

На правах рукописи

БЕРНАТОНИС Павел Вилисович

ЗОНА ОКИСЛЕНИЯ ОЛИМПИАДИНСКОГО ПРОЖИЛКОВО-
ВКРАПЛЕННОГО ЗОЛОТО-СУЛЬФИДНОГО
МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Специальность 04.00.11 – геология, поиски и разведка рудных
и нерудных месторождений; металлогения

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Томск – 1999

Работа выполнена в Томском политехническом университете

Научный руководитель: доктор геолого-минералогических наук,
профессор Коробейникова А.Ф.

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук,
профессор Кучеренко И.В.
кандидат геолого-минералогических наук,
доцент Баженов В.А.

Ведущая организация: Красноярская государственная академия цветных
металлов и золота.

Защита диссертации состоится 9 июня 1999 года в 10 часов в 210 аудитории 1 корпуса на заседании диссертационного совета Д 063.80.08 при Томском политехническом университете по адресу: 634034, Россия, г. Томск, Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан 29 апреля 1999 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

П.С. Чубик

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Зоны окисления золоторудных месторождений, являющиеся объектами эксплуатации с глубокой древности, не потеряли своего значения и в настоящее время. Это обусловлено тем, что в последние годы открыты значительные запасы золота в окисленных рудах на ряде месторождений США, Канады, Австралии, Турции, России и других стран. К их числу принадлежит и уникальное по запасам золота «большееобъемное» Олимпиадинское месторождение, в зоне окисления которого сосредоточено около 40% учтенного балансом количества металла.

Руды Олимпиадинского месторождения относятся к прожилково-вкрапленному карбонатсодержащему типу. Кроме золота в промышленно значимых концентрациях в них установлены серебро, ртуть, сурьма и вольфрам, которые уже являются (Ag, Hg) или могут являться в будущем (Sb, W) элементами попутной добычи.

Прожилково-вкрапленные руды золота стали объектами повышенного геолого-промышленного интереса лишь в последние годы в связи с открытием целого ряда «большееобъемных» месторождений. Поэтому различные аспекты формирования кор выветривания таких месторождений, в отличие от зон окисления сульфидных и кварцевожильных рудных тел, изучены слабо. Большинство исследователей указывает на отсутствие отчетливо проявленной гипергенной минералогической зональности в рудных телах прожилково-вкрапленного типа. Повышенная золотоносность зоны окисления обусловлена обычно только изменением плотности руд в процессе их выветривания. Горизонты вторичного золотого обогащения установлены лишь на некоторых месторождениях Урала, Казахстана и других регионов (Нестеренко, 1991; Новгородова и др., 1985; Развитие идей..., 1998; Чекваидзе и др., 1995 и др.).

На Олимпиадинском месторождении развита уникальная по мощности зона окисления, прослеживающаяся до глубины 440 м от дневной поверхности. Это первый для России пример совмещения «большееобъемных» прожилково-вкрапленных месторождений и мощных зон окисления (Генкин и др., 1994). Поэтому «Олимпиада» является **эталонным объектом** для изучения зоны окисления комплексных прожилково-вкрапленных месторождений, залегающих в карбонатсодержащих породах.

Олимпиадинское месторождение, на котором в настоящее время открытым способом отрабатываются руды зоны окисления, вышло на лидирующее место в России по объемам добычи золота. При проведении детальной разведки месторождения окисленные руды были отнесены к одному технологическому типу без подразделения на сорта. Опыт первых лет работы золото-извлекательной фабрики (ЗИФ) показал технологическую неоднородность окисленных руд по извлечению золота.

Установлено также очень низкое попутное извлечение серебра при существующем гидрометаллургическом процессе переработки руд золота. «Технологическим сюрпризом» стало накопление ртути в продуктах электролиза, что потребовало модернизации системы газоочистки для обеспечения техники безопасности работ и охраны окружающей среды. Поэтому детальное изучение окисленных руд месторождения является актуальным и с технологической точки зрения.

И, наконец, недропользователем составлен проект на проведение поисковых и оценочных работ на рудное золото в пределах горного отвода площадью ~ 1500 км на период до 2002 года. В связи с этим материалы диссертации могут быть использованы для оценки месторождений по выходам, а также для корректировки методики и направлений поисковых и оценочных работ.

Целью работы является изучение основных закономерностей строения зоны окисления для выяснения возможного перераспределения золота и основных попутных компонентов в ее пределах, а также для оценки технологических особенностей минералогических разновидностей окисленных руд.

Основные задачи исследований:

1. Изучение минералого-геохимических особенностей окисленных и первичных руд и продуктов технологического цикла их переработки.
2. Выявление гипергенной минералогической зональности рудных тел месторождения.
3. Установление закономерностей распределения золота и основных попутных компонентов руд в зоне окисления месторождения.
4. Определение группового и видового состава микрофлоры в зоне гипергенеза рудных тел.
5. Исследование поведения золота, серебра, ртути, сурьмы, вольфрама и мышьяка при гидрометаллургической переработке окисленных руд.

