый анализ. Все минералогические работы выполнены в ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского» в соответствии с Методическими рекомендациями Научного совета по методам минералогических исследований, входящими в «Отраслевой реестр методик анализа, допущенных к применению при минералогическом обеспечении ГРР на твердые полезные ископаемые».

Минералогические особенности вольфрамовой руды изучены методами оптической микроскопии (стереомикроскоп высшего класса Leica MZ125 (Германия) и поляризационный оптический микроскоп Olympus BX 53 (Япония)), рентгенографическим количественным фазовым анализом (рентгеновский дифрактометр Tongda TD-3700 (Dandong Tongda Science & Technology Co., Ltd., Китай. Основные параметры: монохроматизированное $\text{CuK}\alpha$ -излучение (графитовый монохроматор на дифрагированном излучении), режим работы рентгеновской трубки: $V = 40 \text{ kV}$, $I = 30 \text{ mA}$, режим записи рентгенограмм непрерывный, шаг 0.02 град 2θ , время набора импульсов 1.0 c.), электронной микроскопии (настольный сканирующий электронный микроскоп ZEM-15 (Zeptoools, Китай) с энергодисперсионной приставкой. Ускоряющее напряжение 15 kV , продолжительность счета импульсов 60 c.). Химический состав руды определен комплексом методов: атомно-эмиссионного с индуктивно связанной плазмой, фотометрического, гравиметрического, титриметрического, рентгенофлуоресцентного.

Результаты и их обсуждение

Изученные пробы шеелитовой руды сформированы каменным материалом различной крупности. Кусковой материал пробы представляет собой плотные, преимущественно охристо-коричневые породы с участками белого, реже серого и черного цвета. На объекте развита кварц-шеелитовая минерализация жильного и жильно-прожилкового типов. Вмещающие породы представлены в значительной степени измененными хлорит-серицитовыми, хлорит-карбонат-кварцевыми метасоматитами с кварц-карбонатными прожилками, в различной степени катаклазированными. Отмечаются значительные хлоритизация, карбонатизация, окварцевание. Местами проявлены пренитизация и альбитизация. Преобладают массивная, полосчатая и пятнистая текстуры и разнотельная, участками микрогранобластовая структура (Жукова и др., 2025).

Химический состав пробы шеелитовой руды приведен в таблице 1.

Главным компонентом является вольфрам (0.36%), который входит в шеелит, в меньшей степени в тунгстит и штольцит. Содержание WO_3 позволяет отнести руду к рядовым.

Главными породообразующими минералами являются кварц, карбонаты и полевые шпаты. В подчиненном количестве наблюдаются пренит, хлорит, цоизит, гидроксиды железа. В количестве единичных зерен наблюдаются пирит, ильменит, слюда, каолинит, рутил, сфалерит, галенит, реальгар, аурипигмент, флюорит. Полезные минералы вольфрама представлены шеелитом, тунгститом и штольцитом, неравномерно распределенными в руде.

Таблица 1. Химический состав руды

Table 1. Chemical composition of ore

Компонент Component	Содержание, мас. % Content, wt. %
Na_2O	0.087
MgO	1.36
Al_2O_3	1.40
SiO_2	87.34
K_2O	1.11
CaO	3.80
TiO_2	0.058
V_2O_5	0.0024
Cr_2O_3	0.01
$\text{MnO}_{\text{общ}}$	0.12
$\text{Fe}_2\text{O}_3_{\text{общ}}$	2.61
SrO	0.0031
BaO	0.016
ZrO_2	0.0014
P_2O_5	0.035
FeO	1.73
SO_3	0.62
WO_3	0.36
As	0.024
Mo	<0.00005
Ni	0.0025
CuO	0.07
ZnO	0.16
Sn	<0.00005

