

Р.А. Кемкина, И.В. Кемкин

**ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ РУД  
И МИНЕРАЛОГЕОХИМИЧЕСКАЯ  
МЕТОДИКА ОЦЕНКИ  
ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ  
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ  
ТОКСИЧНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ  
НА ПРИМЕРЕ ПРАСОЛОВСКОГО  
АУ-АГ МЕСТОРОЖДЕНИЯ**



**RUSSIAN FEDERAL AGENCY OF EDUCATION**

**Far East State Technical University  
(FEPI by V.V. Kuibyshev)**

**RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES**

**FAR EASTERN BRANCH**

**Far East Geological Institute**

**R.A. Kemkina, I.V. Kemkin**

**MINERAL COMPOSITION OF ORES AND  
MINERALOGICAL-GEOCHEMICAL TECHNIQUE OF A RATING  
OF POTENTIAL POLLUTION OF AN ENVIRONMENT BY TOXIC  
ELEMENTS (ON AN EXAMPLE OF PRASOLOVKA AU-AG  
DEPOSIT)**

**VLADIVOSTOK**

**DALNAUKA**

**2007**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ РФ**

**Дальневосточный государственный технический  
университет (ДВПИ им. В.В. Куйбышева)**

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК**

**ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЕ ОТДЕЛЕНИЕ**

**Дальневосточный геологический институт**

**Р.А. Кемкина, И.В. Кемкин**

**ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ РУД И МИНЕРАЛОГО-  
ГЕОХИМИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО  
ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ТОКСИЧНЫМИ  
ЭЛЕМЕНТАМИ (НА ПРИМЕРЕ ПРАСОЛОВСКОГО АУ-АГ  
МЕСТОРОЖДЕНИЯ)**

**ВЛАДИВОСТОК**

**ДАЛЬНАУКА**

**2007**

УДК 553.41:504.064/9(571.6)

**Кемкина Р.А., Кемкин И.В.** ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ РУД И МИНЕРАЛОГОО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ТОКСИЧНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ (НА ПРИМЕРЕ ПРАСОЛОВСКОГО АУ-АГ МЕСТОРОЖДЕНИЯ). Владивосток: Дальнаука, 2007. 212 с. + цв. вкл. ISBN 978-5-8044-0859-7

По результатам детальных вещественно-минералогических исследований руд Прасоловского месторождения и выявленных особенностей химического состава рудных минералов осуществлена типизация рудной минерализации, выделены минеральные парагенезисы и генерации в различных типах руд, выявлены и исследованы ранее неизвестные на месторождении минералы и новые минеральные фазы, не описанных еще в литературе. Рассчитаны кристаллохимические формулы рудных минералов и определены состав, количества и формы вхождения токсичных элементов в кристаллическую структуру минералов. Дана качественная и количественная прогнозная оценка экологической угрозы для окружающей среды при промышленной отработке данного месторождения. Предложенная методика может быть использована для любых месторождений.

Книга рассчитана на широкий круг специалистов в области геологии, минералогии, геоэкологии, природопользования, переработки и обогащения МПИ, а также рекомендуется для практического использования в учебном процессе.

Ил. 62, табл. 52, библи. 167 + вкл.

**Kemkina R.A., Kemkin I.V.** MINERAL COMPOSITION OF ORES AND MINERALOGICAL-GEOCHEMICAL TECHNIQUE OF A RATING OF POTENTIAL POLLUTION OF AN ENVIRONMENT BY TOXIC ELEMENTS (ON AN EXAMPLE OF PRASOLOVKA AU-AG DEPOSIT). Vladivostok: Dalnauka, 2007. 212 p. + color inserts. ISBN 978-5-8044-0859-7

Based on the results of detailed mineralogical researches of ores of the Prasolovka deposit and revealed features of the chemical composition of ore minerals the various types of ore mineralization are established in which the mineral parageneses and generation are allocated. An earlier unknown on Prasolovka deposit ore minerals and new mineral phases which have been not described still in the literature are also revealed and investigated. The crystallochemical formula of ore minerals are designed and the composition and quantities of toxic elements in each minerals are determined. The qualitative and quantitative rating of ecological threat for an environment at industrial improvement of this deposit are given. The offered technique can be used for anyone deposits.

The book is addressed to a wide circle of the experts in the field of geology, mineralogy, geoecology, processing and enrichment of ore deposits, and also it is recommended for practical use in educational process.

Ill. 62. tabl. 52, bibl. 167 + inserts

Ответственные редакторы В.И. Петухов, А.В. Зиньков  
Рецензенты А.К. Седых, В.Г. Хомич

Утверждено к печати Ученым советом ИИСЭ ДВГТУ и ДВГИ ДВО РАН

ISBN 978-5-8044-0859-7  
© Дальнаука, 2007  
© ИИСЭ ДВГТУ, ДВГИ ДВО РАН, 2007  
© Кемкина Р.А., Кемкин И.В., 2007

## ВВЕДЕНИЕ

В течение последнего столетия отмечается резкая активизация освоения человечеством земных недр, что проявляется в увеличении роста объемов добычи полезных ископаемых. Вместе с тем, на большинстве месторождений в промышленное освоение вовлекаются, главным образом, богатые руды, а низкокондиционная рудная масса складывается в виде горнотехнических отвалов или хвостохранилищ. Извлеченная на поверхность и складированная рудно-породная ассоциация с одной стороны неизбежно испытывает влияние природных факторов, видоизменяясь и преобразуясь под их воздействием, а с другой – сама оказывает активное влияние на окружающие ее природные компоненты. В этой связи проблема оценки воздействия неэксплуатируемой части минерального сырья в процессе обработки месторождений на окружающую среду и здоровье человека весьма актуальна, так как рудные месторождения представляют собой природные геохимические аномалии, являющиеся потенциальными и реальными источниками токсичных элементов. В ряду наиболее экотоксичных месторождений вулканогенные золоторудные занимают одно из первых мест, поскольку их руды содержат широкий спектр токсичных элементов, большинство из которых относятся к 1-й и 2-й группам опасности. Учитывая то, что при обработке данных месторождений основное внимание уделяется одному (Au), максимум двум полезным компонентам (+ Ag), вопросы, связанные с выяснением потенциальной экологической опасности незадействованных рудных минералов, приобретают особую важность.

Основная цель настоящей работы заключалась в выяснении потенциальной экологической опасности загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами, которые будут поступать из образующихся техногенных отвалов и хвостохранилищ в процессе обработки Прасоловского вулканогенного Au-Ag месторождения. Для достижения данной цели был детально изучен минеральный состав руд Прасоловского месторождения, выделены минеральные парагенезисы, установлен характер взаимоотношений рудных минералов с основными промышленными минералами, на основании чего определен круг потенциально экологически опасных составляющих горнотехнических отвалов. Весьма важным было также выяснение особенностей химического состава рудных минералов и определение количества и форм вхождения токсичных элементов в их кристаллические структуры. Основываясь на результатах исследований химического состава блеклых руд, как основных в количественном отношении носителей токсичных металлов, были выделены различные их минеральные виды и разновидности и прослежена эволюция состава рудогенерирующих растворов, продуцирующих экотоксиканты. И, наконец, для качественной и количественной оценки потенциальной экологической угрозы окружающей среде и осуществления прогноза загрязнения в случае промышленной обработки данного месторождения выполнено компьютерное моделирование физико-химических процессов минерального преобразования рудных минералов в условиях гипергенеза.

В основу данной монографии положены результаты собственных полевых работ на Прасоловском месторождении, а также лабораторные исследования по изучению вещественного и минерального состава руд, их текстурно-структурных особенностей, внутреннего строения и моделирования поведения рудных минералов в условиях гипергенеза. При сопоставлении полученных данных с аналогичными золотосеребряными месторождениями проанализирован огромный литературный материал.

Основными методами при решении обозначенных выше задач являлись: микроскопическое изучение полированных шлифов в отраженном и поляризованном свете, изучение полированных шлифов под биноклем, рентгеноспектральный (электронно-зондовый), рентгеноструктурный и ИК-спектроскопический анализы, а также моделирование поведения рудных минералов в условиях гипергенного преобразования. В работе использованы результаты изучения более 300 полированных шлифов, порядка 50 шлифовок шлифов руд, 580 электронно-зондовых, 60 рентгеноструктурных, 25 ИК-спектроскопических анализов и около 50 моделей физико-химического изменения рудных минералов. Микроскопическое изучение проведено на основе минераграфического анализа, а компьютерное моделирование – на базе программного продукта «Селектор-Windows». Рентгеноспектральные анализы выполнены на электронных микроанализаторах “Camebax” (ИВиС ДВО РАН, аналитик Чубаров В.М.) и “JXA-5A” (ДВГИ ДВО РАН, аналитики Сапин В.И. и Екимов Н.И.), рентгеноструктурные – на приборе ДРОН-3 (ДВГИ ДВО РАН, аналитик Т.Б. Афанасьева), ИК-спектроскопические – на инфракрасном спектрометре UR-20 (ДВГИ ДВО РАН, аналитик Г.А. Нарнов).

В результате проведенных исследований детально изучен минеральный состав руд Прасоловского месторождения и осуществлена их типизация, выделены минеральные парагенезисы и генерации в различных типах руд, впервые выявлено и исследовано пять ранее неизвестных на месторождении минералов и одиннадцать новых минеральных фаз, не описанных еще в литературе. Исследованы особенности химического состава рудных минералов, на основе чего рассчитаны их кристаллохимические формулы и определены количества и формы вхождения токсичных металлов в их кристаллическую структуру. Выделено и описано более тридцати видов и разновидностей блеклых руд, принадлежащих четырем генерациям, установлена последовательность их кристаллизации, на основании чего воссоздана эволюция состава рудогенерирующих растворов. По результатам моделирования сделан прогноз потенциального загрязнения прилегающей к месторождению территории токсичными металлами в случае его вероятной отработки.

Научные результаты, изложенные в работе, в совокупности с данными текстурно-структурных исследований руд имеют большое практическое значение для определения качественной характеристики руд и выбора методов их обогащения. Учитывая результаты прогноза потенциальной экологической опасности от перемещенных в отвалы рудных минералов, в целях подготовки эффективных природоохранных мероприятий при отработке Прасоловского ме-

сторождения, в работе даны некоторые рекомендации по снижению вредного влияния техногенных накоплений на окружающую среду. Предложенная методика оценки и прогноза загрязнения окружающей среды токсичными элементами, основанная на совокупности данных вещественно-минералогического состава руд и моделирования их поведения в зоне гипергенеза, может быть использована для любых рудных месторождений.

За плодотворное сотрудничество и действенную помощь авторы благодарят О.В. Авченко, В.И. Гвоздева, В.Г. Гоневчука, А.В. Зинькова, В.П. Звереву, Ю.Г. Пискунова, Л.А. Саматову, А.К. Седых, И.А. Тарасенко, В.Г. Хомича, чьими полезными советами и консультациями пользовались в ходе научных исследований и в процессе написания данной работы.

Авторы также признательны В.Т. Казаченко за обсуждение отдельных вопросов, касающихся минералогии и кристаллохимии блеклых руд и предоставление части рентгеноспектральных анализов некоторых рудных минералов и аншлифов.

Особую благодарность авторы выражают А.И. Обжирову (ТОИ ДВО РАН), Н.И. Павлову (ИИСЭ ДВГТУ), Н.Б. Кондрикову (ИХПЭ ДВГУ) за критическую оценку работы, конструктивные замечания и ценные советы, а также В.М. Чубарову (ИВиС ДВО РАН), В.И. Сапину, Н.И. Екимовой, Т.Б. Афанасьевой и Г.А. Нарнову (все ДВГИ ДВО РАН) за аналитические работы.

## **ГЛАВА 1. КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СЕВЕРО-КУНАШИРСКОГО РАЙОНА И СТРУКТУРНАЯ ПОЗИЦИЯ ПРАСОЛОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

Прасоловское месторождение расположено в северо-западной части о. Кунашир – самого южного острова Большой Курильской гряды. Последняя представляет собой цепочку вулканических островов (рис.1-1), протягивающихся в северо-восточном направлении от полуострова Сиретоко (северо-восточная оконечность о. Хоккайдо, Япония) до мыса Лопатка (южная оконечность полуострова Камчатка). В структурно-тектоническом отношении Курильские острова интерпретируются как относительно долгоживущая, как минимум с раннего миоцена и поныне (Неверов, 1970; Сергеев, 1976; Пискунов, 1984; Происхождение..., 1985; Данченко, 1986, 1987, 1990 и др.), а по некоторым данным (Говоров, 2002 и др.) со среднего эоцена и поныне, островодужная система, продолжение которой фиксируется в структурах п-ва Камчатка и о. Хоккайдо. Островодужная природа Большой Курильской гряды явилась, по сути, определяющим фактором их геолого-структурной индивидуальности. В геологическом строении Курильских островов и, соответственно, Прасоловского месторождения принимают участие, главным образом, вулканогенно-осадочные и вулканогенные образования, составляющие группу стратифицированных отложений, и комагматичные им дайковые, субвулканические и интрузивные породы.

### **1.1. Стратифицированные образования Северо-Кунаширского района**

Схема стратиграфии Северо-Кунаширской площади (в пределах которой локализуется Прасоловское месторождение) приводится по результатам геолого-съёмочных работ масштаба 1:200000 и 1:50000, проведенных геологами Сахалинской ГРЭ в 1970-х и 1980-х годах. Наиболее древние отложения рассматриваемого района выделены в **кунаширскую свиту** ранне(?)–среднемиоценового возраста. Отложения кунаширской свиты распространены, главным образом, в северо-западной части о. Кунашир (рис. 1-2) вдоль западного его побережья, севернее устья р. Золотая и характеризуются двумя фациальными разновидностями стратотипа. На побережье пролива Екатерины (северо-западная оконечность о. Кунашир) в разрезе свиты резко преобладают лавы и туфы от основного и среднего (в нижней части) до умеренно-кислого и кислого состава (в верхней части), при подчиненной роли туфопесчаников и туфоалевролитов. На побережье Кунаширского пролива и на водоразделе рек Золотая-Тятина свита представлена преимущественно туфопесчаниками, кремнистыми алевролитами и аргиллитами, сменяющимися сверху субаэральными фациями средних, умеренно-кислых и кислых лав и туфов. В районе м. Прасолова (в радиусе 1 км) в разрезе свиты часты прослои туфопесчаников с углистым детритом, туфогравелитов и туфоконгломератов, содержащих гальку гранитоидов. Мощность свиты колеблется от 750 до 1000 м, при этом ее верх-



Рис. 1-1. Местоположение Прасоловского месторождения

ние части в значительной степени эродированы. Нижняя граница свиты не установлена, а с перекрывающимися позднемиоцен-плиоценовыми образованиями алахинской свиты кунаширская свита имеет тектонические контакты, хотя изредка наблюдаются признаки трансгрессивного (с угловым и азимутальным несогласием) налегания первой на второй. Риолиты свиты имеют калий-аргоновые датировки 10 млн. лет (Дуничев, 1983), а туфопесчаники и туфоалевролиты содержат спорово-пыльцевые и диатомовые комплексы среднего и средне-позднего миоцена.

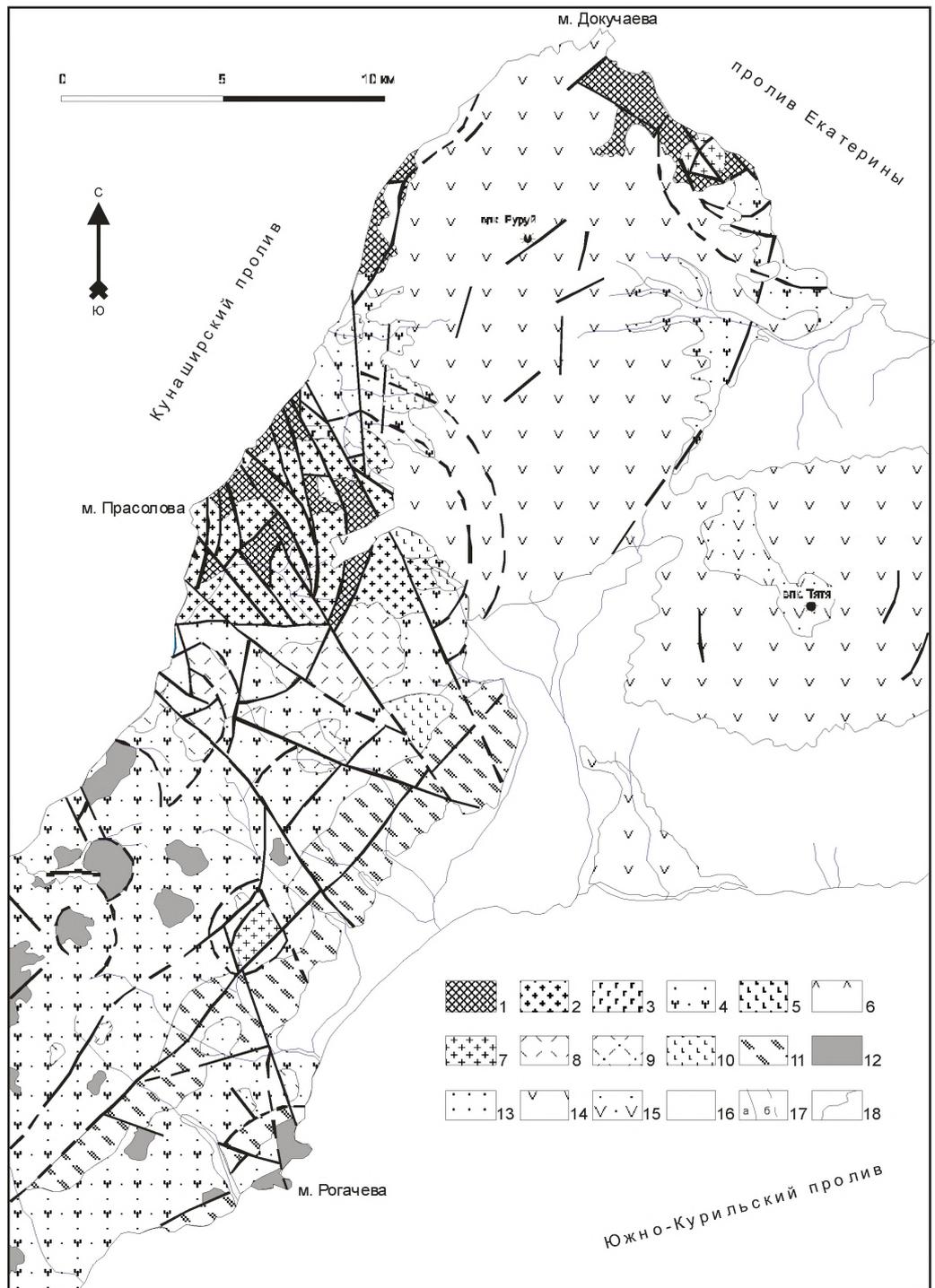


Рис. 1-2. Схематическая геологическая карта Северо-Кунаширского района (по: В.В. Мицук и др., 1987)

Вулканогенные образования кунаширской свиты относятся к базальт-андезит-дацит-риолитовой формации (Происхождение..., 1985; Данченко, 1986, 1990 и др.). Почти повсеместно породные ассоциации свиты затронуты низко- и среднетемпературной пропилитизацией. В районе м. Прасолова гравийные и псаммитовые туффиты, туфы и игнимбриты содержат гнездово-вкрапленное колчеданно-полиметаллическое оруденение, а туфопесчаники серно-колчеданную минерализацию. Разломы в породах кунаширской свиты часто сопровождаются сульфидно-кварцевыми зонами полиметаллической и колчеданно-полиметаллической минерализации или убогосульфидными золото-теллуридно-кварцевыми жилами.

Залегающие выше позднемиоцен-раннеплиоценовые образования объединены в **алехинскую свиту**. Отложения последней наиболее распространены в южной и восточной частях о. Кунашир (см. рис. 1-2). На побережье Кунаширского пролива в составе свиты преобладают туффито-туфовые и эффузивные фации от андезитов (в нижней части) до дацитов и риолитов (в верхней части). На восточном склоне хребта Докучаева в строении свиты принимают участие флишоидно переслаивающиеся туфопесчаники, алевролиты, псаммо-алевритовые туфы и туффиты кислого состава, туфогенные гравелиты и конгломераты. В составе последних часты гальки гранитоидов и кварцево-жильных образований. Суммарная мощность отложений составляет 400-700 м. К югу от Прасоловского массива в низах разреза алехинской свиты преобладают субаэральные туфы и лавы дациандезитов, изредка появляются туфогенные алевролиты с морской фауной, туфогенные конгломератобрекчии и конгломераты. Возраст свиты обоснован фаунистическими и радиологическими данными. Туфотерригенные породы содержат флористические, фаунистические

---

1 – Ранне-среднемиоценовые отложения **кунаширской свиты**. Туфы и лавы среднего, реже кислого состава, туфоконгломераты, туфобрекчии, туфопесчаники, туфоаргиллиты и туффиты. 2, 3 – Средне-позднемиоценовый **Прасоловский комплекс**: 2 – габбро, диориты, кварцевые диориты, диоритовые порфириты, плагиограниты, риолиты и риодациты интрузивной фации; 3 – базальты субвулканической фации. 4 – Позднемиоцен-раннеплиоценовые отложения **алехинской свиты**. Туфы и лавы среднекислого и кислого состава, туфоконгломерато-брекчии, туфогравелиты, туфопесчаники и туфоаргиллиты. 5, 6 – Позднемиоценовый **Береговой комплекс**: 5 – базальты; 6 – риолиты. 7-10 – Позднемиоцен-раннеплиоценовый **Северянковский комплекс**: 7 – плагиограниты интрузивной фации; 8 – риолиты и 9 – риодациты экструзивной фации; 10 – андезиты субвулканической фации. 11 – Позднеплиоцен-раннеплейстоценовые отложения **головнинской свиты**. Туфы и лавы среднего состава, туфы кислого состава, конгломераты и туффиты. 12, 13 – Позднеплиоцен-раннеплейстоценовый **Малайский комплекс**: 12 – андезиты; 13 – андезибазальты. 14 – Ранне-позднечетвертичные лавы андезибазальтов. 15 – Современные лавы андезитов вулкана Тятя. 16 – Современные аллювиально-пролювиальные и морские отложения. 17 – Разрывные нарушения: а – установленные; б – предполагаемые. 18 – Границы разновозрастных стратифицированных и интрузивных образований.

и диатомовые комплексы позднемиоцен-плиоценового возраста (Данченко, 1987; Ковтунович, 1990). Риолиты и дациты имеют калий-аргоновые датировки 5-4,5 млн. лет (Вулканизм..., 1990), а кислые туфы – 6-3,6 млн. лет (Кошкин, 1984).

Вулканогенные образования алексинской свиты отнесены к андезит-дацит-риолитовой формации (Происхождение..., 1985; Данченко, 1986, 1990 и др.). Породные ассоциации свиты интродуцированы поздними фазами гранитоидов Северянковского массива, зачастую подвержены изменениям, соответствующим формации вторичных кварцитов, иногда содержат колчеданно-полиметаллическое или золотосеребряное оруденение.

