

Санкт-Петербургский Государственный Университет

*На правах рукописи*

**ПЕТРОВ  
СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ**

**ТИПОМОРФНЫЕ И  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
ВОЛЬФРАМИТА**

Специальность 04.00.20 — минералогия, кристаллография

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Санкт-Петербург  
1998

Работа выполнена в АО "Институт Механобр"

Научный руководитель: доктор геолого-минералогических наук  
профессор В.М.Изюмкин

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук  
Л.Ф.Сырица  
кандидат геолого-минералогических наук  
В.В.Гавриленко

Ведущая организация: Институт геологии рудных месторождений  
петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН

Защита состоится "11" июня 1998 года в 17 часов в аудитории  
44 на заседании диссертационного совета Д 063.57.27 по защите диссертаций  
на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук  
Санкт-Петербургском государственном университете по адресу:

199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9, геологический  
факультет.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке  
им. А.М.Горького при Санкт-Петербургском государственном университете

Автореферат разослан "8" мая 1998 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

Т.Ф.Семенова

**Актуальность исследований.** Вольфрам широко используется в промышленности как важный стратегический металл. Его основные промышленные минералы — вольфрамит и шеелит имеют различное применение. Шеелит служит сырьем для производства паравольфрамата аммония и, затем, металлического вольфрама, а вольфрамит — для получения ферровольфрама, используемого в черной металлургии.

В последние годы, в связи с распадом СССР и общим состоянием горнодобывающей промышленности, уровень добычи вольфрамита значительно уменьшился. На территории России разрабатываемые месторождения находятся на Алтае (Калгутинское), в Забайкалье (Холтосон, Инкур, Спокойненское, Шумиловское, Бом-Горхон, Барун-Шився) и на Чукотке (Иультин). Многие из них отрабатываются старательскими методами, запасы руд (особенно богатых и легкообогатимых) заканчиваются, а крупные обогатительные предприятия остановлены или работают не на полную мощность. Поэтому, можно прогнозировать, что через несколько лет действующие предприятия не смогут обеспечить даже небольшого прироста производства вольфрамитовых концентратов, который возможен только ценой огромных инвестиций в модернизацию предприятий или на ввод в эксплуатацию новых месторождений. В последнем случае для минимизации расходов потенциальные инвесторы должны оценивать технологические свойства руд по ограниченному набору качественных показателей уже на стадии поисково-оценочных работ, когда происходит определение генетического типа рудопоявления, на основе изучения совокупности химических, физических, механических и других свойств минералов и их ассоциаций. Исследованиями Л.А.Барского, В.З.Блисковского, А.И.Гинзбурга, О.П.Иванова, В.М.Изонтко, Г.А.Коца, Г.А.Митенкова, Б.И.Пирогова, Г.А.Сидоренко, В.И.Ревнишцева, С.Ф.Чернопятова и многих других, установлено, что химический состав, концентрации микропримесей и некоторые физические свойства минералов имеют значение при оценке качества минерального сырья и их определение наряду с изучением свойств поверхности, дефектности кристаллов и характеристик рудных ассоциаций является главным при выборе способов рудоподготовки, обогащения и методов управления технологическими процессами. Анализ эффективности результатов обогащения руд показывает, что она не одинакова не только для разных генетических типов месторождений, но и в пределах рудных полей, месторождений и рудных тел в связи с изменчивостью перечисленных свойств минералов. Для их классификации в приложении к обогащению минерального сырья выделяет-

ся особая группа *технологических* свойств, непосредственно влияющих на выбор схемы обогащения и результат переработки руд.

Целью работы является выявление связей между типоморфными свойствами вольфрамитов с одной стороны и результатами обогащения руд — с другой, а также установление возможности прогнозирования технологических свойств руд на основе выявленных зависимостей для создания оптимальных и усовершенствования существующих технологических схем, управления качеством и улучшения показателей переработки руд.

При этом решены следующие задачи: изучено изменение типоморфных особенностей вольфрамитов в зависимости от генетического типа месторождения; исследован характер неоднородности типоморфных и технологических свойств вольфрамитов на разных уровнях (от месторождений до отдельных кристаллов); определены технологические свойства минералов и их взаимосвязь с показателями обогащения; разработаны методики прогнозирования технологических особенностей минералов (раскрываемости, измельчаемости, флотуемости и других) на основе изучения их типоморфных свойств.

В основу работы положены материалы, собранные автором в 1985-94 гг. на месторождениях Инкур, Холтосон, Калгута и Верхнекайрактинском. Часть материалов получена при изучении технологических проб, поступающих в "Механобр" (Забывое, Верхнекайрактинское, Калгута), образцов из личной коллекции автора (Караоба, Забытое) и других геологов: Лермонтовское (И.К.Кузьменко), Саран, Байназар, (С.С.Русских; В.И.Лыков), Иультин (О.П.Иванов), Спокойненское (И.С.Долгушина).