Шеелит встречается в прожилках, сложенных кварцем и карбонатом, реже в околорудных метасоматитах. Минерал представлен двумя разновидностями. Шеелит первой разновидности образует крупные гипидиоморфные зерна и их агрегаты. Размер зерен достигает 2.4 мм , агрегатов — первых сантиметров (рис. 1, а). Для шеелита характерны следы дробления и пластических деформаций. Трещины в нем выполнены кварцем и кальцитом. Мощность трещин достигает 0.1 мм . В шеелите нередко присутствуют включения кварца размером до $0.1—0.15 \text{ мм}$. Зерна шеелита желтоватого и серовато-белого цвета с жирноватым блеском (рис. 1, б). Шеелит второй разновидности формирует мелкие идиоморфные зерна, иногда обрастающие шеелит первой разновидности. Размер зерен составляет $0.02—0.05 \text{ мм}$ (рис. 1, с, d).

Шеелит двух разновидностей различается по элементному составу (табл. 2). Для первой разновидности шеелита характерно присутствие примеси молибдена и стронция. Вторая разновидность отличается пониженным содержанием элементов-примесей. Соотношение содержаний редкоземельных элементов в шеелите зависит от генетического типа оруденения, а также от минерального состава руды (Колесникова, 2013; Иванов, 1974).

В шеелите-1 иногда наблюдаются включения и прожилки штольцита размером в тысячные доли миллиметра (рис. 2, а, б). Вероятно, штольцит возник в результате гипергенного изменения шеелита. В некоторых зернах штольцита отмечается примесь молибдена до 0.85% . Элементный состав штольцита приведен в таблице 3.

Тунгстит — продукт изменения шеелита, образует зеленоват-желтые каймы землистого сложения, реже остроугольные обломки зерен со слабым перла-