Позднеплиоцен-раннеплейстоценовые отложения залегают с размывом, а также угловым и азимутальным несогласием на породах алексинской свиты. Они выделены в **головнинскую свиту**. Породные ассоциации свиты на территории Северо-Кунаширской площади развиты, главным образом, в пределах позднеплиоцен-раннеплейстоценовых субаэральных вулканических аппаратов гор Шульга, Герасимова, Фрегат и Треугольник или в небольших ареалах субмаринного вулканизма и осадконакопления в восточной и юго-восточной части площади (см. рис. 1-2). В составе свиты выделяется две фации: лавово-вулканокластическая андезит-базальтовая и конгломерато-туфо-туффитовая, отчасти пемзовая. Мощность отложений около 350 м. Возраст свиты основан на определениях макрофауны, диатомей и радиолярий (Дуничев, 1983), а также радиологическими данными лав –  $3,07 \pm 0,05$  млн. лет (Сывороткин, Русинова, 1991).

Вулканогенные образования головнинской свиты относятся к андезит-базальтовой формации (Происхождение..., 1985; Данченко, 1986, 1990 и др.). Породные ассоциации рассматриваемой свиты прорваны субвулканическими телами андезибазальтов. Они несут локальные ореолы окварцеваний и аргиллизации, иногда вмещают проявления золотосеребряной и серной минерализации.

Четвертичные вулканогенные и вулканогенно-осадочные образования несогласно перекрывают вышеописанные неогеновые отложения. В пределах Северо-Кунаширской площади они развиты, главным образом, в северной и северо-восточной части (рис. 1-2), где слагают ряд вулканических аппаратов (Тятя, Руруй и др.). Они представлены потоками и покровами андезитов, базальтов, горизонтами туфов и агломератов того же состава, что и лавы и относятся к базальт-андезитовой формации. В пределах вулканических аппаратов широко развиты поля вторичных кварцитов и зоны с минерализацией самородной серы и мельниковита, а также холодные и термальные минерализованные источники.

Четвертичные преимущественно осадочные образования распространены, в основном, на побережье Южно-Курильского пролива и представлены морскими, аллювиальными, делювиальными и пролювиально-коллювиальными отложениями.

## 1.2. Субвулканические, дайковые и интрузивные образования

Комагматичные неогеновым вулканогенным образованиям породные ассоциации Северо-Кунаширской площади выделены в четыре комплекса (Данченко, 1990 и др.):

1. Средне-позднемиоценовый габбро-диорит-кварцеводиорит-гранодиорит-плагиогранитовый *Прасоловский интрузивный комплекс*.
2. Позднемиоценовый базальт-андезит-дацит-риолитовый *Береговой дайково-субвулканический комплекс*.
3. Позднемиоцен-раннеплиоценовый габбро-диорит-кварцеводиорит-гранодиорит-плагиогранитовый *Северянковский субинтрузивный комплекс*.
4. Позднеплиоцен-раннеплейстоценовый базальт-андезитовый *Малайский экструзивный комплекс*.

**Прасоловский интрузивный комплекс** слагает береговые обрывы между р. Золотой и м. Прасолова и протягивается далее на север до траверза о. Мористый (см. рис. 1-2). Предполагается штокообразная его форма и сложное внутреннее строение. Формирование комплекса осуществлялось в два этапа. В первую фазу образовались зональный массив, сложенный габбро, диоритами, кварцевыми диоритами и диоритовыми порфиритами собственно интрузивной фации и небольшие тела габбро-порфиритов и базальтов субвулканической фации. Породы интрузивной фации слагают периферические части Прасоловского интрузивного массива и занимают 30 % его площади. Габбро по направлению к краевым частям массива фациально переходят в диориты и кварцевые диориты. Субвулканические тела первой фазы пространственно оторваны от Прасоловского интрузивного массива. Они слагают мелкие штоки в районе о. Мористый.

Вторая фаза характеризуется внедрением лейкократовых плагиогранитов, которые слагают центральную часть Прасоловского интрузивного массива. Породы обладают массивной текстурой и четко выраженной порфирированной структурой. В краевых частях массива, близ контакта с габбро, плагиограниты обладают брекчиевой текстурой за счет включений ксенолитов габброидов. В апикальных частях массива плагиограниты фациально сменяются риолитами и риодацитами.

Магматические образования Прасоловского интрузивного комплекса комагматичны вулканогенным породам базальт-андезит-дацит-риолитовой формации, слагающим вместе с ассоциирующими с ними вулканогенно-осадочными отложениями кунаширскую свиту. Возрастное положение Прасоловского комплекса определено наличием интрузивных контактов гранитоидов с вулканитами кунаширской свиты и перекрытием их с размывом отложениями алахинской свиты. Радиологические датировки габбро-диорит-плагиогранитных пород Прасоловского массива варьируют в пределах  $16 \pm 3 - 8,5 \pm 0,5$  млн. лет (по Данченко, 1990) и от 16 до 13 млн. лет (по Рыбин, Данченко, 1994).

**Береговой дайково-субвулканический комплекс** развит в западной (см. рис. 1-2) части Прасоловского рудного поля, где он сохранился как выполнение подводящих каналов ныне эродированных позднемиоценовых эффузивов Аলেখинской свиты. Плистообразные, редко ветвящиеся, дайки заполняют трещины прототектонической отдельности в интрузивных образованиях Прасоловского комплекса, либо образуют протяженные рои в зонах разломов, зачастую осложняют контакты интрузивных образований с вмещающими породами. Мощность даек изменяется от первых метров до десяти, а их протяженность – от первых десятков до первых сотен метров. Формирование комплекса обусловлено внедрением четырех фаз (от ранней к поздней): базальты, андезиты, дациты и гранодиорит-порфиры и риолиты. Выделение четырех фаз комплекса основано на повсеместно наблюдающихся пересечениях базальтов андезитами, а последних гранодиорит-порфирами, которые в свою очередь секутся дайками риолитов.

Дайки основного и среднего составов тектонизированы, рассланцованы, пропицитизированы и, иногда, переработаны до вторичных кварцитов. С кислыми дайками пространственно сближены тела туффизитов и флюидно-эксплозивных брекчий, выполняющих трещины отдельности или образующих штокверкоподобные системы ветвящихся жил. Почти повсеместно с ними ассоциируют рудоносные кварцевые жилы и метасоматиты, иногда нацело замещающие тела флюидно-эксплозивных брекчий с сохранением текстуры последних. Мелкие субвулканические тела дацитов, риодацитов и риолитов локализуются вдоль дуговых и, особенно, трансформных разломов.

Дайки и субвулканиды Берегового комплекса комагматичны позднемиоценовым вулканикам андезит-дацит-риолитовой формации, которые в совокупности с синхронными вулканогенно-осадочными отложениями образуют аলেখинскую свиту.

**Северянковский субинтрузивный комплекс** развит, главным образом, в южной и юго-восточной частях Прасоловского рудного поля (рис. 1-2). Он включает Орловский, Докучаевский, Валентиновский, Ильинский и Кедровый интрузивные массивы, а также экструзивные и субинтрузивные образования кислого, среднего и основного составов. Характер взаимоотношений пород комплекса показывает, что формирование его осуществлялось в два этапа. К первой фазе отнесены тела габбро, диоритов и кварцевых диоритов собственно интрузивной фации, габбро-порфиритов и диоритовых порфиритов субвулканической фации и базальтов, андезибазальтов и андезитов экструзивной фации. Во вторую фазу внедрялись гранодиориты и плагиограниты интрузивной фации, а также риолиты, риодациты и дациты субвулканической и экструзивной фаций. Двухфазное развитие Северянковского комплекса подтверждается наличием ксенолитов габброидов в гранодиоритах Орловского интрузивного массива и наличием активных контактов риолитов с диоритовыми порфиритами.

Интрузивные, субвулканические и экструзивные образования Северянковского комплекса комагматичны раннеплиоценовым вулканикам андезит-дацит-риолитовой формации аলেখинской свиты. Возрастное положение комп-

лекса определено по наличию рвущих контактов его тел с позднемиоцен-раннеплиоценовыми отложениями алахинской свиты. Кроме того, калий-аргоновые датировки возраста для кварцевых диоритов и риолитов дают, соответственно, цифры 11-10,5 млн. лет и 6 млн. лет (Фирсов, 1964), а для габбродиорит-гранодиоритовых пород  $7,8 \pm 1,5$  -  $4,2 \pm 0,9$  млн. лет (Данченко, 1997).

**Малайский экструзивный комплекс** распространен в южной части Северо-Кунаширской площади (рис. 1-2). В него включены позднеплиоцен-раннеплейстоценовые экструзии андезитов, андезибазальтов и базальтов, а также небольшие интрузии габбро и габбродиоритов с калий-аргоновыми датировками 4,2-2 млн. лет (Богатиков, Цветков, 1988) и дайки базальтов, секущие тела риолитов и гранодиоритов в Орловском субинтрузивном массиве Северянковского комплекса (Данченко, 1987). Эти дайки рассматриваются как прикорневые части эродированных позднеплиоцен-раннеплейстоценовых экструзий.

Магматические образования Малайского комплекса комагматичны позднеплиоцен-раннеплейстоценовым вулканитам андезит-базальтовой формации головнинской свиты. Возрастное положение комплекса определено по наличию рвущих контактов с отложениями головнинской свиты.

### **1.3. Некоторые геохимические особенности рудовмещающих пород Прасоловского рудного поля**

В геохимическом отношении породы вышеперечисленных магматических комплексов Прасоловского рудного поля характеризуются в целом фоновыми (в пределах кларка) значениями рудогенных элементов. Наиболее распространенными из них являются молибден, медь, свинец, цинк, серебро и золото. Однако, соотношения их в различных породах существенно отличаются, а содержания иногда немного превышают кларковые значения (табл. 1-1).

Выполненный авторами расчет коэффициентов кларк-концентрации показывает, что содержание молибдена в кислых породах превышает кларк всего лишь в 1,13-2,03 раза (рис. 1-3), в то время как в средних и основных породах это значение увеличивается до 6 раз. Напротив, содержание меди имеет обратную тенденцию. В кислых породах коэффициент отношения содержания к кларку составляет 2,35-2,65, а в средних и основных немногим меньше единицы. Содержания свинца и цинка для большинства типов пород характеризуются фоновыми значениями, за исключением риолитов и дацитов Северянковского субинтрузивного комплекса, где их содержания соответственно в 2,35-4,6 и 1,87-2,54 раза выше кларка (Виноградов, 1962).

В целом, оценивая геохимическую специфику вмещающих рудные тела образований можно заключить, что содержания в них токсичных металлов находятся на уровне кларков или немногим превышают их, в отличие от рудных тел, где содержания этих элементов на несколько порядков превышают кларковые значения (рис. 1-4).

**Средние содержания некоторых токсичных элементов в неизменных породах Прасоловского рудного поля (по данным Прасоловской партии СахГРЭ от 1987 г.)**

Комплекс	Породы (кол-во анализов)	Содержание, г/т			
		Mo	Cu	Zn	Pb
Прасоловский	плагиограниты (44)	8,1	47,0	64,5	19,0
	дациандезиты (18)	8,8	40,0	68,0	16,0
	габбро-диориты (23)	2,2	65,0	67,0	10,0
	диориты (35)	3,1	24,0	72,0	6,0
	андезиты (17)	2,9	38,0	80,0	7,7
	кварцевые диориты (37)	4,0	20,0	65,0	8,3
Северянковский	риодациты, дациты (25)	5,4	30,0	183,0	69,0
	риолиты (72)	4,5	22,0	112,0	47,0
Малайский	андезиты (18)	4,0	22,0	53,0	16,0

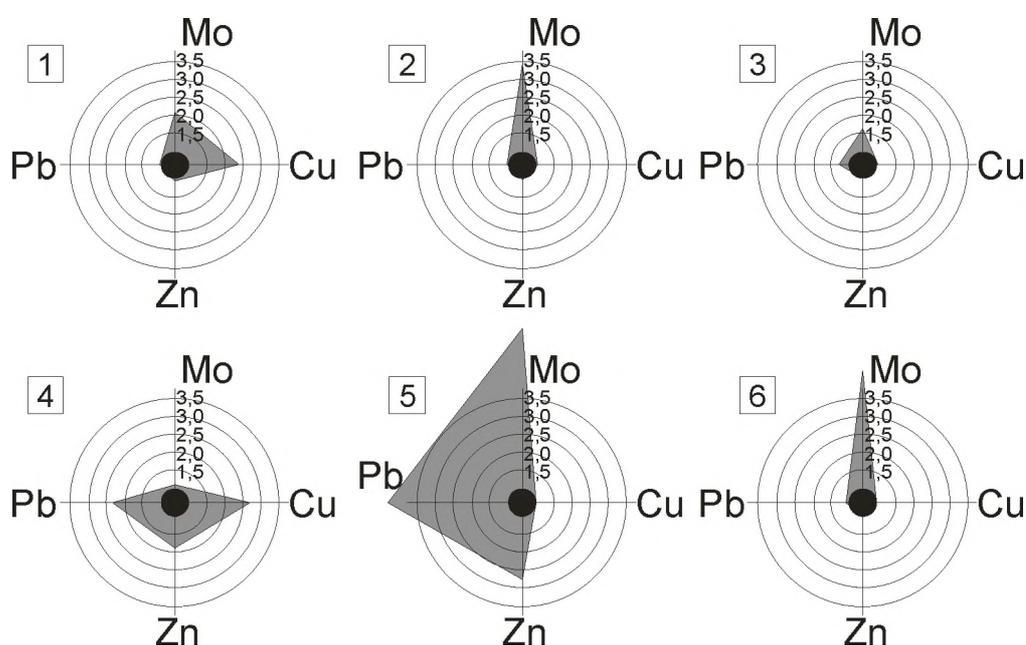


Рис. 1-3. Диаграммы отношения содержания токсичных элементов в различных типах вмещающих рудные тела пород Прасоловского рудного поля к кларковому значению

1-3 – Прасоловский интрузивный комплекс: 1 – плагиограниты; 2 – дациандезиты; 3 – габбро. 4-5 – Северянковский субинтрузивный комплекс: 4 – риолиты; 5 – дациты. 6 – андезиты Малайского экструзивного комплекса.

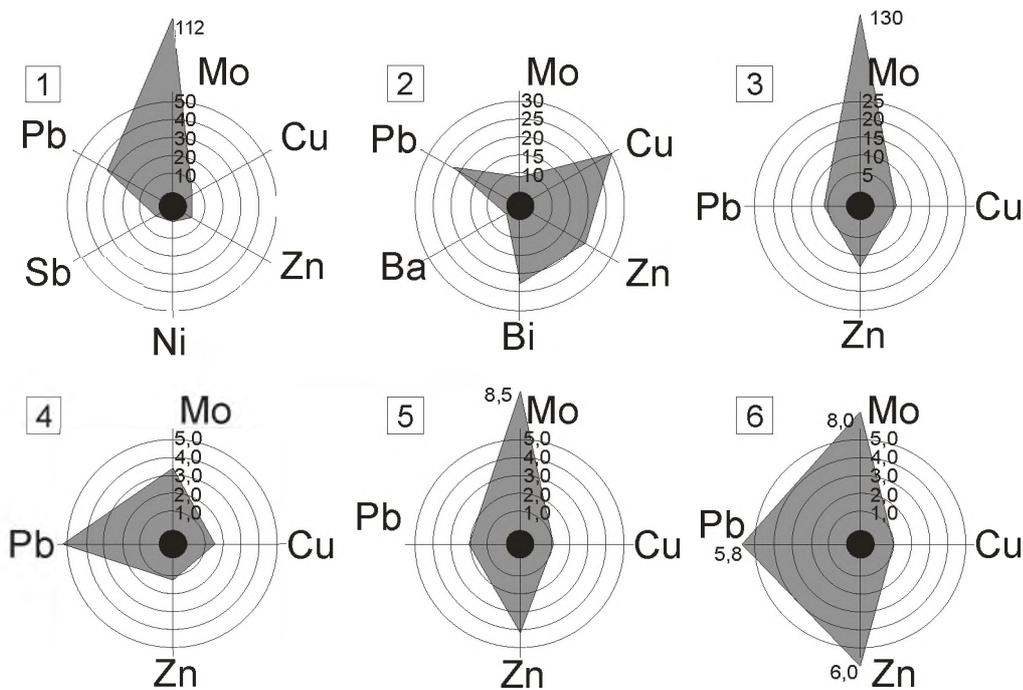


Рис. 1-4. Диаграммы отношения содержания токсичных элементов к их фоновому значению в рудных телах Прасоловского рудного поля.

Рудоносные зоны: 1 – Юго-Западная; 2 – Западная; 3 – Меридиональная; 4 – Восточная; 5 – Удачная; 6 – Зброшенная.

Таким образом, роль вмещающих рудные тела неизменных магматических пород Прасоловского месторождения в токсическом загрязнении района и прилегающих к нему территорий тяжелыми металлами невелика, из чего можно заключить, что существенного влияния на экологическую обстановку региона эти породы не окажут.

#### 1.4. Основные тектонические элементы Северного Кунашира и структурная позиция Прасоловского рудного поля

В структурном плане Северо-Кунаширского района, как, впрочем, и всей Курильской островодужной системы, доминирующую роль играют трансформные дизъюнктивы субпродольные по отношению к дуге (т.е. северо-восточного простирания или так называемого курильского направления, по: Стрельцов, 1976; Злобин и др., 1982 и др.) и поперечные (т.е. северо-западного простирания или так называемого тихоокеанского направления). К первой группе относятся Восточно - и Западно - Кунаширский разломы (см. рис. 1-5),

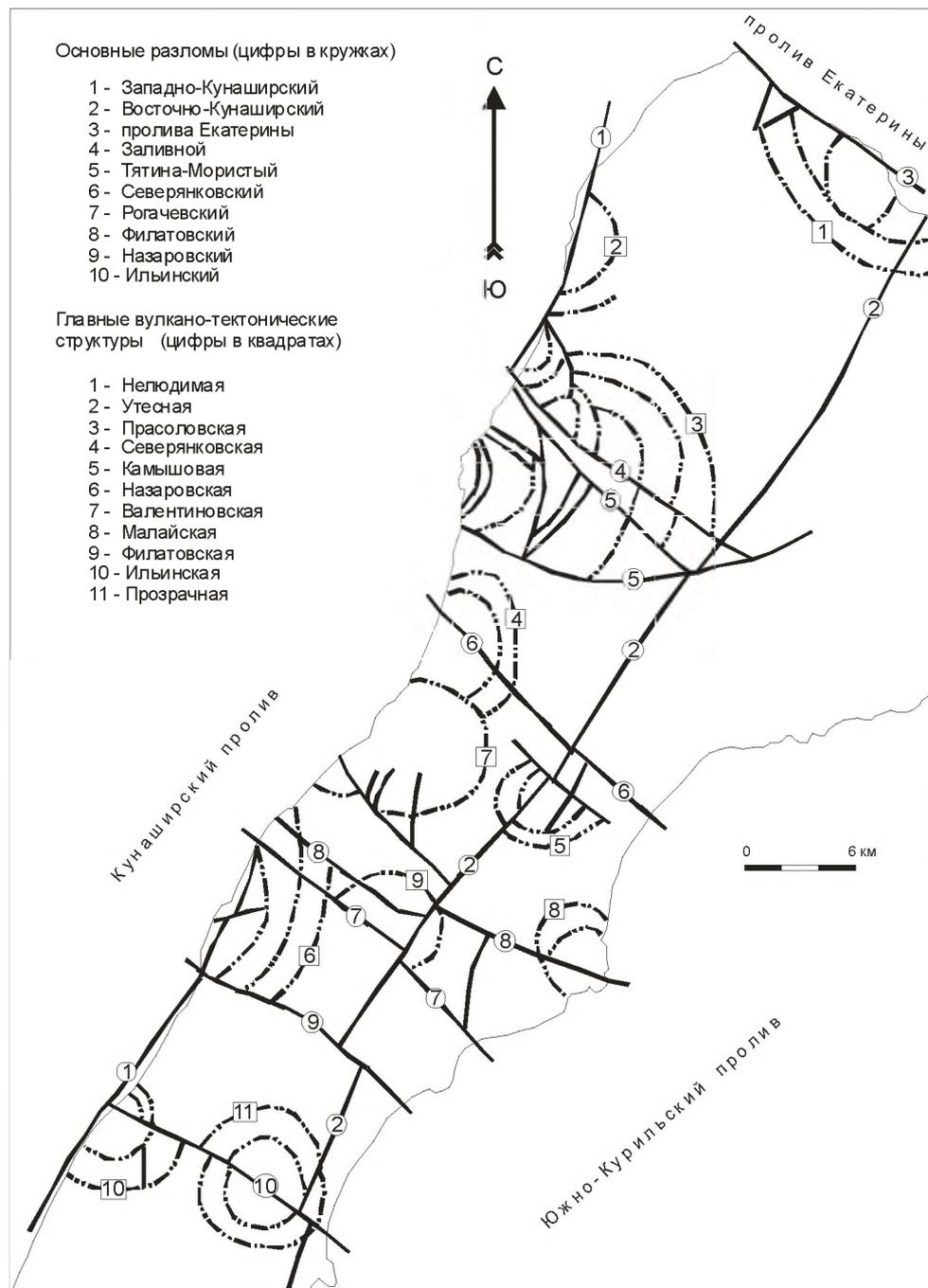


Рис. 1-5. Основные тектонические элементы Северо-Кунаширского района (по: В.Я. Данченко, 1990)

представляющие собой крутопадающие ( $60-80^{\circ}$ ) на восток сбросы. Наиболее четко эта группа разломов выражена на западном фланге рассматриваемого района, где они срезают структуры рудного поля, погружая западные их блоки ниже уровня моря (Данченко, 1990). Кроме того, северо-восточные разломы нередко осложняют контакты габбро-диорит-плагиогранитного Прасоловского комплекса, сопровождаясь более поздними дайками и убогосульфидными кварцевыми жилами, зачастую золотоносными. В пределах рудного поля вдоль разломов этой системы часто развиты экструзии риолитов и риодацитов.

Северо-западная группа разломов (пролива Екатерины, Заливной, Тятина-Мористый, Северянковский, Рогачевский, Филатовский, Назаровский и Ильинский) представляют собой сбросо-сдвиги, которые делят северный Кунашир на ряд блоков, ступенчато погружающихся с севера на юг и смещают северные блоки к востоку. В пределах Прасоловского интрузивного массива они сопровождаются дайками и золотоносными убогосульфидными кварцевыми жилами, а по его периферии и за пределами – экструзиями риолитов, дацитов и золотоносными адуляр-сидерит-кварцевыми или алунит-(гетит)-кварцевыми метасоматитами (Данченко, 1987; 1990 и др.).

Кроме линейных дизъюнктивов в пределах Северо-Кунаширской площади широко развиты также кольцевые и дугообразные (полуовальные) структурно-тектонические формы (см. рис. 1-5), интерпретируемые как вулcano-тектонические структуры центрального типа (Данченко, 1986; 1990; 1991). Главными их элементами являются дуговые и радиальные разломы, а также упорядоченное расположение в пространстве фаций магматических пород. Формирование этих структур связывается с непосредственным внедрением магмы в верхние горизонты земной коры и/или поступлением ее на дневную поверхность. Отличительной их особенностью является то, что расположение основных структурных элементов в них характеризуется центральным типом симметрии. Морфологически вулcano-тектонические структуры выражены в виде одного или нескольких центров линеаментов гидросети, закладывающейся, как правило, вдоль ослабленных зон дуговых разломов или дуговыми хребтами интрузивных и субвулканических тел, реже одиночными конусами стратовулканов и экструзий.