Научная новизна работы. Получены новые данные, существенно уточняющие и расширяющие представления о строении зоны окисления Олимпиадинского месторождения и о распределении в ней золота и основных попутных компонентов руд. Научная новизна работы определяется тем, что изученное месторождение характеризуется целым рядом специфических черт: прожилково-вкрапленный «большеемный» характер оруденения, комплексный тип руд, карбонатсодержащий состав вмещающих пород, мощная зона окисления верхнемелового-палеогенового возраста, обусловленность современных гипергенных процессов условиями высоких северных широт и т.д. Это позволяет отнести его к числу эталонных объектов для сравнительной харак-

теристики зон окисления месторождений подобного типа. Установлена высокая бактериальная обсемененность зоны окисления, что является несколько необычным при мышьяково-сурьмяно-ртутном характере первичных руд.

Практическая ценность работы. Результаты диссертационных исследований могут использоваться при поисках и оценке золоторудных месторождений района. Установлено, что участки локализованного золотого оруденения в зоне окисления характеризуются пестрой окраской руд. Выявленные в окисленных рудах высокие концентрации ртути создают предпосылки для успешного применения ртутно-газового метода поисков золоторудных месторождений. При оценке золоторудных месторождений по выходам следует учитывать практически полное отсутствие миграции золота в зоне окисления.

Изучение минералого-геохимических особенностей продуктов переработки руд и анализ поведения золота и его элементов-спутников в существующем технологическом процессе позволили сформулировать ряд предложений по совершенствованию технологии переработки руд.

Фактическая основа работы. В основу диссертации положены материалы, собранные автором в 1996-1999 годах в составе научной группы кафедры геологии и разведки месторождений полезных ископаемых Томского политехнического университета. Для выполнения задач исследований отобраны 1872 пробы пород, руд и продуктов их переработки. В лабораторных условиях руды, отдельные их фракции, продукты переработки руд, породы и минералы были подвергнуты следующим видам анализа: 1) гранулометрический анализ - 241 проба; 2) минералогический анализ - 190 проб; 3) морфометрический анализ свободного самородного золота - 25 проб; 4) рентгеноструктурный анализ - 8 проб; 5) термический анализ - 8 проб; 6) электронно-микроскопический анализ - 8 проб; 7) микрозондовый рентгеноспектральный анализ сверхтяжелых фракций руд - 5 проб; 8) микрозондовый рентгеноспектральный анализ самородного золота - 108 золотин; 9) полный силикатный анализ - 8 проб; 10) пробирный анализ на золото - 30 проб; 11) химико-атомно-абсорбционный анализ на Au и Ag - 62 пробы; 12) флюоресцентный рентгенорадиометрический анализ - 10 проб; 13) спектроскопический анализ методом ОЖЭ-электронов - 3 пробы; 14) сцинтилляционный эмиссионный спектральный анализ на Au и Ag - 168 проб; 15) приближенно-количественный эмиссионный спектральный анализ - 1508 проб; 16) атомно-абсорбционный анализ на ртуть - 28 проб; 17) атомно-абсорбционный анализ на серебро - 46 проб; 18) спектрохимический анализ на W, Bi, Sb и Au - 28 проб; 19) спектрохимический анализ на Au - 209 проб; 20) инструментальный нейтроин-активационный анализ - 32 пробы; 21) микробиологический анализ - 8 проб.

Аналитические исследования выполнены в лабораториях Томского политехнического университета, Западно-Сибирского испытательного центра (г. Новокузнецк), Объединенного института геологии, геофизики и минералогии СО РАН (г. Новосибирск), Института геохимии СО РАН (г. Иркутск), Научно-исследовательского института ядерной физики при Томском политехническом университете, Олимпиадинского ГОКа, ГТП «Березовгеология» (г.Новосибирск). Результаты анализов обработаны статистически с помощью ПЭВМ. В отработанной части рудного тела №4 выполнена трехмерная геометризация золотого оруденения с использованием результатов пробирного анализа проб эксплуатационной разведки.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на научных конференциях в гг. Новосибирске (1999), Томске (1998, 1999), Красноярске (1999) и Иркутске (1999), а также на научных семинарах в Томском политехническом университете. По теме диссертации опубликовано и сдано в печать 7 статей и тезисов докладов.

Объем работы. Диссертация выполнена на 195 страницах. Она состоит из «Введения», 5 глав, «Заключения», списка использованной литературы, включающего 121 наименование, и содержит 18 рисунков и 70 таблиц.

