

<https://doi.org/10.51301/ejsu.2024.i2.04>

## Correlation of Ore Bodies in a Molybdenum-Tungsten Deposit Using the Distribution of Rock-Forming and Trace Elements

D. Shihov\*, A. Bekbotayeva

Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

\*Corresponding author: [d.shihov@dktko.kz](mailto:d.shihov@dktko.kz)

**Abstract.** The article presents a study of tungsten skarn deposits based on a comprehensive analysis of geological and geochemical data. The research is based on information obtained from drilling and core analysis, photographs, and geochemical surveys. The results identified three main areas of the deposit – Eastern, Central, and Western – with differences in the distribution of ore bodies and mineralization. The main ore body extends over a significant area and contains a substantial proportion of tungsten resources. Mineralized deposits below the main ore body are characterized by varying rock compositions and contain a significant number of ore bodies, including large frameworks. The application of geochemical studies plays a crucial role in understanding geological structures and the formation of mineral deposits. Geochemical data provide information on the composition of rocks, the distribution of elements, and the nature of processes occurring in the Earth's crust. They help establish chemical relationships between different rocks and their minerals, as well as reveal connections with geological structures. The analysis of geochemical data identified correlations between the content of valuable elements and rock lithotypes, aiding in a better understanding of the geological structure of the deposit. Special attention was given to the relationship between zirconium and limestones, identified through geochemical data analysis. The proposed analysis method offers new perspectives for understanding the formation of skarn deposits and developing mining strategies. The study's results represent an important contribution to mining geology and can be used to optimize the exploitation of tungsten skarn deposits.

**Keywords:** skarn deposits, geological data, geochemical analysis, mineralization, data interpretation, rock-forming elements, correlation relationship.

### 1. Введение

Вольфрам классифицируется как один из стратегически критических элементов из-за его широкого использования во многих высокотехнологичных областях [1]. В то время как минерализация вольфрама пространственно ассоциируется с высокофракционированными фельситовыми гранитными интрузиями по всему миру и формирует многочисленные типы рудных месторождений [2,3,4,5], глобальное снабжение вольфрамом в основном добывается из рудных месторождений типа шеелит-скарн и кварцево-вольфрамовых жил [6,7,8,9]. Особенно следует отметить, что минерализация вольфрама, где шеелит и вольфрамит доминируют, иногда может встречаться в рамках одного месторождения, имея сходства по возрасту и геологической среде, но образуя отдельные рудные тела. Примерами могут служить месторождения Яоганксиан, Яолин и Куймейшан, где сочетаются рудные месторождения шеелит-скарн и кварцево-вольфрамовые жилы, а также месторождения Чуанкоу, где сочетаются кварцевые жилы с шеелитом и вольфрамитом на юге Китая [5,10,11].

Молибден-вольфрамовые месторождения Казахстана представляют собой объекты особого интереса для горнодобывающей промышленности, обеспечивая сырьевую базу для производства ценных металлов. Одним из таких значимых объектов является месторождение

Аксоран в Акмолинской области РК, контролируемое зоной Имантауских глубинных разломов северо-западного простирания. Расположенное в зоне сочленения с Карасу-Чаглинской зоной разломов северо-восточного простирания и с субмеридиональным Бастрымовским разломом, данное месторождение имеет сложную геологическую структуру.

На примере рудного района Таебэксан в северо-восточной части Южной Кореи, в котором находится множество металлических и неметаллических месторождений, которые имеют важное значение с точки зрения минеральных ресурсов, можно увидеть закономерность их расположения и генетической связи за счет процессов скарнирования и гидротермальных замещений (например, Sangdong W-Mo, Geodo Fe-Cu-Au, Yeonhwa Pb-Zn, Gagok Pb-Zn, Uljin Pb-Zn, Shinyemi Fe-Pb-Zn, Janggun Fe-Pb-Zn, Nakdong As-Bi, Dongnam Fe и Wondong W-Fe-Pb-Zn), [12,13,14,15,16,17] гидротермальных жильных золото-серебряных (например, Самджо, Дунджон и Донгвон), подобных месторождений Карлин (например, Баегчон), пегматитов, грейзенов (например, Wangpiri Sn, Keumsan W и Ogbang W) и месторождений высокого качества кальцита [18,19].

Участок, где расположено месторождение, сложен разнообразными породами раннепротерозойского и рифейского возрастов, представленными в различной степени метаморфизма. Среди этих пород можно выде-

лить гнейсы, кристаллические сланцы, мраморы, кальцифиры, скарноиды, порфиритоиды, амфиболиты, биотитовые и слюдяные сланцы. Большая часть месторождения сформирована породами куспекской и иманбурлукской свит, принадлежащими к зерендинской серии нижнего рифея [20].

Нижний-средний протерозой (зерендинская серия).

Северная часть месторождения сложена породами высокой степени метаморфизма. Здесь развиты амфиболовые и кристаллические сланцы, гнейсы, амфиболиты, мрамора, в том числе и силикатные (кальцифиры). Менее распространены гранито-гнейсы, гранат-пироксен-полевошпатовые гнейсы и скарноиды, породообразующими минералами которых являются кварц, эпидот, пироксен тремолит, цоизит, иногда карбонаты. Простираение пород меняется от северо-восточного до северо-западного, падение предположительно в северных румбах.