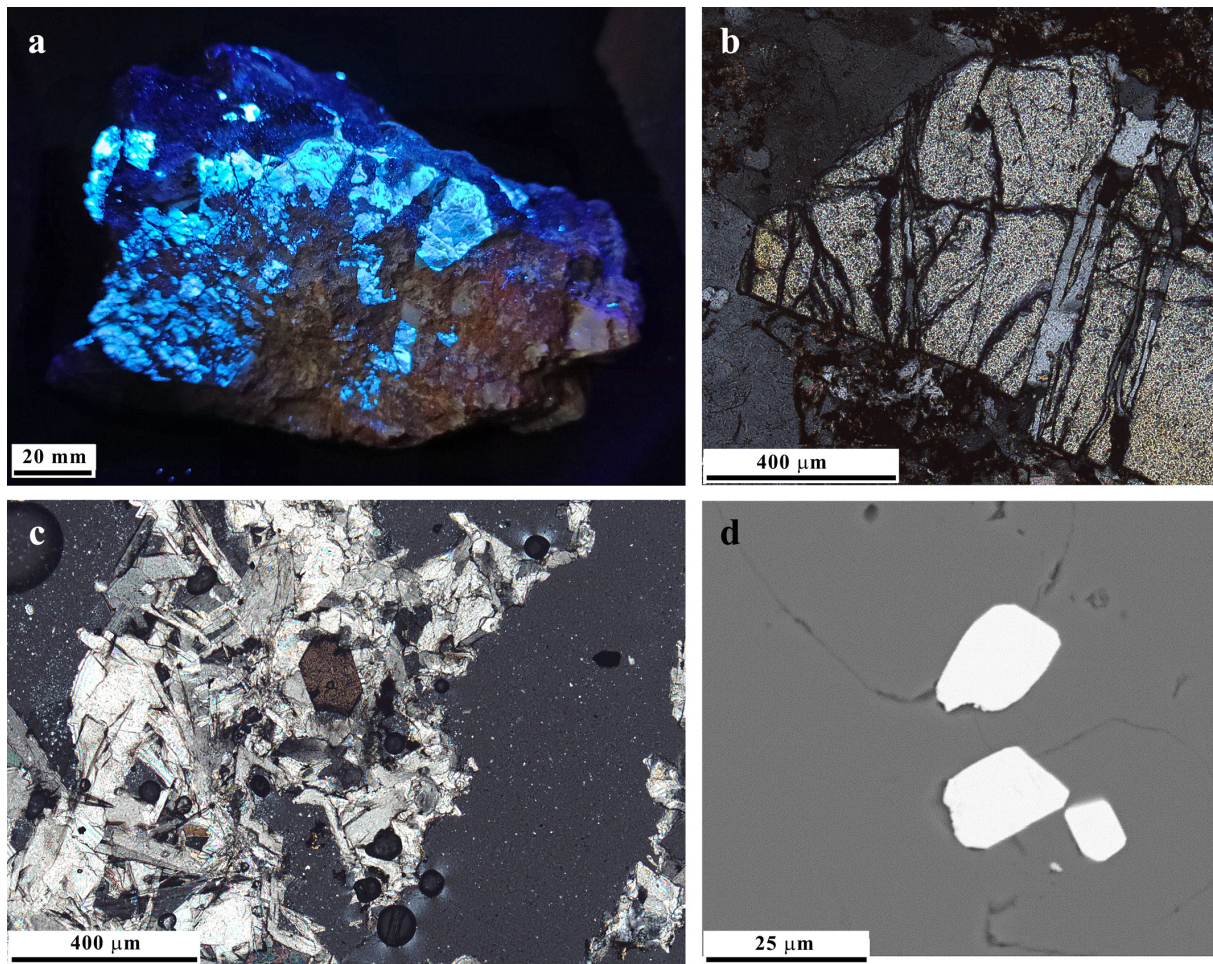


Рис. 1. Гнездообразное скопление шеелита в ожелезненном кварце под УФ-лампой (а); раздробленное зерно шеелита. Проходящий свет, николи скрещены (b); идиоморфное выделение шеелита в кальцитовом прожилке. Проходящий свет, николи скрещены (c); мелкие вкрапленные выделения шеелита в кварце. СЭМ (d)

Fig. 1. Nesting accumulation of scheelite in calcified quartz under UV lamp (a); crushed grain of scheelite. Passing light, crossed nicols (b); idiomorphic allocation of scheelite in a calcite vein. Passing light, crossed nicols (c); small interspersed scheelite precipitates in quartz. SEM (d)

Таблица 2. Элементный состав шеелита
Table 2. Elemental composition of scheelite

№	O	Ca	Cu	Sr	Mo	La	Ce	W	Сумма / Sum
Первая разновидность / First variety									
1	22.12	12.86	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	64.96	100.00
2	22.02	13.03	0.00	2.45	0.24	0.00	0.07	62.19	100.00
3	22.28	13.63	0.04	0.00	0.58	0.00	0.17	63.30	100.00
4	21.97	13.04	0.17	2.66	0.09	0.03	0.10	61.94	100.00
5	21.95	12.70	0.23	2.93	0.26	0.00	0.00	61.93	100.00
Вторая разновидность / Second variety									
6	22.12	12.97	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	64.91	100.00
7	22.13	13.08	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	64.76	100.00
8	22.11	12.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	64.98	100.00
9	22.14	13.16	0.00	0.05	0.00	0.03	0.07	64.55	100.00
10	22.04	12.65	0.14	0.00	0.00	0.30	0.35	64.52	100.00

мутровым блеском. В руде формирует каемки по периферии зерен шеелита и по трещинам в нем (рис. 3, a, b). Иногда в нем отмечается примесь железа (до 6.4 % Fe) (табл. 4), что позволяет предположить наличие в руде его разновидности — ферритунгстита. Для тунгстита характерна низкая твердость 1–2 по шкале Мооса, он не обладает магнитными свойствами и не флотоактивен, что приведет в перспективе к потерям ценного компонента в хвостах.