Автор искренне признателен сотрудникам Томского политехнического университета Ананьеву А.А., Ананьеву Ю.С., Бетхеру М.Я., Боярко Г.Ю., Ворошилову В.Г., Зыкову Ю.Е., Ковалеву М.В., Кудрину К.Ю., Лукьяновой Е.В., Мартыновой Н.Н., Орехову А.Н., Пшеничкину А.Я., Рудику А.К., Сотникову В.А., Тарасенко В.Н., Трифоновой Н.А. и Шевелеву И.А. за большую помощь в проведении исследований и оформлении работы. Особую благодарность автор выражает своему Учителю и научному руководителю профессору Коробейникову А.Ф.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрена методика исследований. Во второй главе приведены общие сведения о геологическом строении Верхне-Енашиминского рудного узла и Олимпиадинского месторождения. В третьей главе описаны современное состояние проблемы, минералогическо-геохимические особенности первичных и окисленных руд, а также гипергенная зональность рудных тел месторождения. В четвертой главе охарактеризовано поведение золота и основных попутных компонентов руд при формировании зоны окисления. Пятая глава посвящена технологическим особенностям руд зоны окисления. В заключении изложены основные выводы и вытекающие из них практические рекомендации.

ОСНОВНЫЕ ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- 1. Залегающие в карбонатсодержащих породах прожилково-вкрапленные рудные тела Олимпиадинского месторождения характеризуются слабо выраженной вертикальной гипергенной зональностью (сверху вниз): мощная подзона полного окисления (до 440 м) через маломощную подзону выщелачивания (0,05-24 м) сменяется первичными рудами.**

Олимпиадинское месторождение локализовано в пришарнирной части (Восточный участок) и на северном крыле (Западный участок) Медвежинской антиклинали. Оно залегает в породах среднекординской подсвиты сухопитской серии. Рудные тела месторождения представлены минерализованными зонами и линзами. Их положение контролируется пачками слюдисто-карбонат-кварцевых сланцев и углеродсодержащих мусковит-кварцевых, серицит-кварцкарбонатных сланцев и карбонатных пород, складчатыми и разрывными тектоническими структурами. Рудные тела не имеют четких границ. Контуры их определяются по результатам опробования.

Первичные руды составляют основную часть запасов Западного участка и более 60% запасов Восточного участка. Они представляют собой метасоматически измененные осадочно-метаморфические породы с редкой (3-5%) вкрапленностью сульфидов. Среди рудных минералов преобладают арсенопирит, пирротин и антимонит. В подчиненных количествах встречаются пирит и бертьерит. Остальные рудные минералы отмечаются в виде незначительной примеси. Главные нерудные минералы представлены кальцитом, кварцем и мусковитом, второстепенные - хлоритом, серицитом, клиноцоизитом, редкие - доломитом, актинолитом, тремолитом и др. Текстура руд вкрапленная, вкрапленно-полосчатая и прожилково-вкрапленная.

Основным полезным компонентом первичных руд является золото. В промышленно интересных концентрациях в рудах наблюдаются также серебро, сурьма, ртуть и вольфрам.

Золото отлагалось в две стадии (Баранова и др., 1997): раннюю пирротин-арсенопиритовую (золото-I) и позднюю бертьерит-антимонитовую (золото-II, аурастибит).

Основная часть золота в первичных рудах находится (>90%) в виде тонкодисперсных («невидимых») включений в различных минералах, чаще всего в игольчатом арсенопирите и других сульфидах. Это золото имеет следующий характер распределения по классам крупности (в %; по результатам сцинтилляционного спектрального анализа): 3-5 мкм - 31,7; 5-9 мкм - 29,0; 9-12 мкм - 15,1; 12-15 мкм - 9,9; 15-25 мкм - 14,3. В 2,2% тонкодисперсных золотин выявлена примесь серебра.

Видимое свободное самородное золото чаще всего отмечается в классе крупности до 100 мкм. Единичные золотины имеют размеры до 1 мм. Микронзондовым рентгеноспектральным анализом (44 золотины) в свободном самородном золоте выявлены примеси Hg, Ag, Cu, Fe, Sb, и S. По химическому составу отчетливо выделяются ртутистое, медистое и железистое самородное золото. Повышенные содержания серебра и ртути установлены в самородном золоте-II. Свободное самородное золото имеет следующий средний химический состав (в %; с учетом всех проб): Au - 94,74; Hg - 1,63; Ag - 3,05; Cu - 0,023; Fe - 0,327; Sb - 0,117; S - 0,023.

Содержания **серебра** в первичных рудах низкие. В гравитационно-флотационных концентратах первичных руд оно выявлено в количестве от 2,88 до 79,45 г/т, что в пересчете на руду составляет 0,4-1,2 г/т. В объединенных пробах мономинеральных фракций из первичных руд установлены следующие содержания серебра (г/т): в серицитолите - 0,96; в пирите - 0,82; в арсенопирите игольчатом - 0,35; в пирротине - 0,58. Собственные минералы серебра при микронзондовых исследованиях в первичных рудах не установлены. Основное количество серебра находится в первичных рудах в виде изоморфной примеси в различных минералах. Тонкодисперсные частицы собственных минералов серебра в незначительных количествах выявлены сцинтилляционным спектральным анализом в пирротине, серицитолите, реже в пирите и марказите.

Сурьма в первичных рудах находится в виде антимонита и бертьерита, реже гудмундита, самородной сурьмы, ульманита, тетраэдрита, джемсонита и аурустибита (Генкин и др., 1994). Среднее содержание сурьмы в первичных рудах составляет (по материалам детальной разведки): на Западном участке месторождения - 0,072%, на Восточном участке - 0,21%.

