

УДК 548.4:553.2:553.46(574)

ТЕРМОБАРОГЕОХІМІЯ ПРОЦЕСІВ РУДОГЕНЕЗУ НА РОДОВИЩАХ МОЛІБДЕН-ВОЛЬФРАМОВИХ ФОРМАЦІЙ ГРЕЙЗЕНОВОЇ ГРУПИ ЦЕНТРАЛЬНОГО КАЗАХСТАНУ

Микола Павлунь, д-р геол. наук,
професор кафедри геології корисних копалин і геофізики
mykola.pavlun@lnu.edu.ua
<https://orcid.org/0000-0002-8634-6576>

Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. М. Грушевського, 4, Львів, Україна, 79005

У Центральному Казахстані молібден-вольфрамове зруденіння грейзенової групи сформувалося під час орогенезу й етапів тектоно-магматичної активізації. Особливе геологічне та металогенічне місце в Центрально-Казахстанській рудній провінції посідає Джунгаро-Балхаська геосинклінальна область. Тут під час пізньогерцинського орогенезу формувалися кислі інтрузії, з якими просторово, структурно і за часом утворення пов'язані всі родовища молібдену й вольфраму. Виділено 18 рудних районів, понад половина яких розташована в Успенській зоні зминання і які пов'язані з грейзенами різних фацій. Розрізняють два морфотипи родовищ – ендоконтакткові жильні та надінтрузивні штокверки.

Грейзени формувалися у фронтальній зоні колони автометасоматитів за участі високотемпературних суттєво газових кислотних розчинів, які зі зниженням температури (>470–300 °С) зазнавали ущільнення й конденсувалися у вигляді післямагматичних дистилатів на глибині від 5–4 до 2,5–1,5 км. Дистилати були збагачені галоїдами, CO₂, H₂O та іншими леткими сполуками.

Відокремлення розплавів-флюїдів від магматичних камер та їх еволюція відбувались або за умови ретроградного закипання магми, або внаслідок поступового відділення розплавів-розчинів – з утворенням розплавів-розчинів з CO₂ і залишкового розплаву-розчину з високощільними галогенними рудоутворювальними флюїдами. Відокремлення від магмо-рудогенерувальної камери відбувалося по-різному. З розвитком контракційної тріщинуватості в надінтрузивних вмісних породах формувався арочний ефект і відбувалось помітне зниження тиску, що сприяло «відсмоктуванню» флюїду з магмо-рудогенерувального джерела з наступною екстракцією рідкісних металів.

Молібден-вольфрамові родовища регіону формувались за пневматолітово-гідротермальних умов протягом п'яти стадій мінералізації з розчинів високої сольової концентрації (>65–27 мас. % NaCl) та високого тиску і значних його флуктуацій (від 165 до 25 МПа).

Ключові слова: вольфрам, молібден, родовище, рудогенез, грейзени, термобарогеохімія, пневматолітово-гідротермальні процеси, пізньогерцинський орогенез, Центральний Казахстан.

DOI <https://doi.org/10.30970/min.76.04>

Постановка проблеми. Центральний Казахстан – типова молібден-вольфрамова рудна провінція, родовища якої належать до грейзенової групи. В Україні поки нема родовищ цієї формації, однак виявлено рудопрояви W і Mo на Українському щиті. Щодо вольфраму, то це Пержанське рудне поле, Кочерівська група рудопроїв, Селищенський, Клинівський, Майський рудопрояви та ін. Також на щиті відомо близько 100 проїв молібдену,

серед яких Вирівський молібденітовий рудопрояр, Вербинське флюорит-молібденове родовище, Глушківський молібденіт-шеєлітовий рудопрояр, молібден-поліметалеве зруденіння в пержанських метасоматитах та ін.

Через ці обставини детальні дослідження термобарогеохімії процесів рудогенезу на молібден-вольфрамових об'єктах грейзенової групи в Джунгаро-Балхашші можуть стати в нагоді під час розв'язання проблеми переведення аналогічних рудопроярів України в розряд родовищ.

Аналіз досліджень. Молібден-вольфрамове зруденіння, як довів М. Повилайтіс (1970, 1975, 1976), формується під час орогенезу і етапів тектоно-магматичної активізації (ТМА) земної кори. За характером розвитку геологічних формацій орогенного ряду та їхніми співвідношеннями з тими чи іншими наборами геосинклінальних формацій вирізняють типи металогенічних провінцій, специфіку яких відображає тип ендегенної мінералізації. У геологічній будові досліджуваного регіону суттєву роль відіграють субсеквентні кислі ефузивні порфірової формації й комагматичні інтрузивні утворення гранітоїдного ряду (головні формації орогенного структурного поверху). На підставі зазначеного М. Повилайтіс (1976) та Д. Рундквіст (1977) виділили молібден-вольфрамоворудну провінцію регіону як самостійний центрально-казахстанський металогенічний тип.

У Центрально-Казахстанській мозаїчно-брилової складчастій системі особливе геологічне й металогенічне місце посідає Джунгаро-Балхаська геосинклінально-складчаста область. Примітними її особливостями, як зазначила Н. Маркова (1969), є вкрай обмежений прояв ранньої стадії розвитку герцинід, закладання герцинських складчасто-блокових структур, розділених і ускладнених глибинними розломами, на потужній корі сіалічного типу, розвиток процесів ТМА. З цими процесами пов'язано формування великих покривних полів ефузивних порід різноманітного складу і становлення комагматичних ранньо-, середньо- і пізньогерцинських сіалічних гранітоїдів. Головне металогенічне значення мають інтрузиви пізньогерцинського часу, сформовані в післяорогенну стадію під час інверсії тектонічного режиму за стійких вертикальних брилових рухів земної кори та відшаровування між фундаментом і герцинським структурним поверхом.