Отложения, относимые к рифейским, по составу расчленяются предположительно на три пачки: порфиroidную, порфиroidно-амфиболитовую и углистоглинисто-карбонатную сопоставимую, по нашему мнению, с образованиями куспекской, иманбурлукской свит нижнего рифея и шарыкской свиты среднего рифея [20].

Нижний рифей.

Куспекская свита сложена преимущественно зеленовато-серыми до темно-серых порфиroidами кварц-полевошпат-серицитового состава и кварц-серицитовыми сланцами, возникшими за счет кислых лав и туфов, реже амфиболовыми сланцами.

Породы свиты слагают центральную часть месторождения. Простираение пород меняется от северо-восточного до северо-западного с образованием субширотной складки. Мощность свиты 300-500м.

Иманбурлукская свита является рудовмещающей и представлена темно-зелеными и черными амфиболовыми и биотитовыми сланцами, амфиболитами с горизонтами порфиroidов, кварц-полевошпат-биотитовых гнейсов, скарноидов и дайко-штокообразными и близкослойными телами диоритовых порфиroidов. Простираение пород северо-восточное 40-60°. Мощность не менее 400-500м.

Детальное расчленение разреза свиты, проведенное в наиболее продуктивной её части, показало, что она сложена переслаивающимися темно-зелеными кварц-альбит-актинолитовыми сланцами, актинолитовыми амфиболитами и темно-серыми кварц-альбит-биотитовыми сланцами. Переходы между амфиболовыми и биотитовыми сланцами постепенные.

Актинолитовые амфиболиты и амфиболовые сланцы представляют собой массивные или рассланцованные породы. Основная масса сложена игольчатыми, таблитчатыми и ксеноморфными зернами актинолита и несдвойникованного альбита, а также кварца и редко, роговой обманки. Амфиболиты отличаются только более массивным сложением и большим количеством темно-цветных (до 80-90%). Биотитовые сланцы представляют собой тонкозернистые тонкорассланцованные темно-серые породы. Биотит обычно окрашен в шлифах в светло-зеленый или светло-коричневый цвет.

В отдельных случаях биотитовые и амфиболовые сланцы обогащены эпидотом и гранатом.

Породы зерендинской серии и нижнего рифея отделены от нижнепалеозойских и среднерифейских толщ мощной тектонической зоной, по которой северный блок, сложенный более древними породами, надвинут на среднерифейские и нижнепалеозойские породы.

Средний рифей (шарыкская свита).

Продуктивную толщу амфибол содержащих пород подстилают филлитовидные углеродосодержащие сланцы, отнесенные к шарыкской свите. Среди филлитовидных сланцев отмечаются линзы мраморизованных известняков и доломитов, амфиболовые, слюдяные, кремнистые сланцы и кварциты. Углеродосодержащие сланцы интенсивно пиритизированы и хорошо картируются в физических полях интенсивными аномалиями поляризуемости.

Объемные метасоматические изменения пород выражены магнезиальным и известковым скарнированием, биотитизацией, мусковитизацией, турмалинизацией, флюоритизацией, калишпатизацией и окварцеванием. Гидротермальные образования проявлены в виде порфиритов и жил кварц-полевошпатовой, кварц-полевошпат-молибденитовой, кварц-молибденит-хлоритовой и кварц-кальцит-флюоритовой ассоциаций. Имеющиеся к настоящему времени фактические геологические материалы позволили предшественникам предположить на площади месторождения запрокинутую антиклинальную складку субширотного простираения со срезанным северным крылом. К таким данным, по их мнению, относится обратная последовательность разреза рифейских отложений с расположением наиболее древних порфиритов куспекской свиты в верхней части разреза, а наиболее молодых отложений шарыкской свиты - в нижней, а также конфигурация блока порфиритов с их замыканием северо-восточнее профиля 30 [20]. По-нашему же мнению, в структурном плане месторождение представляет собой наклонное надвиговое сооружение, в котором более древние породы куспекской свиты оказались надвинутыми на более молодые образования. В пользу этого говорит интенсивная тектоническая проработка подошвы куспекской свиты, угловое несогласие, с которым они залегают на менее деформированных толщах иманбурлукской свиты.

В целом, размах оруденения на месторождении составляет более 2.5 км по простираению и до 300-500 м по падению. Снизу оруденение обрезается кровлей интрузивного массива гранит-порфиroidов. Несмотря на то, что оруденение является наложенным, то есть, более поздним, рудные тела упираются в кровлю массива и не имеют дальнейшего продолжения, поскольку изменяется характер и направление проницаемости пород. Между тем, наложенный характер минерализации, а также наличие рудных пересечений не исключают вероятности обнаружения в гранит-порфиroidах оруденения штокверкового типа. Наиболее значимые рудные пересечения («рудные столбы») вскрыты в непосредственной близости от кровли гранит-порфиroidов. Сочетание факторов близости гранитной интрузии, высокой известковистости пород и их структурной проницаемости является наиболее благоприятным для локализации вольфрамового оруденения. Преобладающий характер оруденения обычно связан с составом материнской интрузии [22].

В тоже время, какого-то богатого оруденения непосредственно на контакте гранит-порфиров с ороговикоманскими амфибол-биотит-плагноклазовыми сланцами не выявлено. Вероятно, это связано с тем, что роговики сами по себе малопроницаемы для рудонесущих растворов.