Повышенные концентрации **ртути** в первичных рудах характерны для участков развития поздней бертьерит-антимонитовой минеральной ассоциации. Она наблюдается здесь в виде киновари, а также в виде примеси в самородном золоте (до 13 мас.%), антимоните и бертьерите (Яблокова и др., 1986).

Вольфрам в первичных рудах представлен шеелитом, значительно реже вольфрамитом. Установлено, что шеелит накапливается в крупных классах немагнитной и электромагнитной фракций гравиконоцентратов первичных руд. В пересчете на гравиконоцентрат его содержания колеблются от 0,3 до 6,13%, составляя в среднем 2,92%.

В приповерхностной части рудных тел №1 и №3 Западного участка месторождения и рудного тела №4 Восточного участка развиты зоны окисления. Рудное тело №1 окислено до глубины 80-110 м, а рудное тело №3 - 60 м от дневной поверхности вдоль контакта слюдисто-карбонат-кварцевых и углеродсодержащих сланцев (Генкин и др., 1994). В рудном теле №4 окисленные руды прослеживаются вдоль тектонически ослабленных зон до глубины 440 м от дневной поверхности, полностью сменяясь первичными рудами на горизонте с абсолютными отметками +280

м (Генкин и др., 1994). Благоприятными факторами формирования зон окисления рудных тел являются:

- 1) приуроченность оруденения к пришарнирной части и крыльям Медвежинской гребневидной антиклинали;
- 2) интенсивная тектоническая нарушенность пород и руд;
- 3) карбонатсодержащий состав вмещающих пород и рудоносных метасо-матитов;
- 4) контакты литологических разновидностей осадочно-метаморфических пород.

Рудные тела месторождения имеют следующий профиль вторичной зональности (сверху вниз):

- 1) подзона полного окисления;
- 2) подзона выщелачивания;
- 3) зона первичных руд.

Подзона богатых окисленных руд (окисного обогащения) и зона вторичного сульфидного обогащения (цементации) из разреза выпадают, так как минералы меди в первичных рудах практически отсутствуют.

В подзоне полного окисления выветрелые рудные метасоматиты представлены структурным элювием, пропитанным оксидами и гидроксидами Fe, Mn, Sb, As, W и Pb, которые придают окисленным рудам характерные цвета: бурый, желтый, красный, серый. В количественном отношении преобладают окисленные руды бурого и желтого цветов. Они слагают значительные по объемам участки зоны окисления. При этом окисленные руды бурого цвета наиболее характерны для флангов месторождения, а желтого цвета для центральных его частей. Окисленные руды красного и серого цветов в подчиненных количествах развиты в центральных частях месторождения. В наиболее продуктивных частях зоны окисления гипергенные руды имеют пеструю окраску. Пространственное расположение разноокрашенных разновидностей окисленных руд контролируется слоистостью и сланцеватостью пород, разрывными нарушениями и приразломными зонами рассланцевания, складчатыми структурами, первичными рудами и метасоматитами. Пестрая окраска окисленных руд является одним из прямых поисковых признаков локализованного золотого оруденения.

По гранулометрическому, минералогическому и химическому составу, а также по содержанию элементов-примесей разноокрашенные окисленные руды существенно не отличаются друг от друга. Поэтому цвет окисленных руд не может быть использован для выделения их природных разновидностей и технологических сортов.

Основными рудными гипергенными минералами в подзоне полного окисления являются оксиды и гидроксиды железа и марганца, второстепенными и редкими - оксиды и гидроксиды Sb, As, W и Pb, англезит, церуссит и др. Главные нерудные гипергенные минералы представлены гидрослюдами, второстепенные и редкие - кварцем, монтмориллонитом и каолинитом. При этом монтмориллонит и каолинит наблюдаются лишь в верхней части подзоны полного окисления.

Самородное **золото** в рудах подзоны полного окисления двух типов: остаточное (гипогенное) и новообразованное (гипергенное).

Остаточное свободное (крупное) и тонкодисперсное («невидимое») самородное золото имеет те же морфологические особенности и такую же размерность частиц, как и в первичных рудах. В зоне окисления это золото облагорожено за счет химического растворения серебра и других элементов-примесей. Из свободного остаточного золота (64 анализа) установлен частичный вынос (в мас.%) Ag (-1,69), Fe (-0,316), Hg (-0,13), S (-0,109), Си {-0,23) и Sb (-0,021). В тонкодисперсном остаточном самородном золоте примеси серебра установлены в 0,01% золотин против 2,2% в первичных рудах.

Гипергенное золото существенной роли в рудах подзоны полного окисления не играет (до 1-2%). Оно образуется чаще всего в результате разложения ауристита («горчичное золото»). Реже наблюдаются пленочные выделения гипергенного золота, локализующиеся в метаколлоидных структурах и трещинах дегидратации оксидов и гидроксидов Fe, Mn, Sb и W.

Глинистая фракция окисленных руд обеднена золотом. При среднем ее выходе 62,05% (28 проб) с ней связано 54,0% золота от руды.