Саме з цими інтрузіями складчастого комплексу просторово, структурно і за часом утворення асоціює молібден-вольфрамове зруденіння, як свого часу в працях 1965–1968 рр. переконливо довів Г. Щерба. Цей дослідник виділив у регіоні два типи відповідних родовищ: 1) ендоконтактові зі слабким розвитком площинного лужного метасоматозу і практичною відсутністю дайок (Акчатау, Східний і Північний Коунрад); 2) екзоконтактові з незначним проникненням у граніти, де руди часто асоціюють з дайками кислого складу, частина з яких внутрішньорудні (Коктенколь, Джанет, Нура-Талди, Верхне Кайракти). Родовища, поширені в зонах ендоконтакту гранітних масивів, представлені крутоспадними грейзеновими тілами з кварцовими й іншими жилами виповнення. У зону екзоконтакту грейзени переходять серією зближених жил з біляжилним грейзеновим облямуванням. Потужність таких жил невелика, хоча загальні масштаби штокверків набагато більші, порівняно з власне кварцовожильними. У рудах, окрім кварцу, мінералів Мо, W і Ве, поширені пірит, бісмутин, бісмут, сфалерит, халькопірит, галеніт, з нерудних мінералів – різноманітні слюди (серицит, мусковіт, лепідоліт, цинвальдит), польові шпати, топаз, флюорит, карбонати, сульфати і цеоліти. Поширені різноманітні процеси заміщення різної інтенсивності: вольфрамиту шеєлітом, мікрокліну альбітом та ін.

Мета наукової публікації – розкрити фізико-хімічні умови й динаміку еволюції рудоутворювальних процесів на родовищах провінції, з'ясувати механізми міграції й екстрагування металоносних флюїдів у рудоконтролювальні структури, схарактеризувати агрегатний стан і склад флюїдів, їхню сольову концентрацію, у тім числі на продуктивних

стадіях рудоутворення, розробити схеми стадійності і термобарогеохімічного режиму формування родовищ.

Виклад основного матеріалу. Найбільшою рудоконтрольовальною структурою досліджуваного регіону є Успенська зона зминання, у якій виявлено понад 50 % усіх молібден-вольфрамових родовищ і рудопроявів. Головні родовища провінції згруповано у 18 рудних районів, які пов'язані з грейзенами різних фацій.

Еталонним прикладом пізньогерцинського рудоспряженого акчатауського комплексу і родовища є Акчатауський масив лейкократових гранітів і просторово, структурно і генетично пов'язане з ним однойменне родовище (рис. 1).

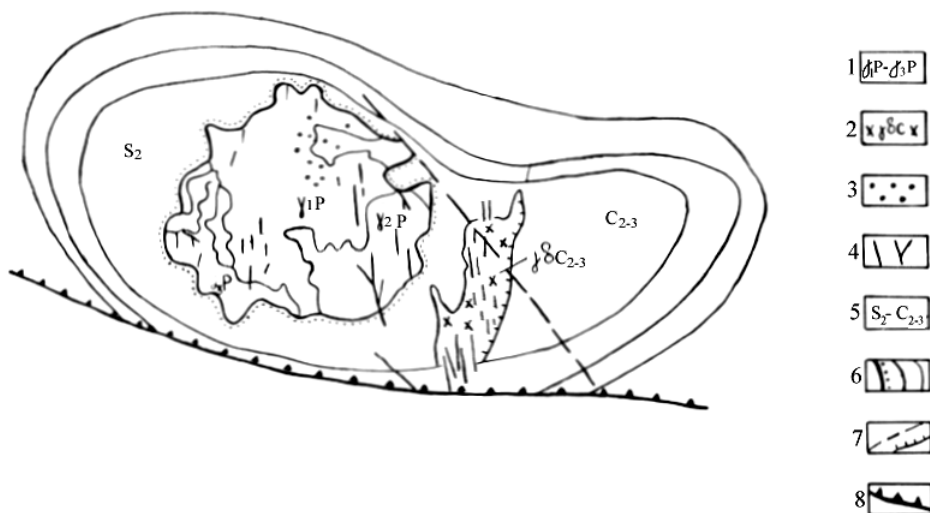


Рис. 1. Схематична геологічна будова, морфологія та геолого-структурна позиція Акчатауського гранітного масиву та однойменного родовища (за В. Бочаровим та ін.):

1 – граніти різних фаз укорінення; 2 – адамеліти; 3 – шлірові тіла пегматитів; 4 – грейзенові тіла й рудоносні кварцові жили; 5 – вмісні породи рами; 6 – межі виходу масиву на денну поверхню і глибинне продовження гранітів за гравіметричними даними; 7 – регіональні й локальні тектонічні розломи; 8 – Акчатауська зона глибинних розломів

Виконані нами протягом 1980–1988 рр. разом з Ю. Дорошенком та Ж. Сімків термобарогеохімічні дослідження флюїдних включень у мінералах дали змогу діагностувати фізико-хімічні умови й динаміку еволюції рудоутворювальних процесів на родовищах провінції та механізми екстрагування й міграції металоносних флюїдів, виконати градієнтний аналіз і визначити концентрацію й тренди термобарогеохімічної зональності розвитку деяких родовищ описуваної формації [2–4; 7].