Для исследования типоморфных свойств использовано 86 малообъемных проб, около 270 штучных образцов, из которых отобрано 120 мономинеральных фракций; проведено микроскопическое изучение более 360 полированных и 650 прозрачных шлифов с описанием и измерением кристаллов вольфрамитов (более 9500). Выполнены полные и сокращенные химические анализы 162 мономинеральных фракций вольфрамовых минералов, около 600 микрорентгено-спектральных определений (АО "Механобр-аналит"), рентгенографическое исследование 75 монокристалльных выколов и порошков вольфрамитов (СПГУ, каф. кристаллографии — ДРОН-2, АО "Механобр-аналит" — D/тах С "Гейгерфлекс", Е.Э.Михеева); определение химического состава поверхности 14 кристаллов вольфрамитов (ЭСХА "Perkin Elmer", спектрометр РН1-5400, "Механобр-аналит", А.В.Щукарев); измерения физических характеристик: микротвердости — на 123 образцах (не менее 2500 определений на приборах ПМТ-3 и Micromet II), измельчае-

мости — 110 проб (вибронстиратор Retch); плотности — 10 проб вольфрамита и 8 проб вольфрамит-шеселитовых агрегатов гидростатическим взвешиванием и пикнометрическим методом; магнитной восприимчивости — 48 проб вольфрамита ("Механобр", А.Е.Шубина). Для 136 проб выполнены тестовые технологические испытания по схемам Механобра. Обработка результатов проводилась на ЭВМ с применением стандартных статистических пакетов.

**Научная новизна.** Построена геолого-технологическая классификация вольфрамовых месторождений, отражающая с одной стороны их генетические особенности, а с другой — закономерности изменения технологических свойств руд. Выявлены главные типоморфные свойства минералов, определяющие схему обогащения и показатели переработки вольфрамового сырья. Установлена закономерная изменчивость морфологии рудных минералов и их ассоциаций (срастаний) в процессе формирования руд, определено их технологическое значение и способы использования при прогнозировании и технологической оценке руд. Впервые использована методика рентгенографического изучения микродефектности и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии для определения химического состава поверхности природных кристаллов вольфрамита, показано влияние геологических факторов (тектоники, среды рудоотложения — способ, объем, температура, скорость кристаллизации) на формирование дефектного строения кристаллов. Установлены закономерности изменения прочностных свойств кристаллов в зависимости от их состава и морфологии, магнитной восприимчивости — от степени окисления железа в вольфрамите.

#### **Защищаемые положения:**

1. Важнейшими типоморфными свойствами вольфрамита являются: морфология кристаллов и их химический состав, обусловленные температурой и составом среды рудоотложения, а также дефектное строение минеральных индивидов, отражающее условия роста кристаллов и их последующие изменения. Эти характеристики минерала определяют его физические и технологические свойства.

2. Вольфрамиты из руд моноформационных объектов изотропны в отношении типоморфных и технологических свойств, которые эволюционно изменяются от высоко— к низкотемпературным образованиям. Свойства вольфрамитов различных полиформационных объектов находятся в зависимости от длительности формирования руд.

3. В процессе переработки вольфрамитовых руд основные потери вольфрама связаны с переизмельчением кристаллов при дезинтеграции,

которое увеличивается от высоко— к низкотемпературным рудам и от жильных рудных тел к штокверкам.

4. Результаты обогащения вольфрамитовых руд могут прогнозироваться: особенности дезинтеграции — по вариациям микротвердости, являющимися суммарной мерой дефектности кристаллов; результаты гравитационного концентрирования — по морфологии выделений минерала и характеристикам его ассоциаций; флотационные свойства — по интегральной характеристике микродефектности, химическому составу минерала и его поверхности.

**Практическая значимость.** Материалы исследований использованы при подсчете запасов и составлении ТЭО отработки Верхнекайрактинского и Калгутинского месторождений; отражены в утвержденной в ГКЗ СССР методике определения руд переходной зоны Верхнекайрактинского месторождения. В практике оценки вольфрамитовых месторождений на ранних стадиях геологоразведочных работ широко используются методики определения взаимосвязи между типоморфными особенностями минералов с результатами обогащения. Часть полученных данных вошла в учебное пособие "Рентгенометрический анализ" для студентов Санкт-Петербургского горного института.