Геологами в керне скважин отмечались обширные зоны, практически нацело сложенные кварцем, которые сменялись породами порфирирового облика. Помимо кварца в них также присутствуют участки, обогащенные биотитом и калиевым полевым шпатом. В них широко развито тонкое кварцевое прожилкование – кварцевый штокверк, в котором заключено прожилково-вкрапленное молибденитовое оруденение. В некоторых случаях прожилки сплошного молибденита достигают мощности 5 см. На наш взгляд, такие зоны представляют собой не что иное, как вторичные кварциты – результат воздействия процессов кислотного выщелачивания, сопровождаемого выносом оснований. В документации эти зоны регистрируются как зоны скарноидов, однако эта интерпретация определенно не верна. Подобные зоны весьма характерны для порфирировых систем, где они являются составной частью закономерной метасоматической зональности и сопровождаются оруденением – молибденовым и медно-молибденовым – на месторождениях соответствующего типа. Проведенные петрографические исследования показали, что породы порфирирового облика представляют собой в различной степени милонитизированные гранит-порфиры.

Для более глубокого понимания геологической структуры и распределения ресурсов месторождения была создана база данных, включающая все регистрируемые геологические данные. Основная БД сформирована в Access, а необходимые таблицы для моделирования были импортированы в Micromine. В базе данных содержатся информация о трех периодах буровых работ (1987 год, 2016 и 2018 годы), включая данные по привязке и траектории скважин, опробованию и литологии. Настоящая база данных проверена на наличие ошибок и признана пригодной для использования в моделировании и оценке минеральных ресурсов и рудных запасов.

Одним из ключевых аспектов применения геохимических исследований является их способность обнаруживать индикаторы минерализации. Поиск аномальных концентраций определенных элементов может указывать на наличие рудных зон и месторождений. Такие данные могут использоваться для более точного прогнозирования месторождений и планирования геологоразведочных работ.

Кроме того, геохимические исследования позволяют оценить процессы метаморфизма и метасоматоза, которые влияют на изменение состава и структуры пород. Это помогает понять динамику развития геологических структур и причины формирования месторождений.

Этот анализ геологической структуры и базы данных играет важную роль в понимании и оптимизации разработки месторождения, что является ключевым аспектом его экономической эффективности и устойчивости [23]. В настоящей статье мы рассмотрим увязку рудных тел данного молибден-вольфрамового месторождения с использованием распределения породообразующих элементов и микроэлементов на основе представленных данных.

## 2. Материалы и методы

Для детального исследования месторождения использовался комплекс методов, начиная от полевых работ и заканчивая химическими и геохимическими анализами.

В начале работы было проведено геологическое обследование месторождения с целью сбора первичных геологических данных. Полевые работы включали в себя детальное описание структуры месторождения на основе наблюдений и анализа образцов, взятых с поверхности.

Далее, были выполнены работы по бурению скважин. Результаты бурения предоставили дополнительные данные о геологическом строении месторождения, а также позволили собрать образцы пород для дальнейшего анализа.

После этого были построены каркасные модели месторождения на основе полученных данных. В результате моделирования были выделены главные рудные тела и минерализованные зоны, а также определена их геометрия и распределение на участках месторождения.

Для уточнения интерпретации геологических структур были использованы данные геохимического анализа. Собранные образцы пород были подвергнуты химическому анализу, что позволило получить информацию о содержании различных элементов. Данные геохимического анализа использовались для подтверждения результатов моделирования и интерпретации месторождения.

Согласно, полученным в результате бурения, геологическим данным месторождение делится на три основных участка, смещенных друг относительно друга разрывной тектоникой – Восточный, Центральный и Западный (рисунок 1). В свою очередь в пределах Восточного участка выделяется два домена – это Главное рудное тело (RT\_01), сложенное преимущественно гнейсовидными и метабазитовыми сланцами; и минерализованные линзоподобные залежи смешанного состава с преобладанием скарноидов, залегающие ниже RT\_01.

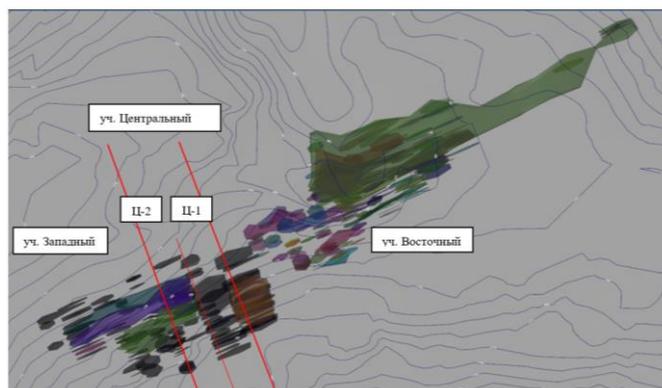


Рисунок 1. Проекция рудных тел на горизонтальную плоскость

Главное рудное тело (RT\_01) уверенно прослеживается по простиранию на северо-восток (АЗ ПР 60°) в 12 профилях на 1000-1100 м, и до 650 м по падению на северо-запад под углом ~50°. На долю этого тела приходится 25% ресурсов триоксида вольфрама (рисунок 2).