Формування грейзенів починалося у фронтальній частині колони автотемасоматитів за участі високотемпературних суттєво газових кислотних розчинів, які зі зниженням термобаричного режиму (>475–300 °С) зазнавали ущільнення й конденсувалися як післямагматичні дистилати. Грейзени супроводжувалися супутнім зруденінням у вигляді штюкверкових тіл і ендоконтактових утворень прожилково-жильного морфотипу з нестійким вмістом головних і супутніх корисних компонентів у кислих інтрузіях рудоспряженого акчатауського комплексу. Свого часу у співавторстві з В. Боголеповим ми показали (1982), що ці інтрузії зазнавали інтенсивної контракційної тріщинуватості у зв'язку з розрядженням

ранньомагматичних напружень та їх остиганням, коли відбувалося зменшення об'єму та ендокінетичним шляхом формувалося склепіння і виникав арочний ефект над рудно-магматичним джерелом. Високощільний і дуже агресивний рудоутворювальний флюїд, який складався з газової вуглекислотної і водно-сольової галогенідної частин, переміщувався з розплаву і граніту шляхом магматичної дистиляції [7]. За Г. Щербою (1968), процес відбувався на глибинах становлення магматичних мас – від 5,0–4,0 до 2,0–1,5 км, що забезпечувало достатній масштаб магматичної дистиляції.

Розуцільнення флюїду в надінтрузивній зоні арочного склепіння супроводжувалося помітним зниженням тиску ($-\Delta P$), через що водно-сольовий флюїд ніби «відсмоктувався» з магмо-рудогенерувального джерела з екстрагуванням рідкісних металів [7]. Цей процес суттєво посилювався тоді, коли його відбувалося значно інтенсивніше флюїдовідділення за порівняно високого водовмісту ($C_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{внх}} \geq 4\%$ і більше) – так звані мокрі магми.

Термобарогеохімічний аналіз рудоносних і безрудних гранітоїдних інтрузій засвідчив, що за розплавленими й сингенетичними флюїдними включеннями в порфірових вкрапленнях мінералів гранітів можна визначити PT -параметри, висхідний водовміст і фазовий склад рудно-магматичної системи, у якій водовміст може бути значно нижчий ($<2-3\%$). Ця різниця визначає різний перебіг екстрагування металів у процесі магматичної дистиляції та специфічні механізми відокремлення й міграції металоносних флюїдів у боки і догори від рудно-магматичного джерела. За високого вмісту води й інших летких, як стверджували Ф. Рейф та Є. Бажеев (1982), внутрішній тиск системи стає настільки великий, що неминуча розгерметизація магматичної камери і відщеплення металоносних фаз. Коли ж водовміст низький (так звані сухі магми), то тиск флюїду не досягає межі міцності бокових порід, тому флюїд разом з екстрагованими з силікатного розплаву і граніту металами розсіюється в міжзерновому просторі інтрузиву, що кристалізується. У такий спосіб інтегрована дія двох чинників – арочний ефект і зниження $-\Delta P$ та підвищений вміст водно-сольової рідини ($C_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{внх}} > 4\%$) – забезпечує дуже високу екстракцію розсієних металів шляхом магматичної дистиляції та їх трансакцію в рудовмісні структури грейзеново-жильного типу в ендоконтакті рудоспряженого масиву гранітоїдів чи в надінтрузивні штокверки [7].

Відщеплена від флюїдогенерувального джерела мобільна флюїдна фаза зазнавала інтенсивної гетерогенізації внаслідок нерівноважних термодинамічних умов міграції й була перенасичена леткими компонентами. Цей процес дегазации флюїдної фази, унаслідок якого першочергово фракціонували кислотні компоненти, зумовив зростання її лужності. Тому передовий фронт відщеплених «лужних» флюїдів ранніх пульсацій магмогенерувального вогнища спричинив інтенсивний розвиток ранньої лужної стадії з синхронним розвитком протогенетичного ряду $K-Na$ -фацій метасоматитів – мікроклінізації (Караоба) і подекуди – альбітизації (Коктенколь, Східний Коунрад), як раніше довели в своїх працях О. Беус зі співавт. (1961), Ф. Чухров (1966) та Г. Щерба (1968). Ці метасоматити передували формуванню ранніх власне молібденових парагенезисів родовищ.

Лужні метасоматити почали утворюватися за умов надкритичного пневматолітового стану мінералоутворювальних флюїдів порівняно високої густини за $>475-430\text{ }^\circ\text{C}$. Наступна кристалізація сполучених з ними ранніх молібденових руд пов'язана з трансформацією надкритичних газоподібних розчинів у рідинні. Верхня межа цього переходу визначалася критичними явищами за температури гомогенізації флюїдних включень $450-425-415\text{ }^\circ\text{C}$. Примітно, що в розчинах водних витяжок із сингенетичних флюїдних включень у молібденоносному кварці виявлено значний вміст аніонів HSiO_3^- : до $8-10\text{ мг/250 мл}$, що становить $45-55\text{ экв. \%}$ від сумарної кількості аніонів розчину. Ця обставина добре узгоджується з даними про динаміку регресивно-інверсійних перетворень агрегатного стану мінералоутворювальних флюїдів ранніх стадій мінералізації за відповідного високотемпературного рівня системи, що

можна пояснити тісним геохімічним зв'язком Mo з Si. Адже, як експериментально довели М. Хігаров та Л. Іванов (1965) і С. Коренбаум (1970), молібден задовільно транспортується за надкритичних умов саме у формі кремнієво-молібденової кислоти, а руйнування таких комплексів і початок кристалізації молібденіту відбувається в разі трансформації газоподібних надкритичних флюїдів у рідкі гідротермальні під час зниження температури. Гідротермальні флюїди зазнають неодноразового ретроградного кипіння, що також стимулює синхронну кристалізацію молібденіту. Такі періодичні «епізоди пневматолізу» у власне гідротермальному мінералоутворенні на родовищах описуваної провінції відбувалися за 440–425–395–375–360 °С. Наприкінці стадії формування власне молібденових руд масштаби й інтенсивність ранньої лужної «хвилі» закономірно знижувалися. Наступна інверсія режиму лужності–кислотності, пов'язана зі становленням інтратрудних дайок, призвела до зміни «реліктів» лужного метасоматозу етапом кислотного вилугування – грейзенізацією. Еволюційно-інверсійна зміна типів метасоматозу знову відбувалася під час переходу мінералоутворювальних розчинів із надкритичного пневматолітового стану в гідротермальний. Як засвідчили наші дослідження 1980–1984 років та роботи О. Бризгаліна (1976), з цим за 435–430 °С пов'язаний початок руйнування хлоридно-натрових і гідроксофторидних комплексних сполук та кристалізація промислово цінних мінералів – молібденіту, вольфрамиту, флюориту, берилу, бісмутину продуктивної комплексної рідкіснометалевої стадії (R_c), яка тривала до 270 °С. Ці процеси відображає схема стадійності і термобарогеохімічного режиму процесу рудоутворення на родовищі Акчатау (рис. 2).