**Апробация работы и публикации.** Результаты исследований докладывались на Всесоюзном совещании "Роль технологической минералогии в расширении сырьевой базы СССР" (Челябинск, 1986); Всесоюзной школе-семинаре "Использование минералогических методов при прогнозировании, поисках и оценке месторождений полезных ископаемых" (Алма-Ата, 1987); семинаре ВМО "Технологическое значение разницы свойств минеральных агрегатов и индивидов" (Ленинград, 1988); II Всесоюзной школе по прикладной минералогии (Сочи, 1990); Всероссийском семинаре "Геолого-технологическое моделирование месторождений" (Санкт-Петербург, 1992); Международном симпозиуме "Минерально-сырьевые ресурсы России" (Санкт-Петербург, 1993); Международной конференции по малому горному бизнесу (Петрозаводск, 1995). Результаты исследований представлены в 16 научных статьях.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из 3 глав, введения и заключения и содержит 120 страниц текста, 64 рисунков, 35 таблиц, список литературы из 238 названий.

**Благодарности.** Приношу глубокую благодарность своему научному руководителю проф. В.М.Изонтко. Искренне признателен А.М.Базилевскому, А.В.Богдановичу, М.Б.Григорьевой, И.С.Долгушиной

А.Н.Зайцеву, Т.Г.Ивановой, Ю.Л.Крецеру, С.В.Крутиковой, И.К.Кузьменко, В.И.Лыкову, А.К.Мазурову, Е.Э.Михеевой, В.А.Романову, С.С.Русских, О.К.Смирновой, Л.С.Смольской, Ю.А.Солопову, В.Г.Стрельщину, П.Ю.Ходановичу, А.Е.Шубиной, А.В.Щукареву, М.А.Яговкиной за сотрудничество и помощь на разных этапах работы. Автор глубоко признателен своим первым учителям В.С.Аплову, В.И.Данилевскому и А.Э.Гликину.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*1. Классификация вольфрамовых месторождений.* В настоящее время существует около тридцати классификаций вольфрамовых месторождений, построенных для проведения региональных поисков, оценки ресурсов вольфрамового сырья и локального прогнозирования запасов (А.Д.Щеглов, А.М.Быбочкин, Д.В.Рундквист и другие). Имеется гораздо меньше классификаций для целей технологической оценки руд (Т.В.Буткевич, А.М.Быбочкин, В.М.Изонгко). Предлагаемая геолого-технологическая классификация месторождений вольфрама сделана с учетом технологических свойств руд и детализирована на основе генетического подхода. В ней проявления подразделяются на поли- и моноформационные, а оруденение в последних связывается с литологическим составом вмещающих пород и типами метасоматитов, характеристикой интрузивного магматизма и тектонического режима формирования минеральных парагенезисов, а, следовательно, температурой и длительностью образования месторождений. В соответствии с эволюцией геологических параметров изменяются основные особенности руд и главных рудных минералов. Например, по мере снижения температуры образования руд уменьшаются средние размеры кристаллов; изменяется характер сростаний вольфрамита с другими минералами, снижаются железистость вольфрамитов и концентрации Nb, Ta, Sc, TR. Одновременно, закономерно ухудшаются технологические свойства и показатели переработки руд, усложняются схемы их обогащения.

*2. Типоморфные свойства вольфрамита.* Основное внимание при изучении типоморфизма вольфрамитов уделяется влиянию условий образования (температуры, давления, состава среды рудоотложения) на химический состав минералов изоморфного ряда ферберит-гюбнерит, концентрацию примесей, морфологические особенности, параметры элементарной ячейки, дефектность кристаллического строения, плотность и прочностные характеристики. При этом в соответствии с собственными материалами проанализированы данные: В.Ф.Барабанова, И.В.Булдакова, Л.Г.Виноградовой, Н.В.Добровольской, Ю.Г.Иванова, Г.Ф.Ивановой,

В.М.Изонтоко, Г.А.Ильниского, С.И.Лебедевой, О.Д.Левницкого, И.Е.Максимюк, Е.Г.Пановой, М.М.Повилдайтис, В.А.Попова, М.Б.Рафальсон, Т.А.Соседко, В.И.Сотникова, Н.А.Сорокиной, Л.Ф.Сырица, В.С.Чурикова, Н.П.Юшкина, A.Beugnies, T.Kotoyo, K.Nakashima, A.Soeda, A.Sugaki, S.Takeno, Y.Wang, M.Watanabe и других.