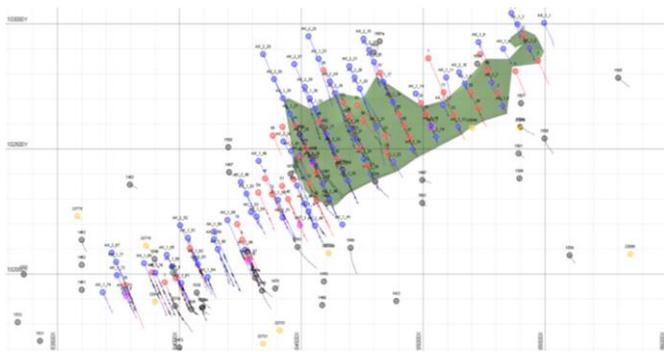


Рисунок 2. Главное рудное тело №01

Минерализованные залежи, расположенные ниже RT\_01, представлены зоной разлинзованных пород (скарнов, сланцев, амфиболитов) падающей на северо-запад под углами 48-60 град., в среднем – 54 град (рисунок 3). В пределах этой зоны каркасами околонуено 156 минерализованных тел, подавляющая часть которых представляет собой мелкие линзы с одним скважинным пересечением; внутри шести крупных каркасов были выделены зоны «богатой» минерализации типа ЗН. Основные ресурсы здесь сосредоточены в телах: 02, 05, 06, 07, 09, 10, 11, 16, ЗН1, ЗН2, которые составляют примерно половину от общего объема ресурсов месторождения.

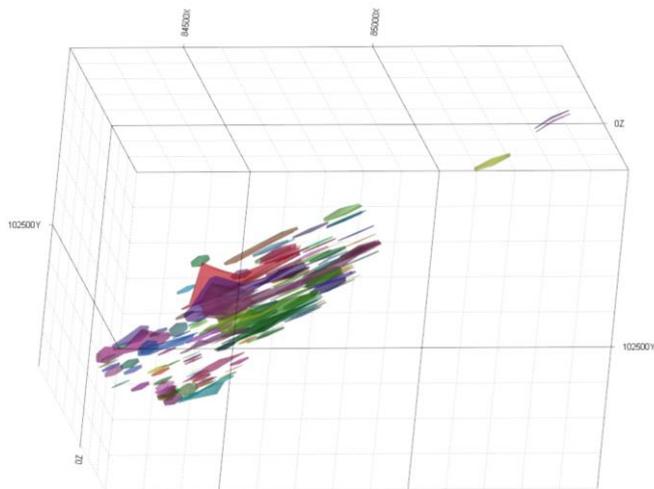


Рисунок 3. Разлинзованные рудные тела

Центральный участок разделяется на два блока (с северо-востока на северо-запад) – Центральный-1 и Центральный-2. Разрывная тектоника отделяет блоки Центрального участка, как друг от друга, так и от соседних Восточного и Западного участков. Каждый из доменов Центрального участка основывается на одном профиле.

Западный участок представляет собой вольфраммолибденовый штокверк, в пределах были выделены отдельные зоны. Все участки имеют генеральное простирание на северо-восток под  $\sim 60^\circ$  и общее падение на северо-запад под  $50-55^\circ$ . Всего геологами было построено и передано для оценки 253 каркаса.

Увязка пересечений минерализованных зон в каркасы основывалась на соотношении литологического состава, углов контактов и микроструктур. Авторы статьи следили за увязкой минерализованных зон и настояли на привлечении к интерпретации таких первичных данных, как фотографии и описание керна, данные геохимического

опробования. Привлечение последних оказалось весьма полезным – визуализированные и сопоставленные данные по Mn, Ca, Zr, Fe, Ti, Rb, Sr и Ba помогли достичь обоснованной уверенности при интерпретации.

В качестве альтернативного варианта интерпретации предлагаем рассмотреть следующий подход. Для понимания структуры месторождения и конфигурации и ориентировки рудных тел мы попытались привлечь данные о распределении породообразующих элементов и микроэлементов. Для этого необходимо было понять, есть ли какие-то корреляции полезных компонентов с другими элементами (которые могут иметь более равномерное распределение).

Были построены корреляционные матрицы по всем породам, которые показали, что ни вольфрам, ни молибден не имеют значимых корреляционных связей ни с одним из элементов, ни между собой, за исключением слабой отрицательной корреляции между вольфрамом и калием (что, однако же, тоже можно попытаться использовать для сопоставления разрезов). Тогда были построены корреляционные матрицы отдельно по литотипам. В скарноидах наблюдается слабая корреляция между молибденом и вольфрамом. У вольфрама корреляционные связи наблюдаются: отрицательные – с алюминием, калием, никелем, барием, титаном; положительные – с серебром, висмутом, селеном.

Имея представление об особенностях химического состава рудовмещающих пород, можно более объективно, чем позволяет это геологическая документация, вынести их на разрезы. Для общего понимания структуры месторождения можно выбрать какой-либо маркирующий горизонт, который будет контрастно выделяться как по химическому составу, так и в геологической документации. Как известно, маркирующий горизонт – геологическое образование, которое выделяется на фоне окружающих пород своими характеристиками или свойствами. Он может быть отличительным по своему минеральному составу, текстуре, цвету или другим физическим характеристикам. Маркирующие горизонты часто используются для установления временных или пространственных корреляций между различными участками земной коры. Эти горизонты могут быть использованы для определения возраста пород, рассматривания истории их формирования, а также для локализации рудных залежей или других геологических объектов. В качестве такого маркирующего горизонта можно использовать мраморизованные известняки (таблица 1).