Серебро в рудах подзоны полного окисления выявлено в количестве от 0,1 до 0,44 г/т при среднем содержании 0,221 г/т. Основная его часть находится в виде изоморфной примеси и тонкодисперсных выделений в различных минералах. Глинистая фракция окисленных руд обеднена серебром (21,3% от руды при выходе глинистой фракции 62,05%). В свободном остаточном самородном золоте из окисленных руд серебро выявлено в 50% проб в количестве от 0,006 до 12,17%. В тонкодисперсном остаточном самородном золоте из окисленных руд серебро практически отсутствует (0,01% золотин). Собственные минералы серебра при микросондовых исследованиях сверхтяжелых фракций трех проб окисленных руд не обнаружены.

Ртуть в окисленных рудах подзоны полного окисления атомно-абсорбционным анализом по методу холодного пара выявлена в количестве от 1,2 до 240,0 г/т при средней концентрации 37,6 г/т. Повышенные ее содержания характерны (Генкин и др., 1994; Яблокова и др., 1986 и др.) для остаточного самородного золота (до 11,23 мас.%), биндгеймита (до 10,5 мас.%), натечных оксидов и гидроксидов Fe и Mn (0,п мас.%).

Вольфрам, сурьма и мышьяк находятся в рудах подзоны полного окисления в виде тонкодисперсных выделений оксидов и гидроксидов.

В подзоне выщелачивания происходит полное растворение карбонатов и основной части сульфидов с образованием пустот от выщелачивания и карстовых микрополостей. В виде редких небольших по размерам линз и гнезд отмечаются кварцевые, лимонитовые и пиритовые сыпучки. Для этой подзоны характерно наличие привнесенных гидроксидов железа, цементирующих нередко рыхлый выветрелый материал и заполняющих пустоты от выщелачивания сульфидов и карстовые полости. В незначительных количествах иногда наблюдаются гипс и самородная сера. Мощность этой подзоны колеблется от 0,05 до 24 м. Обычно она не превышает первых метров.

Граница подзоны выщелачивания с первичными метасоматитами резкая. Она фиксируется по появлению в рудах карбонатных минералов. В верхней части зоны первичных руд метасоматиты обычно дезинтегрированы, но сохраняют свои текстурно-структурные особенности.

В корях выветривания линейного типа, развитых вдоль проницаемых зон, горизонтальная (поперечная) гипергенная зональность не проявлена или почти не проявлена.

2. Особенности распределения в зоне окисления золота и основных попутных компонентов руд обусловлены неравномерным характером первичного оруденения, в меньшей мере относительным обогащением за счет изменении плотности руд в процессе выветривания и лишь отчасти хемогенной миграцией элементов.

Перераспределение золота и основных попутных компонентов руд под влиянием гипергенных процессов изучено в ныне отрабатываемом рудном теле №4, имеющем наиболее мощную зону окисления.

С этой целью в плоскости разреза по разведочной линии 25.0 выявлен характер распределения золота (209 проб) и 26-ти элементов-примесей руд (1080 проб). Золото определяли в пробах спектрохимическим способом при нижнем пределе чувствительности 0,003 г/т и верхнем - 1 г/т. Элементы-примеси анализировали приближенно-количественным эмиссионным спектральным методом.

В отработанной части зоны окисления рудного тела №4 выполнен трехмерный анализ распределения золотой минерализации внутри рудной массы. По результатам эксплуатационного опробования (3658 проб) шести горизонтов (+660 м - +610 м) на ПЭВМ были составлены погоризонтные планы изоконцентрат золота, их аффинные проекции, трехмерные блок-диаграммы рудных столбов и их послойных сечений, планы изоконцентрат золота на профилях эксплуатационной разведки и их аффинные проекции.

Средние содержания золота и основных попутных компонентов в первичных и окисленных рудах рудного тела №4 приведены в таблице.

Параметры	Единицы измерения	Первичные руды	Окисленные руды	Коэффициент концентрации
Золото (по материалам разведки)	г/т	4,6	10,8	+2,3
Сурьма	г/т	211,7	1427,0	+6,7
Вольфрам	г/т	55,8	543,4	+9,7
Серебро	г/т	0,2	0,29	+1,45
Мышьяк	г/т	898,0	974,0	+1,1
Плотность руд (по материалам разведки)	т/м ³	2,7	1,6	-1,7

Золото. Анализ материалов детальной разведки месторождения, характера распределения золота в плоскости разреза 25.0 и в отработанной части рудного тела №4 позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Участки обогащения руд на фоне средних и бедных содержаний контролируются радиальными разрывными нарушениями северо-восточного простирания, их пересечениями с концентрическими разрывами северо-западного простирания и оперяющими подновленными трещинами субширотного простирания.
2. Рудные столбы с концентрацией 15 г/т Au имеют субвертикальное залегание, трубообразную форму и уплощенность вдоль разрывов.
3. Заметного перераспределения золота при окислении руд не наблюдается. Горизонтально залегающие пояса вторичного золотого обогащения в изученной части зоны окисления рудного тела №4 отсутствуют. Не установлено даже участков локального обогащения над останцами первичных руд.