Морфология кристаллов вольфрамита и их сростания с другими минералами изменяются от высоко— к низкотемпературным ассоциациям, что выражается в увеличении доли базальных пинакоидов в общей огранке над гранями призматических поясов. Такие изменения приводят к уплощенности и вытянутости индивидов. В жилах средневзвешенный размер зерен составляет почти 10 мкм по удлинению (53 объекта), на штокверках и метасоматических зонах — 1,2 мкм (20 объектов). Установлено, что размеры этих кристаллов в пределах полиформационных месторождений в целом увеличиваются по мере падения температуры рудообразования из-за многократного проявления процессов перекристаллизации и регенерации. Общим для вольфрамитов всех генетических типов является высокая степень идиоморфизма. Наиболее часто вольфрамиты находятся в сростаниях с кварцем, мусковитом, пиритом, реже — топазом, флюоритом, полевым шпатом, шеелитом и другими минералами, что оценивалось путем измерений коэффициентов сростаний с вольфрамитом. Эта величина отражает долю поверхности индивида, контактирующую с конкретным минералом, она связана с минеральным составом соответствующих парагенезисов и пропорциональна валовому составу руд. Общее для вольфрамита всех генетических типов — резкое преобладание кварца в сростаниях с ним, особенно, у крупных агрегатов и индивидов (70-80% поверхности сростаний). Для грейзеновых месторождений кроме кварца фиксируются: топаз, мусковит, флюорит и сульфиды (рис. 1 а, б), соотношение которых зависит от температуры и количества стадий минералообразования: с увеличением их числа увеличивается роль сульфидов (рис. 1 а). Изменения размеров выделений вольфрамита связаны с его ассоциациями (рис. 1 а, б), поздние мелкие индивиды сростаются с сульфидами, а ранние — с кварцем, слюдами и топазом. В рудах березитовых месторождений в сростаниях с вольфрамитом присутствуют сульфиды, мусковит и флюорит, а на штокверках — полевой шпат (рис. 1 в, г). В жилах ассоциации вольфрамита и эволюция размеров кристаллов аналогичны грейзенам. На штокверках ранние, мелкие вольфрамиты выделяются совместно с полевыми шпатами и кварцем в щелочных условиях, а при понижении температуры и смене рН среды на кислую — с мусковитом, флюоритом и кварцем, претерпевая при этом перекристаллизацию. Крупные



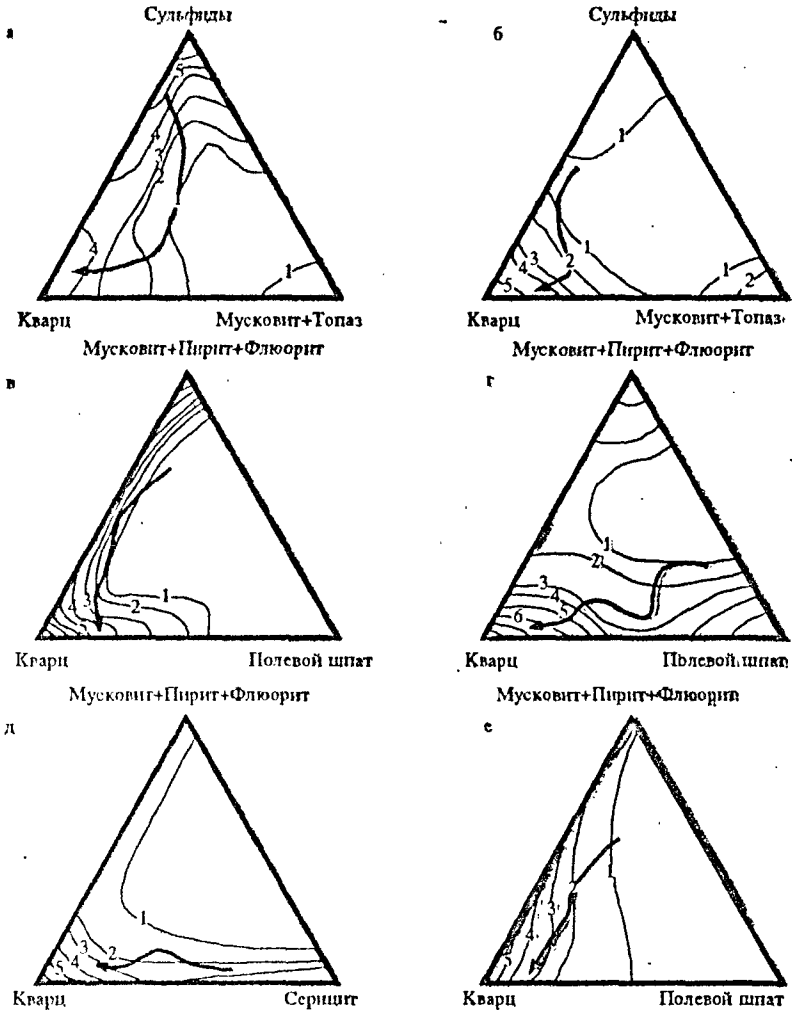


Рис. 1. Ассоциации и изменение гранулометрии кристаллов вольфрамита в рудах месторождений разных генетических типов (%): грейзеновых - Калуга (а) и Бом-Горлон (б); березитовых - Холтосон (в) и Инкур (г); гумбенитовых - Верхнекайрактинское (д); гумбенит-березитовых - Байпазар (е). Диаграммы построены по данным наблюдений сростаний вольфрамита, изолиниями показана частота встречаемости ассоциаций; стрелками - изменение размеров кристаллов.