Дуговые разломы представляют собой, как правило, сбросы с крутым падением сместителя. Обычно они сопровождаются дайками и минерализованными зонами измененных пород. Диаметры этих структур на поверхности изменяются от первых километров до нескольких десятков километров. В зависимости от того, какое положение (центральное или периферическое) занимают интрузивные и субвулканические магматические образования внутри вулcano-тектонических структур, последние подразделяются на вулcano-интрузивные поднятия и вулcano-тектонические депрессии.

На данный момент в пределах рассматриваемой территории выделено несколько (см. рис. 1-5) таких вулcano-тектонических структур, главные из которых следующие: Нелюдимая, Утесная, Прасоловская, Северянковская, Ка-

мышовая, Филатовская, Валентиновская, Назаровская, Малайская, Ильинская и др. Они различаются возрастом, длительностью и характером развития, зачастую осложняют друг друга или дислоцированы трансформными разломами так, что в пределах островной суши сохранились лишь отдельные фрагменты вулканоструктур. Анализ закономерностей распространения неогеновых магматических образований Большой Курильской гряды и локализации в них рудной минерализации показывает, что в пределы вулcano-тектонических структур попадают до 80 % всех тел магматических пород и до 85 % проявлений рудного и химического сырья (Данченко, 1997). В этой связи они считаются средоточием вулканогенных рудно-магматических систем или структурно-вещественной основой рудных полей.

Под **рудным полем** обычно понимают сравнительно небольшую рудоносную площадь с одновременными или близкими по возрасту, генетически связанными между собой сближенными рудными месторождениями и (или) рудными телами, приуроченными к локальным тектоническим элементам или генетически связанными с какими-либо телами изверженных пород (Геологический..., 1973). Площади рудных полей колеблются от первых до 10-20, реже до нескольких десятков квадратных километров. В этом отношении Прасоловское рудное поле можно отнести к разряду крупных, так как площадь его составляет как минимум 40 кв. км, а максимум 65 кв. км. Такой разброс цифр обусловлен разной трактовкой границ рудного поля различными авторами. Одни (Мицук и др., 1987 г.; Мицук, 1990) включают в контур рудного поля только площадь развития наиболее эродированных и тектонически переработанных образований Прасоловского интрузивного массива и ассоциирующих с ними вулканогенно-осадочных пород кунаширской свиты. Другие (Данченко, 1987, 1990; Роготнев, 1992) рассматривают его (контур) намного шире, включая в него также и наложенные на этот массив более молодые вулканоструктуры (подробнее см. ниже). Тем не менее, все исследователи признают, что Прасоловское месторождение приурочено к одноименной вулcano-тектонической структуре центрального типа диаметром 14-15 км (см. рис. 1-5). В пределах островной суши обнажена лишь восточная часть этой структуры. Западная ее часть «срезана» зоной Западно-Кунаширского разлома и опущена ниже уровня моря. Северо-восточная часть Прасоловской вулcano-тектонической структуры осложнена системами разломов Заливной и Тятина-Мористый и отчасти перекрыта четвертичными лавами, а южная – опущена по Северянковскому сбросу и осложнена более молодыми Северянковской и Сухоложской вулcano-тектоническими структурами, диаметры которых соответственно 8 и 4 км. Прасоловская вулcano-тектоническая структура представляет собой вулcano-интрузивное поднятие и является наиболее древней структурой в пределах Северного Кунашира. В строении этой структуры принимают участие вулканогенные и вулканогенно-осадочные образования кунаширской свиты и интрузирующие их габбро-диорит-плагиогранитные породы Прасоловского интрузивного массива (см. рис. 1-2). Интрузивный комплекс формирует центральную часть Прасоловской вулканно-

структуры, тогда как породы кунаширской свиты развиты по ее периферии и слагают небольшие останцы кровли в своде интрузивного массива. Вблизи древних эруптивных центров, выполненных штокообразными телами андезитов и риолитов, лапшиевые и агломератовые туфы преимущественно кислого состава содержат гидротермально-метасоматические залежи пирит-халькопирит-сфалеритовых руд, а также серии полиметаллических кварцево-сульфидных жил.

Наложенные на Прасоловское вулcano-интрузивное поднятие и осложняющие его юго-западный и южный фланги Северянковская и Сухоложская вулcano-тектонические структуры представляют собой вулcano-тектонические депрессии. Северянковская структура сложена вулканитами и алевро-псаммитовыми вулканогенно-осадочными образованиями алахинской свиты. Коматитические им экструзии и субвулканические тела андезитов, дацитов и риолитов Северянковского субинтрузивного комплекса располагаются преимущественно по периферии Прасоловского вулcano-тектонического поднятия или внутри вулcanодепрессии, а интрузии габбродиорит-кварцеводиорит-гранодиоритов и базальт-андезит-дацит-риолитовые дайки напротив, в зонах разломов, секущих свод этого поднятия. В строении Северянковской структуры выделяется три концентрические зоны, разделенные дугвыми разломами. Внутренняя зона выполнена осадочно-вулканокластическими отложениями, прорванными субвулканическими телами риолитов и андезитов, которые, по наблюдениям в глубоком эрозионном срезе, сменяются габбродиоритовыми порфиритами. В средней зоне преобладают экструзии и субвулканические тела риолитов. Во внешней зоне вулканиты, представленные разностями от андезитов до риодацитов, формируют несколько второстепенных эруптивных центров. Наиболее крупный из них, расположенный в месте сочленения Прасоловского вулcano-интрузивного поднятия и Северянковской вулcano-тектонической депрессии, образует Сухоложскую вулcano-тектоническую структуру (депрессию). Позднемиоцен-раннеплиоценовые дайки и субвулканические тела Северянковского субинтрузивного комплекса в пределах Прасоловского вулcano-интрузивного поднятия сопровождаются разнотипной золото-теллуридно-кварцевой минерализацией.

Юго-восточный фланг Прасоловского вулcano-интрузивного поднятия осложнен еще одной более молодой вулcano-тектонической структурой г. Шульга. Андезибазальты и туффогенные породы этого вулканического аппарата соответствуют головнинской свите и вмещают существенно серебряную сульфидно-сульфосольно-кварцевую минерализацию.

Наиболее четко проявленными элементами Прасоловской вулcano-тектонической структуры являются дугвые разломы, характеризующиеся относительно пологим ( $40-80^{\circ}$ ), зачастую центриклинальным, падением. На дневной поверхности эти разломы трассируются линеаменами гидросети рек Золотая, Северянка, Тятина, Саратовская и ручьев Заливной и Перевальный. Внутренние дугвые разломы Прасоловской структуры контролируют положение мелких

субвулканических тел риолитов, дацитов и роев даек Берегового дайково-субвулканического комплекса, а внешние дуговые разломы, соответственно, субвулканических тел Северянковского субинтрузивного комплекса. Крупные субвулканические тела сопровождаются своими собственными радиальными и дуговыми дизъюнктивами, а также зонами прототектонической трещиноватости, часто дискордантными относительно соответствующих элементов Прасоловской вулcano-тектонической структуры. Совокупность дуговых дизъюнктивов контролирует подавляющее большинство пунктов золотосеребряной минерализации (рудные зоны Дуговая, Мористая-III, Средне-Золотая, Крошечная). Однако наиболее важные из них приурочены к сопряжениям дуговых разломов с трансформными.

Радиальная система крутопадающих ( $70-90^{\circ}$ ) разломов проявлена сравнительно слабо. Она осложнена сопряжениями с северо-западными трансформными разломами, радиальной трещиноватостью в периферии субвулканических тел Северянковского комплекса и прототектонической трещиноватостью в гранитоидах. Эта группа разломов также сопровождается дайками, реже кварцевыми жилами, контролируя отчасти рудную зону Мористая-III.

Прототектоническая трещиноватость в гранитоидах формирует системы трещин, субпараллельные зонам трансформных разломов (во внутренних частях Прасоловского интрузивного массива), либо субпараллельные контактам (в периферических частях массива) или падающие центриклинально к предполагаемой корневой части массива (на западном фланге). Прототектоническая трещиноватость повсеместно вмещает дайки базальтов, андезитов, реже кислых пород и кварцевые жилы (например, рудная зона Крошечная).

Северо-западные трансформные сбросо-сдвиги входят в системы разломов Заливного, Тятина-Мористого, Сквозного и Северянковского. Последние интенсивно инъецированы сериями разновозрастных субвулканических тел, даек, экструзий, в том числе телами туффизитов и флюидно-эксплозивных брекчий. Почти повсеместно они сопровождаются кварцевыми жилами и линейными телами минерализованных вторичных кварцитов, контролируя рудные зоны Юго-Западную, Нижне-Золотую, Птичью, Мористую I и II. Золотосеребряная минерализация сопровождает иногда эти разломы и за пределами Прасоловского месторождения.

Северо-восточные трансформные разломы Западно-Кунаширской системы "срезают" западный фланг Прасоловской вулcano-тектонической структуры. Они контролируют положение миоценовых эруптивных центров, сопровождаются проявлениями колчеданно-полиметаллической минерализации в осадочно-вулканогенной толще, а в поле гранитоидов золотосеребряными проявлениями рудных зон Западной, Меридиональной, Восточной и Светлой. Трансформные разломы определяют размещение в рудных зонах рудных тел и рудных столбов, наиболее многочисленных и богатых в сопряжениях с дуговыми разломами.

\*\*\*

Таким образом, в структурном отношении Прасоловское рудное поле представляет собой комбинацию разновозрастных антиформных и синформных вулcano-тектонических формирований (а именно, вулcano-интрузивного поднятия и вулcano-тектонических депрессий), осложненных более молодой стратовулканической постройкой, которые отражают пространственно-временную миграцию центра эндогенной активности одного отдельного (в нашем случае Северо-Кунаширского) блока островодужной системы. В пределах рудного поля эти вулcano-тектонические структуры отличаются друг от друга и составом магматических комплексов, и последовательностью их формирования, и спецификой связанной с ними рудной минерализации. Так с миоценовыми магматическими комплексами ассоциируют, как правило, серно- и медно-цинково-колчеданные проявления. С позднемиоцен-раннеплиоценовыми комплексами пространственно связаны полиметаллическое и золотосеребряное оруденение. Для позднеплиоцен-раннеплейстоценовых магматических комплексов наиболее характерны колчеданные и серебряные сульфидно-сульфосольные проявления. При этом, вмещающие рудные тела неизменные породы характеризуются низкими содержаниями рудогенных элементов (на уровне кларков или немногим превышают их), из чего можно заключить, что существенного влияния на экологическую обстановку региона эти породы не окажут.

В данной работе будут рассмотрены особенности минерального и вещественного состава золотосеребряных руд Прасоловского месторождения с точки зрения их потенциальной экологической опасности для окружающей среды в случае его промышленной обработки.

## **ГЛАВА 2. ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И СОСТАВА AU-AG-СОДЕРЖАЩИХ РУДНЫХ ТЕЛ ПРАСОЛОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

По результатам поисковых и поисково-оценочных работ Прасоловской партии Сахалинской ГРЭ, проведенных соответственно в периоды с 1982 по 1987 и с 1985 по 1991 годы, установлено, что золотосеребряное оруденение в пределах Прасоловского месторождения приурочено преимущественно к дуговым фрагментам кольцевых разломов вулcano-тектонических структур. В меньшей степени оно ассоциирует с радиальными разломами и трещинами прототектонической отдельности в экструзивных и интрузивных образованиях. Наиболее интенсивно оруденение развито в зонах пересечения всех названных систем дизъюнктивных нарушений и, особенно, в местах сопряжения их с системами продольных (т.е. северо-восточного простирания) и поперечных (т.е. северо-западного простирания) сквозных (трансформных) разломов. Золотосеребряные руды характеризуются единством морфологии, геологической позиции, условий залегания и значительным сходством минералогического состава. Они представлены, как правило, протяженными (до нескольких километров) сериями крутопадающих (60-90°) кварцевых жил (мощность которых в среднем составляет 1-2 м, редко 9 м) или зонами вторичных кварцитов шириной до 10 м. Последние, в большинстве случаев, сопровождают дайки и тела инъекционных брекчий и туффизитов в Прасоловском интрузивном массиве и во вмещающих его вулcanoгенно-осадочных образованиях кунаширской свиты. Группы пространственно сближенных рудных тел и рудопроявлений, приуроченных к какому-либо одному тектоническому элементу, образуют рудоносные зоны. Эти зоны отличаются масштабностью, наличием или отсутствием тех или иных типов руд и их соотношением. Ниже приводится краткое описание некоторых основных рудоносных зон, локализуемых в различных типах вулcano-тектонических структур Прасоловского месторождения – т.е. в пределах Прасоловского вулcano-тектонического поднятия и Северянковской вулcano-тектонической депрессии.

### **2.1. Основные рудоносные зоны Прасоловского вулcano-тектонического поднятия**

В пределах Прасоловского вулcano-тектонического поднятия, площадь которого составляет 40 кв. км, выделено более 10 рудоносных зон с золотосеребряной минерализацией, общей протяженностью более 50 км (рис. 2-1). Рудоносные зоны протяженностью в первые километры и шириной в десятки метров включают либо одну стволую жилу, либо таковую в сопровождении ответвлений. Реже встречаются тела минерализованных брекчий, зоны прожилкового окварцевания или вторичных кварцитов.

Жилы мощностью в первые метры прослеживаются на сотни метров по простиранию и более чем на 100 м по падению (по наблюдениям в горных выработках). Они характеризуются крутым юго-западным, либо северо-восточ-

ным (70-90<sup>0</sup>, реже 40-60<sup>0</sup>) падением. Большинство жил имеет четкие зальбанды и образовались путем выполнения трещин отрыва и скола, реже протектонической отдельности, либо замещения дорудных даек или тектонических и флюидно-эксплозивных брекчий. Жилы характеризуются сложным внутренним строением, грубополосчатой текстурой 1<sup>го</sup> порядка и обладают некоторыми элементами симметрии расположения полос, каждая из которых обладает своим набором текстур 2<sup>го</sup> порядка. Ранние генерации последних характеризуются преобладанием реликтовых текстур полосчатых даек и брекчий. Более поздним полосам присущи текстуры, отражающие последовательность полистадийного рудоотложения и соответствующие определенным типам и подтипам руд.

В осевых частях рудоносных зон и в пределах интрузивных и субвулканических тел преобладают монолитные и плитообразные, выдержанные по простиранию и падению жилы. В лежачих и висячих блоках рудоносных зон, особенно в толще вулканогенно-осадочных пород, наблюдается расщепление жил на серии маломощных прожилков, ветвящихся вдоль даек и зон трещиноватости и имеющих сравнительно простое строение.

**Рудоносная зона Западная** расположена в западной части Прасоловского месторождения (см. рис. 2-1) и прослеживается на протяжении почти 4 км при ширине 150-200 м вдоль северо-северо-восточного трансформного разлома Западно-Кунаширской системы, осложняющего интрузивный контакт гранитоидов Прасоловского массива и вулканогенно-осадочных пород кунаширской свиты. На северном фланге жилы этой зоны пересекают полиметаллические и колчеданно-полиметаллические проявления Водопадное и Росоку, а на южном – сочленяются с рудоносной зоной Юго-Западная. Рудоносная зона Западная в висячем блоке зоны включает одну крупную жилу (Главная) мощностью 2-4 м (в среднем 3,2 м), круто (60-80<sup>0</sup>) падающую к северо-востоку, а в лежачем блоке – около 100 коротких (10-30 м), маломощных (5-10, до 30 см) жил. Среди последних часты допродуктивные крутые (70-90<sup>0</sup>) северо-восточные пирит-кварцевые жилы, а также золото-полисульфидно-кварцевые, сравнительно полого (30-60<sup>0</sup>) падающие на запад-юго-запад. К ним относятся две сравнительно мощные и протяженные жилы Колломорфная и Кокардовая. Большинство жил сопровождают и, отчасти, замещают дорудные дайки базальтов, андезитов, дацитов и риолитов.

Главная жила состоит из нескольких звеньев, разделенных интервалами ветвления и расщепления жилы в блоках вулканогенно-осадочных пород. Отщепления жилы в вулканогенно-осадочных породах имеют преимущественно пирит-кварцевый состав, а в гранитоидах лежачего блока – полисульфидно-кварцевый. Главная жила вскрыта серией подземных горных выработок, а также скважинами, что позволяет проследить ее по падению на 300 м под уровнем моря. В подземных выработках наблюдается весьма сложное внутреннее строение жилы, обусловленное чередованием полос, характеризующих разнотипные руды и образующих следующую последовательность:

1. Призальбандовые мелкозернистые золото-пирит (халькопирит)-кварцевые руды с ксенолитами переработанных вмещающих пород;

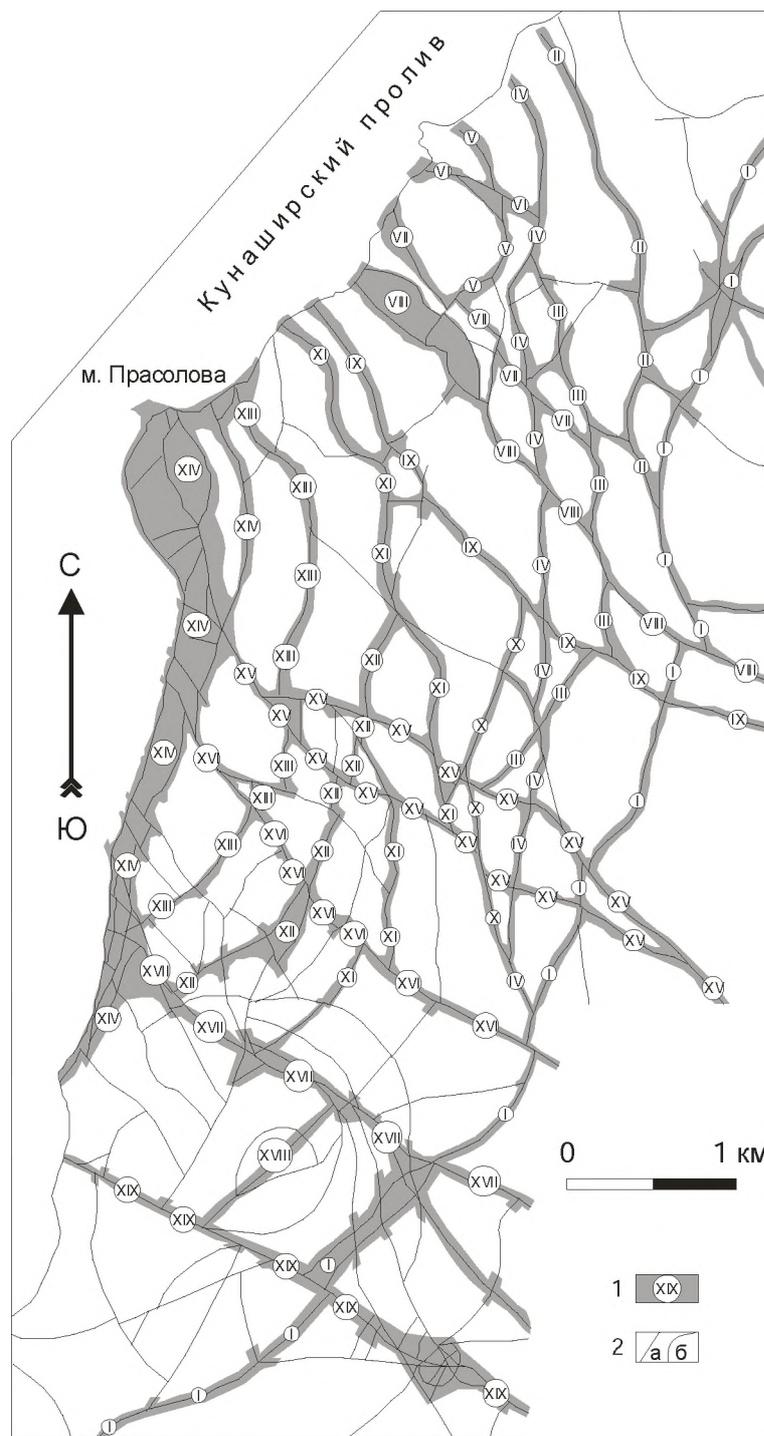


Рис. 2-1. Основные рудоносные зоны Прасоловского рудного поля (по: В.В. Мицук и др., 1987г.)

2. Микро- и криптозернистые золото-полисульфидно-кварцевые руды линейно-полосчатой текстуры с элементами ритмов. Каждый ритм начинается полосой рудно-глинистого (до 30 % рудных) вещества шириной 0,1-2 мм, сменяющейся гидрослюдисто-кварцевым (до 5-10 % рудных) и затем собственно кварцевым веществом (рудных до 0,1 %). Соотношение мощностей полосок изменяется от 1:10:100 до 1:50:1000, а соотношение рудных минералов в них от 30:5:1 до 10:1:0,001. Количество сульфидов резко возрастает в участках наложения жилы на раннюю колчеданно-полиметаллическую минерализацию или в зонах вторичного сульфидного обогащения. Золото-полисульфидные руды изредка пересекают ранние золото-пирит-кварцевые, выходя во вмещающие породы самостоятельными жилами (Колломорфная, Кокардовая);

3. Микро- и криптозернистые золото-теллуридно-кварцевые руды мощностью 0,1-0,4 м (редко до 1,5 м) с колломорфно-брекчиевыми текстурами. В них ксенолиты более ранних полисульфидных и собственно золото-теллуридно-кварцевых руд цементируются гидрослюдисто-кварцевым веществом с золотом и теллуридами. Золото-теллуридные прожилки иногда выходят во вмещающие породы, пересекая более ранние золото-полисульфидно-кварцевые прожилки в зальбандах дайки. Раздувы золото-теллуридно-кварцевых полос образуют лентовидные гнезда богатых руд размерами до 45x17x1,2 м, которые в плоскости жилы полого (20-30°) склоняются на юго-запад. Такие гнезда приурочены преимущественно к перегибам простирания и падения жилы, а также к пересечениям рудоносной зоны северо-западными трансформными разломами и участкам развития флюидно-эксплозивных брекчий. Полосы золото-теллуридно-кварцевых руд содержат до 60-80 % всего золота и серебра Главной жилы;

4. Внутренним частям в раздувах жилы иногда присущи полосы, сложенные золото-адуляр (карбонат)-кварцевыми рудами с массивной, линейно-колломорфной, скорлуповатой, каркасно-пластинчатой текстурами или ноздреватыми и кавернозными пирит-глинисто-кварцевыми рудами, переходящими в полости, выполненные глинисто-охристым материалом.

В целом рудоносная зона Западная характеризуется наибольшей насыщенностью жилами, максимальной их мощностью и протяженностью, высокой долей золото-полисульфидно-кварцевых и золото-теллуридно-кварцевых руд. Для них характерно преобладание свинца и цинка над медью. Золото-серебряное отношение в них от 0,54 до 0,87 (в среднем 0,71). Все это

---

1. - Рудоносные зоны и их номера; 2. - Разломы: трансформные (а) и дуговые (б).

Рудоносные зоны (римские цифры в кружках): I –Светлая; II - Дуговая; III –Верхняя; IV - Меридиональная; V - Мористая IV; VI - Мористая III; VII - Мористая II; VIII - Мористая I; IX - Птичья; X - Восточная; XI - Средне-Золотая; XII - Крошечная; XIII – Прасоловская; XIV - Западная; XV - Сквозная; XVI - Нижне-Золотая; XVII - Юго-Западная; XVIII - Сухоложская; XIX - Удачная.

делает рудоносную зону Западная одной из наиболее перспективной на Прасоловском месторождении.