В рудном теле №4 процессы окисления наиболее интенсивно развиты вдоль Главного разлома. Зона его влияния характеризуется совмещением двух продуктивных (ранней и поздней) минеральных ассоциаций, а, следовательно, наиболее локализованным золотым оруденением. Наблюдаемое содержание золота в зоне окисления, в 2,3 раза превышающее его концентрацию в первичных рудах при изменении их плотности только в 1,7 раза, объясняется первичным характером оруденения и уменьшением плотности руд в процессе их выветривания.

Вкрапленный характер оруденения и карбонатсодержащий состав вмещающих пород делают невозможным сколько-нибудь заметное перераспределение золота в зоне окисления.

Облагораживание остаточного галогенного самородного золота и отложение *in situ* незначительных количеств гипергенного золота на ранних стадиях формирования зоны окисления происходят с участием серосодержащих соединений, а на поздних - хлоридных и гидроксильных. Имеет также место микробиологическое растворение золота, о чем свидетельствует высокая бактериальная обсемененность зоны окисления.

Сурьма. В плоскости разреза по разведочной линии 25.0 в зоне первичных руд выявлены лишь единичные небольшие участки с повышенными содержаниями сурьмы. Исключительно высокие ее концентрации наблюдаются в окисленных рудах, что обусловлено совмещением Главного разлома, поздней бертьерит-антимонитовой минеральной ассоциации и линейной коры выветривания. Содержание сурьмы в последней в 6,7 раза выше, нежели в первичных рудах.

Таким образом, высокие содержания сурьмы в окисленных рудах обусловлены первичным характером ее распределения и относительным вторичным обогащением при подчиненной роли хемогенного перераспределения в гипергенных условиях.

Вольфрам. Характер распределения в первичных рудах вольфрама определяется закономерностями локализации дорудных шеелитоносных метасоматитов и поздней бертьерит-антимонитовой минеральной ассоциации с шеелитом-II (Баранова и др., 1997). Среднее содержание вольфрама в первичных рудах составляет 55,8 г/т. Почти 10-кратное увеличение среднего содержания (543,4 г/т) вольфрама в зоне окисления наблюдается из-за ее совмещения с участками богатого первичного шеелитового оруденения.

Серебро. Контуры золотого и серебряного оруденения совпадают лишь в общих чертах. Повышенные концентрации серебра контролируются субвертикальными ослабленными тектоническими зонами, которые отчетливо прослеживаются даже в коре выветривания. Окисление руд не сопровождается изменением закономерностей пространственного распределения серебра. При этом среднее его содержание в зоне окисления в 1,45 раза выше, чем в первичных рудах. Такой характер сереброносности зоны окисления обусловлен относительным обогащением за счет выветривания руд и незначительным гипергенным перераспределением металла.

Мышьяк. В контуре рудного тела №4 в плоскости разреза по разведочной линии 25.0 мышьяк имеет пятнистый характер распределения, одинаковый и в зоне первичных руд, и в зоне окисления. В первичных рудах среднее содержание мышьяка составляет 989 г/т против 974 г/т в окисленных рудах. По-видимому, вынос мышьяка из зоны окисления не компенсирует относительного обогащения им вторичных руд из-за уменьшения их плотности в процессе выветривания.

3. Современные геохимические процессы в зоне окисления Олимпна-динского месторождения протекают при заметном участии микроорганизмов.

Микроорганизмы играют существенную роль в геохимических процессах, протекающих в коре выветривания. Жизнедеятельность микроорганизмов повышает миграционную способность многих химических элементов, в том числе и золота, в зоне окисления рудных месторождений (Кузнецов и др., 1962; Калабин, 1969; Каравайко и др., 1972; Удодов и др., 1981, 1983 и др.). Они используются также при бактериальном выщелачивании руд золота и при извлечении металла из золотосодержащих технологических растворов (Маракушев, 1991 и др.).

Это предопределило необходимость изучения группового и видового состава микроорганизмов в зоне окисления месторождения. Основные задачи исследований сводились, во-первых, к выяснению возможной роли микроорганизмов в формировании зоны окисления и биохимической трансформации золота, во-вторых к выявлению адаптировавшихся к условиям As-Sb-Hg руд штаммов *Thiobacillus ferrooxidans* и *Thiobacillus thiooxidans*, которые можно использовать для биовыщелачивания золота.

Для решения задач исследований на микробиологические анализы были отобраны окисленные руды из керна скважин (3,0 - 31,0 м от дневной поверхности) и с эксплуатационного горизонта +610 м (70 м от дневной поверхности). Материал керновых проб был подвергнут анализам на определение видового состава тионовых бактерий, а также на выявление микроорганизмов, окисляющих мышьяк. В рудах горизонта +610 м идентифицировали микроорганизмы, участвующие в геохимических циклах углерода, азота, кремния и серы.