Из таблицы хорошо видно, например, что известняки отличаются от других пород резко повышенными содержаниями кальция и магния (поэтому их правильнее называть доломитизированными известняками). Доломитизация, как известно, проявляется в процессе химического осаждения магния и кальция из морской или пресной воды. Поэтому доломитизированные известняки более богаты магнием по сравнению с обычными известняками. Это отличие может проявляться и в их физических свойствах. Например, доломитизированные известняки могут иметь более высокую твердость и плотность, чем обычные известняки. Также доломитизированные известняки часто обладают характерными текстурными особенностями, такими как доломитовые ореолы вокруг кристаллов доломита или доломитовые включения в структуре породы.

Таблица 1. Горные породы по порообразующим элементам

Наименования пород	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	FeO	K <sub>2</sub> O	MgO	MnO	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Сумма
Скарны, скарноиды	9.82	11.87	5.45	2.09	4.58	0.20	56.73	0.56	91.3
Пироксениты	9.37	7.93	8.76	4.06	7.64	0.17	53.27	0.56	91.8
Глина	14.08	1.18	5.77	2.37	2.25	0.09	64.44	0.65	90.8
Кварциты, слюдистые кварциты	9.91	3.05	3.39	2.87	1.74	0.08	72.63	0.54	94.2
Амфиболиты	13.16	4.27	6.09	4.51	2.70	0.10	59.27	0.64	90.7
Порфиритоид	12.46	3.61	5.03	4.44	2.10	0.10	61.44	0.58	89.7
Порфириод	12.53	3.65	5.11	4.40	3.32	0.10	60.59	0.58	90.3
Диорит	12.16	6.43	6.83	2.79	5.68	0.13	56.18	0.83	91.0
Изв мраморизованные	3.75	28.19	2.71	1.43	16.45	0.18	22.60	0.21	75.5
Андезит	12.23	5.50	6.63	3.09	4.23	0.12	57.46	0.87	90.1
Сланцы гнейсовидные	10.57	9.81	6.34	2.50	7.99	0.13	48.93	0.75	87.0
Сланцы метабазитовые	12.62	4.68	6.07	4.47	2.97	0.11	59.24	0.63	90.8
Метапилитовые сланцы	12.88	3.79	5.55	4.24	2.65	0.09	61.53	0.64	91.4
Кварцевая жила	8.29	2.78	3.73	2.41	1.52	0.07	72.72	0.38	91.9
Гранит-порфир	12.09	1.50	2.00	4.38	0.83	0.06	72.72	0.22	93.8

Как известно, скарн, как метасоматическая порода, является результатом гидротермального изменения кальциевых и магниевых карбонатных пород. Её формирование связано с концентрациями металлических отложений. Преобладающий металл определяет тип месторождения, что также зависит от источника гидротермальной жидкости, тектонической среды помещения, структур пород-протолитов и состава пород-протолитов

### 3. Результаты и обсуждение

В процессе исследования месторождения было проведено детальное изучение химического состава пород, что позволило выявить характерные особенности известняков. Для того, чтобы усилить контрастность различий между известняками и другими породами, был применен мультипликатор Ca\*Mg. Этот подход позволил более четко выделить горизонт известняков на фоне других горных пород, что существенно облегчило дальнейшую интерпретацию данных и структуры месторождения.

Одной из ключевых особенностей известняков, которая помогла их выделить, является резкое пониженное содержание циркония (рисунок 4).

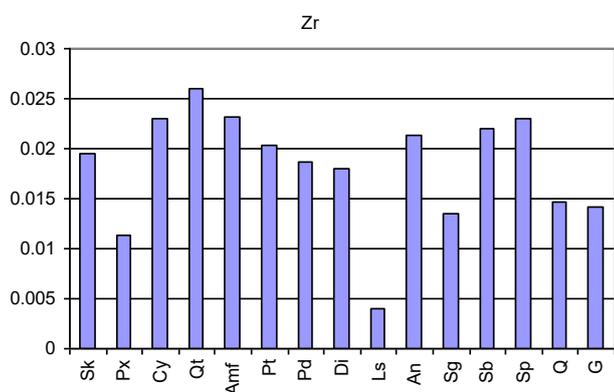


Рисунок 4. Содержание циркония в литотипах

Например, исследование, проведенное авторами W.D. Smith и др., подчеркивает широкое распространение циркония в магматических и осадочных породах, где он часто присутствует в минерале цирконе, но практически отсутствует в известняках [24]. Это связано с

устойчивостью минерала циркония, который не подвержен влиянию процессов метасоматоза, отличающихся от тех, что характерны для формирования известняков. Таким образом, низкое содержание циркония стало еще одним характерным признаком известняков, помогающим их выделить среди других пород.