**Рудоносная зона Юго-Западная** контролируется северо-западным трансформным разломом Северянковской системы сбросов (см. рис. 2-1), секущих как Прасоловскую, так и Северянковскую вулканотектонические структуры. В пределах Прасоловского месторождения она представляет собой жильную зону шириной 70-200 м и протяженностью около 1 км. Юго-Западная зона включает две золото-теллуридно-кварцевые жилы в гранитоидах Прасоловского массива. Это жилы Юго-Западная-1 мощностью до 3 м (в среднем 1,1 м) и Юго-Западная-2 мощностью до 2 м (в среднем 0,66 м). Обе жилы расчленены сбросом по долине р. Золотая на два участка – северо-западный (в приподнятом блоке) и юго-восточный (в опущенном). В северо-западном блоке обе жилы имеют крутое ( $70-90^{\circ}$ ) падение (от юго-восточного до северо-восточного). Здесь они характеризуются ветвлением и расщеплением. Жила Юго-Западная-1 «срезается» береговой линией Кунаширского пролива, а жила Юго-Западная-2 ответвляется к северо-северо-востоку, входя в систему жил рудоносной зоны Западная. В юго-восточном блоке обе жилы имеют более пологое ( $50-70^{\circ}$ ) юго-западное падение и, кулисообразно сменяя друг друга, следятся на протяжении 450 м до тектонического контакта гранитоидов Прасоловского массива и осадочно-вулканогенных пород алексинской свиты.

Обе жилы вскрыты системой из 10 взаимно связанных горных выработок (штольни, штреки, врезы и т.д.). Они сопровождают и, отчасти, замещают дорудные дайки, состав которых меняется от базальтов до риолитов. Жилы характеризуются сложным строением, весьма близким таковому Главной жилы рудоносной зоны Западная. Отличие состоит в том, что среди золото-теллуридно-кварцевых руд преобладают золото-селенидно-теллуридный, золото-блеклорудный и золото-гидрослюдистый подтип. Кроме того, золото-адуляр-кварцевый тип руд также преобладает над золото-полисульфидно-кварцевым.

Золотосеребряное оруденение данной рудоносной зоны характеризуется крайне неравномерным распределением и концентрацией в богатых гнездах. Руды отличаются преобладанием меди над свинцом и цинком (соотношение их 1:0,8:0,6) при отношении золота к серебру 0,03-0,29 (до 0,5 в богатых рудах). В сравнении с другими рудоносными зонами руды рассматриваемой зоны обогащены сурьмой, мышьяком и молибденом.

**Рудоносная зона Светлая** контролируется северо-восточным трансформным разломом Западно-Кунаширской системы (см. рис. 2-1), отчасти сопряженным с дуговыми элементами Прасоловской вулканоструктуры. На северо-восточном фланге Прасоловского вулканотектонического поднятия и за его пределами рудоносная зона перекрыта четвертичными эффузивами, а на юго-западном выходит в пределы Северянковской вулканотектонической депрессии. Рудоносная зона Светлая прослеживается на интервале почти 7 км, при ширине 40-150 м, сериями даек, кварцевых жил, зон прожилкового окварцевания или вторичных кварцитов с убогосульфидной или золотосеребряной минерализацией. Наиболее перспективным объектом этой зоны является рудо-

проявление «Светоч», представляющее собой минерализованное тело серицитовых кварцитов и кварцевых прожилков, замещающих дайку плагиогранитов Северянковского субинтрузивного комплекса, круто ( $70-90^{\circ}$ ) падающую в запад-северо-западном направлении в поле кварцевых диоритов Прасоловского комплекса. Вторичные кварциты и прожилки развиты преимущественно вдоль зальбандов дайки, реже замещают ее полностью. Вкрапленность и шпирсы сульфидов с золотом рассеяны в кварцитах вдоль реликтовой полосчатости дайки или в участках брекчирования. Распределение рудных минералов крайне неравномерное. Концентрация их наблюдается лишь в пересечении минерализованных вторичных кварцитов северо-западным разломом системы Тягина-Мористый. Мощность рудного тела 3 м, а протяженность 40 м. В пределах рудоносной зоны наблюдается пересечение золото-пирит (халькопирит)-кварцевых руд более поздними золото-полисульфидно-кварцевыми, золото-теллуридно-кварцевыми и адуляр-кварцевыми прожилками мощностью 3-5 см.

**Рудоносная зона Крошечная** расположена на юго-восточном склоне Прасоловской вулканоструктуры (см. рис. 2-1) и приурочена к дайке риолитов, которая контролируется дуговым разломом в гранитоидах Прасоловского комплекса в нижнем течении р. Золотая. На северном фланге она «срезается» сквозной зоной северо-западного трансформного разлома и сочленяется с рудоносной зоной Средне-Золотая, а на юго-западном фланге пересекается рудоносной зоной Нижне-Золотая и сочленяется с системой прототектонической трещиноватости гранитоидов Прасоловского массива, расщепляясь на ряд субпараллельных зон. Рудоносная зона представляет собой серию кварцевых прожилков и минерализованных зон дробления вдоль даек риодацитов и риолитов, иногда нацело переработанных во вторичные кварциты. Она прослеживается на интервале 1,6 км при ширине 60-250 м.

На участке пересечения с рудоносной зоной Нижне-Золотая одна из апофиз рудоносной зоны Крошечная содержит рудопроявление «Крошка». Оно представляет собой серию золото-полисульфидно-кварцевых и золото-теллуридно-кварцевых прожилков мощностью 3-5 см (в раздувах до 20 см), круто ( $70-85^{\circ}$ ) падающих к западу-северо-западу. Эти прожилки сопровождают, секут и, отчасти, замещают дорудные тела и жилы в пропилитизированных плагиогранитах. Рудные тела сложены преимущественно золото-полисульфидно-кварцевыми и золото-теллуридно-кварцевыми типами и содержат незначительные количества меди, висмута, олова. Золото-серебряное отношение в них 0,1-0,14.

**Рудоносная зона Меридиональная** контролируется северо-северо-восточным трансформным разломом Западно-Кунаширской системы в гранитоидах Прасоловского интрузивного комплекса и в вулканогенно-осадочных породах кунаширской свиты (см. рис. 2-1). Зона сопровождается дайками, изменяющимися по составу от андезитов до риолитов, а также карбонатно-кварцевыми жилами и минерализованными телами вторичных кварцитов. Ее протяженность составляет около 6 км, а ширина 60-80 м. Северный фланг зоны достигает побережья Кунаширского пролива, а на южном

фланге она сочленяется с рудоносной зоной Светлая. В пределах зоны выделяется два пункта минерализации в карбонатно-кварцевых жилах, вскрытых штольнями и врезами в правом борту 4-го правого притока р. Золотая. Первый из них приурочен к пересечению рудоносных зон Меридиональная и Верхняя. В жилах, мощность которых порядка 3 м, а протяженность 600 м, преобладают руды золото-пирит-кварцевого и (адуляр) карбонатно-кварцевого типов. Золото-теллуридно-кварцевые руды представлены полосами с убогой вкрапленностью рудных минералов. Рудам присуще довольно низкое золото-серебряное отношение (до 0,11, в среднем 0,03).

**Рудоносная зона Верхняя** прослеживается на интервале порядка 3,5 км вдоль дугового разлома Прасоловской вулканоструктуры от 4<sup>го</sup> левого притока р. Золотая (где она срезается трансформным разломом рудоносной зоны Сквозная) до среднего течения безымянного ручья у траверза острова Мористый (где она пересекается рудоносной зоной Меридиональная и сочленяется с рудоносной зоной Мористая-4). Повсеместно она несет маломощные (0,1-0,5 м) кварцевые жилы и зоны прожилкового окварцевания шириной до 1,5 м, сопровождающие дайки пестрого состава. В участках сопряжения с системами трансформных разломов рудоносных зон Мористая-1, Сквозная и Меридиональная зона Верхняя содержит пункты минерализации (золото) полисульфидно-кварцевого и (золото) касситерит-кварцевого типов. Золото-теллуридно-кварцевые руды в ней пока не выявлены.

**Рудоносная зона Восточная** представляет собой западную апофизу рудоносной зоны Верхняя в гранитоидах Прасоловского комплекса, расположенную в среднем течении р. Золотая (см. рис. 2-1). Зона включает серию кварцевых жил и минерализованных зон, сопровождающих дайки. Они прослеживаются на протяжении 2 км и вскрыты пятью штольнями общей протяженностью 577 м. Монолитные плитообразные жилы метакolloидного кварца мощностью до 3 м и протяженностью 700 м вскрыты штольнями в наиболее глубоком эрозионном врезе долины р. Золотая. Здесь жилы имеют устойчивое относительно пологое (40-70<sup>о</sup>) падение на запад. По мере повышения эрозионного среза в бортах долины кварцевые жилы сменяются зоной прожилкового окварцевания в сочленении с рудоносной зоной Верхняя на северном фланге или линейными телами вторичных кварцитов по экстррузивным риолитам на южном фланге. В штольнях жилы сложены преимущественно низкопродуктивными ранними (золото) пирит-кварцевыми и (золото) полисульфидно-кварцевыми рудами, при ограниченном распространении золото-теллуридно-кварцевых.

**Рудоносная зона Средне-Золотая** контролируется одним из дуговых элементов Прасоловской вулканотектонической структуры и прослеживается на интервале 4,6 км при ширине 20-50 м от побережья Кунаширского пролива на северо-западе до границ Северянковской вулканоструктуры на юго-западе (см. рис. 2-1). В южной части зона пересечена и отчасти сдвинута северо-западными трансформными разломами рудоносных зон Нижне-Золотая и Сквозная. Здесь в гранитоидах Прасоловского массива, в бортах долины р. Золотая, она включает

серию кварцевых жил мощностью 0,1-0,5 м. Их протяженность по простиранию около 500 м, а по падению – не менее 100 м. Жилы местами переходят в зоны прожилкования и тела кварцитов. Они сопровождают и замещают дайки, состав которых меняется от базальтов до риолитов. Сложены жилы золото-полисульфидно-кварцевыми рудами невысокой продуктивности. Золото-теллуридно-кварцевые руды здесь также пока не выявлены.

**Рудоносная зона Мористая-2** входит в группу трансформных разломов системы сбросо-сдвигов Тятина-Мористая. Она прослеживается на протяжении 2,7 км от побережья Кунаширского пролива к юго-востоку в истоки р. Золотая при ширине 40-150 м. Зона сопровождает дайки пестрого состава и представлена кварцевыми жилами и прожилками. Наиболее важные из них локализируют пункт минерализации «Андезитовый». Здесь в субвулканическом теле андезитов штольнями, общей протяженностью 30 м, вскрыта крутопадающая (70-85°) на северо-запад жила мощностью 0,1-0,4 м. Руды представлены золото-полисульфидно-кварцевым типом. Другие жилы (в юго-восточной части зоны) сложены (золото) пирит-халькопирит-кварцевыми рудами. Богатые золото-теллуридно-кварцевые руды в этой зоне также не обнаружены.

## **2.2. Основные рудоносные зоны Северянковской вулканотектонической депрессии**

Северянковская вулканоструктура (площадью 25 кв. км) расположена в пересечении субпродольного Западно-Кунаширского разлома с поперечной системой разломов Михайловско-Рогачевская. В ее пределах оруденение контролируется дугowymi, реже радиальными структурными элементами и трансформными разломами, составляющими продолжение рудоносных зон Юго-Западная и Светлая или формирующими новые рудоносные зоны (Сухоложская, Удачная, Рогачевская, Лимонитовая, Перевальная и Зброшенная).

**Рудоносная зона Светлая** расположена в поле позднемиоцено-раннеплиоценовых вулканитов и приурочена к северо-восточному трансформному разлому (см. рис. 2-1). Она прослеживается на протяжении 6,4 км при ширине 80-150 м. Зона сопровождается метасоматитами, образующими последовательную смену зон в вертикальном разрезе (снизу вверх): пропилиты-калишпатофиры-аргиллизиты-серадсодержащие алунитовые и диаспоровые кварциты. В пределах северной части зоны выделяется два пункта минерализации. «Северянковский» и «Левый», соответственно с полиметаллически-золото-серебряным и золото-калишпат-кварцевым оруденением. Первый приурочен к линейным телам аподацитовых баритосодержащих кварцитов (мощностью до 3 м) с прожилково-вкрапленной минерализацией сфалерита, галенита и халькопирита. По направлению к периферии они фациально переходят в кварцсерицитовые метасоматиты и далее в альбит-хлоритовые пропилиты. Содержание золота в рудах до 0,5 г/т, а серебра – до 100 г/т. Золото-серебряное отношение изменяется от 0,005 до 0,05.

Золото-калишпат-кварцевый пункт минерализации «Левый» локализуется в поле калишпатизированной экструзии дацитов в тектоническом контакте ее с туфами алахинской свиты. Рудная минерализация приурочена к тектоническим глинам мощностью 0,1 м. Содержание золота до 3 г/т, а серебра 30 г/т.

Далее в юго-западном направлении рудоносная зона Светлая трассируется коренными выходами алунитовых кварцитов, содержащих золото до 0,1 г/т и серебро до 20 г/т, а еще далее – диаспоровыми кварцитами с рассеянной сульфидной минерализацией (пирит, реже сфалерит). Повышенных концентраций золота здесь не выявлено. Однако, по аналогии с другими участками Прасоловского рудного поля, в диаспоровых кварцитах допустимо ожидать сульфосольно-золотосеребряное оруденение.

**Рудоносная зона Юго-Западная** располагается в поле позднемиоценраннеплиоценовых лав, туфов и экструзий кислого и умеренно кислого состава и приурочена к трансформному разлому (см. рис. 2-1). Зона следует по коренным выходам и развалам кварц-серицитовых и кварц-гидрослюдистых метасоматитов на протяжении почти 3,5 км при ширине 80-200 м. Она характеризуется наличием пирит-гематит-кварцевых прожилков с баритом и халцедоном и крутопадающих (60-90<sup>0</sup>) залежей адуляр-кварцевых метасоматитов с баритом, сфалеритом, галенитом, реже халькопиритом (пункт минерализации «Медвежий»), которые окаймляются серицитовыми кварцитами и аргиллизитами. Оруденение сосредоточено вдоль зон дробления шириной 0,2-2 м. Содержание золота достигает 5,2 г/т, а серебра – 32,2 г/т.

На юго-восточном фланге зоны крутопадающие (75-85<sup>0</sup>) минерализованные зоны дробления мощностью до 6 м развиты, в основном, в поле купольных брекчий среднего состава. Они представлены алуни- (ярозит)-содержащими вторичными кварцитами, содержание золота в которых 1,1 г/т, а мышьяка более 1%.

**Рудоносная зона Сухоложская** приурочена к радиальному разлому одноименной вулкано-тектонической депрессии. Она прослеживается по обнажениям и свалам на протяжении 1,2 км шириной 30-70 м в поле базальтов, андезитов и дацитов. Зона сопровождается низкотемпературной пропилитизацией пород основного и среднего состава, аргиллизацией и окварцеванием более кислых разностей. Она включает маломощные (0,1-0,3 м) минерализованные зоны дробления с баритом, пиритом, сфалеритом, галенитом и халькопиритом, содержание золота в которых 0,4 г/т, а серебра до 30 г/т. Золото-серебряное отношение в рудах колеблется от 0,08 до 0,01, а цинк-медное равно 0,66.

**Рудоносная зона Удачная** расположена в поле риодацитов, дацитов, туфоконгломерато-брекчий и туфоаргиллитов (см. рис. 2-1) и контролируется субширотным трансформным разломом. Она прослежена поверхностными горными выработками, в обнажениях и по свалам гидротермалитов на протяжении 2,6 км шириной 70-150 м. В экструзии дацитов она сопровождается зональным комплексом кремнекальевых метасоматитов с кварц-адуляровыми гидротермалитами в осевой зоне. Последние образуют метасоматические залежи

мощностью до 8 м и линейные тела (0,2-0,5 м мощностью) с существенно золотым (для первых) и золотосеребряным (для вторых) оруденением. За пределами экструзивных риодацитов оруденение резко ослабевает и в поле туфоаргиллитов исчезает.

На пересечении рудоносной зоной Удачная локального эруптивного центра калишпатизированных туффизитов умеренно-кислого состава локализуется одноименное рудопоявление площадью около 1 км. В его пределах оконтурена крутопадающая ( $60^{\circ}$ ) на северо-восток рудная залежь «Осьминог». Содержание золота в ней достигает 330 г/т, а серебра 135 г/т. Выделяется два типа минерализации: жильный золото-гетит-кварцевый (с баритом) и метасоматический золото-калишпа-кварцевый. Руды рудопоявления «Удачное» характеризуются золото-серебряным отношением равным 2, цинк-медным – 4, а цинк-свинцовым – 5.

**Рудоносная зона Рогачевская** контролируется дуговым разломом Северянковской вулканоструктуры. Она прослеживается по минерализованным теплым источникам в долине р. Северянка, по единичным коренным обнажениям и делювиальным свалам в поле вулканогенно-осадочных пород алексинской свиты на протяжении 2,7 км шириной 50-150 м. Зона сопровождается гидротермальной аргиллизацией и окварцеванием, а также знаковой золотоносностью аллювия дренирующих ее ручьев и включает минерализованные зоны дробления с адуляром и серицитом мощностью 0,1-0,2 м и линейные тела вторичных кварцитов по флюидно-эксплозивным брекчиям риолитов мощностью 0,2-0,3 м. Содержание золота в них до 0,2 г/т, а серебра до 80 г/т. Золото-серебряное, цинк-медное и цинк-свинцовое отношение равны соответственно 0,007, 1, 2,2.

**Рудоносная зона Лимонитовая** приурочена к радиальному разлому Северянковской вулкано-тектонической депрессии и прослеживается в обнажениях на интервале в 1,3 км. Она служит контактом между риолитами и туффами и сопровождается серасодержащими алуниновыми и гетит-ярозитовыми кварцитами шириной 50-250 м. Зона включает крутопадающие ( $60-80^{\circ}$ ) залежи золото-гетит (ярозит)-кварцевых руд мощностью до 3 м. Содержание золота в них до 1 г/т, а серебра до 15 г/т.

**Рудоносная зона Перевальная** контролируется трансформным разломом северо-западного простирания и прослеживается по обнажениям и свалам гидротермалитов в поле позднемиоцен-раннеплиоценовых диоритовых порфиритов, риодацитов, риолитов, вулканогенно-осадочных пород алексинской свиты и плиоценовых экструзий андезитов на протяжении 7 км. На северо-западном фланге зона включает локальные ореолы калишпатизации и аргиллизации, сменяющиеся вверх по разрезу ореолами серасодержащих алуниновых кварцитов. На юго-восточном фланге эта рудоносная зона сопровождается пропилитизацией и окварцеванием диоритовых порфиритов, а также монокварцитами по экструзии риолитов. Ширина зоны гидротермально измененных пород изменяется от 50 до 120 м. В осевой части зоны развиты линейные тела вторичных кварцитов и тектонических брекчий с вкрапленной и гнездово-про-

жилково-вкрапленной минерализацией пирита, сфалерита, халькопирита и галенита. Содержание золота в них достигает 20 г/т, а серебра – 100 г/т. Золото-серебряное отношение здесь равно 0,65, цинк-медное – 0,2, а цинк-свинцовое – 2.

**Рудоносная зона Зброшенная** развита в поле позднемиоцен-раннеплиоценовых вулканитов и вулканогенно-осадочных пород алексинской свиты. Она приурочена к дуговому разлому и прослеживается на протяжении 4,2 км по коренным обнажениям и свалам гидротермалитов. Правосторонними сбросо-сдвигами рудных зон Перевальная и Светлая зона Зброшенная ступенчато погружается в северо-восточном направлении. Участки оруденения в ее пределах представлены алунит-кварцевыми залежами. Они приурочены к локальным эруптивным центрам, выполненным флюидно-эксплозивными брекчиями кислого состава и туффизитами, преобразованными в метасоматические кварциты. Минерализованная залежь несет вкрапленность пирита, гнезда и корки ярозита, алунита и содержит очень мелкое самородное золото. Среднее содержание золота в них 1-2 г/т. В отдельных телах кварцитов содержание достигает до 20 г/т, а серебра до 100 г/т. Золото-серебряное отношение в рудах данной зоны колеблется от 0,2 до 0,06, цинк-медное – от 0,25 до 0,07, а цинк-свинцовое – от 1 до 0,08.

\*\*\*

Таким образом, золото-серебросодержащие рудные тела Прасоловского месторождения представлены либо системами крутопадающих кварцевых жил, либо зонами вторичных кварцитов и прожилкового окварцевания. Золотосеребряное оруденение в них характеризуется несколькими минеральными типами – золото-пирит-кварцевым, золото-полисульфидно-кварцевым, золото-теллуридно-кварцевым, золото-карбонатно-кварцевым и золото-калишпат-кварцевым. При этом наибольшее разнообразие минеральных типов отмечается для рудных тел, расположенных в пределах Прасоловского вулканотектонического поднятия. Руды Северянковской вулканотектонической депрессии включают только два минеральных типа – золото-полиметаллически-кварцевый и золото-калишпат-кварцевый. В пределах обеих вулканоструктур продуктивность Прасоловского рудного поля обеспечивается исключительно золото-теллуридно-кварцевым типом руд, содержание золота и серебра в котором составляет 60-80 %, однако наиболее распространенными являются золото-полиметаллические руды, которые в случае разработки месторождения обеспечат максимально негативное воздействие на окружающую среду.

### ГЛАВА 3. МИНЕРАЛЬНЫЙ И ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ РУД ПРАСОЛОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Прасоловское месторождение характеризуется своеобразным минеральным и вещественным составом руд, что обусловлено специфическими геодинамическими условиями и многостадийностью его формирования. Работы по изучению минералогии и условий образования месторождения в разные годы и с разной детальностью проводились многими исследователями (Неверов, 1964; 1970; Коваленкер, Русинов, 1986; Данченко, Иванов, 1989; Коваленкер и др., 1989; Данченко, 1990; 1991; Danchenko, 1995 и др.).

В настоящей главе приводятся основные данные по типам руд, их минеральному и вещественному составу, текстурно-структурными особенностями, последовательности рудоотложения и т.д., полученные в ходе собственных многолетних исследований (Кемкина, 1998<sub>а</sub>, 2001<sub>а</sub>, 2002; Кемкина, Севериненко, 2006<sub>а</sub>; Kemkina et al., 2001 и др.).

#### 3.1. Минеральные типы руд

На основе детального изучения вещественного состава, минеральных парагенезисов и их взаимоотношений, а также текстурно-структурных особенностей руд Прасоловского месторождения можно выделить пять их минералогических типов, а именно: золото-пирит (халькопирит)-кварцевый, золото-полисульфидно-кварцевый, золото-теллуридно-кварцевый, золото-адуляр (карбонат)-кварцевый и гипергенный с вторичными сульфидами. Следует отметить, что аналогичные типы руд были выделены В. Я. Данченко (1990, 1991) при изучении соотношения разных типов золотосеребряной минерализации в пределах Курильского островодужного вулканического пояса. Наиболее широко распространены первые два типа, которые встречаются практически во всех рудоносных зонах. Однако, продуктивность рудных тел обеспечивается почти исключительно третьим типом – золото-теллуридно-кварцевым. Все минеральные типы руд состоят, главным образом, из кварца с примесью глинистых минералов, гидрослюд, карбонатов и др. и рудных минералов, количество которых обычно не превышает 3 %, редко достигает 5 %. Ниже дана краткая характеристика выделенных минеральных типов руд:

**Золото-пирит (халькопирит)-кварцевые** руды развиты во всех рудоносных зонах и слагают приальбандовые части кварцевых жил. Рудная минерализация в них образует редкую изометричную и линзовидную вкрапленность, а также неяснополосчатые и брекчиевидные выделения (рис. 3-1). Главными минералами являются кварц, серицит, катаклазированный пирит, с размером зерен до 0,5 мм, сфалерит, галенит, акантит, блеклые руды, а также самородное золото. Золотоносность этих руд в целом невысока (среднее содержание, по данным Прасоловской ГПП ФГУПП «СахГРЭ»), составляет около 1 г/т). Золото в этом типе руд представлено редкими мельчайшими (0,02-0,04 мм) ксеноморфными выделениями, которые выполняют межзерновые пространства и

микродузовые пустоты в кварце, а также микротрещины в сульфидах. Пробность золота высокая и составляет в среднем 980 ‰. Отношение Au:Ag = 0,003 (Данченко, 1991).