Дослідження засвідчили, що агрегатний стан флюїдів на родовищах змінювався неодноразово, проте загалом усі вони належать до пневматолітово-гідротермальних утворень. Мінералоутворювана діяльність газоподібних розчинів виявлена тільки у ранній період рудогенезу, коли починали кристалізуватися мінеральні парагенезиси молібденіт-кварцової і комплексної рідкіснометалевої стадії, або ж услід за вкоріненням інтрузивних дайок, які здебільшого передували R_c -стадії. Верхня температурна межа гетерогенного стану розчинів, з якими пов'язаний початок розпаду транспортіваних комплексних сполук металів і кристалізації їхніх мінералів, визначений критичними явищами і становить для відповідних морфоструктурних типів родовищ 445–440–435–425 °С (жильні ендоконтактіві тіла), для надінтрузивних штокверків вона не перевищує 425 °С. Продуктивні мінеральні комплекси кристалізувалися здебільшого за >440–300 °С на тлі флуктуацій тиску від 165 до 40 МПа. Тільки інтенсивна шеелітова мінералізація Верхньо-Кайрактинського штокверку сформувалася за нижчої температури – 380–260 °С. Це не заперечує її постеріорного розвитку по більш ранньому й високотемпературному вольфрамиту R_c -стадії.

Однак праці Г. Бедрова (1961), В. Чернова (1984) та наші термобарогеохімічні дослідження засвідчують, що частина шееліту є продуктом постеріорного розвитку по реліктовому вольфрамиту комплексної рідкіснометалевої стадії і кристалізації шееліту з первинно збагачених кальцієм розчинів самостійної шееліт-кварцової стадії мінералізації.

Відповісти ж на питання, яка частка кальцію була в первинних гідротермах шееліт-кварцової стадії і скільки його ще треба було вилучити з бокових порід унаслідок циркуляції цих розчинів у тріщинному каркасі штокверку для формування шеелітового зруденіння – поки що проблематично.

Характерною особливістю деяких найбільших родовищ молібденіт-вольфрамової формації є їхнє розташування дуже далеко від апікальної частини ще не розкритих інтрузивів. Таку позицію займає, зокрема, родовище Верхнє Кайракти. Тут рудоспрямований масив акчатауських гранітів розташований на глибині близько 4 км, а параметрична свердловина засвідчила, що до глибини > 1 км вміст шееліту не зменшується. Можливо, родовище доцільніше зачислити до шеелітоносних штокверків вольфрамової формації [1].