штокверковые объекты гумбентового и гумбент-березитового типа характеризуются наличием двух принципиально различных морфогенетических разновидностей вольфрамита: первая — в кварцевых и кварц-полевошпатовых прожилках с пиритом, мусковитом и флюоритом, вторая — мелкая вкрапленность в околожильных метасоматитах с полевым шпатом, серицитом, пиритом, сидеритом (рис. 1 д, е).

Формирование гидротермальных руд на полиформационных объектах заканчивается сульфатно-цеолитной стадией, сопровождающейся интенсивной гидратацией и аргиллизацией слоистых силикатов вмещающих пород. В результате образуются специфические ассоциации, в которых наряду с традиционными минеральными фазами вольфрама фиксируются разнообразные вольфрамсодержащие гидроокислы и слоистые силикаты. В рудах зоны водообмена коры выветривания месторождений Казахстана установлено увеличение содержаний вольфрама в форме новообразованного вольфрамита в 2 раза.

**Химический состав вольфрамитов.** Анализ литературных данных и собственные наблюдения позволили считать, что ведущим фактором, влияющим на состав вольфрамитов, является температура, определяющая активность компонентов в гидротермальном растворе и его кислотно-основные свойства, степень и глубину воздействия на вмещающие породы. С ростом температуры марганцовистость вольфрамитов снижается от березитов к грейzenам, но из-за высокой изменчивости обоих параметров и влияния других факторов сила связи слабая ( $R=-0,47$ ). В пределах отдельных месторождений она возрастает ( $R=0,6-0,8$ ) и наблюдается обогащение марганцем вольфрамита в околонейтральных условиях по сравнению с ферберитом, типичным для кислых сред. На высокотемпературных грейzenовых и гидротермальных месторождениях состав минерала определяется активностью F, Mn и Fe в растворах, по мере снижения температур доминирующее значение приобретает активность серы. Установлены прямые зависимости марганцовистости вольфрамитов от марганцовистости сосуществующих слюд, содержания в рудах сульфидов; обратные — от содержания фтора в сосуществующих мусковитах и присутствия мышьяка в составе ассоциаций (арсенопирит). Железистость боковых пород пропорциональна составу минерала только в пределах рудных тел и месторождений.

Распределение железа и марганца внутри слоев структуры неравномерно, что подтверждается исследованием состава поверхности спайных сколов методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (ЭСХА). Так, атомное соотношение Mn/Fe на поверхности грейzenового

гюбнерита тождественно объемному, а у березитового — наблюдается избыток железа по сравнению с объемной концентрацией, что может объясняться только упорядочиванием компонентов по слоям в структуре минерала.

Параметры элементарной ячейки зависят от содержания гюбнеритового минерала, что описывается линейными уравнениями. Дефектность вольфрамитов исследовалась с помощью методов рентгеновской топографии, обнаруживших искажения кристаллического строения разных порядков, связанные с остаточными напряжениями и блочностью. Остаточные макронапряжения (уравновешенные в пределах индивида) в кристаллах из жильных рудных тел в два раза выше, чем из штокверковых, и уменьшаются от ранних генераций к поздним. Это объясняется снятием напряжений в результате интратрудных тектонических движений. В штокверках значения остаточных макронапряжений закономерно возрастают от ранних генераций к поздним в связи с более спокойной тектонической обстановкой минералообразования. Величина макронапряжений в отдельных кристаллах вольфрамитов постепенно нарастает от корневой части к головке и резко падает в местах расщепления кристалла. Микрорискажения структуры (уравновешенные в пределах блоков и вызывающие уширение дифракционных рентгеновских максимумов) определяются остаточными микронапряжениями и микроблочностью (5-200 нм). Значения первых возрастают от ранних генераций к поздним и в два-три раза выше в жильных рудных телах по сравнению с штокверковыми. Наоборот, микроблочность ранних генераций вольфрамитов жил и штокверков тождественна (50-70 нм). Поздние вольфрамиты в жилах имеют минимальные размеры (30-35 нм), а в штокверке — максимальные (100-110 нм). Подобная характеристика микроблочности соответствует тектоническим и температурным режимам минералообразования в указанных рудных телах.