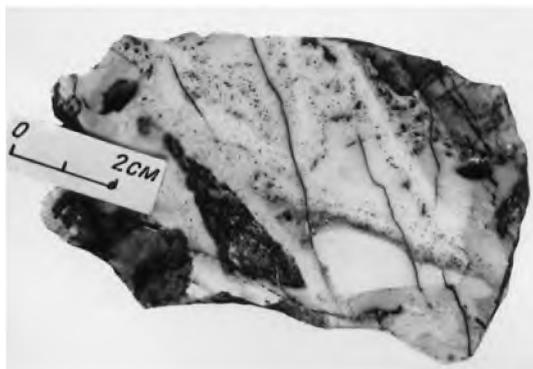


Рис. 3-1. Золото-пирит (халькопирит)-кварцевые руды

**Золото-полисульфидно-кварцевые** руды пересекают ранние золото-пирит-кварцевые и слагают полосы (шириной до 30 см), содержащие пятнистую, гнездовую и фестончатую вкрапленность (рис. 3-2) или массивные сульфидные руды с зональным строением. В этом типе преобладающими являются кварц, адуляр, барит, гидрослюды, пирит, сфалерит, сульфид железа и цинка (фаза  $FeZn_2S_4$  с содержанием железа до 20 мас. %), галенит, халькопирит, борнит с продуктами распада твердого раствора, халькозин. Кроме того, присутствуют блеклые руды, представленные тетраэдритом и цинкистым тетраэдритом (содержание Zn до 7 мас. %). В составе данного типа присутствуют также теллуриды – гессит, креннерит, самородный теллур, количество которых ограничено. Содержание золота здесь несколько выше (до 20 г/т) по сравнению с первым типом, а его зерна более крупные (их размер изменяется от 0,08 до 0,5 мм). Золото образует округлые включения в кварце. Кроме того, совместно с халькопиритом оно «залечивает» трещины в пирите, а также присутствует в виде мелких (до 0,005 мм) выделений в борните, образуя с ним ровные, без признаков коррозии, границы. Пробность золота, в зависимости от минеральной

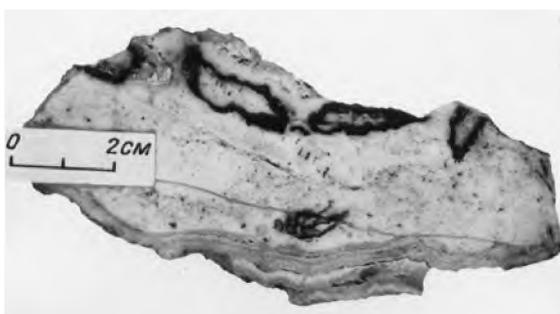
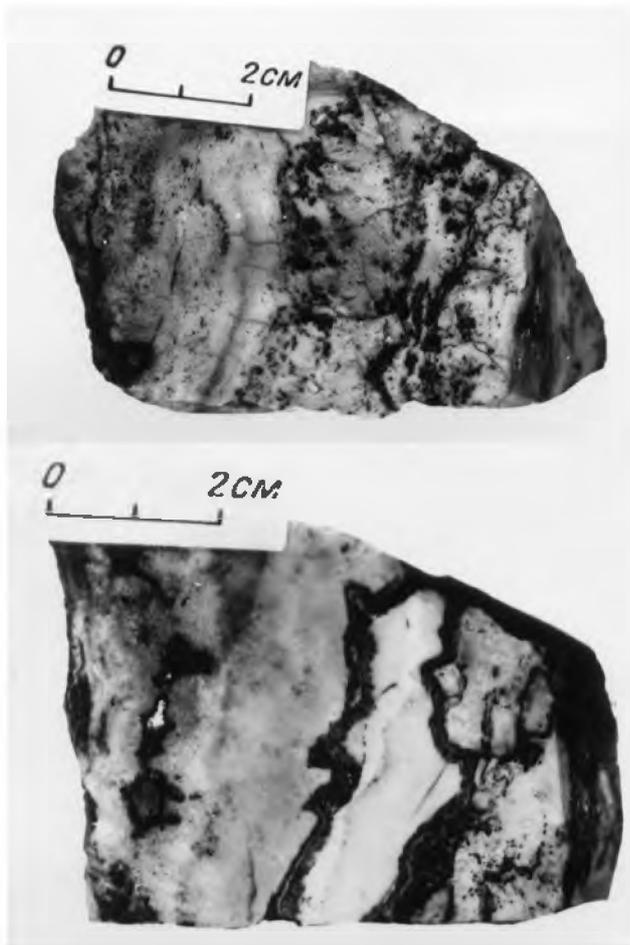


Рис. 3-2. Золото-полисульфидно-кварцевые руды

ассоциации, изменяется от 810 до 950 ‰. Отношение Au:Ag варьирует от 0,08 до 1,66 (Данченко, 1991).

**Золото-теллуридно-кварцевые** руды являются наиболее продуктивными и обеспечивают 60-80 % всего золота и серебра месторождения. Эти руды слагают полосы (рис. 3-3) мощностью от 2 до 40 см. Иногда в них образуются раздувы, приуроченные преимущественно к перегибам простирания и падения жил, а также пересечениям зон трансформными разломами.



Полосы золото-теллуридных руд пересекают более ранние золото-полисульфидно-кварцевые руды. Минеральный состав их очень богат. В них широко представлены пирит, молибденит, сфалерит, халькопирит, галенит, акантит, а также теллуриды (гессит, петцит, алтаит, штютцит, калаверит, креннерит, сивванит, теллур самородный, мутманнит, кури-

Рис. 3-3. Золото-теллуридно-кварцевые руды

лит, селенотеллур, селено-содержащий теллурид висмута). Кроме того, присутствуют селениды (клаусталит, науманит), блеклые руды (тетраэдрит, голдфилдит и висмутсодержащие переменного состава), сульфосоли серебра, а также минеральные фазы следующих сос-

тавов:  $Au(Ag,Cu)_4(Te,S)_2$ ,  $(Ag,Cu)_2(Te,S)$ ,  $(Cu,Ag)_2TeS_2$ ,  $(Ag,Cu,Pb,Bi)_5Te_2(Se,S)_6$ ,  $AgAuTe$ ,  $(AuAg)_2Te$ ,  $(Ag,Cu)(Pb,Bi)(Te,As,Sb)(Se,S)_4$ . В рудах обильны кварц, барит, гидрослюда, халцедон. Золото образует как очень мелкую эмульсионную вкрапленность (0,003-0,009), так и более крупные (до 0,8 мм) изометричные, пластинчатые и ксеноморфные выделения и тонкие просечки в кварце, блеклых рудах, гессите, петците и других теллуридах. Кроме того, оно находится в сростании с халькопиритом, сфалеритом, клаусталитом, тетраэдритом и др. Его проба 820-980 ‰, а Au:Ag отношение меняется от 0,25 до 2,5 (Данченко, 1991).

**Золото-адуляр (карбонат)-кварцевые руды** развиты сравнительно ограниченно на месторождении и выполняют внутренние части наиболее крупных жил, последовательно сменяя золото-теллуридно-кварцевые руды, либо пересекают более ранние минеральные типы с выходом во вмещающие породы в виде самостоятельных жил. В целом, руды характеризуются широким развитием кварца, карбоната, адуляра, глинистых минералов (рис. 3-4). Количество же рудных минералов ограничено. Они представлены идиоморфным пиритом, марказитом, халькопиритом, сфалеритом, редко теллуридами, акантитом и низкопробным золотом (721-860 ‰). Золотоносность данного типа руд невысока. Отношение  $Au:Ag = 0,5$  (Данченко, 1991).

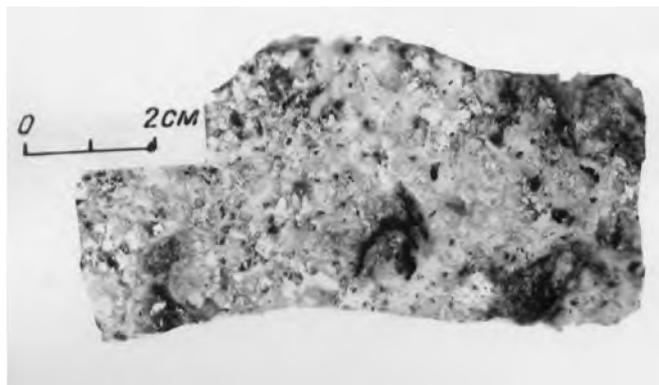


Рис. 3-4. Золото-адуляр (карбонат)-кварцевые руды. Здесь и далее все фотографии авторов

**Руды вторичного сульфидного обогащения** на месторождении развиты крайне ограниченно. Они слагают приповерхностные части жил вдоль зон наложенной трещиноватости, распространяясь на глубину на 20-40 м (и вероятно больше) и образованы блеклыми рудами, акантитом, борнитом, халькозином, ковеллином, лимонитом, малахитом, азуритом, гетитом, кераргиритом, идаитом, клокманитом, самородным золотом и серебром. Золото представлено преимущественно высокопробными (950 ‰) вторичными образованиями (горчичное золото) в гессите и теллуридах. Отношение  $Au:Ag = 0,33$ .

Таким образом, анализ минералогического состава, количеств рудных минеральных фаз, их соотношений и текстурных характеристик в выделенных типах руд позволяет предположить, что формирование руд Прасоловского месторождения осуществлялось в условиях постоянно изменяющегося геохимического режима, проявляющегося в закономерном снижении активности сульфидной серы, повышении активности теллура, затем селена и кислорода на фоне понижения температуры. Вследствие этого происходила смена сульфидов сульфотеллуридами, затем теллуридами, селенидами и оксидами.

### 3.2. Краткая характеристика минеральных фаз

По результатам проведенных исследований установлено, что руды Прасоловского месторождения характеризуются большим разнообразием рудных

минералов, включающих самородные элементы, сульфиды, селениды, теллуриды, сульфосоли, галогениды, карбонаты и гидроксиды (Кемкина, 2001<sub>б</sub>, 2002; Kemkina et al., 2001). Диагностика минералов осуществлялась на основе оригинальных данных оптического и рентгеноструктурного исследований, а также результатов микрорентгеноспектрального анализа.

Как отмечалось выше, количество рудных минералов в рудах Прасоловского месторождения не превышает 3 %, редко 5 % (в среднем 0,8-1,5 %), из которых большая половина представлена сульфидами. Такое соотношение количества и качества рудной минерализации позволяет отнести данное месторождение, согласно классификации Н.В. Петровской (1973), к малосульфидной золото-кварцевой формации.

Основные рудные минералы приведены в таблице 3-1. В основу определения их распространенности положены как количественные (результаты микроскопического изучения, химических, спектральных и других видов анализов), так и качественные (визуальные с элементами минералого-геохимического картирования) методы оценки распространения минеральных фаз по месторождению.

Таблица 3-1

**Основные рудные минералы Прасоловского месторождения  
и их распространенность в рудах**

Минерал	Формула	Распространенность
<b>Самородные элементы и интерметаллиды</b>		
Золото	Au	++
Серебро	Ag	+
Электрум	(AuAg)	+
Теллур	Te	+
<b>Сульфиды</b>		
Молибденит	MoS <sub>2</sub>	+
Пирит	FeS <sub>2</sub>	+++
Марказит	FeS <sub>2</sub>	++
Халькопирит	CuFeS <sub>2</sub>	+++
Борнит	Cu <sub>5</sub> FeS <sub>4</sub>	+++
Идаит*	Cu <sub>3</sub> FeS <sub>4</sub>	+
Халькозин	Cu <sub>2</sub> S	++
Ковеллин	CuS	++
Фаза*	Cu <sub>3</sub> S <sub>2</sub>	+
Фаза*	(CuZn)S	+
Сфалерит	ZnS	+++
Фаза*	FeZn <sub>2</sub> S <sub>4</sub>	+
Акантит	[Ag <sub>2</sub> S]	+
Фаза*	AgS	+
Рокезит*	CuInS <sub>2</sub>	+
Галенит	PbS	++
Галенит-клаусталит	PbS-PbSe	++

Минерал	Формула	Распространенность
<b>Селениды</b>		
Клаусталит	PbSe	+++
Клокманит*	CuSe	+
Науманит	Ag <sub>2</sub> Se	+
Теллуроселениды (?) свинца и висмута - фаза 1*	(Ag,Cu)(Pb,Bi)(Te,As,Sb)(Se,S) <sub>4</sub>	+
Теллуроселениды (?) свинца и висмута - фаза 2*	(Ag,Cu,Pb,Bi) <sub>5</sub> Te <sub>2</sub> (Se,S) <sub>6</sub>	+
<b>Теллуриды</b>		
Гессит	Ag <sub>2</sub> Te	+++
Петцит	Au <sub>3</sub> AgTe <sub>2</sub>	++
Гессит-петцитовый твердый раствор	(AuAg) <sub>2</sub> Te	+
Теллурид золота и серебра*	AuAgTe	+
Сильванит	AuAgTe <sub>4</sub>	++
Штютцит	Ag <sub>5-x</sub> Te <sub>3</sub>	+
Калаверит	AuTe <sub>2</sub>	+
Креннерит	(Au,Ag)Te <sub>2</sub>	+
Мутманнит*	(Au,Ag)Te	+
Курилит	(Ag,Au) <sub>2</sub> (Te,Se,S)	+
Алтаит	PbTe	++
Селенистый теллур	Te <sub>3</sub> Se <sub>4</sub>	+
Селеносодержащий теллурид висмута*	Bi <sub>2</sub> SeTe <sub>2</sub>	+
Фаза*	Au(Ag,Cu) <sub>4</sub> (Te,S) <sub>2</sub>	+
Фаза*	(Ag,Cu) <sub>2</sub> (Te,S)	+
Фаза*	(Cu,Ag) <sub>2</sub> TeS <sub>2</sub>	+
<b>Галогениды</b>		
Хлораргирит	[AgCl]	+
<b>Сульфосоли</b>		
Виттихенит*	Cu <sub>3</sub> BiS <sub>3</sub>	+
Прустит	Ag <sub>3</sub> AsS <sub>3</sub>	+
Теннантит	Cu <sub>12</sub> As <sub>4</sub> S <sub>13</sub>	+++
Тетраэдрит	Cu <sub>12</sub> Sb <sub>4</sub> S <sub>13</sub>	+++
Голдфилдит	Cu <sub>12</sub> (Te,Sb,As) <sub>4</sub> S <sub>13</sub>	+++
Ag-тетраэдрит	(Cu,Ag) <sub>12</sub> Sb <sub>4</sub> S <sub>13</sub>	++

**Примечание:** \* - минералы и минеральные фазы, обнаруженные впервые.  
Встречаемость минералов: +++ – широко распространенные, ++ – распространенные, + – редкие.

### 3.2.1. Самородные элементы и интерметаллиды

Данная группа на месторождении представлена самородными золотом, серебром, электрумом и теллуридом.

**Золото (Au)** главный промышленный минерал данного месторождения. Оно присутствует во всех минеральных типах руд, но наиболее продуктивными в отношении золотой минерализации являются золото-теллуридно-кварцевые руды, где оно составляет 2-3 % от общего количества рудных минералов. Содержание золота как в пределах рудных тел, так и в минеральных типах непостоянно и изменяется от 0,5 до 25 г/т, достигая иногда в отдельных бороздовых пробах 840 г/т. Кроме содержания золота в рудах вариациям подвержены также морфология и размеры его минеральных выделений, пробность и химический состав.

При изучении в шлифах установлено, что форма минеральных выделений самородного золота разнообразна. В золото-пирит (халькопирит)-кварцевых рудах оно встречается в виде ксеноморфных зерен. Для золото-теллуридно-кварцевых руд более характерны удлиненные, ветвящиеся и прожилкоподобные (рис. 3-5 приложения 1) образования. Округлые, комковатые и овальные (рис. 3-6 приложения 1) выделения преобладают в золото-полисульфидно-кварцевых и золото-адуляр (карбонат)-кварцевых рудах.

Размер золотинок также варьирует в широких пределах и изменяется от микроскопического (0,002-0,004 мм) и мелкого (0,05 до 0,5 мм), до относительно крупного (1,0-2,0 мм). При этом, сравнительно крупные образования золота наблюдаются в золото-полисульфидно-кварцевых и золото-теллуридно-кварцевых рудах, а в золото-адуляр (карбонат)-кварцевых оно образует пленочные покрытия (толщиной 0,001-0,05 мм) на поверхности зерен кварца.

Результаты микрорентгеноспектрального анализа (табл. 3-2), а также данные В.Я. Данченко (1991) показывают, что пробность золота также непостоянна. Она более высокая для золото-теллуридно-кварцевых руд (829-980 ‰) и руд вторичного обогащения (930-980 ‰), но несколько ниже (711-869 ‰) для первых двух минеральных типов и золото-адуляр (карбонат)-кварцевых руд (714-776 ‰). При этом отмечается, что внутри каждого минерального типа пробность золота имеет четкую тенденцию к понижению от ранних генераций золота к поздним. Например, в золото-полисульфидно-кварцевом типе руд В.Я. Данченко (1991) выделяет галенит-сфалеритовую (раннюю) и борнит-халькозиновую (позднюю) ассоциации, пробность золота которых соответственно составляет 844-873 и 700 ‰. Нередки случаи обнаружения зонального золота, представленного сростками зерен разной пробности (рис. 3-7 приложения 1). Как правило, внутренние зерна имеют более низкую пробность золота (800-850 ‰), тогда как обрастающие их зерна более высокопробны (930-980 ‰) и представлены вторичным (горчичным) золотом, которое в шлифах характеризуется более темным (коричневатым) оттенком. Редко отмечается и обратная картина, когда вокруг крупных выделений высокопробного золота развивается более низкопробное.

Таблица 3-2

## Химический состав (мас. %) и кристаллохимические формулы золота, серебра, электрума и теллура

№ обр.	Минерал	Fe	Cu	Zn	As	Te	Sb	Se	S	Au	Ag	Сумма	Кристаллохимическая формула
523/17 <sup>X</sup>	Au	-	-	-	-	-	-	-	-	83,5	16,7	100,2	Au <sub>0,77</sub> Ag <sub>0,27</sub>
521/7 <sup>X</sup>	Au	-	-	-	-	-	-	-	-	93,0	6,00	99,0	Au <sub>0,89</sub> Ag <sub>0,11</sub>
P-78/4	Au	-	-	-	-	-	-	-	-	82,95	16,59	99,54	Au <sub>0,77</sub> Ag <sub>0,27</sub>
P-78/4	Au	-	-	-	-	-	-	-	-	85,03	14,02	99,05	Au <sub>0,77</sub> Ag <sub>0,23</sub>
ПС-90-35	Au	-	-	-	-	0,30	-	-	-	86,94	14,29	101,53	Au <sub>0,77</sub> Ag <sub>0,22</sub> Te <sub>0,01</sub>
ПС-3-1	Au	-	-	-	-	-	-	-	-	91,48	5,79	97,27	Au <sub>0,9</sub> Ag <sub>0,1</sub>
ПС-3-3	Au	-	0,06	-	-	-	-	-	-	90,28	7,19	97,54	Au <sub>0,87</sub> Ag <sub>0,13</sub>
ПС-2-34	Au	-	1,22	-	-	2,96	-	-	-	71,16	15,82	97,15	Au <sub>0,67</sub> Ag <sub>0,23</sub> Te <sub>0,04</sub> Cu <sub>0,03</sub>
ПС-2-35	Au	-	1,06	-	-	-	-	-	-	85,47	11,08	97,61	Au <sub>0,78</sub> Ag <sub>0,19</sub> Cu <sub>0,03</sub>
Л 1-8	Au	-	-	-	-	4,16	-	-	-	77,61	18,10	99,87	Au <sub>0,73</sub> Ag <sub>0,22</sub> Te <sub>0,05</sub>
Л 1 (33)	Au	0,05	0,24	-	0,18	-	-	0,19	0,17	87,94	12,21	100,98	Au <sub>0,78</sub> Ag <sub>0,20</sub> Cu <sub>0,01</sub> Se <sub>0,01</sub>
3634-9	AuAg	-	-	-	-	2,07	-	-	-	62,05	39,30	103,42	Au <sub>0,45</sub> Ag <sub>0,52</sub> Te <sub>0,02</sub>
3634-9	AuAg	-	-	-	-	0,01	-	-	-	62,01	39,50	101,52	Au <sub>0,46</sub> Ag <sub>0,54</sub>
3634-9	AuAg	-	-	-	-	3,06	-	-	-	72,08	27,33	102,47	Au <sub>0,57</sub> Ag <sub>0,39</sub> Te <sub>0,04</sub>
3634-9	AuAg	-	-	-	-	0,01	-	-	-	71,98	27,57	99,56	Au <sub>0,61</sub> Ag <sub>0,39</sub>
P-78/2	Te	0,22	4,78	0,23	0,82	86,24	1,29	1,16	0,46	-	4,68	100,03	Te <sub>0,79</sub> Cu <sub>0,09</sub> Ag <sub>0,03</sub> Zn <sub>0,01</sub> As <sub>0,01</sub> Sb <sub>0,01</sub> S <sub>0,01</sub> Se <sub>0,02</sub>
521/12 <sup>X</sup>	Te	-	-	-	-	99,85	-	-	-	-	-	99,85	Te <sub>1,0</sub>
2678 <sup>X</sup>	Te	-	-	-	-	99,60	-	-	-	-	-	99,60	Te <sub>1,0</sub>

**Примечание:** Здесь и далее все анализы выполнены на электронных микроанализаторах "Camebax" (ИВИС ДВО РАН, аналитик Чубаров В.М.) и "ИХА-5А" (ДВГИ ДВО РАН, аналитики Салин В.И. и Екимова Н.И.) по стандартным методикам, принятым в этих подразделениях. Условия съемки для "ИХА-5А": рабочее напряжение 25 КВ, ток поглощенных электронов на образце 36 А, размер электронного зонда 1-2 мкм, время экспозиции 10 сек. Крестиком (<sup>X</sup>) отмечены анализы, заимствованные из отчета Прасоловской ГПП ФГУТП «СахРГЭ» за 1987 г. Здесь и далее в таблицах " - " – элемент не обнаружен.

Включения высокопробного самородного золота приурочены либо к жильному кварцу (рис. 3-8 приложения 1) и бариту, где они образуют крупные скопления, либо в виде единичных мелких зерен ассоциируют с сульфидами (главным образом пиритом). Кроме того, оно часто образует сростки с калаверитом и алтаитом. Напротив, относительно низкопробное золото образует прожилковые, овальные, изометричные и сетчатые включения в блеклых рудах (рис. 3-6 приложения 1), теллуридах серебра (рис. 3-5 приложения 1), теллуроселенидах (?) свинца и висмута и других минералах.