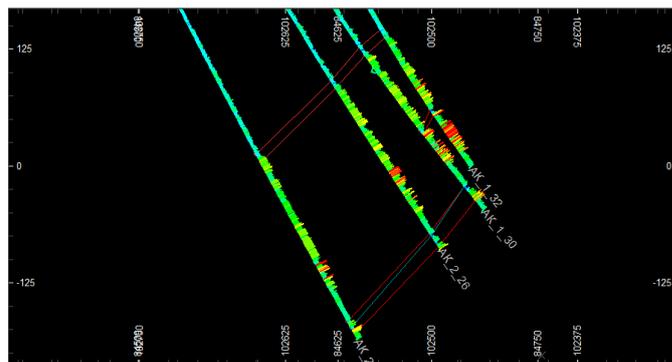


Рисунок 5. Пример увязки рудных тел. На гистограммах – содержание циркония. Голубая линия – положение кровли известняков. PP34

Анализ химического состава пород и применение мультипликатора Ca\*Mg, а также выявление особенностей содержания циркония позволили объективно выделить горизонт известняков и понять директивность структур ниже верхнего рудного тела (рисунок 5). Это имеет важное значение для планирования дальнейших геологических исследований и оптимизации процессов разработки месторождения, так как позволяет более точно определить распределение полезных ископаемых и ресурсов на различных глубинах.

### 4. Выводы

В нашей работе мы представили результаты детального анализа скарнового месторождения, основанного на использовании современных методов геологических и геохимических исследований. Полученные данные позволили нам лучше понять процессы формирования рудных залежей и определить факторы, влияющие на их геологическую структуру.

Согласно современным представлениям об образовании скарновых месторождений, рудоотложение происходит в отрыве во времени от скарнообразования. Скар-

ны при этом выступают как геохимический барьер, просачиваясь через которые рудонесущие растворы нейтрализуются и отлагают рудное вещество.

С использованием материалов базы данных и геологической документации выяснено, что в наибольшей степени скарнирование развивается по метапелитовым сланцам, амфиболитам. Возможное объяснение этому – это повышенная проницаемость этих пород. Характерно, что порфиновые породы практически не подвергаются скарнированию, при том, что по составу они практически не отличаются от амфиболитов. На разрезах также видно, что скарнированию подвержены подошва слоя известняков

Нет сомнения в том, что по крайней мере часть оруденения, в особенности молибденового, приурочено к кварцевым жилам. Гидротермальные растворы, богатые растворенными минералами, вступали в химические реакции с вмещающими породами, что приводило к образованию молибденита. Этот процесс обычно происходит в условиях повышенного давления и температуры, а также в присутствии сероводородных соединений, которые способствуют образованию сульфидов металлов. Основная доля молибденита сосредоточена в юго-западной части месторождения, хотя пересечения с относительно высокими содержаниями молибдена известны по всему полю месторождения. Наиболее высокие значения молибдена связаны с телом диоритовых порфиритов и его экзоконтактовой части. По мере приближения к диоритам во вмещающих сланцах увеличивается количество кварц-молибденитовых прожилков. В самих диоритовых порфиритах отмечаются многочисленные кварц-молибденитовые и мономинеральные молибденитовые жилы и прожилки вплоть до образования на отдельных участках микробрекчий. Приуроченность значительной массы молибденита к этому участку месторождения связана с максимальным развитием здесь меридиональных разноориентированных кварцевых прожилков, несущих основную часть молибденита.

Кроме того, сами скарны зачастую имеют вид жил, прожилков, что связано с проникновением растворов по ослабленным зонам и трещинам, т. е. скарнирование имеет не только объемный характер, но и линейный. Таким образом, оруденение имеет литологический и структурный контроль. С одной стороны, литологический контроль выражается в том, что скарнированию подвержены только амфиболиты, сланцы и известняки (в последних скарнирование приурочено к подошве слоя, что заметно при сопоставлении разрезов). В порфировых разностях, согласно документации, скарны практически отсутствуют.

Однако в пределах этих литологических доменов на первое место выходит уже фактор структурного контроля. И здесь положение рудных зон может иметь крутопадающее или субвертикальное направление, образовывать системы ветвящихся жил и прожилков, превращаясь, таким образом, в штокверк.

Крупные рудные тела прослеживаются от скважины к скважине, однако имеют изменчивость в углах падения. Это может быть связано как с локальной складчатостью, так и с разрывной тектоникой. Наиболее значимые и богатые рудные тела сохраняют свою конформность

генерализованной структуре месторождения и имеют согласное залегание. Мелкие же тела, представленные жильными образованиями, могут иметь форму штокверка или линейно-направленный характер.

Предложенный в нашей работе подход к использованию геохимических данных для увязки геологической структуры и рудных тел открывает новые перспективы для дальнейших исследований в этой области. На основе наших результатов можно предположить, что продолжение исследований в этом направлении позволит более полно понять механизмы формирования скарновых месторождений и разработать эффективные стратегии их разведки и разработки.