При изучении прочностных свойств вольфрамитов основное внимание уделено твердости (в частности — микротвердости) и хрупкости. В результате экспериментов установлена линейная зависимость между микротвердостью и содержанием гюбнеритового минерала с повышенной дисперсией ее значений у вольфрамитов промежуточного состава (50-75%  $MnWO_4$ ). Сильное влияние на микротвердость оказывают дефекты кристаллического строения: микротрещины, ростовая зональность с гетерометрией, границы макро— и микроблоков. Абсолютная микротвердость растет с увеличением степени гомогенности образцов (увеличением блочности и уменьшением остаточных напряжений) и контролируется прежде всего остаточными на-

пряжениями и микроблочностью. Хрупкость минерала оценивается его измельчаемостью в стандартных условиях и характеризуется существенным разбросом ее значений (выход класса менее 0,07мм при измельчении колеблется от 10 до 40%) в зависимости от геологических (тектоника) и минерало-геохимических (состав минерала и его ассоциаций, генерации) факторов. Установлено, что в поздних генерациях жильный вольфрамит всегда более хрупкий, чем ранний. Среди минералов изоморфного ряда вольфрамитов повышенной хрупкостью обладают гюбнериты обедненные примесями ниобия и тантала. Зависимость между микротвердостью и хрупкостью слабая ( $R=0,4$ ), что объясняется разницей в локальности методов, определяющих эти свойства (первый — точечный, второй — объемный). Величиной, аккумулирующей влияние неоднородностей строения кристалла на прочностные характеристики, является коэффициент вариации микротвердости, четко связанный с хрупкостью ( $R=0,9$ ).

Плотность вольфрамитов зависит от их состава и снижается от ферберита к гюбнериту. Отклонения ее значений от линейной зависимости вызваны включениями других минералов или обилием газовой фазы в включениях.

По магнитным свойствам вольфрамиты относятся к парамагнетикам, магнетизм которых обусловлен железом и марганцем. Вследствие близких магнитных характеристик у двухвалентных катионов железа и марганца их соотношение слабо влияет на изменение магнитной восприимчивости, хотя в целом ее величина выше у ферберитов, чем у гюбнеритов. Одновременным определением магнитной восприимчивости методом Гаусса и доли трехвалентного железа в составе минерала обнаружено увеличение обоих параметров на верхних горизонтах месторождений.

**3. Технологические свойства вольфрамита.** При создании технологических схем обогащения вольфрамитовых руд использован ряд свойств вольфрамита, выделяющих его среди сосуществующих минералов: плотность, магнитная восприимчивость, морфологические и прочностные характеристики (И.Х.Влодавский, Д.С.Емельянов, Т.Е.Колтунова, Л.П.Мацуев, С.И.Митрофанов, И.Н.Плаксин, W.Dianzuo, F.V.Michell, G.Moriot, H.Weibai, W.Weisun и другие). Обогащение вольфрамитовых руд осуществляется гравитационными способами с получением черновых концентратов и их последующей доводкой электромагнитной сепарацией в полях высокой напряженности или флотогравитацией.

Анализ работы обогатительных фабрик показывает, что по мере снижения температуры образования руд ухудшается их качество и, как следствие,

технологические схемы становятся более сложными и разветвленными. Увеличиваются потери в хвостах обогащения за счет мелкого и тонкого переизмельченного вольфрамита и, в меньшей мере — повышения доли шеелита, субмикроскопических включений вольфрамовых минералов и изоморфной примеси вольфрама в породообразующих минералах (рис. 2).

Известно, что чем крупнее вкрапленность вольфрамита, тем эффективнее результаты гравитации (более 0,2 мм). Поскольку средние размеры обычно значительно превышают этот предел, то наибольшее значение для технологической оценки руд приобретают характеристики ассоциаций (срастаний) вольфрамита и его прочностные свойства, связанные с внутренним строением кристаллов. Сила связи между индивидами в минеральных срастаниях определяется механическим сцеплением высоко развитых поверхностей зерен и их электрическими взаимодействиями. Установлен ряд минералов, в котором способность вольфрамита вскрываться из срастаний с ними убывает: кварц → топаз → полевые шпаты → флюорит → карбонаты → слюды (мусковит — биотит — серицит) → пирит → арсенопирит → пирротин → сфалерит → халькопирит → молибденит → шеелит. Для раскрытия минеральных срастаний вольфрамита с силикатами (кроме слюстых) достаточно глубины дробления около 5 мм; со слюдами — 3-5 мм; с сульфидами — 0,5-1 мм. Для раскрытия срастаний с молибденитом и шеелитом необходимо более тонкое измельчение (менее 0,2-0,5 мм).