Тесная ассоциация самородного золота с блеклыми рудами и теллуридами возможно явилась причиной того, что среди элементов-примесей в существенных количествах присутствуют (табл. 3-2) серебро (5,79-18,10 мас. %), медь (0,06-1,22 мас. %) и теллур (0,30-4,16 мас. %). При этом характерным является то, что повышенные содержания этих элементов отмечаются, главным образом, в относительно низкопробном золоте, приуроченном, как отмечалось выше, к рудным минералам продуктивных ассоциаций и не типичны для высокопробного самородного золота, ассоциирующего с жильными минералами.

**Серебро (Ag).** Самородное серебро крайне редкий минерал Прасоловского месторождения и встречается только в рудах вторичного обогащения. Оно образует многочисленные мельчайшие (до 0,02 мм) выделения неправильной, крючковатой, и прожилковидной формы, главным образом, в хлораргирите. Кроме того, самородное серебро в виде единичных зерен отмечается в акантите и вторичных минералах замещающих блеклые руды, халькозин и борнит.

**Электрум (AuAg).** В настоящее время различные исследователи относят к данному минеральному виду такие фазы, где содержание серебра колеблется либо от 10 до 15 % (Минералы, 1960), либо от 15 до 50 % (Бетехтин, 1961), либо от 35 до 65 % (Некрасов, 1991) и т.д. Вместе с тем, некоторые исследователи считают, что между золотом и серебром как в жидком, так и в твердом состоянии существует полная смесимость, поэтому деление золото-серебряных минеральных фаз на индивидуальные разновидности условны (т. е. количество серебра в таких фазах может варьировать в широких пределах). В данной работе в соответствии с (Геологический..., 1973) под электрумом мы понимаем такую фазу, в которой содержание серебра составляет от 25 до 75 %.

Описываемый минерал в шлифах характеризуется светло-желтым цветом и высокой отражательной способностью (R~89 %). Изотропен. Образует изометричные зерна размером в сотые доли миллиметра, расположенные в виде включений в гессите и прустите. Ассоциирует также с самородными золотом и серебром.

По данным микрорентгеноспектрального анализа содержание серебра в электруме Прасоловского месторождения изменяется от 27,33 до 39,50 мас. % (табл. 3-2). Кроме того, для него характерна незначительная примесь Те (от 0,01 до 3,06 мас. %).

**Теллур (Te).** Самородный теллур на месторождении встречается крайне редко, в связи с тем, что в природных условиях он легко образует химические соединения с рядом распространенных металлов. Под микроскопом имеет кре-

мово-белый цвет, высокую отражательную способность и сильные эффекты анизотропии.

Выделяется две генерации самородного теллура.

*Теллур 1 генерации* совместно с сивьванитом, реже алтаитом образует микроскопические выделения, величиной в сотые доли миллиметра, в серебро-содержащей блеклой руде, которую они замещают по зонам роста. Вероятно поэтому теллур данной генерации богат примесями меди, серебра, цинка, железа, мышьяка, сурьмы и селена (см. табл. 3-2). Расчетная кристаллохимическая формула этого теллура соответствует  $\text{Te}_{0,79}\text{Cu}_{0,09}\text{Ag}_{0,05}\text{Zn}_{0,01}\text{As}_{0,01}\text{Sb}_{0,01}\text{S}_{0,01}\text{Se}_{0,02}$ .

*Теллур 2 генерации* встречается, главным образом, в теллуридно-селенидной ассоциации и, напротив, не содержит примесей (см. табл. 3-2). Он образует тесные сростания с клаусталитом, который содержит существенные количества теллура (до 2,20 мас. %), и селенистым теллуrom. Размер этих полиминеральных сростаний, выполняющих интерстиции между зернами кварца, не превышает 50 мкм.

### 3.2.2. Сульфиды

Минералы данной группы являются наиболее распространенными в рудах Прасоловского месторождения и встречаются во всех выделенных минеральных типах, при резком преобладании в первых двух. Они представлены однокомпонентными (простыми) и двухкомпонентными (сложными) соединениями серы с такими металлами как молибден, железо, медь, цинк, серебро и свинец.

**Молибденит  $\text{MoS}_2$**  наиболее редкий из сульфидов и встречается только в золото-теллуридно-кварцевых рудах. В отраженном свете имеет белый цвет с сероватым оттенком. Отчетливо видна пластинчатость молибденита в скрещенных николях. Он образует как единичные округлые (до 0,03 мм), пластинчатые и листоватые (0,05-0,15 мм) выделения, так и их скопления (по 2-3 зерна). Размер таких скоплений составляет 0,8-3 мм. Кроме того, отмечаются тесные сростания молибденита с блеклыми рудами (голдфилдитом), с которыми образует выделения сферолитовой формы (рис. 3-9 приложения 1). Нередко молибденит содержит мельчайшие (0,009 x 0,07 мм) пластинчатой формы включения высокопробного (881-891 ‰) самородного золота, развивающегося преимущественно по зонам роста концентрически-зональных почек этого минерала и образующего сростания с ним (рис. 3-9 приложения 1). Разъедается и замещается молибденит гипергенными минералами. При этом, замещению, в основном, подвержены центральные части сферических образований. Вероятно, замещению предшествовала частичная перекристаллизация молибденита, косвенным подтверждением чего может служить игольчатое и перистое его строение.

#### 3.2.2.1. Минералы системы Cu-Fe-S

Минералы системы Cu-Fe-S являются наиболее распространенными сульфидами на месторождении. Они представлены типичными представителями

данной системы такими как пирит, марказит, халькопирит, борнит, халькозин и ковеллин. В небольших количествах отмечаются идаит и фазы, еще не описанные в литературе, химический состав которых соответствует кристаллохимическим формулам –  $\text{Cu}_3\text{S}_2$  и  $(\text{Cu,Zn})\text{S}$  (рис. 3-10).

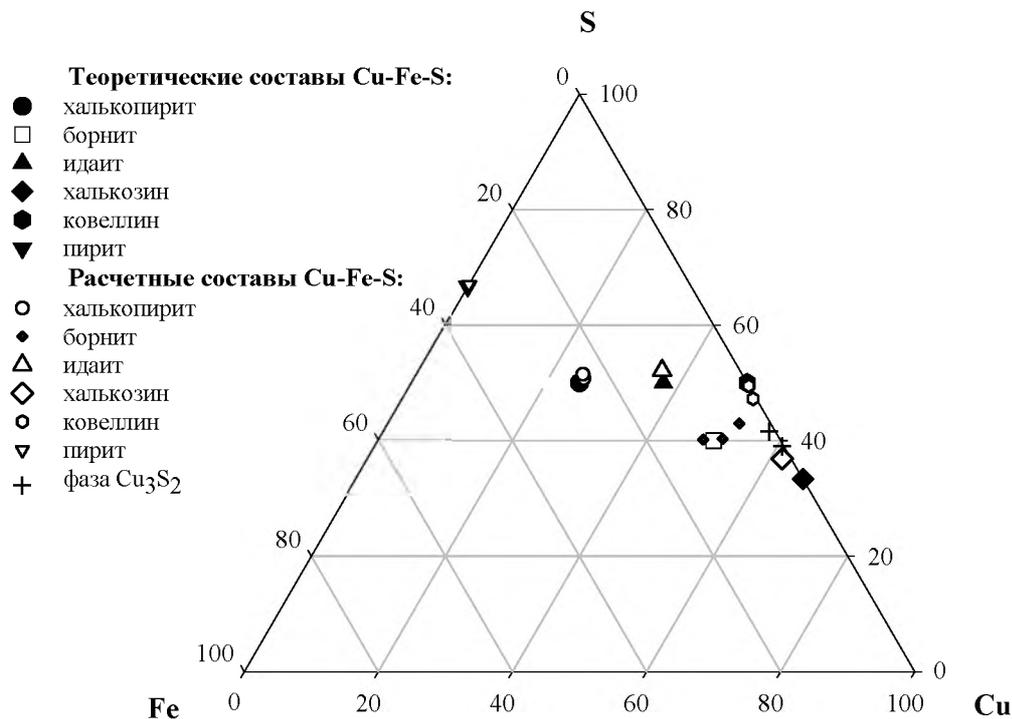


Рис. 3-10. Диаграмма составов минералов системы Cu-Fe-S

**Пирит  $\text{FeS}_2$**  самый распространенный минерал в рудах месторождения. Его количество составляет 70-95 % от суммы всех рудных минералов. Он отлагался на протяжении всего процесса минералообразования. Об этом свидетельствуют и разная морфология его кристаллических зерен (аллотриоморфные формы, кубы, кубопентагондодекаэдры, пентагондодекаэдры, октаэдры), и особенности внутреннего строения (наличие или отсутствие зон роста, включений), и присутствие его в разных парагенетических ассоциациях, и широкие вариации в размере зерен и др.

В околорудных метасоматитах преобладают простые формы (кубы), а в кварцевых жилах – более сложные (кубопентагондодекаэдры, пентагондодекаэдры, октаэдры), что подтверждает установленную Н.З. Евзиковой (1984) закономерность изменения форм пиритов в зависимости от участков их локализации (от кубических в околорудных метасоматитах до пентагондодекаэдрических и октаэдрических в самих кварцевых жилах).

В рудных телах ранних минеральных типов, а также и в околорудных метасоматитах, пирит образует гнезда, прожилки, массивные агрегаты, а также мелкую рассеянную (редкую) вкрапленность. Для поздних руд (золото-адуляр-кварцевых) характерна, напротив, частая мелкая вкрапленность.

В зависимости от минерального типа руд размер зерен пирита существенно меняется. Для руд ранних стадий характерны более крупные зерна, достигающие в сечении 0,5 мм, а также их сростки, обычно ассоциирующие с марказитом. Поздние пириты имеют размер от 0,005 до 0,09 мм и часто образуют скопления изометричной (до 3-4 мм в диаметре), реже вытянутой (0,02 x 0,2 мм) формы.

Степень идиоморфизма пирита, равно как и размер зерен, в ранних и поздних генерациях также отличается, изменяясь от неправильной до идеальной. Выделения раннего пирита характеризуются, как правило, неправильной формой, что является результатом катаклазирования его и последующего замещения минералами более поздних стадий кристаллизации рудного вещества. Поэтому его зерна редко сохраняют свою первоначальную форму, чаще это реликты с неправильными очертаниями (рис. 3-11 приложения 1). Напротив, пириты поздних стадий представлены идиоморфными кристаллами без признаков коррозии, и обладают ярко выраженным октаэдрическим и пентагондодекаэдрическим габитусом (рис. 3-12 приложения 1). Особенностью этих пиритов является присутствие в них большого количества реликтов (включений) нерудных минералов, благодаря которым четко проявлено их зональное строение. Включения приурочены, главным образом, к центральным частям зерен пирита, придавая им футлярообразные формы, реже к краевым, что указывает на метасоматическую природу зерен пирита.

В свою очередь пирит также подвержен замещению различными минералами. При этом в шлифах можно наблюдать участки, где отмечается совместное нахождение как замещенных (от частичного, до почти полного), так и незатронутых замещением зерен пирита. Иногда в результате замещения лишь 1-2 грани зерна сохраняют идиоморфные очертания. Замещение осуществляется как по зонам роста пирита, так и по его периферии и внутри зерен, что приводит к образованию скелетных форм. Наиболее интенсивно пирит замещается лимонитом с образованием сетчатой микротекстуры. Кроме того, по прожилкам он замещается блеклыми рудами, рокезитом, борнитом, халькопиритом и ковеллином. Среди микровключений в пирите отмечаются выделения золота, гессита, клаусталита и других минералов. Иногда пирит рассекается и прожилками кварца, мощностью 0,008-0,02 мм, не содержащих рудную минерализацию.

Для сравнения параметров кристаллической решетки пирита из руд Прасоловского месторождения с типовыми (на примере месторождения Зангезур, Закавказье) был выполнен рентгеноструктурный анализ, результаты которого приведены в табл. 3-3.

Данные рентгеноспектрального анализа показывают, что пирит содержит незначительную примесь меди. Его рассчитанная кристаллохимическая формула аналогична теоретической (табл. 3-4).

## Рентгенограммы пирита

Прасоловское м-е, № пробы				hkl	Зангезур, Закавказье (Михеев, 1957)	
P-65 / 1		P-97 / 1			I	d/n
I	d/n	I	d/n			
4	3,12	4	3,13	111	2	3,102
10	2,70	10	2,71	200	8	2,696
5	2,42	3	2,42	210	8	2,417
3	2,21	3	2,21	211	7	2,206
3	1,912	3	1,914	220	6	1,908
6	1,630	-	-	311	10	1,629
1	1,501	-	-	230	4	1,498

**Примечание:** Здесь и далее для всех минералов рентгеноструктурный анализ выполнен в лаборатории физических методов ДВГИ ДВО РАН, аналитик Т.Б. Афанасьева. Условия съемки: ДРОН-3, CuK $\alpha$  (монохром.), 20x40, шк. 1000 x 2,5, 1° мин.

**Марказит FeS<sub>2</sub>** В шлифах четко диагностируется по высокой отражательной способности и резко выраженной анизотропии. Обладает характерным мелкозернистым строением, которое хорошо заметно благодаря ярко проявленным эффектам анизотропии. Минеральные выделения марказита образуют как изометричные (0,1 мм в поперечнике), так и вытянутые формы (0,1 x 0,5 мм). Почти повсеместно марказит ассоциирует с идиоморфными зернами пирита, в которых он присутствует в виде включений, либо в виде каемок обрастания, что свидетельствует о более позднем его образовании.

**Халькопирит CuFeS<sub>2</sub>** относится к числу широко распространенных рудных минералов Прасоловского месторождения. Средние количества его в общей массе сульфидов обычно составляет 3-5 %. Он образует прожилки, гнезда, рассеянную вкрапленность, а также тесные сростания с блеклыми рудами, сфалеритом, галенитом, пиритом, борнитом и другими рудными минералами. Замещается халькопирит ковеллином, халькозином и гипергенным борнитом. По форме выделений, размерам зерен и приуроченности к определенным минеральным ассоциациям выделяется несколько его генераций.

*Халькопирит 1 генерации* встречается в золото-пирит (халькопирит)-кварцевых рудах. Он образует как самостоятельные зерна округлой, неправильной и аллотриоморфной формы размером до 0,08 мм в поперечнике, так и прожилки в корродированном пирите мощностью в среднем 0,08 мм, который он (совместно с золотом) интенсивно замещает с образованием петельчатых структур. Отмечаются также сростания его с мышьяковистыми блеклыми рудами. В свою очередь халькопирит сам интенсивно замещается халькозином и ковеллином. Халькопирит данной генерации химически чист и не содержит примесей (табл. 3-4).

*Халькопирит 2 генерации* развит, преимущественно, в золото-полисульфидно-кварцевых рудах, где образует тесные сростания с борнитом. Он пред-

Таблица 3-4

## Химический состав (мас. %) и кристаллохимические формулы минералов системы Cu-Fe-S

№ обр.	Минерал, генерация	Формула	Fe	Cu	S	Zn	As	Se	Sb	Pb	Te	Сумма	Кристаллохимическая формула
ПС-90-59-5	Пирит	FeS <sub>2</sub>	46,48	0,02	53,61	-	-	-	-	-	-	100,11	Fe <sub>1,00</sub> S <sub>2,00</sub>
ПС-90-42-11	Пирит	FeS <sub>2</sub>	46,32	-	53,74	-	-	-	-	-	-	100,06	Fe <sub>0,99</sub> S <sub>2,01</sub>
ПС-90-59-4	Халькопирит 1	CuFeS <sub>2</sub>	29,78	34,38	35,03	-	-	-	-	-	-	99,15	Cu <sub>1,0</sub> Fe <sub>0,98</sub> S <sub>2,02</sub>
Л-1	Халькопирит 4	CuFeS <sub>2</sub>	30,38	35,14	33,29	-	0,71	-	-	-	-	99,57	Cu <sub>1,03</sub> Fe <sub>1,01</sub> As <sub>0,02</sub> S <sub>1,94</sub>
ПС-90-61-4	Халькопирит 5	CuFeS <sub>2</sub>	28,73	34,12	34,80	-	-	-	-	-	-	97,66	Cu <sub>1,01</sub> Fe <sub>0,96</sub> S <sub>2,03</sub>
ПС-90-42-15	Халькопирит 5	CuFeS <sub>2</sub>	28,20	33,59	35,12	0,09	-	-	-	-	-	97,00	Cu <sub>0,99</sub> Fe <sub>0,95</sub> Zn <sub>0,003</sub> S <sub>2,06</sub>
ПС-90-59-3	Борнит 2	Cu <sub>3</sub> FeS <sub>4</sub>	5,21	66,0	27,26	-	-	-	-	-	-	98,48	Cu <sub>3,23</sub> Fe <sub>0,47</sub> S <sub>4,29</sub>
ПС-90-59-8	Борнит 2	Cu <sub>3</sub> FeS <sub>4</sub>	9,65	66,08	26,29	-	-	-	-	-	-	102,03	Cu <sub>3,12</sub> Fe <sub>0,85</sub> S <sub>4,03</sub>
Л-11	Борнит 3	Cu <sub>3</sub> FeS <sub>4</sub>	12,70	60,80	25,41	-	1,04	0,84	0,68	-	-	101,51	Cu <sub>4,76</sub> Fe <sub>1,13</sub> As <sub>0,17</sub> Sb <sub>0,03</sub> (S <sub>1,85</sub> Se <sub>0,05</sub> ) <sub>4,00</sub>
ПС-90-16-22	Идаит	Cu <sub>3</sub> FeS <sub>4</sub>	13,66	48,68	35,36	-	-	-	-	-	-	97,70	Cu <sub>2,9</sub> Fe <sub>0,93</sub> S <sub>4,17</sub>
ПС-90-59-7	Халькозин	Cu <sub>2</sub> S	1,41	77,45	23,28	-	-	-	-	-	-	102,14	Cu <sub>1,86</sub> Fe <sub>0,04</sub> S <sub>1,11</sub>
Л-11	Халькозин	Cu <sub>2</sub> S	0,59	67,48	25,14	-	0,70	0,86	0,68	-	-	95,48	Cu <sub>1,69</sub> Fe <sub>0,02</sub> As <sub>0,01</sub> Sb <sub>0,01</sub> (S <sub>1,25</sub> Se <sub>0,02</sub> ) <sub>1,27</sub>
ПС-90-43-26	Ковеллин	CuS	-	60,16	29,59	0,37	-	0,85	1,16	0,09	2,84	95,06	Cu <sub>0,99</sub> Zn <sub>0,01</sub> Pb <sub>0,001</sub> Te <sub>0,01</sub> Sb <sub>0,01</sub> (S <sub>0,96</sub> Se <sub>0,01</sub> ) <sub>0,97</sub>
Л-1-29	Ковеллин	CuS	0,43	64,52	29,11	-	0,65	0,92	0,68	-	-	96,35	Cu <sub>1,04</sub> Fe <sub>0,01</sub> As <sub>0,01</sub> Sb <sub>0,01</sub> (S <sub>1,01</sub> Se <sub>0,01</sub> ) <sub>1,04</sub>
Л-11	Фаза	Cu <sub>2</sub> S <sub>2</sub>	0,59	67,48	25,14	-	0,70	0,86	0,68	-	-	95,48	Cu <sub>2,82</sub> Fe <sub>0,02</sub> As <sub>0,02</sub> Sb <sub>0,01</sub> (S <sub>1,06</sub> Se <sub>0,01</sub> ) <sub>1,11</sub>
Л-15	Фаза	Cu <sub>2</sub> S <sub>2</sub>	-	75,09	25,40	-	-	-	0,03	-	0,11	100,63	Cu <sub>3,01</sub> Zn <sub>0,01</sub> S <sub>1,98</sub>
Р-21	Фаза	(Cu,Zn)S	0,83	54,19	33,27	9,56	-	-	-	-	0,26	98,11	(Cu <sub>0,83</sub> Zn <sub>0,14</sub> Fe <sub>0,02</sub> ) <sub>0,98</sub> S <sub>1,01</sub>
ПС-90-42-16	Фаза	(Cu,Zn)S	0,77	49,73	33,41	12,68	-	-	-	-	0,17	96,75	(Cu <sub>0,77</sub> Zn <sub>0,19</sub> Fe <sub>0,02</sub> ) <sub>0,98</sub> S <sub>1,02</sub>

ставлен тонкими правильными пластинчатыми и решетчатыми выделениями в борните, равномерно распределенными по всему зерну. Кроме того, образует мелкие, изометричные, округлые и линзовидные включения в последнем, количество которых составляет около 40%. Подобные сростания характеризуют эмульсионно-пластинчатые структуры, образованные при распаде твердого борнит-халькопиритового раствора. Продукты распада очень мелкие, часто на границе разрешающей способности микроскопа и вероятно меньше. Характерно, что пластинки халькопирита в местах пересечения становятся более тонкими или выклиниваются, а не раздуваются, как в прожилках замещения. Пластинки и решетки халькопирита ориентированы по определенным кристаллографическим направлениям борнита, что особенно заметно на стыке различно ориентированных борнитовых зерен. По границам таких зерен отмечается интенсивное замещение ковеллином.

По отсутствию перераспределений халькопирита в борните можно предположить, что эти руды не были подвержены значительным изменениям температуры и давления и образовались при температуре порядка 275° С (согласно Филимонова, 1952), либо 475° С (по Schwartz, 1931).

*Халькопирит 3 генерации* также присутствует в золото-полисульфидно-кварцевых рудах в виде округлых и неправильных выделений размером около 0,04 мм. Он образует сростания с блеклыми рудами и борнитом (рис. 3-13 приложения 1), не содержащим продукты распада халькопирита. Границы сростания ровные, плавноизвилистые, что указывает на их близодновременное выделение, хотя возможно, что халькопирит выделялся несколько позже борнита. В виде прожилков халькопирит замещает гипидиоморфные кристаллы рокезита. Сам в свою очередь замещается гесситом, содержащим тонкие просечки золота (рис. 3-14 приложения 1), и ковеллином (рис. 3-13 приложения 1).

*Халькопирит 4 генерации* встречается в рудах золото-теллуридно-кварцевого типа. Он образует тесные графические сростания с блеклыми рудами, размер которых варьирует в пределах 0,1-0,8 мм. Отмечается, что в одних минеральных выделениях халькопирит преобладает над блеклой рудой, в других – наоборот. Такой характер взаимоотношения минералов в сростках свидетельствует о близодновременном их образовании. Халькопирит данной генерации содержит неправильной формы реликты раннего сфалерита (который он замещает), а также мелкие включения более поздних штютцита, сильвания, акантита и относительно крупные ковеллина. При этом последний, в отдельных случаях, практически нацело замещает халькопирит-блеклорудные сростания.

Рентгеноспектральный анализ показывает незначительные содержания мышьяка (0,71 мас. %) в данном халькопирите (табл. 3-4).

*Халькопирит 5 генерации* развит в золото-адуляр (карбонат)-кварцевых рудах, где он ассоциирует со сфалеритом, образуя с ним тесные сростания (рис. 3-15 приложения 1). Иногда отмечаются мелкие (тысячные доли мм) его включения в последнем при отсутствии каких либо признаков коррозии одного минерала другим. Все это позволяет предположить близодновременное отложение указанных минералов. По халькопириту развивается селенистый галенит. Кроме

того, в небольшом количестве (0,09 мас. %) в халькопирите данной генерации присутствует примесь цинка (табл. 3-4).