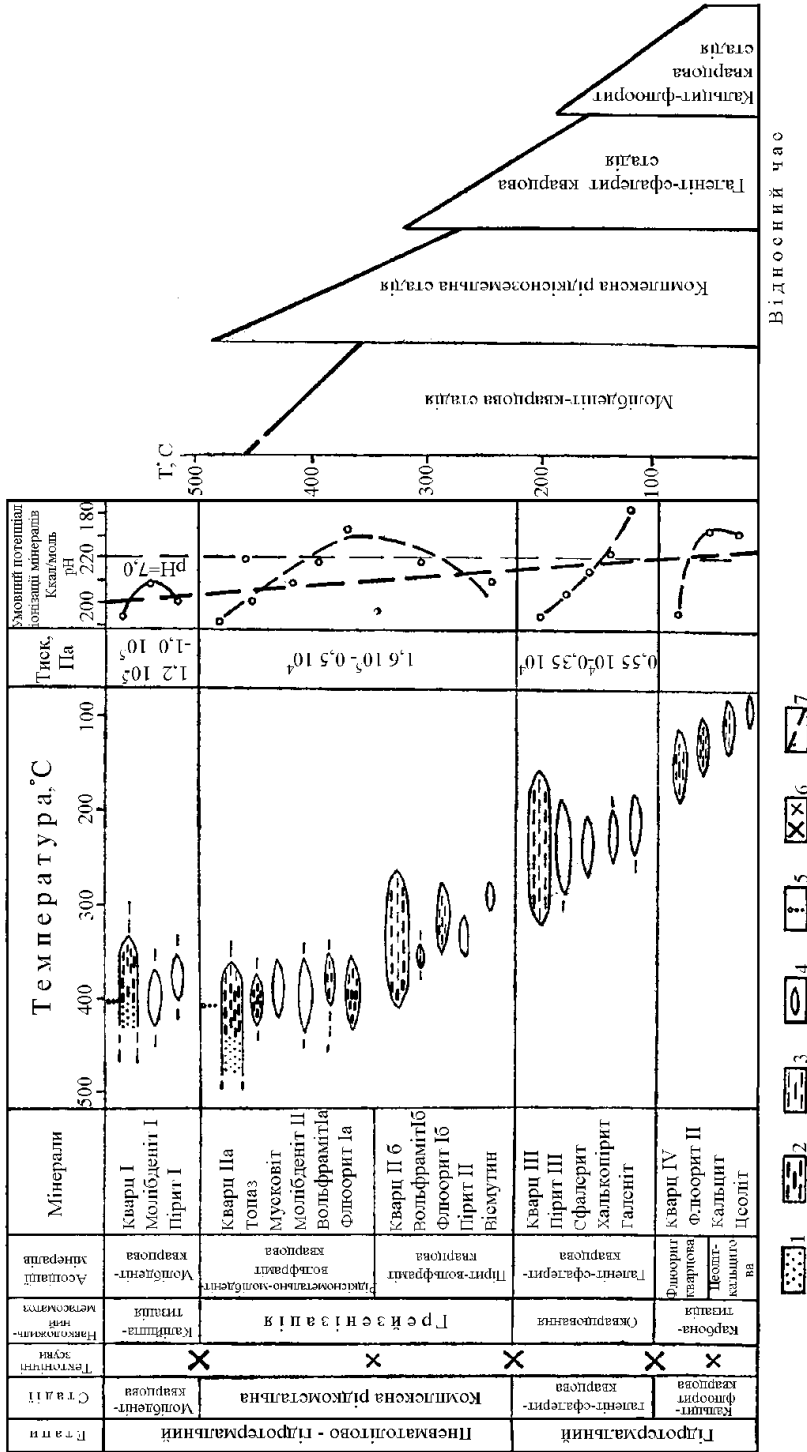


Рис. 2. Схема стадійності і термобарогеохімічного режиму процесу мінералоутворення на Ачкауаському молібден-вольфрамовому родовищі.

Температурні інтервали, визначені за томотензацією включень мінералоутворювальних розчинів у станах: 1 – газовому, 2 – критичному (конденсація), 3 – рідкому, 4 – передбачувані температурні інтервали за даними декрепітації; 5 – явища періодичного кипіння розчинів; 6 – між- і внутрішньостадійні тектонічні порушення; 7 – тенденція зміни кислотно-лужних властивостей розчинів у процесі мінералоутворення

Значення термостатованості рудномагматичних систем ($\Delta T/100$ м) на родовищах різного морфоструктурного типу становить 30–20 °C/100 м (Акчатауське), 25–15 (Східний Коунрад), 25–20 (жильна Караоба). Для штокверків цей градієнт значно менший і зіставний з горизонтальним градієнтом на жильних родовищах: 10–8 (Верхнє Кайракти), 12–10 °C/100 м (Коктенколь). З урахуванням просторової зміни температури і наведених значень термостатованості рудномагматичних систем визначено температурний діапазон кристалізації промислово цінних мінералів, °C: молібденіт I – 425–390, молібденіт II – 445–400, вольфраміт – 435–350, бісмутин – 245–275 (Акчатау), молібденіт – 440–380 (Караоба), 430–375 (Коктенколь), 425–390 (Джанет), 415–350 (Байназар), 405–385 (Верхнє Кайракти), 400–350 (Східний Коунрад), 400–320 (Нура-Талди).

Вольфраміт на всіх родовищах, крім Акчатауського, формувався здебільшого за $T = 400\text{--}280$ °C, шееліт – 350–260 °C.

Ці оптимальні значення температури кристалізації головних промислових мінералів украй примітні з погляду їхнього практичного застосування для локального прогнозування та оцінки зруденіння. У праці Т. Сушевської зі співавт. (2001), яка вивчала склад газових компонентів флюїдів на Акчатау, зазначено про радикальне переважаєння CO_2 над N_2 і CH_4 , що добре корелює з наявними матеріалами. Автори розкрили наявність своєрідних окисно-відновних умов у ділянці існування буфера Ni–NiO. Його існування саме в інтервалі 450–300 °C для нас особливо важливе, оскільки він забезпечував у розчинах рівень концентрації Fe^{2+} і Mn^{2+} , необхідний для утворення вольфраміту [5; 6]. З іншого боку, його наявність і регуляція концентрації в розчинах Fe і Mn у зазначеному температурному інтервалі експериментально посилює адекватність і відповідність визначених нами значень температури кристалізації цінних мінералів у рудах родовищ формації за флюїдними включеннями в мінералах. Аналогічні окисно-відновні умови характерні для продуктивних стадій формації в інших регіонах, наприклад, на родовищі Сіновес у Чехії.

Мінераутворювальні розчини власне гідротермального етапу, коли кристалізувалися сульфідно(поліметалево)-кварцові мінеральні парагенезиси післяпродуктивних стадій, мали температуру 320–75 °C, перебували від тиском від 50 до 25 МПа і були насичені CO_2 .

Аналіз складу водних і газових витяжок із розчинів включень засвідчив, що під час раннього, високотемпературного пневматолітово-гідротермального періоду найактивніша роль належала Cl, F, CO_2 і, частково (Акчатауське родовище), – бору. Для власне гідротермальних середньо-низькотемпературних процесів ці компоненти майже не характерні, або ж їх узагалі нема, хіба що в період кристалізації поліметалево(Pb+Zn)-кварцових асоціацій, коли знову активізувався CO_2 . Загалом же особливості хімізму розчинів ранніх продуктивних етапів рудоутворення полягають у лужно-галогенному складі (Cl-K-Na для молібденіт-кварцової стадії і F-Cl-K-Na для рідкіснометалевої) зі змінним, однак повсюдним умістом гідросилікат-іона. За середньотемпературних умов суттєву роль відіграє CO_2 , тоді ж з'являється гідрокарбонат-іон. «Наскрізним» іоном є Na^+ , що дає підстави припускати його важливу роль у формуванні комплексних сполук не тільки Mo і W, а й Zn та Pb.

За даними газового аналізу, у розчинах були наявні CO_2 (70–77 %), граничні вуглеводні (14–19) і N_2 (8–12 %).