При дезинтеграции руд переизмельченная часть вольфрамита выходит за нижние пределы оптимальных размеров гравитационного обогащения. Такие зерна плохо извлекаются в гравитационные концентраты, а при размерах менее 0,07-0,05 мм теряются в хвостах. Доля таких зерен может быть значительна несмотря на крупновкрапленный характер вольфрамита в исходной руде. Как показывают опыты, характер распределения вольфрамита по классам крупности дробленной руды зависит от ее генетического типа и морфологии рудных тел, определяющих размеры вкрапленности минерала. В жильных рудах с крупным вольфрамитом его количество в тонких классах увеличивается одновременно с уменьшением размеров кристаллов от ранних генераций к поздним. Механические свойства ассоциирующих минералов существенного влияния не оказывают, так как они определяются преобладающим кварцем, и только при повышенных концентрациях сульфидов (более 20-25%) отмечается уменьшение ошламования вольфрамита. В прожилково-вкрапленных рудах переизмельчение вольфрамита максимально, что объясняется высокой прочностью вмещающих пород и дисперсией размеров выделений минерала на фоне низких содержаний. На всех месторож

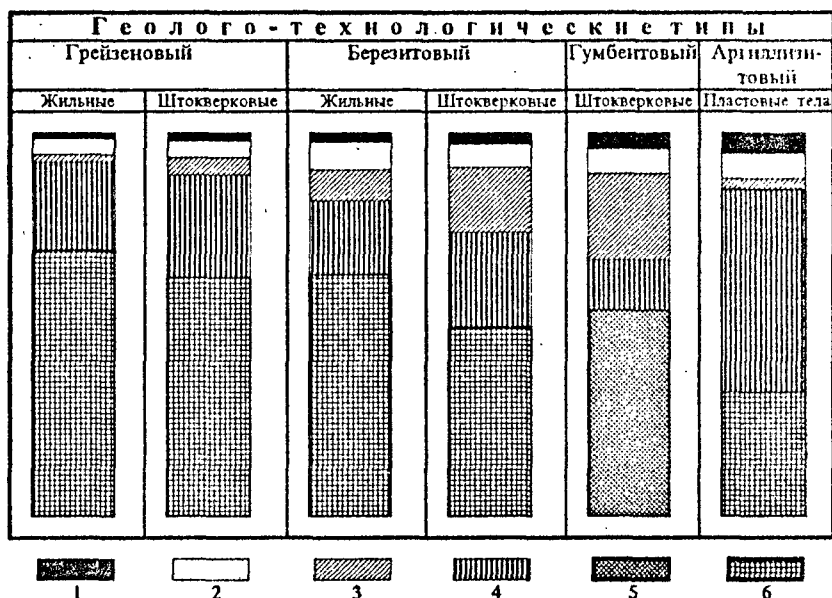


Рис. 2 Распределение вольфрама по продуктам обогащения руд промышленных объектов. Вся площадь прямоугольника соответствует 100% вольфрама в руде, заштрихованные прямоугольники - доли вольфрама в хвостах обогащения (1-4) и концентратах (5,6). 1 - Сумбмикроскопическая вкрапленность вольфрамовых фаз (< 5 мкм) и изоморфная примесь вольфрама в породообразующих и рудных минералах; 2 - окисленные формы вольфрама (тунгстит, ферро- и гидротунгстит, русселит, вольфрамсодержащие гидрокислы железа). Свободные зерна в хвостах: 3 - шешелита; 4 - вольфрамита. Концентраты: 5 - вольфрамит-цесселитовый, 6 - вольфрамитовый.

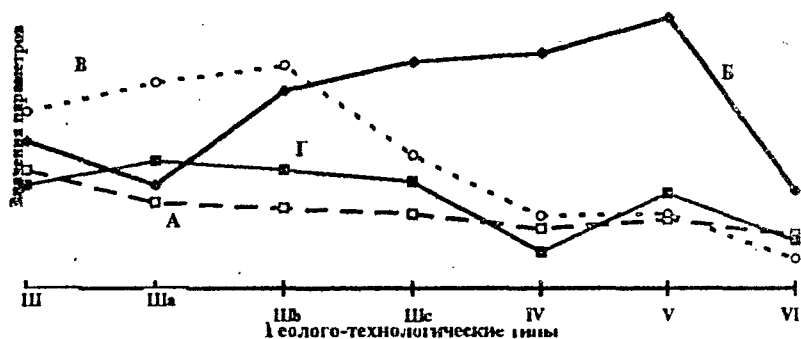


Рис. 3. Относительное изменение типоморфных и технологических свойств вольфрамитов различного генезиса. Геолого-технологические типы: III - грейзеновый; IV - гумбентовый; V - березитовый; VI - аргиллизитовый; минеральные разновидности: а - касситерит-вольфрамитовая; б - молибденит-вольфрамитовая; с - сульфидно-вольфрамитовая; А - температура гомогенизации включений (°С); Б - марганцовистость вольфрамита (%); В - размеры кристаллов (мм); Г - извлечение вольфрамита в концентраты.

дениях измельчаемость вольфрамита определяется неоднородностями его строения.