**Борнит  $Cu_5FeS_4$**  наиболее широко распространен в рудах золото-полисульфидно-кварцевого типа (до 5-7 %), хотя общая доля его среди рудных минералов месторождения составляет не более 1 %. Он также присутствует в рудах вторичного сульфидного обогащения в виде гипергенных образований. Борнит образует как самостоятельные разновеликие выделения неправильной формы в кварцевых жилах, так и сростки с другими сульфидами, а также мелкие вкрапления в них.

Присутствие борнита в разных минеральных ассоциациях позволяет выделить три его генерации, которые практически не отличаются по своим оптическим свойствам. В шлифах все они характеризуются розово-коричневым цветом, невысокой отражательной способностью (~20 %) и сильно выраженными цветными эффектами анизотропии: от коричневых до серых цветов.

*Борнит 1 генерации* встречается в виде минеральных выделений неправильной (амебообразной) формы (рис. 3-16 приложения 1), размер которых в среднем составляет 0,02-0,1 мм. Он находится в тесном срастании с халькопиритом 2 генерации, образуя с ним структуры распада твердого раствора, что указывает на одновременность кристаллизации этих минералов. При большом увеличении в борните хорошо различимы пластинчатые, решетчатые, эмульсионные включения халькопирита, количество которого меняется от 10 до 40 %. Такое различное количественное отношение между борнитом и халькопиритом свидетельствует о том, что образование подобных структур происходило при различной температуре, которая достигала 300° С (Рафиенко, 1957). Кроме того, в борните отмечаются каплевидные включения клаусталита и блеклых руд, характер границ которых указывает на то, что последние замещают первый. Образования клаусталита приурочены, главным образом, к центральным частям выделений борнита.

Из вторичных минералов, развивающихся по борниту, отмечаются халькозин и ковеллин, которые образуют округлые, линзовидные и пластинчатые выделения внутри борнита, а также каймы и оторочки по его периферии (рис. 3-16 приложения 1).

*Борнит 2 генерации* образует ксеноморфные выделения и находится в тесном срастании с халькопиритом 3 генерации (рис. 3-13 приложения 1). Контакты образований борнита и халькопирита имеют извилистые очертания, свидетельствующие об одновременной или близодновременной кристаллизации этих минералов. Микроскопические исследования показывают, что в большинстве случаев халькопирит располагается по периферии борнитовых выделений. Борнит второй генерации не содержит продуктов распада. Совместно с вышеуказанным халькопиритом он замещает рокезит.

Данный борнит характеризуется также и отсутствием каких-либо элементов-примесей (табл. 3-4).

*Борнит 3 генерации* является гипергенным минералом зоны вторичного обогащения. Он представлен минеральными выделениями преимущественно

прожилковой и неправильной форм, размер которых изменяется от сотых долей мм до 0,9 мм. Совместно с ковеллином замещает халькопирит (рис. 3-17 приложения 1), мышьяковистые блеклые руды и реже пирит. При этом, отдельные зерна вышеуказанных минералов замещены либо частично, либо практически полностью. В связи с этим, количество борнита в разных сростаниях изменяется от десятых долей процентов до 80 %.

Согласно микронзондовым данным, описываемый борнит, в отличие от борнита 2 генерации, напротив, содержит значительные количества мышьяка, сурьмы и селена, по-видимому, за счет механических примесей замещенной им блеклой руды (табл. 3-4).

Следует отметить, что борниты Прасоловского месторождения характеризуются нестехиометричностью химического состава, т.е. согласно данным рентгеноспектрального анализа, в них отмечаются существенные колебания атомных количеств как меди, железа, так и серы (табл. 3-4).

**Идаит  $Cu_3FeS_4$**  в отраженном свете имеет красновато-коричневый (как и у борнита) цвет. Благодаря своей слоистой структуре обладает очень сильными анизотропией и двуотражением, которые сопровождаются цветными эффектами.

В рудах месторождения идаит встречается крайне редко (отмечен всего лишь в одном шлифе) и образует мелкие (до 0,08 мм) неправильные обособления в кварце, замещенные по краям ковеллином (рис. 3-18 приложения 1), а также развивается в виде прерывистых тонких каемок по борниту. Идаит часто содержит пластинчатые включения халькопирита, ориентированные в двух взаимно пересекающихся направлениях. Подобные сростания были также описаны Ж. Френцелем (Frensel, 1958) в борнитовых рудах рудника Ида и Ф. Хатертом (Hatert, 2003) в кварцевых жилах месторождения Вилселм, Бельгия. Согласно данным последнего идаит образовался при окислении и полном замещении борнита, содержащего продукты распада халькопирита, которые и наблюдаются в идаите. В соответствии с этим, идаит Прасоловского месторождения образовался за счет замещения борнита 1 генерации.

Данные микронзондового анализа показывают (табл. 3-4), что химический состав Прасоловского идаита (Cu-56,16; Fe-9,86; S-33,98 мас. %) несколько отличается от теоретического большим содержанием железа и, соответственно, меньшим меди. Высокие значения железа (до 12,2 %) в идаите отмечены также в колчеданных рудах Казахстана (Яренская, 1971), тем не менее химический состав этого идаита был пересчитан (несмотря на существенный недостаток меди и серы –  $Cu_{3,83}Fe_{1,00}S_{4,77}$ ) на общепризнанную кристаллохимическую формулу -  $Cu_3FeS_6$ .

Напротив, соотношение основных минералообразующих компонентов идаита Прасоловского месторождения не позволяет пересчитать его кристаллохимическую формулу на теоретическую. Попытка расчета дает результат -  $Cu_{4,35}Fe_{1,39}S_{6,26}$ . Однако, его состав хорошо рассчитывается на формулу  $Cu_3FeS_4$  ( $Cu_{2,9}Fe_{0,93}S_{4,17}$ ). Аналогичная формула идаита была предложена и Фридериком Хатертом (Hatert, 2003). В этой связи, в данной работе формула идаита принята как  $Cu_3FeS_4$ .

**Халькозин  $\text{Cu}_2\text{S}$**  в отраженном свете серовато-белый с голубоватым оттенком и невысокой отражательной способностью (около 20 %), слабо анизотропен. Встречается в виде реакционных кайм замещения вокруг аллотриоморфных выделений халькопирита, блеклых руд, рокезита и борнита (рис. 3-16 приложения 1), а также образует в последнем небольшие (0,02 мм) каплевидные включения. Реакционные каймы характеризуются неравномерностью обрастания, что проявляется в неодинаковой их мощности на различных участках замещаемых зерен. Кроме того, в отдельных шлифах наблюдается замещение халькозином сфалерита и раздробленных зерен пирита. В свою очередь, по периферии образований халькозина развивается ковеллин.

Химический состав описываемого халькозина близок теоретическому, но отмечается небольшое количество примесей железа, селена, мышьяка, сурьмы (табл. 3-4).

**Ковеллин  $\text{CuS}$**  один из самых распространенных гипергенных минералов руд Прасоловского месторождения. Его содержание в шлифах составляет в среднем 2-3 %. В отраженном свете минерал имеет синие цвета различных оттенков – от бледно-голубого до темно-синего. Встречается он в виде каемок, прожилков, неправильных выделений, а также изометричных зерен. Совместно с халькозином и минеральной фазой  $\text{Cu}_3\text{S}_2$  замещает пирит, блеклые руды, сфалерит, халькопирит (рис. 3-17 приложения 1), борнит (рис. 3-16 приложения 1) и рокезит, в связи с чем, его форма и размеры соответствуют таковым замещаемого им минерала. При этом замещение носит незакономерный характер, т. е. вне всякой связи с особенностями внутреннего строения (плоскостей спайности, зон роста и т. д.) замещаемых минералов. Степень замещения различна – от частичной (с отчетливо наблюдаемыми реликтами замещаемого минерала) до полной. В отдельных случаях замещение представлено сетью тончайших прожилков, например, образование сетчатых микротекстур ковеллина в пирите.

Результаты рентгеноспектрального анализа показывают, что в ковеллине присутствует большое количество элементов-примесей, но содержания их невысоки (табл. 3-4). Исключения составляют сурьма и теллур, количество которых приближается к 1 и 3 мас. % соответственно. Расчетные кристаллохимические формулы ковеллина близки идеальным.

**Фаза  $\text{Cu}_3\text{S}_2$**  – вторичный минерал, образовавшийся в условиях гипергенеза за счет замещения борнита и теллурсодержащих блеклых руд. Встречается в виде включений, прожилков, каемок и тесно ассоциирует с ковеллином. Выделения данной фазы немногочисленны (отмечены только в двух шлифах) и приурочены, преимущественно, к краевым частям замещаемых минералов.

По оптическим свойствам описываемая фаза близка ковеллину, но химический состав несколько отличен. Для нее характерно присутствие в небольших количествах (до 1 %) примесей Fe, Te, Sb, As, Fe и Se, а состав идеально пересчитывается на формулу  $\text{Cu}_3\text{S}_2$  (табл. 3-4). В литературе минеральная фаза с подобным химическим составом не описана.

**Фаза  $(\text{Cu,Zn})\text{S}$**  также вторичный и очень редкий (встречен в одном шлифе) минерал. Развивается, преимущественно, по сфалериту, образуя в нем

мелкие каплевидные включения, а также присутствует в виде каймы на контакте пирит-сфалеритовых сростаний.

Данные рентгеноспектрального анализа (табл. 3-4) показывают, что рассматриваемая фаза содержит большое количество цинка (от 9,56 до 12,68 мас. %), а химический состав минерала пересчитывается на кристаллохимическую формулу  $(\text{Cu},\text{Zn})\text{S}$ . В незначительных количествах присутствуют железо и теллур. Сведения о данной минеральной фазе в литературе отсутствуют.

### 3.2.2.2. Минералы системы Fe-Zn-S

Минералы системы Fe-Zn-S распространены во всех минеральных типах руд Прасоловского месторождения, но более характерны для золото-полисульфидно-кварцевых. Они представлены преимущественно сфалеритом и минеральной фазой, химический состав которой соответствует формуле  $\text{FeZn}_2\text{S}_4$  (рис. 3-19).

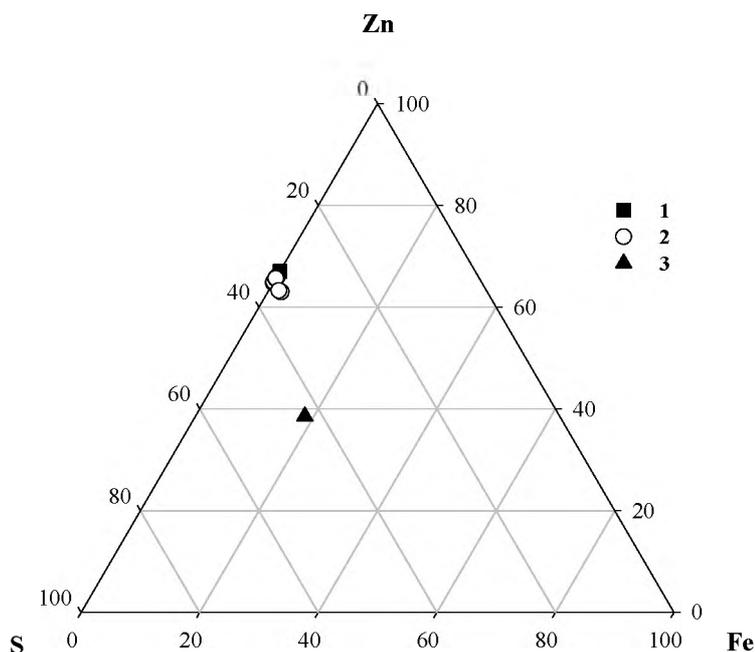


Рис. 3-19. Диаграмма составов минералов системы Fe-Zn-S – сфалерит (1 – теоретический, 2 – расчетный), фаза  $\text{FeZn}_2\text{S}_4$  (3)

**Сфалерит  $\text{ZnS}$ .** На основании анализа данных о форме выделений, размерах зерен, а также приуроченности к определенным минеральным ассоциациям выделяется три генерации сфалерита.

*Сфалерит 1 генерации* присутствует в золото-пирит (халькопирит)-кварцевых рудах. В отраженном свете он имеет темно-серый цвет и темно-бурые внутренние рефлексии. Обычно сфалерит этой генерации образует линзовидные скоп-

ления в кварце, которые состоят из сросшихся аллотриоморфных зерен. Длина таких «линз» не превышает 0,8-1,0 мм, а размер зерен в них колеблется от 0,05 до 0,2 мм. При микроскопическом исследовании установлено, что сфалерит образует тесные сростания с халькопиритом, совместно с которым замещает пирит. Кроме того, в виде реликтовых включений (0,08-0,1 мм) он наблюдается в блеклых рудах, характеризующихся, согласно данным рентгеноспектрального анализа, повышенными содержаниями цинка (4-7 мас. %). Среди других минералов, замещающих сфалерит, отмечаются борнит, ковеллин, минеральная фаза (Cu,Zn)S и нерудный минерал. При этом замещение носит незакономерный характер, т. е. без всякой связи с формой зерен и особенностями внутреннего строения сфалерита.

Сфалерит данной генерации характеризуется повышенными содержаниями меди (до 1,92 мас. %) и незначительными мышьяка, теллура, кадмия, селена (табл. 3-5).

*Сфалерит 2 генерации* развит в золото-полисульфидно-кварцевых рудах. В шлифах имеет неравномерную (пятнистую) светло-серую и серую окраску с хорошо проявленными светлыми внутренними рефлексами (от медовых и зеленовато-желтых до светло-бурых), что явно свидетельствует об отсутствии в его составе железа. При этом следует отметить, что различные оттенки внутренних рефлексов наблюдаются не только в разных зернах, но в пределах одного зерна, т.е. центральная часть зерна имеет медовые цвета внутренних рефлексов, а краевые части более светлые – желтые и светло-бурые. В скрещенных николях в таких зернах отчетливо проявлена зональность сфалерита, чем и обусловлена, очевидно, неравномерность (пятнистость) его окраски.

Сфалерит 2 генерации локализуется, главным образом, в приконтактных частях кварц-сульфидных прожилков, где образует вкрапленность в виде маломощных (до 0,15 мм) цепочек протяженностью до 1-1,5 см, а также в виде отдельных редких округлых, дендритовидных, либо радиально-лучистых скоплений внутри прожилков. Размер таких скоплений составляет 0,5 x 2,0 см, в то время как размер самих зерен изменяется от 0,07 до 0,3 мм. Зерна сфалерита, как правило, имеют округлую форму с хорошо выраженным идиоморфизмом отдельных граней (рис. 3-20 приложения 1). При этом грани, обращенные к вмещающей прожилок породе, близки к идиоморфным, а грани, обращенные внутрь прожилка, таким идиоморфизмом не обладают, что объясняется кристалломорфологическими особенностями роста кристаллов при смене свободных условий кристаллизации стесненными (Григорьев, 1961).

Сфалерит тесно ассоциирует с халькопиритом (рис. 3-20 приложения 1), блеклыми рудами, граница сростания с которыми четкая, извилистая, некоррозийная, что указывает на их близодновременную кристаллизацию. По периферии он замещается клаусталитом и селенистым галенитом, в котором содержание цинка более 2 мас. %. Эти же минералы встречаются и внутри его в виде микроскопической вкрапленности. Кроме того, данный сфалерит подвержен интенсивному замещению ковеллином, а также нерудным минералом (англезитом?), что придает ему сетчатое строение. Однако, степень замещения в раз-

Химический состав (мас. %) и кристаллохимические формулы минералов системы Fe - Zn - S

№ обр.	Минерал-генерация	Формула	Fe	Cu	S	Zn	As	Se	Sb	Au	Cd	Te	Сумма	Кристаллохимическая формула
ПС-90-12-19	Сфалерит 1	ZnS	0,07	1,92	33,57	61,75	0,13	-	-	-	0,19	-	97,63	$Zn_{0,93}Cu_{0,03}Fe_{0,001}Cd_{0,001}As_{0,001}S_{1,03}$
Л 8,9	Сфалерит 1	ZnS	0,12	0,07	33,46	64,77	-	0,01	-	-	-	0,18	98,64	$Zn_{0,98}S_{1,02}$
ПС-90-30-28	Сфалерит 2	ZnS	-	0,55	32,46	62,66	-	-	-	-	0,01	-	95,68	$Zn_{0,97}Cu_{0,01}S_{1,02}$
ПС-90-30-29	Сфалерит 2	ZnS	-	0,47	34,13	62,91	-	-	0,01	0,04	0,07	0,01	97,65	$Zn_{0,95}Cu_{0,01}S_{1,05}$
ПС-90-30-30	Сфалерит 2	ZnS	-	0,40	32,61	62,48	-	-	-	-	-	-	95,49	$Zn_{0,97}Cu_{0,01}S_{1,03}$
ПС-90-11-56	Сфалерит 2	ZnS	-	1,08	34,02	63,09	-	-	-	-	0,34	-	98,54	$Zn_{0,94}Cu_{0,02}Cd_{0,01}S_{1,04}$
ПС-90-11-59	Сфалерит 2	ZnS	-	0,47	33,66	64,28	-	-	0,05	-	0,42	-	98,88	$Zn_{0,96}Cu_{0,01}Cd_{0,01}Sb_{0,001}S_{1,03}$
ПС-90-61-7	Сфалерит 2	ZnS	-	0,52	33,36	63,78	-	-	0,05	-	0,16	0,04	97,93	$Zn_{0,95}Cu_{0,01}Fe_{0,001}Cd_{0,001}Te_{0,001}Sb_{0,001}S_{1,03}$
ПС-90-42-12	Сфалерит 3	ZnS	2,17	0,69	33,97	61,48	-	-	-	-	0,19	-	98,50	$Zn_{0,92}Cu_{0,01}Fe_{0,04}Cd_{0,001}S_{1,03}$
ПС-90-42-13	Сфалерит 3	ZnS	1,67	1,29	33,83	61,14	-	-	-	-	0,06	-	97,99	$Zn_{0,92}Cu_{0,02}Fe_{0,03}Cd_{0,001}S_{1,03}$
ПС-90-42-10	Фаза	$FeZn_2S_4$	19,38	-	45,17	40,49	-	-	-	-	-	-	105,03	$Zn_{1,83}Fe_{1,02}S_{4,15}$

личных зернах неодинакова. Отмечаются зерна сильно замещенные и зерна лишь частично затронутые замещением.

Данные рентгеноспектрального анализа (табл. 3-5) показывают, что сфалерит 2 генерации содержит в разных количествах такие примеси как медь, кадмий, золото, теллур и сурьму.

*Сфалерит 3 генерации* развит в золото-теллуридно-кварцевых рудах. В шлифах имеет более темный цвет по сравнению со сфалеритом 1 генерации. Внутренние рефлексы темно-коричневые. Он представлен ксеноморфными (рис. 3-21 приложения 1) минеральными выделениями (от 0,04 до 0,09 мм) в кварце, которые концентрируются, преимущественно, вблизи контакта кварцевых жил с вмещающими породами. При изучении в шлифах наблюдается замещение сфалерита халькопиритом, который образует маломощные (от микроскопических до 0,07 мм) каймы по периферии его зерен. В отдельных выделениях сфалерита отмечаются также включения галенита, размер которых измеряется тысячными долями мм.

Особенностью сфалерита этой генерации является присутствие в его составе железа (табл. 3-5), количество которого около 2 мас. %. Отмечается также незначительная примесь меди и кадмия.

**Фаза  $FeZn_2S_4$**  Минеральные выделения данной фазы образуют микроскопические линзовидные включения и тончайшие прожилки размером 0,02 x 0,2 мм в раздробленных зернах пирита. В отраженном свете минерал имеет темно-серый цвет, с буро-коричневыми (до черных) внутренними рефлексами. Согласно данным рентгеноспектрального анализа, выделенная фаза характеризуется высоким содержанием железа, количество которого приближается к 20 мас. % (табл. 3-5) и значительно повышенным (по сравнению со сфалеритом) содержанием серы (более 45 мас. %). По этой причине он не пересчитывается на кристаллохимическую формулу сфалерита (или марматита). Химический состав данного минерала, пересчитанный на 7 атомов, соответствует кристаллохимической формуле  $Zn_{1,83}Fe_{1,02}S_{4,15}$ .

Завершая описание минералов системы Fe-Zn-S, следует отметить, что для этой группы отмечается незначительный дефицит цинка (от 0,03 до 0,08 ат. в формуле), при несколько повышенных количествах серы (от 0,1 до 0,15 ат. в формуле). Хотя данные рентгеноструктурного анализа показывают, что основные параметры кристаллических решеток (межплоскостные расстояния) минералов этой системы (включая и сфалерит) Прасоловского месторождения аналогичны друг другу, а также эталонному (по: В.И. Михеев, 1957) сфалериту (табл. 3-6).

### 3.2.2.3. Минералы системы Ag-S

Минералы данной системы на Прасоловском месторождении представлены акантитом и впервые установленной минеральной фазой AgS (Кемкина, 2001<sub>б</sub>).

**Акантит  $Ag_2S$**  встречается практически во всех минеральных типах руд, но наиболее част в рудах вторичного обогащения. В соответствии с этим присут-

Таблица 3-6  
Межплоскостные расстояния сфалерита Прасоловского месторождения

hkl	Прасоловское месторождение												Эталон			
	P-81		P-215(8)		P-105		P-78		PC-90-6		PC-90-611		PC-90-49		PC-90-35	
	I	d/n	I	d/n	I	d/n	I	d/n	I	d/n	I	d/n	I	d/n	I	d/n
111	10	3,12	10	3,12	10	3,12	10	3,13	10	3,12	165	3,12	10	3,12	10	3,116
200	6	2,73	2	2,70	3	2,70	7	2,71	2	2,70	35	2,70	2	2,71	4	2,706
220	4	1,912	10	1,908	9	1,91	5	1,912	9	1,91	90	1,912	5	1,910	8	1,908
311	3	1,631	7	1,628	11	1,628	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,630
222	-	-	10	1,563	10	1,561	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,560

ствуется в нескольких генерациях. Однако, ввиду незначительного его количества в рудах, а также отсутствия каких-либо специфических его отличий в разных минеральных типах, ниже будет приведена общая его характеристика и минеральные парагенезисы, в которых он встречается.

В шлифах акантит имеет серовато-белый цвет с невысокой отражательной способностью (около 30 %) и отчетливыми эффектами анизотропии.

В золото-теллуридно-кварцевых рудах он встречается в ассоциации с самородным золотом и блеклыми рудами в виде редких зерен (до 0,06 мм) неправильной формы, а также образует мирмекитовые вроски в халькопирите и прустите. В полисульфидно-кварцевых рудах акантит представлен мелкими (до 0,008 мм) крючкообразными выделениями в галените. В рудах вторичного обогащения акантит совместно с теллуратами замещает ксеноморфные выделения блеклых руд (рис. 3-22 приложения 1) с высоким содержанием серебра (до 18,37 мас. %), в которых он развивается как по границам их зерен, так и внутри в виде неправильных, овальных, изометричных включений, либо маломощных прожилков. Размер включений акантита меняется от тысячных долей до 0,08 мм. В единичных случаях отмечается также замещение акантитом гессита. В свою очередь, по нему развивается хлораргирит и самородное серебро.