## References / Литература

- [1] Hayes S.M. & McCullough, E.A. (2018) Critical minerals: A review of elemental trends in comprehensive criticality studies. *Resources Policy*, (59), 192-199. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.06.015>
- [2] Hulsbosch N., Boiron, M.C., Dewaele, S. & Muchez, P. (2016). Fluid fractionation of tungsten during granite–pegmatite differentiation and the metal source of peribatholithic W quartz veins: evidence from the Karagwe–Ankole Belt (Rwanda). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, (175), 299-318. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.11.020>
- [3] Zhao, W.W., Zhou, M.F., Martin Li, Y.H., Zhao, Z. & Gao, J.F. (2017). Genetic types, mineralization styles, and geodynamic settings of Mesozoic tungsten deposits in South China. *Journal of Asian Earth Sciences*, (137), 109-140. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2016.12.047>
- [4] Launay, G., Sizaret, S., Lach, P., Melleton, J., Gloaguen, E & Poujol, M. (2021). Genetic relationship between greisenization and Sn-W mineralizations in vein and greisen deposits: Insights from the Panasqueira deposit (Portugal). *Bulletin de la Société Géologique de France*, 192(1). <https://doi.org/10.1051/bsgf/2020046>
- [5] Ni, P., Pan, J.-Y., Han, L., Cui, J.-M., Gao, Y., Fan, M.-S., Li, W.-S., Chi, Z., Zhang, K.-H., Cheng, Z.-L. & Liu, Y.-P. (2023). Tungsten and tin deposits in South China: temporal and spatial distribution, metallogenic models and prospecting directions. *Ore Geology Reviews*, (157), 105453. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105453>
- [6] Fontelles, M., Soler, P., Demange, M., Derre, C., Krier-Schellen, A.D., Verkaeren, J., Guy, B. & Zahm, A. (1989). The scheelite skarn deposit of Salau (Ariege, French Pyrenees). *Economic Geology*, 84(5), 1172–1209. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.84.5.1172>
- [7] Meinert, L.D., Dipple, G.M. & Nicolescu, S. (2005). World Skarn Deposits, One Hundredth Anniversary Volume, Jeffrey W. Hedenquist, John F. H. Thompson, Richard J. Goldfarb, Jeremy P. Richards. <https://doi.org/10.5382/AV100.11>
- [8] Mao, J., Ouyang, H., Song, S., Santosh, M., Yuan, S., Zhou, Z., Zheng, W., Liu, H., Liu, P., Cheng, Y. & Chen, M. (2019). Geology and Metallogeny of Tungsten and Tin Deposits in China. *SEG Special Publications*, 22, 411–482. <https://doi.org/10.5382/SP.22.10>
- [9] Chang, Z., Shu, Q., Meinert, L.D. (2019). Skarn deposits of China. *Mineral Deposits of China*, (22), 189-234. <https://doi.org/10.5382/SP.22.06>
- [10] Li, W.S., Ni, P., Wang, G.G., Yang, Y.L., Pan, J.Y., Wang, X.L., Chen, L.L. & Fan, M.S. (2020). A possible linkage between highly fractionated granitoids and associated W-mineralization in the Mesozoic Yaogangxian granitic intrusion, Nanling region, South China. *Journal of Asian Earth Sciences*, (193), 104314. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2020.104314>

- [11] Li, W.S., Ni, P., Pan, J.Y., Fan, M.S., Chen, L.L., Zhang, D., Wu, X.W. & Gao, Y. (2021). Constraints on the timing and genetic link of scheelite- and wolframite-bearing quartz veins in the Chuankou W ore field, South China. *Ore Geology Reviews*, (133), 104122. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104122>
- [12] Lee, C.H., Lee, H.K. & Kim, S.J. (1998). Geochemistry and mineralization age of magnesian skarn-type iron deposits of the Janggum mine, Republic of Korea. *Mineral. Deposita*, (33), 379–390. <https://doi.org/10.1007/s001260050156>
- [13] Shin, D.B., Park, H.I., Lee, I.S., Lee, K.S. & Hwang, J. (2004). Hydrothermal As-Bi mineralization in the Nakdong deposits, South Korea: insight from fluid inclusions and stable isotopes. *The Canadian Mineralogist*, 42(5), 1465–1481. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.42.5.1465>
- [14] Kim, E.-J., Park, M.-E., & White, N. (2012). Skarn gold mineralization at the Geodo Mine, South Korea (Version 1). *University of Tasmania*. <https://hdl.handle.net/102.100.100/579325>
- [15] Seo, J.H., Yoo, B.C., Villa, I.M., Lee, J.H., Lee, T., Kim, C. & Moon, K.J. (2017). Magmatic-hydrothermal processes in Sangdong W-Mo deposit, Korea: study of fluid inclusions and <sup>39</sup>Ar-<sup>40</sup>Ar geochronology. *Ore Geology Reviews*, (91), 316–334. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.09.019>
- [16] Choi, J., Shin, D. & Im, H. (2018). Regional variations of sulfur isotope compositions for metallic deposits in the Taebaeksan Mineralized District, South Korea. *Geosciences Journal*, 22, 79–89. <https://doi.org/10.1007/s12303-017-0057-x>
- [17] Lee, C.H. & Park, H.I. (1994). Gold mineralization and depositional environment of the Samjo deposits, Korea. *Journal of Geology*, 30(4), 395–409
- [18] Park, H.I. & Park, Y.R. (1990). Gold and silver mineralization in the Dongweon mine. *Journal of Korean Inst. Mining Geol.*, (23), 183–199
- [19] Lee, C.H. & Park, H.I. (1996). Epithermal gold-silver mineralization and depositional environment carbonate-hosted replacement type Baegjeon deposits, Korea. *Economic and Environmental Geology*, 29(2), 105–117
- [20] Gubajdullin, Sh.A. & Sharanov, A.F. (1992). Otchet o rezultatah poiskovo-ocenochnyh rabot na mestorozhdenii molibdenov'framovyh rud Aksoran. *Shantobe*
- [21] Vinkler, G. (1979). Genezis metamorficheskikh porod. *Moskva, Nedra*
- [22] Meinert, L.D. (1992). Skarns and skarn deposits. *Geoscience Canada*, 19(4), 145–162
- [23] Denisenko, V.K. (1978). Mestorozhdeniya vol'frama. *Moskva, Nedra*
- [24] Smith, W.D., Darling, J.R., Bullen, D.S., Lasalle, S., Pereira, I., Moreira, H., Allen, C.J., & Tapster, S. (2019). Zircon perspectives on the age and origin of evolved S-type granites from the Cornubian Batholith, Southwest England. *Lithos*, (336–337), 14–26. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.03.025>