Элементный состав тунгстита приведен в таблице 4. Главным породообразующим минералом является кварц. Крупные зерна кварца носят следы пластических деформаций и в различной степени катаклизированы и перекристаллизованы. Зерна кварца запыленные, нередко пересечены тонкими карбонатными прожилками. Большинство прожилков сложены шестоватым кварцем, ориентированным поперек протяженности прожилков. По зонам тектонических на-

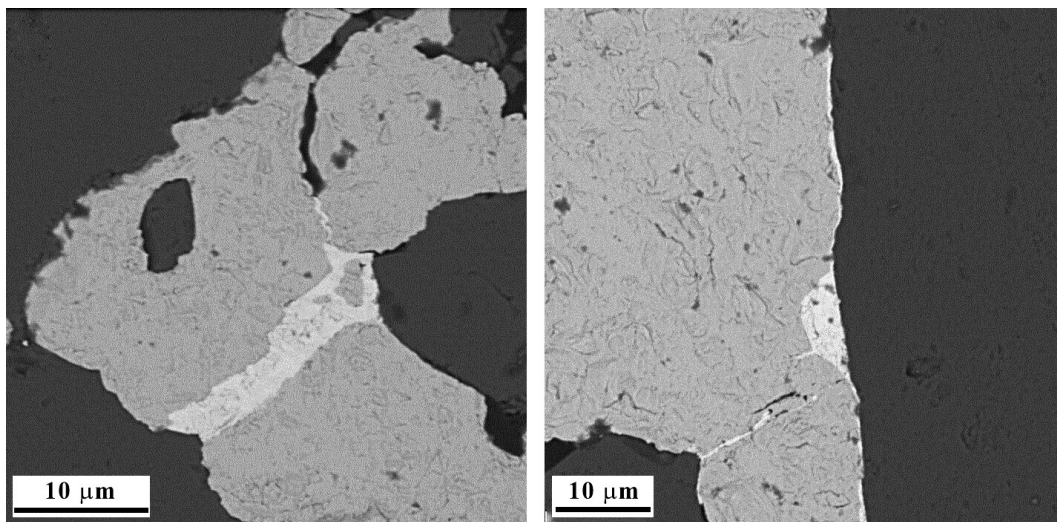


Рис. 2. Прожилки и каймы замещения штольцита (светло-серое) по шеелиту. СЭМ

Fig. 2. Veinlets and replacement rims of stolzite (light gray) after scheelite

Таблица 3. Элементный состав штольцита

Table 3. Elemental composition of stolzite

№	O	W	Pb	Сумма Sum
1	14,23	41.35	44.42	100.00
2	14.28	41.64	44.08	100.00
3	13.86	39.21	46.93	100.00
4	14.36	42.11	43.53	100.00
5	14.41	42.45	43.14	100.00