Извлечение вольфрамита из шламовых фракций может осуществляться с помощью флотации, результаты которой весьма чувствительны к его химическому составу. При использовании жирнокислотных собирателей лучше всего флотируются чистые ферберит и гюбнерит со стабильными кристаллическими решетками. При вхождении изоморфной примеси Mn в ферберит и Fe в гюбнерит флотационная активность закономерно снижается. Выход в пенный продукт промежуточных минералов с содержанием гюбнеритового минала от 40 до 65% в данных условиях нестабилен и колеблется от 2-3 до 22-34%, что связано с присутствием в образцах структур распада твердого раствора. Степень развития этих структур, а, следовательно, характеристика дефектности кристаллов, определяют результаты флотации. Так, вольфрамиты с гетерогенным блочным строением (четко выраженные структуры распада) извлекаются в пенный продукт лучше, чем рентгеновски гомогенные, но аномально напряженные образцы, в которых флотоактивность весьма низкая. Изучение химического состава поверхности вольфрамитов с разной флотуемостью (ЭСХА) показало, что реагент-собиратель активно взаимодействует прежде всего с железом, а потом с марганцем, чем объясняется лучшая флотуемость железистых вольфрамитов по сравнению с марганцевыми. Поверхность вольфрамита со структурами распада твердого раствора с олеатом натрия не взаимодействует.

**Заключение.** Материалы исследований показывают, что типоморфные свойства вольфрамита имеют важное технологическое значение. Они являются следствием всей истории формирования рудных ассоциаций, определяют выбор схемы, технологию обогащения и непосредственно влияют на результаты переработки руд. Типоморфные свойства минералов находятся в пространственно-временной зависимости от условий образования. Следовательно, технологические свойства рудных минералов и руд также эволюционируют в зависимости от изменения параметров минералообразования (температура, давление, объем, состав и свойства гидротермальных растворов и прочее), т.е., в общем случае, результаты переработки руд находятся в зависимости от их генезиса (рис 3).

Среди моноформационных месторождений наиболее легкообогатимы руды высокотемпературных грейзеновых объектов. Для полиформационных вольфрамовых месторождений технологические свойства и результаты обогащения руд ухудшаются в зависимости от увеличения времени формирования руд, а также по мере понижения температуры преобладающего метасо-

матического процесса (от грейзеновых до комплексных ферберит-антимонитовых аргиллизитовых месторождений).

### Список основных публикаций по теме диссертации:

1. Типоморфные особенности вольфрамита и их влияние на поведение в процессе обогащения // Роль технологической минералогии в расширении сырьевой базы СССР. Всес. конф., тез. докл. — Челябинск, 1986. — С.59-60. (соавторы В.М.Изонтко, С.В.Крутикова).
2. Рентгенографическое изучение дефектности вольфрамитов //Инф. Мат. XI Всес. совещания по рентгенографии минерального сырья, тез. докл. — Свердловск, 1989 — С.55.
3. Технологические аспекты изучения минеральных агрегатов и индивидов //Обогащение руд — 1989 — №6 — С.20-23. (соавтор В.М.Изонтко).
4. Особенности геолого-технологической оценки вольфрамовых руд разных промышленно-генетических типов //Переработка комплексных вольфрамовых и вольфрамомолибденовых руд и продуктов обогащения. — Л.:Механобр, 1989 — С.4-17. (соавтор В.М.Изонтко).
5. Рентгенометрический анализ./ Учебное пособие, Л.:Механобр, 1990 — 102с. (соавторы В.М.Изонтко, И.В.Михеева, И.А.Будько).
6. Geologic-technological assessment of tungsten ores of different commercial and genetic types //Geologic-technological assessment ore minerals, samples, deposit. L.:Mekhanobr, 1990 — P.28-37 (соавтор В.М.Изонтко).
7. Геолого-технологическое картирование руд Верхнекайрактинского месторождения //Геолого-технологическое моделирование рудных месторождений. — СПб:Механобр, 1993 -С.57-63. (соавторы В.М.Изонтко, Ю.А.Солопов).
8. Геолого-металлогеническое картирование — первый этап технологической оценки месторождений // Геолого-технологическая оценка и переработка рудных месторождений разных генетических типов. — СПб:Механобр, 1993 -С.14-17. (соавторы В.М.Изонтко, М.А.Ягольницер, П.С.Ростовцев).
9. Геолого-минералогические основы выбора объектов для малого горного бизнеса //Конф. по малому горному бизнесу на Северо-Западе России, тез. докл. — Петрозаводск, 1995 — С.20. (соавтор В.М.Изонтко).
10. Типоморфные и технологические свойства вольфрамита //Обогащение руд — 1997 — №2 — С.34-38.