В окисленных рудах из приповерхностной части зоны окисления выявлены автотрофные тионовые бактерии и микроорганизмы, резистентные к мышьяку. Среди автотрофных тионовых бактерий преобладающим в количественном отношении видом является *Th. ferrooxidans*. В незначительных количествах установлены *Th. thiooxidans*, *Thiobacillus thiooxydans*, *Thiobacillus thioparus* и *Thiobacillus denitrificans*. Окисляющие мышьяк микроорганизмы наблюдаются во всех пробах, но в заметном количестве только в одной из них. Миксо-трофные штаммы тионовых бактерий в приповерхностной части зоны окисления не обнаружены.

В окисленных рудах горизонта +610 м преобладают бактерии, трансформирующие соединения углерода и азота. Обращает на себя внимание высокая численность денитрифицирующих микроорганизмов и уробактерий. В подчиненных количествах выявлены миксотрофные тионовые бактерии *Thiobacillus novellus*, *Thiobacillus intermedius* и *Thiobacillus perometabolis*, окисляющие поли-тионаты и серу в присутствии органического вещества. Автотрофные тионовые бактерии *Th. Ferrooxidans*, *Th. thiooxidans*, *Th. thioparus* и *Thiobacillus* «у» в рудах горизонта +610 м не обнаружены. Это обусловлено, по-видимому, недостаточной аэробностью блока окисленных руд, из которого были отобраны пробы на микробиологические исследования. Косвенным подтверждением данного факта является значительное развитие денитрифицирующих анаэробных бактерий при подчиненном распространении нитрифицирующих аэробных микроорганизмов.

Таким образом, изучение микрофлоры в зоне окисления Олимпиадинского золоторудного месторождения позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Обработка окисленных руд открытым способом не приводит к заметной активизации бактериальных процессов, что подтверждается отсутствием автотрофных тионовых бактерий на вскрытых глубоких горизонтах месторождения.
2. Окисленные руды имеют высокую бактериальную обсемененность, что свидетельствует о несомненном участии микроорганизмов в формировании зоны окисления и в процессах миграции золота в ее пределах.
3. В окисленных рудах выявлены *Th. ferrooxidans* и *Th. thiooxidans*, штаммы которых чаще всего используются при биологическом окислении сульфидных концентратов.

4. Основными минералого-геохимическими особенностями продуктов переработки окисленных руд являются: повышенное содержание остаточного золота в сульфидной фракции хвостов сорбционного выщелачивания, значительная отравленность отрегенированной ионообменной смолы химическими соединениями, накопление золота и ртути в продуктах газоочистки, низкая сорбируемость серебра на смолу из цианистых растворов и слабое вовлечение сурьмы, вольфрама и мышьяка в технологический процесс.

В настоящее время на Олимпиадинском золоторудном месторождении открытым способом обрабатываются руды зоны окисления рудного тела №4. Окисленные руды перерабатываются гидрометаллургическим способом.

Добываемые попутно из останков неокисленных метасоматитов первичные руды обогащаются гравитационно-флотационным методом с получением сульфидных концентратов, золото из которых извлекается затем биогидрометаллургическим способом (Аслануков, 1997).

Анализ фактического поведения Au, Ag, Hg, Sb, As и W в существующем гидрометаллургическом процессе проведен на основе изучения минералого-геохимических особенностей продуктов переработки окисленных руд.

Золото. Учитывая средние содержания золота в продуктах питания ЗИФ (11,7 г/тв изученных пробах) и кеках выщелачивания (0,43 г/т в твердой фазе хвостов), в процессе планирования руд в раствор переходит 96,3% Au.

Установлена хорошая извлекаемость золота из глинистой фракции окисленных руд. После цианирования руд среднее содержание в глинистой фракции золота понизилось с 41,4% от питания до 10,0% от хвостов. Непроцианированное золото представлено в основном частицами тонких классов крупности (до 12 мкм).

Повышенные концентрации остаточного золота (54 г/т) выявлены в тяжелой (сульфидной) алеврито-песчаной фракции хвостов. Ввиду незначительного выхода тяжелой фракции (в среднем 0,05% по массе) использование энергозатратных технологий гравитационного доизвлечения золота из хвостов сорбционного выщелачивания экономически нецелесообразно. Однако, значительный перепад высот от ЗИФ до хвостохранилища позволяет применять самотечные каскадные системы конусных и спиральных концентраторов, на которых можно получить до 3-5 % промпродукта от исходного объема хвостов. Такое количество промпродукта реально обработать в гидроциклонах с получением богатого золотосодержащего концентрата.

Из пульпы на ионообменную смолу сорбируется 24,1 кг химических элементов. Ионообменная смола, направляемая после обеззолочения и регенерации в цикл сорбции, содержит остаточное золото (145 г/т), а также 7,0 кг/т других компонентов. Наличие такого количества компонентов в смоле приводит к ее «отравлению». С целью снижения эффекта «отравления» ионообменной смолы следует ревизовать технологию ее регенерации, исходя из элементного состава фактических оборотных компонентов.