Під час утворення рідкіснометалевих парагенезисів розчини залишалися висококонцентрованими (їхня концентрація на деяких родовищах навіть зростала внаслідок нових пульсацій магматичного вогнища й укорінення інтарудних дайок) і мали F-Cl-K⁺-Na⁺ склад за помітного зниження частки HCO_3^- . Для флюїдів характерний різний уміст катіонів–аніонів, що наочно виявляється під час аналізу співвідношень головних іонів з розвитком процесу рудоутворення. У водних витяжках із розчинів включень молібденіт-кварцової стадії (мінералізація – 11–15 мг/250 мл, рН – від 6 до 4 за рН бідистилату

5,8–6,0) зафіксовано такі співвідношення, %-екв.: $\text{Na}^+/\text{K}^+ - 9,0-3,0$; $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/(\text{Na}^++\text{K}^+) - 0,07-0,04$; $\text{F}^-/\text{Cl}^- - 0,16-0,03$; $\text{HSiO}_3^-/(\text{F}^-+\text{Cl}^-) - 1,6-0,2$. Для розчинів флюїдних включень із кварцу рідкіснометалево-кварцової стадії (мінералізація водних витяжок – від 7,6–10,8 до 16,3–16,9 мг/250 мл, рН – 5,5–6,5, рН бідистиляту – 5,8–6,2) зафіксоване помітне зростання кількості F^- і K^+ , що зумовлює дещо інші значення наведених співвідношень: $\text{Na}^+/\text{K}^+ -$ від 8,0–6,8 до 5,4–4,3; $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/(\text{Na}^++\text{K}^+) - 0,30-0,02$; $\text{F}^-/\text{Cl}^- - 0,43-0,25$; $\text{HSiO}_3^-/(\text{F}^-+\text{Cl}^-) - 0,55-0,15$. У цих розчинах вміст CO_2 досягає 88 %, що узгоджується з експериментальними дослідженнями тричленної системи $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$. Як засвідчили наші дослідження разом з Ж. Сімків (1988), зазначені співвідношення близько-аналогічні для відповідних стадій родовищ різного морфоструктурного типу (конвергентність складу).

Вміст головного газового компонента – CO_2 – збільшується від ранніх до пізніх стадій, максимальний його вміст (до 97 об. %) притаманний періоду формування післяпродуктивного сульфідного комплексу, що позначається на наявності включень рідкого й газоподібного CO_2 (рис. 3).

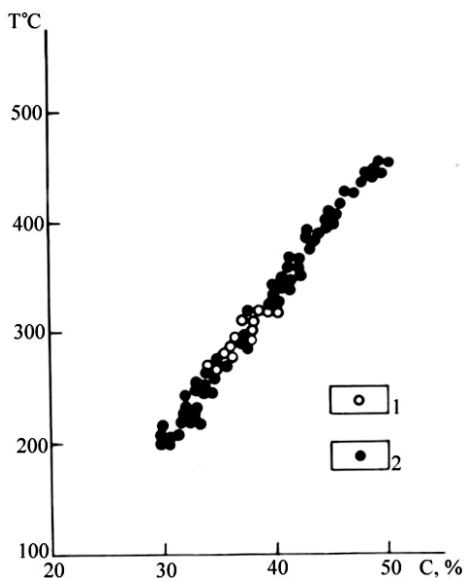


Рис. 3. Варіації сольової концентрації розчинів включень на молібден-вольфрамових родовищах Центрального Казахстану:

1 – молібденіт-кварцова стадія; 2 – рідкіснометалево-молібденіт-вольфраміт-кварцова стадія

Сумарна кількість N_2 і деяких інертних газів змінюється від 2 до 12 об. %, вміст CH_4 і гомологів невеликий, він теж зменшується від ранніх до пізніх стадій мінералізації. Наявна концентрація солей у розчинах виявляється найвищою на ендоконтактних родовищах: для молібденіт-кварцової стадії змінюється від 42 до 26 мас. % NaCl , для рідкіснометалевої – від 65 до 27 мас. % NaCl , на інших родовищах коливається від 47–26 до 21–2 мас. % NaCl . Ця особливість сольової концентрації флюїдів продуктивних стадій виявляється у фазовому складі сингенетичних включень: вони містять до 14–17 розчинних солей хлоридів Na і K та інших, наразі не діагностованих сполук («гідротермальна ропа», за М. Єрмаковим), у тім числі нерозчинних рудних мінералів (зокрема, вольфраміту). Такі

розчини чітко вирізняються серед розчинів включень мінералів інших стадій, наприклад, післяпродуктивних, де превалюють включення з CO₂ (рис. 4–6).

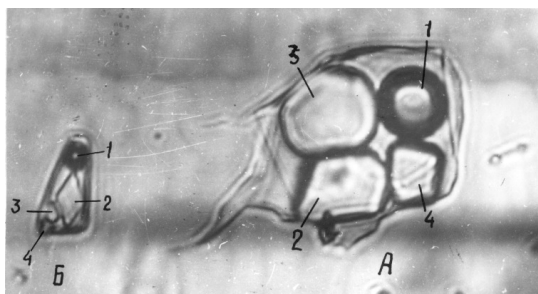


Рис. 4. Група сингенетичних газорідких багатофазових включень у кварці, $\times 600$

A: 1 – газ; 2–4 – солі; *Б:* 1 – газ; 2–4 – солі (2 – кристал KCl)