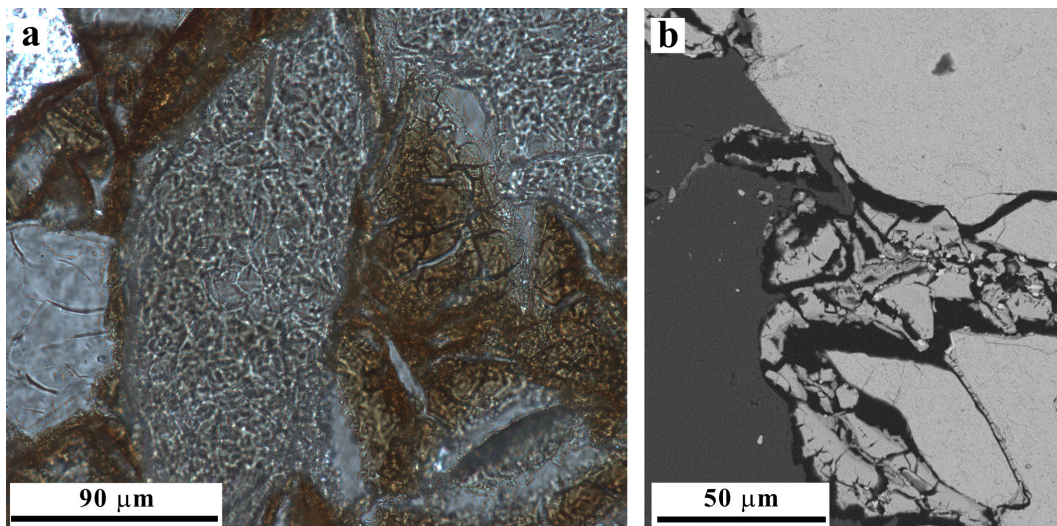


Рис. 3. Каймы тунгстита вокруг зерен шеелиита. Проходящий свет, николи параллельны (а). Изображение в обратнорассеянных электронах. СЭМ (b)

Fig. 3. Tungstite rims around scheelite grains. Transmitted light, parallel nicols (a). Image in backscattered electrons. SEM (b)

Таблица 4. Элементный состав тунгстита

Table 4. Elemental composition of tungstite

№	O	Ca	Fe	W	Сумма / Sum
1	21.56	0.00	6.40	72.04	100.00
2	21.58	1.05	5.74	71.63	100.00
3	21.50	1.28	4.93	72.29	100.00
4	21.50	1.11	5.09	72.30	100.00
5	21.51	1.29	4.97	72.23	100.00



пряжений наблюдается перекристаллизация крупных зерен кварца в тонко- и мелкозернистый агрегат зерен гранобластовой структуры. Наблюдается значительное окварцевание вмещающих пород. Наряду с кварцем присутствуют карбонаты как в виде прожилков, нередко совместно с кварцем, так и виде неравномерно проявленной карбонатизации пород. Карбонаты представлены тремя минеральными видами — кальцитом, доломитом и анкеритом. Выделения карбонатов преимущественно лапчатые, с неровными краями, слабо удлинённые. Местами отмечается «запыленность» зерен. Иногда вокруг зерен шеелита наблюдаются каймы доломита и анкерита, сменяющиеся кальцитом. В меньшем количестве отмечаются плагиоклаз, пренит, хлорит, цоизит и др.

Вредными минералами для вольфрамовых руд являются апатит, пирит, пирротин и арсенопирит. Все эти минералы встречаются эпизодически, как правило в местах наиболее интенсивно проявленных тектонических деформаций и метасоматических изменений.

Арсенопирит присутствует в виде ксеноморфных, корродированных удлинённых зерен и звездчатых тройниковых сростков. Зерна несут следы дробления. Наблюдаются сростания преимущественно с пиритом (рис. 4, а) и халькопиритом, реже арсенопирит образует каймы вокруг зерен пирротина. Пирротин отмечается в виде удлинённых ксеноморфных выделений размером в сотые доли миллиметра. Зерна пирротина, как правило, кавернозные, с извилистыми грани-

цами. Апатит образует единичные изометричные зерна размером до 0.4 мм по удлинению, со следами кристаллографической огранки (рис. 4, б), неравномерно рассеянные в кварце. Нередко носит следы дробления.

Минералогическое изучение характера раскрытия рудных и породообразующих минералов проводилось в классах ситового анализа (мм): $-5+2$, $-2+1$, $-1+0.5$, $-0.5+0.3$, $-0.3+0.1$, $-0.1+0.074$, $-0.074+0.044$. В каждом классе были выделены и количественно оценены четыре основных типа минеральных сростков, отличающихся по содержанию шеелита (%): индивидуализированные (свободные) рудные зерна (91—100); богатые (71—90); рядовые (31—70); бедные (6—30). Свободные зерна породообразующих минералов не учитывались. В таблице 5 показано раскрытие шеелита без учета породообразующих минералов.