## Молибден-вольфрам кен орнының кенді денелерін жыныс түзуші элементтер мен микроэлементтердің таралуын пайдалана отырып байланыстыру

Д.Шихов\*, А.Бекботаева

Satbayev University, Алматы, Қазақстан

\*Корреспонденция үшін автор: [d.shihov@dktko.kz](mailto:d.shihov@dktko.kz)

**Аңдатпа.** Мақала геологиялық және геохимиялық деректерді кешенді талдауға негізделген вольфрамның скарн кен орындарын зерттеу болып табылады. Зерттеу бұрғылау және негізгі талдау, фотосуреттер және геохимиялық зерттеу нәтижесінде алынған ақпаратқа негізделген. Нәтижелер кен орнының үш негізгі учаскесін бөлуге мүмкіндік берді – Шығыс, Орталық және Батыс, кен денелерінің таралуы мен минералдануында айырмашылықтар бар. Негізгі кен денесі айтарлықтай кеңістікте байқалады және вольфрам ресурстарының едәуір бөлігін қамтиды. Негізгі кен денесінен төмен минералданған кен орындары тау жыныстарының әр түрлі құрамымен сипатталады және құрамында кен денелерінің едәуір мөлшері, соның ішінде ірі тіректер бар. Геохимиялық зерттеулерді қолдану геологиялық құрылымдарды түсінуде және пайдалы қазбалар кен орындарының қалыптасуында маңызды рөл атқарады. Геохимиялық мәліметтер тау жыныстарының құрамы, элементтердің таралуы және жер қыртысында болатын процестердің сипаты туралы ақпарат алуға мүмкіндік береді. Олар әртүрлі тау жыныстары мен олардың минералдары арасында химиялық байланыстар орнатуға, сондай-ақ геологиялық құрылымдармен байланыстарды ашуға көмектеседі. Геохимиялық деректерді талдау пайдалы элементтердің құрамы мен тау жыныстарының литотиптері арасындағы корреляцияны анықтады, бұл кен орнының геологиялық құрылымын жақсы түсінуге көмектесті. Геохимиялық деректерді талдау нәтижесінде анықталған цирконий мен әктастардың өзара байланысына ерекше назар аударылады. Ұсынылған талдау әдісі скарн кен орындарының қалыптасуын түсінуге және тау-кен Стратегияларын жасауға жаңа перспективалар берді. Зерттеу нәтижелері тау геологиясына маңызды үлес болып табылады және вольфрамның скарн кен орындарын пайдалануды оңтайландыру үшін пайдаланылуы мүмкін.

**Негізгі сөздер:** скарн кен орындары, геологиялық деректер, геохимиялық талдау, минералдану, деректерді түсіндіру, тау жыныстарын құрайтын элементтер, корреляциялық тәуелділік.

## Увязка рудных тел молибден-вольфрамового месторождения с использованием распределения порообразующих элементов и микроэлементов

Д.Шихов\*, А.Бекботаева

Satbayev University, Алматы, Казахстан

\*Автор для корреспонденции: [d.shihov@dktko.kz](mailto:d.shihov@dktko.kz)

**Аннотация.** Статья представляет собой исследование скарновых месторождений вольфрама, основанное на комплексном анализе геологических и геохимических данных. Исследование базируется на информации, полученной в результате бурения и анализа керна, фотографий, а также геохимического обследования. Результаты позволили выделить три основных участка месторождения – Восточный, Центральный и Западный, с различиями в распределении рудных тел и минерализации. Главное рудное тело прослеживается на значительном пространстве и содержит значительную долю ресурсов вольфрама. Минерализованные залежи ниже главного рудного тела характеризуются различным составом пород и содержат значительное количество рудных тел, в том числе крупных каркасов. Применение геохимических исследований играет важную роль в понимании геологических структур и формирования месторождений полезных ископаемых. Геохимические данные позволяют получить информацию о составе горных пород, распределении элементов и характере процессов, происходящих в земной коре. Они помогают установить химические связи между различными породами и их минералами, а также выявить взаимосвязи с геологическими структурами. Анализ геохимических данных позволил выявить корреляции между содержанием полезных элементов и литотипами пород, что помогло лучше понять геологическую структуру месторождения. Особое внимание уделено взаимосвязи циркония и известняков, выявленной в результате анализа геохимических данных. Предложенный метод анализа дал новые перспективы для понимания формирования скарновых месторождений и разработки стратегий добычи полезных ископаемых. Результаты исследования представляют собой важный вклад в горную геологию и могут быть использованы для оптимизации эксплуатации скарновых месторождений вольфрама.

**Ключевые слова:** *скарновые месторождения, геологические данные, геохимический анализ, минерализация, интерпретация данных, порообразующие элементы, корреляционная зависимость.*

Received: 29 January 2024

Accepted: 15 April 2024

Available online: 30 April 2024