Рис. 5. Газорідке та вуглекислотноводне включення у кварці, $\times 450$

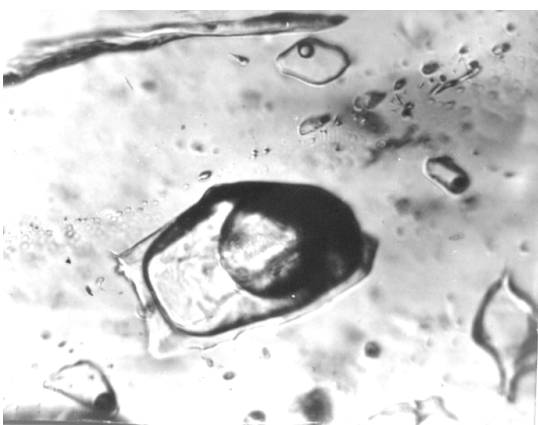


Рис. 6. Вуглекислотноводне включення з ореолами газорідких включень у флюориті, $\times 450$

Загалом термодинамічно-регресивний стадійний процес рудоутворення на родовищах розвивався дискретно-інверсійно. Розвиткові кожної стадії передували тектонічні рухи, які часто супроводжувалися вкоріненням дайок аплітів, граніт-аплітів, мікрогранітів, граніт-порфірів, лампрофірів, особливо на різночасових стадіях на родовищі Нура-Талди. Вони енергетично підтримували рудний процес і стимулювали так звані процеси реювенациї нових порцій розчинів, з якими, як зазначав М. Єрмаков (1972), на родовищах пов'язані своєрідні епізоди пневматолізу (ретроградного кипіння) у власне гідротермальному процесі. Температура процесу рудоутворення на різних стадіях змінювалася стрибкоподібно:

вона була вищою на початку кожної наступної стадії порівняно з кінцем попередньої. Водночас за повсюдного зниження температури від ранніх стадій до пізніх, а в межах стадії – від її початку до кінця на Акчатауському родовищі початок другої (за часом прояву) рідкіснометалевої стадії – навіть порівняно з початком ранньої молібденової – є більш високотемпературним. Це пов'язано, вірогідно, із надзвичайно високою сольовою концентрацією флюїдів другої пульсації магмогенерувального вогнища і вкоріненням інтарудних дайок граніт-аплітів. Загалом же на інших родовищах формації такі стрибки теж спричинені укоріненням внутрішньорудних дайок (здебільшого на ранніх стадіях) і пульсаційним надходженням рудоутворювальних розчинів у рудолокалізуючі структури. Це відбувалося на тлі зменшення енергетичних показників рудно-магматичної системи і щораз більшого залучення в процеси рудоутворення порівняно холодних вадозних інфільтраційних вод глибинної циркуляції, особливо під час укорінення рудоспряжених інтрузій акчатауського комплексу в палеоводорясні гідрогеологічні басейни земної кори того часу. Це, до речі, може забезпечити перехід порівняно «сухих» магм у порівняно «мокрі» і стимулюватиме магматичну дистиляцію й екстрагування галоїдами рудної речовини.

Висновки та перспективи подальшого дослідження. У геологічній історії і фізико-хімічних умовах утворення родовищ молібден-вольфрамової формації є дуже багато спільного, що дає підстави трактувати їх як результат діяльності причинно-взаємопов'язаних і закономірно виявлених рудно-магматичних процесів, сполучених у часі та просторі зі становленням алохтонних масивів аляскітових гранітів верхньогерцинського акчатауського комплексу. Стосовно ж виявленої тенденції зниження високотемпературних процесів рудоутворення і загальної сольової концентрації розчинів від ендоконтактових до надінтрузивних родовищ, то вона, з одного боку, може бути зумовлена різною глибиною формування рудоспряжених гранітних масивів і зруденіння в жорстких каркасних (жильні ендоконтактові родовища) і лінійних рухомих (Успенська зона зминання, штокверки) геотектонічних структурах земної кори Центрального Казахстану, а з іншого, – може свідчити про різну інтенсивність денудаційних процесів у післяпермський час. Таке передбачення підтверджується тим, що в процесі формування ендоконтактовий тип мінералізації «росте» догори і переходить в екзоконтакт, а екзоконтактовий – вниз, дуже часто досягаючи апікальних частин рудогенерувальних інтрузій. На сучасному ерозійному зрізі кожний з морфоструктурних типів може мати самостійне значення або ж формує перехідний – жильно-штокверковий тип.

Отже, родовища молібден-вольфрамової формації грейзенової групи Центрального Казахстану – це високотемпературні пневматолітово-гідротермальні й високобаричні утворення. Для продуктивних стадій рудоутворення характерна висока сольова концентрація флюїдів – понад 65 мас. % NaCl для ендоконтактового морфотипу і порівняно менша – для штокверкового. На післяпродуктивній стадії активна рудоутворювальна роль належала CO₂. На завершальній стадії кристалізувалися карбонати й цеоліти.

На теренах України родовищ молібден-вольфрамової формації поки не виявлено, однак є численні рудопрояви вольфраму і молібдену на Українському щиті. Відомо, що ці метали належать до групи рідкісних і мають унікальні фізичні й хімічні властивості. У руслі сучасних світових тенденцій важливо всебічно досліджувати вже відомі на території України прояви вольфрамової й молібденової мінералізації та провадити відповідні розшукові роботи для виявлення нових проявів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Лазько Є. М. Ендогенні рудні формації : навч. посібник. Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2004. 119 с.