Четко прослеживается увеличение условно свободных зерен рудного минерала от крупных классов к тонким. В классе крупности ($-0.074+0.044$) мм раскрытие шеелита составляет 99 %, а в классе крупности ($-0.044+0.02$) мм зерна шеелита полностью раскрыты.

Свободные зерна представляют собой фрагменты зерен шеелита. Богатые зерна образованы шеелитом и преимущественно кварцем. Сростки кварца или карбонатов с шеелитом, присутствующим в них в подчиненном количестве, относятся к категории рядовых и бедных. Минеральные зерна породообразующих минералов (кварц, карбонаты, полевые шпаты, пренит, слюда, реже гидроксиды железа и обломки сланцев) в подсчет не включены.

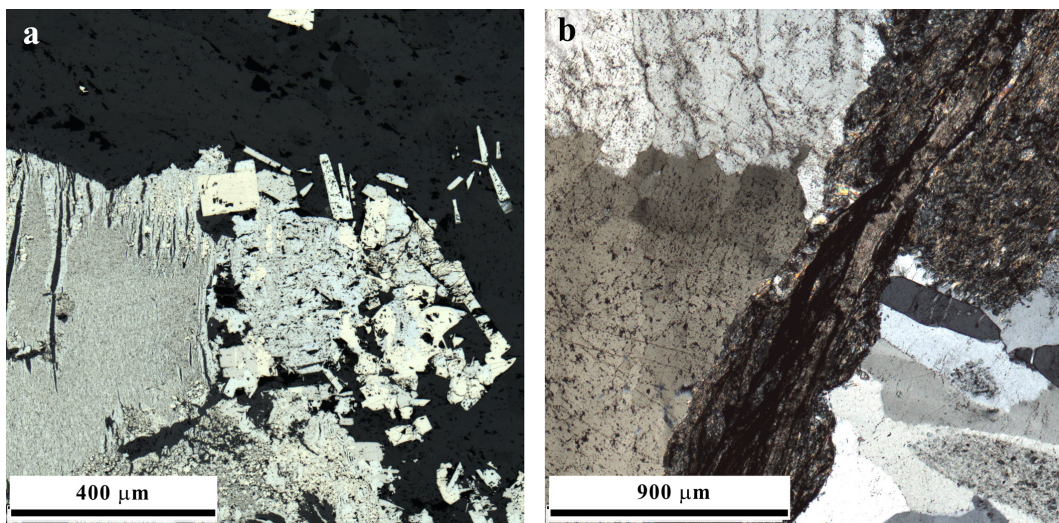


Рис. 4. Агрегат пирита и арсенопирита. Отраженный свет, николи параллельны (а). Удлинённые зерна апатита в кварце. Проходящий свет, николи скрещены (б)

Fig. 4. Pyrite and arsenopyrite aggregate. Reflected light, parallel nicols (a). Elongated grains of apatite in quartz. Passing light, crossed nicols (b)

Таблица 5. Распределение типов сростков по классам крупности исходной руды без учета нерудных минералов, %

Table 5. Distribution of splice types by size classes of the initial ore, excluding non-metallic minerals, %

Тип сростков Type of splices	Класс крупности, мм / Size class, mm							
	-2+1	-1+0.5	-0.5+0.3	-0.3+0.2	-0.2+0.1	-0.1+0.074	-0.074+0.044	-0.044+0.02
Свободные / Free	0	63	72	91	96	97	99	100
Богатые / Rich	0	0	3	0	3	2	0	0
Рядовые / Ordinary	0	12	7	4	0	0	0	0
Бедные / Low	100	25	18	5	1	1	1	0
Сумма / Sum	100	100	100	100	100	100	100	100

Выводы

Проведенные исследования показали, что морфологические особенности руд, в том числе характер распределения, выделения, гранулярный состав вольфрамовых минералов (шеелит, тунгстит, штольцит), позволяют с большой долей вероятности говорить об их поведении в процессах обогащения и качестве ожидаемых продуктов. В результате были выделены две группы факторов, влияющих на обогащение:

— положительные: чистые (практически без включений породообразующих минералов) зерна шеелита, размеры его выделений и то, что шеелит образует сростки открытого типа, которые могут быть легко раскрыты;

— отрицательные: трещиноватость зерен шеелита, наличие двух разновидностей шеелита, отличающихся размером зерен, одновременное присутствие нескольких минеральных форм вольфрама (шеелит, тунгстит, штольцит); сюда же относятся каймы и прожилки тунгстита, который в настоящее время считается неизвлекаемым минералом; присутствие вредных минералов — апатита, пирита, арсенопирита, пирротина — и большого количества кальцийсодержащих минералов (карбонатов и флюорита) в руде, близких по флотационным свойствам к шеелиту; наличие в руде галенита и штольцита, с которыми связан свинец, являющийся вредной примесью для вольфрамовых руд (Методические..., 2007).

Авторы выражают благодарность главному геологу АО «Северо-Кавказское ПГО» О. П. Туаеву за предоставленные материалы и ценные советы.

Литература / References

Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2022 году. М., 2023. 640 с.

State report on the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2022. Moscow; 2023. 640 p. Russian.

Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2023 году. М., 2024. 716 с.

State report on the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2023. Moscow; 2024. 716 p. Russian.

Об утверждении перечня основных видов стратегического минерального сырья: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 30.08.2022 № 2473-р.

On approval of the list of main types of strategic mineral raw materials. Russian: Order of the Government of the Russian Federation dated August 30, 2022:2473-r.

Жукова В. Е., Ожогина Е. Г., Шувалова Ю. Н., Сычева Н. А. Особенности минерального состава, определяющие обогатимость вольфрамовых руд // Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья (Плаксинские чтения — 2025). Екатеринбург: Форт-Диалог Исет, 2025. С. 112—115; DOI: 10.21440/978-5-6047797-5-0-2025-3-510

Zhukova V. E., Ozhogina E. G., Shuvalova Yu. N., Sycheva N. A. Features of the mineral composition that determine the beneficiation of tungsten ores. In: Innovative processes of complex and deep processing of natural and non-traditional mineral raw materials (Plaksin Readings 2025). Yekaterinburg: Fort-Dialog Iset; 2025. p. 112—115. Russian.

Иванов Ю. Г. Геохимические и минералогические критерии поисков вольфрамового оруденения. М.: Недра, 1974. 213 с.

Ivanov Yu. G. Geochemical and mineralogical criteria for searching for tungsten mineralization. Moscow: Nedra; 1974. 213 p. Russian.

Колесникова Н. Б. Редкие земли в шеелитах как типоморфный признак генетико-формационного типа руд // Рациональное освоение недр. № 1. 2013. С. 32—34. Kolesnikova N. B. Rare earths in scheelites as a typomorphic feature of the genetic-formational type of ores. Rational development of subsoil. 2013;1:32—34. Russian.

Лаптева А. М., Чекмарев К. В. Минерально-сырьевая база вольфрама России: состояние и перспективы развития // Разведка и охрана недр. № 5. 2024. С. 3—16. DOI: 10.53085/0034-026X_2024_5_03

Lapteva A. M., Chekmarev K. V. Mineral resource base of tungsten in Russia: state and development prospects. Exploration and Protection of Subsurface Resources. 2024;5:3—16. Russian.

Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Вольфрамовые руды. М., 2007. 43 с.

Methodological recommendations for the application of the Classification of deposit reserves and predicted resources of solid minerals. Tungsten ores. Moscow; 2007. 43 p. Russian.

Хатков В. Ю., Боярко Г. Ю. Современное состояние вольфрамовой промышленности России // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 2. 124—137.

Khatkov V. Yu., Boyarko G. Yu. Current state of the tungsten industry in Russia. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2019;330(2):124—137. Russian.

Поступила в редакцию / Received 30.01.2026