При отжиге продуктов электролиза и их плавке часть золота улетучивается с отходящими газами и накапливается в шламах скруббера (2000 г/т) и в активированном угле (565 г/т) фильтров газоочистки. В шламах скруббера основная часть золота находится в виде амальгамы. Продукты газоочистки выводятся из производства как токсичные отходы. Следует накапливать эти отходы для последующего извлечения из них благородного металла.

Серебро. При содержании серебра в окисленных рудах 0,221 г/т и хвостах цианирования 0,007 г/т извлечение Ag составляет 96,8%. Основные потери серебра происходят с жидкой фазой пульпы из-за плохой его сорбируемости на смолу. При обезвреживании обеззолоченной пульпы гипохлорсульфитом натрия должно происходить образование слабо растворимого в воде хлорида серебра и технологическое рассеяние его в отвальных хвостах.

Из насыщенной ионообменной смолы тиомочевинной десорбируется 97,5% серебра. Так как тиомочевинные соединения золота весьма устойчивы, то перед электролизом с помощью гипохлорсульфита натрия их переводят в хлориды. При этом большая часть серебра должна переходить в осадок в виде слабо растворимого хлорида.

Увеличение извлечения серебра при существующем технологическом процессе возможно за счет переработки обеззолоченных растворов пульпы сорбционного выщелачивания и за счет вывода из оборота шламов разложения тиомочевинных растворов. Целесообразность введения этих операций должна быть определена экономическими расчетами.

Ртуть. Наличие ртути в самородном золоте обуславливает ее переход в растворенное состояние при цианировании руд. Имея сходные с золотом электрохимические свойства, она концентрируется в продуктах электролиза. Отжиг и плавка этого материала сопровождаются улетучиванием ртути и накоплением ее в шламах скруббера и активированном угле фильтров газоочистки. Металлическая ртуть из шламов скруббера может быть выделена и реализована в качестве товарного продукта. Предварительно из нее должно быть извлечено золото.

Сурьма, мышьяк и вольфрам. Эти элементы находятся в окисленных рудах в виде трудно растворимых оксидов и гидроксидов. Поэтому в технологический процесс они вовлекаются слабо и практически полностью накапливаются в отвальных хвостах.

Сурьма выявлена в насыщенной золотом и отрегенированной ионообменной смоле, лигатурном золоте, шлаках плавки золота и в активированном угле фильтров газоочистки.

Мышьяк установлен лишь в шлаках плавки золота, шлаках скруббера и в активированном угле фильтров очистки газов.

Вольфрам обнаружен в шлаках плавки золота и в активированном угле фильтров очистки газов. В ЦНИГРИ разработана принципиальная гидрометаллургическая схема извлечения вольфрама из хвостов цианирования окисленных руд (Яблокова, Сандомирская, 1998).

Установлено также, что существуют два принципиально возможных направления совершенствования технологии переработки первичных руд.

В процессе изучения минералогического состава гравиконоцентратов первичных руд попутной добычи было выявлено, что в них накапливается **шеелит**. Он концентрируется в материале крупных классов, что создает предпосылки для его извлечения. Наиболее реально выделение шеелита из гравиконоцентрата первичных руд с использованием магнитной и электростатической сепарации.

При **биогидрометаллургическом извлечении золота** из сульфидных концентратов целесообразно использовать адаптировавшиеся к условиям As-Sb-Hg руд месторождения штаммы *Th. ferrooxidans* и *Th. thiooxidans*.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Бернатонис П.В. Поведение золота в зоне окисления Олимпиадинского золоторудного месторождения // Совершенствование технологий поиска и разведки, добычи и переработки полезных ископаемых. Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Красноярск: ГАЦМ и 3, 1999. С. 3.
2. Бернатонис П.В. Поведение ртути в зоне окисления Олимпиадинского золоторудного месторождения // Материалы XXXVII Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс». Геология. Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 1999. С. 44.
3. Бернатонис П.В. Сереброносность Олимпиадинского золоторудного месторождения // Материалы 18 Всероссийской молодежной конференции «Геология и геодинамика Евразии». Иркутск: ИЗК СО РАН, 1999. С. 89.
4. Бернатонис П.В., Боярко Г.Ю. Вторичная зональность Олимпиадинского золоторудного месторождения // Структурный анализ в геологических исследованиях. Материалы Международного научного семинара. Томск: ЦНТИ, 1999. С. 171-173.
5. Бернатонис П.В., Боярко Г.Ю. Структурно-литологический контроль вольфрамового оруденения на Олимпиадинском месторождении золота // Структурный анализ в геологических исследованиях. Материалы Международного научного семинара. Томск: ЦНТИ, 1999. С. 174-176.
6. Бернатонис П.В., Трифонова Н.А. Состав микрофлоры в зоне окисления Олимпиадинского золоторудного месторождения // Обской вестник. 1999. №1 (в печати).

7. Боярко Г.Ю., Бернатонис П.В. Морфология рудных столбов Олимпиадинского золоторудного месторождения // Структурный анализ в геологических исследованиях. Материалы Международного научного семинара. Томск: ЦНТИ, 1999. С. 177-180.