2. Лазько Є. М., Ляхов Ю. В., Павлунь М. М., Пізніур А. В., Попівняк І. В. Термобарогеохімія в прикладній геології (пошуки, розвідка та експлуатація родовищ). *Мінерал. зб.* 1992. № 45. Вип. 2. С. 15–21.
3. Павлунь М. Досвід великомасштабного термобарогеохімічного прогнозування грейзенового молібден-вольфрамового зруденіння герцинід Джунгаро-Балхаштя (Центральний Казахстан). *Мінерал. зб.* 2002. № 51. Вип. 2. С. 22–33.
4. Павлунь М. М. Фізико-хімічні умови формування молібден-вольфрамового родовища Коктенколь в Центральному Казахстані. *Зб. наук. праць УкрДГПІ.* 2002. № 1–2. С. 124–127.
5. Eugster H. P. Granites and hydrothermal ore deposits: a geochemical framework. *Mineralogical Magazine.* 1985. Vol. 49. Iss. 350. P. 7–23. URL: chrome- https://www.rruff.net/doclib/MinMag/Volume_49/49-350-7.pdf
6. Norman D. I., Moore J. N., Yonaka B., Musgrave J. Gaseous species in fluid inclusions: A tracer of fluids and indicator of fluid processes. *Proc. XXI Workshop on Geothermal Reservoir Engineering.* Stanford University, California, 1996. P. 233–240.
7. Pavlun N. N., Piznyur A. V., Zinchuk N. N. Evolution of the endogenous ore-bearing fluids (according to minerals' inclusions). *Fifth Biennial SGA Meeting and the Tenth Quadrennial IAGOD Meeting,* London, UK, 1999. P. 144–153.

REFERENCES

1. Lazko, Ye. M. (2004). *Endohenni rudni formatsii [Endogenous ore formations]*. Lviv: Ivan Franko National University of Lviv.
2. Lazko, Ye. M., Liakhov, Yu. V., Pavlun, M. M., Pizniur, A. V., & Popivniak, I. V. (1992). *Termobarogeokhimiia v prykladnii heolohii (poshuky, rozvidka ta ekspluatatsiia rodovyshch) [Thermobarogeochemistry in applied geology (prospecting, exploration and exploitation of deposits)]*. *Mineralogical Collection*, 45 (2), 15–21.
3. Pavlun, M. M. (2002). *Dosvid velykomasshtabnoho termobarogeokhimiichnoho prohnzuvannia hreizenovoho molibden-volframovoho zrudenninnya hertsynid Dzhunharo-Balkhashshia (Tsentralnyi Kazakhstan) [Experience of large-scale thermobarogeochemical forecasting of greisen molybdenum-tungsten mineralization in Hercynides of Dzhoungaro-Balkhash region (Central Kazakhstan)]*. *Mineralogical Collection*, 51 (2), 22–33.
4. Pavlun, M. M. (2002). *Fyzyko-khimichni umovy formuvannia molibden-volframovoho rodovyshcha Koktenkol v Tsentralnomu Kazakhstani [Physicochemical conditions of formation of the Koktenkol molybdenum-tungsten deposit in Central Kazakhstan]*. *Collection of Scientific Papers of the Ukrainian State Geological Exploration Institute*, 1–2, 124–127.
5. Eugster, H. P. (1985). *Granites and hydrothermal ore deposits: a geochemical framework*. *Mineralogical Magazine*, 49 (350), 7–23. URL: chrome- https://www.rruff.net/doclib/MinMag/Volume_49/49-350-7.pdf
6. Norman, D. I., Moore, J. N., Yonaka, B., & Musgrave, J. (1996). *Gaseous species in fluid inclusions: A tracer of fluids and indicator of fluid processes*. In *Proc. XXI Workshop on Geothermal Reservoir Engineering* (pp. 233–240). Stanford University, California.
7. Pavlun, N. N., Piznyur, A. V., & Zinchuk, N. N. (1999). *Evolution of the endogenous ore-bearing fluids (according to minerals' inclusions)*. In *Fifth Biennial SGA Meeting and the Tenth Quadrennial IAGOD Meeting* (pp. 144–153). London, UK.

THERMOBAROGEOCHEMISTRY OF ORE FORMATION PROCESSES IN MOLYBDENUM-TUNGSTEN DEPOSITS OF THE GREISEN GROUP IN CENTRAL KAZAKHSTAN

Mykola Pavlun

mykola.pavlun@lnu.edu.ua

*Ivan Franko National University of Lviv,
4, Hrushevskoho St., Lviv, Ukraine, 79005*

Molybdenum-tungsten mineralization of the greisen group in Central Kazakhstan was formed during orogenesis and stages of tectono-magmatic activation. The Dzhungar-Balkhash geosyncline region occupies a special geological and metallogenic place in the Central Kazakhstan ore province. Here, during the Late Hercynian orogenesis, acidic intrusions were formed, with which all molybdenum and tungsten deposits are spatially, structurally, and in terms of time of formation connected. 18 ore regions have been identified, more than half of which are located in the Uspenska zone of crush and are associated with greisens of various facies. There are two morphotypes of deposits – endomorphic veined and supraintrusive stockworks.

Greisens were formed in the frontal zone of the autometasomatites column with the participation of high-temperature, essentially gaseous acid solutions, which, with a decrease in temperature (>470–300 °C), underwent compaction and condensed in the form of post-magmatic distillates at a depth of 5–4 to 2.5–1.5 km. The distillates were enriched in halides, CO₂, H₂O, and other volatile compounds.

The separation of melts-fluids from magma chambers and their evolution occurred either under the condition of retrograde boiling of magma, or as a result of the gradual separation of melts-solutions – with the formation of melts-solutions with CO₂ and a residual melt-solution with high-density halogen ore-forming fluids. Separation from the magma-ore generating chamber occurred in different ways. During the development of contractional fracturing in supraintrusive host rocks, an arch effect was formed and a noticeable decrease in pressure occurred, which contributed to the «suction» of fluid from the magma-ore-generating source with subsequent extraction of rare metals.

Molybdenum-tungsten deposits in the region have been formed under pneumatolytic-hydrothermal conditions during five stages of mineralization from solutions of high salt concentration (>65–27 wt. % NaCl) and high pressure and its significant fluctuations (from 165 to 25 MPa).

Key words: tungsten, molybdenum, deposit, ore formation, greisens, thermobarogeochemistry, pneumatolytic-hydrothermal processes, Late Hercynian orogenesis, Central Kazakhstan.



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 25.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026