По данным рентгеноспектрального анализа (табл. 3-7), акантит содержит большое количество элементов-примесей (медь, мышьяк, теллур, сурьма, селен, свинец, висмут, цинк). При этом, вероятно, медь изоморфно замещает серебро, а селен и теллур – серу. Остальные же элементы, скорее всего, являют-

## Химический состав акантита (мас. %)

№ обр.	Cu	Zn	Se	As	Te	Sb	S	Pb	Bi	Ag	Сум-ма
ПС-3-1	6,33	0,11	1,32	2,15	4,49	2,26	12,79	0,26	0,18	72,76	102,66

ся механическими примесями (т.е. микроскопические реликты) в результате замещения акантитом блеклой руды. Аналогичная картина отмечается и на некоторых вулканогенных золоторудных месторождениях Японии (Shikazono, 1978).

Рассчитанная кристаллохимическая формула акантита соответствует  $(Ag_{1,59}Cu_{0,23})_{1,82}Sb_{0,04}As_{0,07}(S_{0,94}Te_{0,08}Se_{0,04})_{1,06}$ .

**Фаза AgS** обнаружена только в одном шлифе в виде единичных микроскопических зерен. Ассоциирует с блеклыми рудами, петцитом и высокопробным (880 ‰) золотом в золото-теллуридно-кварцевых рудах. Содержит редкие пылевидные включения клаусталита. Химический состав выделенной фазы представлен (в мас. %): Ag-74,03 и S -24,95. Пересчет результатов анализа на 2 атома показал, что состав данной фазы соответствует кристаллохимической формуле  $Ag_{0,94}S_{1,06}$ . В литературе минеральная фаза с подобным химическим составом не описана.

## 3.2.2.4. Минералы системы Cu-In-S

Судьфиды индия в природе достаточно редки. Известны только два минерала этого класса – рокезит  $CuInS_2$  и индит  $FeIn_2S_4$ , первый из которых, в настоящее время, известен на одном из колчеданных месторождений Центрального Казахстана (Яренская, Слюсарев, 1970), а также в касситерит-сульфидном типе месторождения рудника Шарье. Другой (индит) установлен в рудах касситерит-силикатного типа (Генкин, Муравьева, 1963).

**Рокезит  $CuInS_2$** . На Прасоловском месторождении индиевая минерализация связана с самой поздней ассоциацией золото-полисульфидно-кварцевых руд и представлена рокезитом, содержание которого не превышает 0,1 % от всего количества рудных минералов.

Рокезит в отраженном свете серого цвета с голубоватым оттенком, твердость чуть выше халькопирита с которым он тесно срастается. Наблюдается очень слабое двуотражение и анизотропия. Форма зерен гипидиоморфная (отчетливо наблюдаются прямоугольные сечения), а в срastании с пиритом – аллотриоморфная, так как рокезит по прожилкам разьедает и замещает его. Реликтовая форма зерен рокезита отмечается и при замещении его борнитом и халькозином. Обособленных зерен рокезита не наблюдается. Он постоянно присутствует в срastании с халькопиритом, причем характер срastания таков, что в одних сростках халькопирит замещает рокезит, в других – наоборот, но явный идиоморфизм зерен рокезита позволяет предположить его более раннее образование. Местами по границам срastания рокезита с халькопиритом развивается

халькозин и борнит (гипергенный), не содержащий продуктов распада халькопирита.

Результаты рентгеноспектрального анализа даны в таблице 3-8, в которой для сопоставления приведен состав рокезита из рудника Шарье (Яренская, Слюсарев, 1970), где он впервые диагностирован. Рокезит Прасоловского месторождения содержит незначительные примеси цинка, сурьмы, селена. Сопоставление химического состава и некоторых физических свойств исследуемого минерала и рокезита из рудника Шарье (табл. 3-8) позволяют судить о полной идентичности главных минералообразующих химических элементов. Рассчитанная кристаллохимическая формула рокезита ( $Cu_{1,0}Fe_{0,02}Zn_{0,01}Sb_{0,01}In_{1,01}S_{1,94}Se_{0,01}$ ) весьма близка стехиометрической.

Таблица 3-8

**Химический состав рокезита (мас. %)**

Месторождение, № обр.	Fe	Cu	Zn	Se	Sb	In	S	Сумма
Прасоловское (обр. Л-14)	0,38	26,41	0,29	0,25	0,47	48,19	25,88	101,87
Рудник Шарье	-	26,8±0,5	-	-	-	47,8±1	27,3±1	101,1

**3.2.2.5. Минералы системы Pb-S-Se**

В этой системе рассмотрены галенит и представители изоморфного ряда галенит-клаусталит.

**Галенит PbS** встречается ограниченно по сравнению с другими сульфидами и присутствует в подчиненных количествах (0,4-3 % от общей массы сульфидов).

В отраженном свете галенит белый, изотропный, имеет чуть меньшую отражательную способность, чем клаусталит.

В рудах Прасоловского месторождения галенит отмечен в нескольких минеральных ассоциациях, что позволяет выделить несколько его генераций.

*Галенит 1 генерации* встречается в виде мелкой рассеянной вкрапленности в кварц-сфалеритовых прожилках, а также в срастаниях со сфалеритом 2 генерации, с которым образует коррозионные границы и замещает его как по периферии, так и изнутри, содержась в нем виде субмикроскопических включений. Размер зерен галенита составляет тысячные доли мм (до 0,006), редко достигая 0,07 мм. Форма зерен неправильная, края зазубрены. Сфалерит, с которым ассоциирует галенит 1 генерации, зональный, светло-серого цвета с ярко проявленными внутренними рефлексами от желтых до темно-коричневых. Изредка галенит в виде каемок обрастает также аллотриоморфные зерна халькопирита и блеклой руды.

По данным рентгеноспектрального анализа в галените 1 генерации отмечаются повышенные содержания (табл. 3-9) селена (проба ПС-90-61-3) и железа (проба ПС-90-42-17), достигая 2,07 и 4,38 мас. % соответственно, а также незначительные примеси меди (до 0,53 мас. %).

Таблица 3-9

## Химический состав (мас. %) и кристаллохимические формулы галенита, галенит - клаусталита и клаусталита

№ обр.	Минерал, генерация	Формула	Fe	Cu	Ag	Zn	Pb	As	Te	Sb	Bi	S	Se	Сумма	Кристаллохимическая формула
ПС-90-61-3	Галенит 1	PbS	0,16	0,53	-	-	84,32	-	-	-	-	11,69	2,07	98,79	$Pb_{1,01}Cu_{0,02}Fe_{0,01}(S_{0,99}Se_{0,06})_{0,96}$
ПС-90-42-17	Галенит 1	PbS	4,38	0,01	-	-	83,09	-	-	-	-	16,35	-	103,83	$Pb_{0,81}Fe_{0,16}S_{1,03}$
ПС-90-62-52	Галенит 2	PbS	-	-	-	-	81,66	-	-	-	-	10,07	4,82	98,55	$Pb_{1,02}(S_{0,92}Se_{0,18})_{1,00}$
ПС-90-62-54	Галенит 2	PbS	-	-	-	-	81,55	-	-	-	-	10,31	5,58	97,44	$Pb_{1,00}(S_{0,92}Se_{0,18})_{1,00}$
ПС-90-62-55	Галенит 2	PbS	-	-	-	-	82,40	-	-	-	-	10,18	5,47	98,05	$Pb_{1,01}(S_{0,91}Se_{0,18})_{0,99}$
ПС-90-61-5	Галенит 2	PbS	-	-	-	1,14	84,82	-	-	-	-	10,97	4,12	101,05	$Pb_{1,00}Zn_{0,13}(S_{0,83}Se_{0,13})_{0,96}$
ПС-90-61-6	Галенит 2	PbS	-	-	-	2,06	84,43	-	-	-	-	10,68	4,08	101,25	$Pb_{0,99}Zn_{0,08}(S_{0,81}Se_{0,13})_{0,94}$
ПС-90-61-8	Галенит 2	PbS	-	-	-	0,17	82,90	-	-	-	-	10,65	4,42	98,14	$Pb_{1,01}Zn_{0,01}(S_{0,84}Se_{0,14})_{0,98}$
ПС-90-61-9	Галенит 2	PbS	-	-	-	1,13	83,72	-	-	-	-	11,10	3,72	99,68	$Pb_{0,99}Zn_{0,04}As_{0,02}(S_{0,85}Se_{0,12})_{0,97}$
ПС-90-49-62	Галенит - клаусталит	PbS- PbSe	-	3,03	-	0,49	80,27	0,47	-	-	-	6,11	7,01	100,38	$Pb_{0,94}Cu_{0,12}Zn_{0,02}As_{0,02}(Se_{0,92}S_{0,06})_{0,91}$
ПС-90-49-63	Галенит - клаусталит	PbS- PbSe	-	4,13	-	0,54	77,32	1,88	-	-	-	5,69	14,34	103,96	$Pb_{0,96}Cu_{0,16}Zn_{0,06}As_{0,02}Bi_{0,01}(Se_{0,44}S_{0,43})_{0,87}$
ПС-90-50-33	Галенит - клаусталит	PbS- PbSe	-	0,53	-	0,21	79,95	0,18	-	-	-	7,24	11,51	99,61	$Pb_{0,94}Cu_{0,02}Zn_{0,01}As_{0,01}(Se_{0,98}S_{0,01})_{0,97}$
ПС-2-28	Клаусталит 1	PbSe	-	0,46	-	-	74,92	1,71	0,08	-	0,26	3,07	20,80	101,28	$Pb_{0,96}Cu_{0,02}As_{0,06}Bi_{0,003}Te_{0,002}(Se_{0,7}S_{0,25})_{0,95}$
ПС-2-29	Клаусталит 1	PbSe	-	0,46	-	-	75,25	1,52	0,14	-	0,25	2,87	21,36	101,84	$Pb_{0,97}Cu_{0,02}As_{0,03}Bi_{0,003}Te_{0,001}(Se_{0,72}S_{0,24})_{0,96}$
ПС-2-32	Клаусталит 1	PbSe	-	2,75	-	-	74,39	1,08	0,21	-	0,21	2,85	19,85	101,35	$Pb_{0,95}Cu_{0,11}As_{0,04}Bi_{0,003}Te_{0,001}(Se_{0,66}S_{0,23})_{0,89}$
2672/3 <sup>А</sup>	Клаусталит 1	PbSe	-	-	-	-	71,89	-	0,75	-	-	0,22	26,60	99,10	$Pb_{1,00}Te_{0,01}(Se_{0,97}S_{0,02})_{0,99}$
P-55-18	Клаусталит 1	PbSe	0,33	0,62	1,70	-	77,23	0,75	-	1,81	-	2,27	24,59	100,39	$Pb_{0,92}Cu_{0,02}As_{0,04}Sb_{0,04}(Se_{0,7}S_{0,17})_{0,94}$

Окончание таблицы 3-9

№ обр.	Минерал, генерация	Формула	Fe	Cu	Ag	Zn	Pb	As	Te	Sb	Bi	S	Se	Сумма	Кристаллохимическая формула
ПС-90-43-21	Клаусталит 1	PbSe	-	5,12	-	-	71,69	2,13	0,89	-	-	2,26	23,28	105,37	$Pb_{98,96}Cu_{0,96}As_{0,07}Te_{0,02}$ ( $Se_{0,71}Sb_{0,17}Bi_{0,08}$ )
ПС-90-43-24	Клаусталит 1	PbSe	-	7,06	-	0,33	61,10	2,47	2,01	1,13	-	3,21	20,57	97,86	$Pb_{97,1}Cu_{0,27}Zn_{0,01}As_{0,08}Te_{0,04}$ $Sb_{0,01}Se_{0,66}S_{0,16}Bi_{0,07}$
ПС-90-30-31	Клаусталит 2	PbSe	-	-	-	0,08	74,68	2,95	-	-	0,14	2,14	23,54	103,53	$Pb_{99,9}As_{0,1}Bi_{0,01}$ ( $Se_{0,78}Sb_{0,17}Bi_{0,04}$ )
ПС-90-28-9	Клаусталит 3	PbSe	-	1,13	-	-	75,85	2,47	-	-	0,03	2,20	23,72	105,40	$Pb_{99,9}Cu_{0,05}As_{0,08}Bi_{0,001}$ ( $Se_{0,78}Sb_{0,17}Bi_{0,04}$ )
ПС-90-28-10	Клаусталит 3	PbSe	-	1,41	-	-	75,58	2,81	-	-	0,02	2,00	23,95	105,78	$Pb_{99,9}Cu_{0,06}As_{0,09}Bi_{0,001}$ ( $Se_{0,77}Sb_{0,16}Bi_{0,07}$ )
ПС-90-28-16	Клаусталит 3	PbSe	-	-	-	-	76,48	3,20	-	-	-	2,04	23,93	105,66	$Pb_{99,9}As_{0,11}Bi_{0,001}$ ( $Se_{0,78}Sb_{0,16}Bi_{0,04}$ )
ПС-90-28-17	Клаусталит 3	PbSe	-	-	-	-	76,59	3,58	-	-	0,13	2,05	24,32	106,67	$Pb_{99,9}As_{0,11}Bi_{0,001}$ ( $Se_{0,78}Sb_{0,16}Bi_{0,04}$ )
26723 <sup>х</sup>	Клаусталит 3	PbSe	-	-	-	-	72,34	-	0,92	-	-	-	25,62	98,33	$Pb_{99,9}Te_{0,02}Se_{0,96}$
589 <sup>х</sup>	Клаусталит 3	PbSe	-	-	-	-	71,34	-	-	-	-	-	27,19	98,53	$Pb_{100}Se_{1,00}$

Галенит 2 генерации диагностирован в единичных зернах сфалерита 3 генерации, отличающегося от сфалерита, ассоциирующего с галенитом 1 генерации, светло-бурыми и желто-зелеными внутренними рефлексами. Включения галенита имеют округлую форму. Размер их измеряется тысячными долями мм. Характер взаимоотношений его со сфалеритом и другими минералами указывает на более позднее его образование. Отличительной чертой галенита этой генерации является его быстрое окисление на воздухе (в свежеприготовленном аншлифе покрывается иризирующей пленкой в течение нескольких часов). В галените содержится значительная примесь (табл. 3-9) цинка (2,06 мас. %) и селена (от 3,72 до 5,58 мас. %). Последняя является характерной чертой всех галенитов рассматриваемого месторождения.

Следует отметить, что галениты в чистом виде в рудах месторождения встречаются в небольшом количестве. Обычно они образуют изоморфный ряд галенит-клаусталит, обусловленный тем, что в этих минералах атомы серы в различных соотношениях замещаются атомами селена. Содержание серы в минералах этого изоморфного ряда изменяется от 5 до 7 мас. %, а селена от 7 до 14 мас. %, (табл. 3-9, рис. 3-23).

Минералы данного ряда встречаются в месторождениях различных Генетических типов, например, в редкометальных месторождениях Арманьского района Магаданской области (Синдеева, 1959), в сульфидных медно-никелевых рудах Талнахского месторождения (Коваленкер и др., 1971; Коваленкер, 1977), в ванадий-урановых месторождениях плато Колорадо (Coleman, 1959), золотосодержащих кварцевых

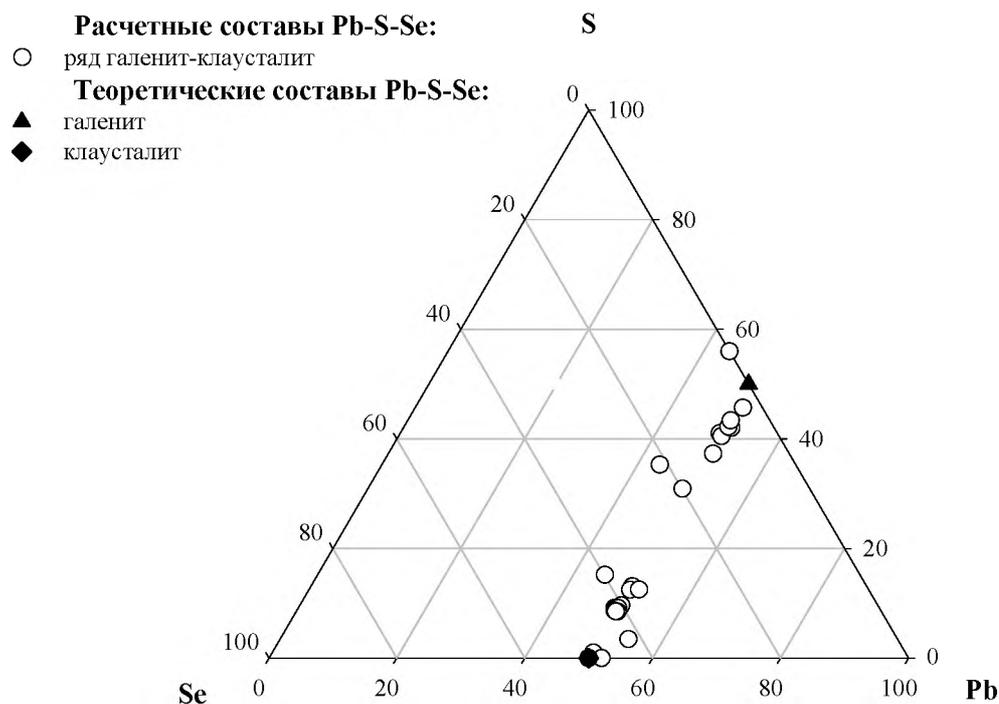


Рис. 3-23. Диаграмма составов минералов системы Pb-S-Se

жилах Карело-Кольского региона (Гавриленко, Реженова, 1987) и др. Изоморфизм анионов в кристаллических решетках минералов этого ряда продиктован (Синдеева, 1959) энергетическим сходством атомов селена и серы и близостью их ионных радиусов (1,93 Å для селена и 1,82 Å для серы). Экспериментальными исследованиями также подтверждено, что в системе PbS-PbSe наблюдается ряд полной изоморфной смесимости атомов серы и селена (Earley, 1950, Синдеева, Годовиков 1959; Сушкова и др. 2004).

**Изоморфный ряд галенит-клаусталит.** Минералы изоморфного ряда галенит-клаусталит представлены редкими мельчайшими (размером сотые и тысячные доли мм) беспорядочно рассеянными включениями в блеклых рудах. Включения имеют ксеноморфные и пластинчатые формы. В свою очередь они замещаются нерудным минералом (англезитом). Поскольку галенит-клаусталиты замещают блеклые руды, то они содержат значительные примеси меди (до 4,13 мас. %), мышьяка (1,88 мас. %) и небольшие количества цинка и висмута, которые являются, по-видимому, реликтовыми включениями замещаемого минерала. Данные рентгеноспектрального анализа показывают, что соотношение серы и селена в минералах галенит-клаусталитов различно (рис. 3-23 приложения 1), что и обуславливает изоморфный ряд от галенита до клаусталита.

### 3.2.3. Селениды

Появление селенидов обычно связывается с резким возрастанием окислительного потенциала среды рудоотложения (Tischendorf, Undethum, 1964), что реализуется в их одновременной кристаллизации с золотом или на более поздних стадиях.

Селен присутствует в рудах в форме собственных минералов – клаусталита, науманита, клокманита, а также изоморфно входит в решетки практически всех рудных минералов месторождения. Это видимо связано с тем, что в заключительные стадии минералообразования активность селена была настолько высокой, что селенидизации подверглись и большинство ранее отложенных минералов. Основным концентратом селена являются блеклые руды.

Из группы селенидов на Прасоловском месторождении изучены следующие минералы: клаусталит, клокманит, науманит и теллуроселениды (?) свинца и висмута.

**Клаусталит PbSe** довольно широко распространен в рудах месторождения и встречается в нескольких минеральных ассоциациях, на основании чего выделяются три его генерации.

*Клаусталит 1 генерации* в отраженном свете белый. По отражательной способности близок галениту, но несколько ярче последнего. Изотропен, однако в скрещенных николях отсутствует полная темнота. Отчетливо видны следы спайности. Клаусталит образует как обособленные зерна размером до 0,03 мм в кварце, так и мелкие (тысячные доли мм), включения в минеральных выделениях блеклых руд (рис. 3-24 приложения 1), относительно крупные из которых приурочены преимущественно к центральным их частям, а более мелкие беспорядочно распределены по всей их массе. Форма зерен неправильная, лапчато-аллотриоморфная, иногда каплевидная. Минеральные выделения клаусталита тесно ассоциируют с гесситом и селенидом серебра. В халькопирит-борнитовых рудах клаусталит присутствует в виде включений в борните, а иногда замещает халькопирит.

Количество селена в клаусталитах меняется от 19,85 до 27,19 мас. % (табл. 3-9, рис. 3-23). Невысокие значения селена в отдельных пробах обусловлены повышенными содержаниями таких элементов как S, As, Te, Bi, Sb. Клаусталит, встречающийся в Ag-содержащей блеклой руде (Ag до 18 мас. %), характеризуется, кроме того, еще и повышенными содержаниями Ag и Sb (в мас. %) – до 1,70 и 1,81 соответственно.

*Клаусталит 2 генерации* представлен минеральными выделениями размером от 0,01 до 0,07 мм. Образует зерна неправильной формы с лапчатыми очертаниями и коррозионными границами. В аншлифах отмечается, что клаусталит данной генерации встречается как в виде мономинеральных выделений, так и в сростаниях со сфалеритом (клаусталит обволакивает зерна сфалерита, а также содержит мелкие включения последнего). Такое взаимоотношение, а также коррозионный характер границ между ними указывает, что клаусталит замещает сфалерит и является, соответственно, более поздним. Кроме того, в кла-

усталите отмечаются также включения самородного теллура и сивьванита. В отдельных зернах наблюдается замещение клаусталита науманитом. По данным рентгеноспектрального анализа, в клаусталите установлены примеси Zn, As, Bi, S (табл. 3-9).

*Клаусталит 3 генерации* является наиболее поздним среди клаусталитов и распространен в кварцевых жилах. Он представлен зернами преимущественно неправильной, реже изометричной формы. В рудах клаусталит данной генерации тесно ассоциирует с клокманитом, находясь с ним в сростании (рис. 3-25 приложения 1), либо обволакиваясь (рис. 3-26 приложения 1) последним в виде каемок по краям зерен. Границы сростания коррозионные. Иногда отмечаются реликтовые включения клаусталита в клокманите. Все это указывает на более раннее образование клаусталита по отношению к клокманиту. В зависимости от того, насколько один минерал заместил другой, размер зерен клаусталита варьирует от 0,01 мм до 0,1 мм.

В клаусталите отмечаются достаточно высокие содержания примесей As (более 3 мас. %), S (более 2 мас. %), Cu (более 1 мас. %) и небольшие – Bi (табл. 3-9). В целом, по сравнению со стехиометрической формулой в клаусталитах Прасоловского месторождения отмечается недостаток свинца и селена (в среднем 0,06 ат. в форм.).

**Клокманит CuSe** (селенид меди) в отраженном свете имеет серый цвет с голубовато-зеленоватым оттенком. Двухотражение сильное. Анизотропия отчетливая. Цветные эффекты от желтого до коричневого. Внутренних рефлексов не наблюдается. Клокманит обычно образуется на заключительных этапах минералообразования в условиях низких температур (Рамдор, 1962). Температура его кристаллизации согласно данным Вогана и Крейга (1981) – 60° С.

В рудах Прасоловского месторождения клокманит встречается в виде зерен неправильной формы в кварцевых прожилках и в большинстве случаев замещает клаусталит по периферии с образованием реакционных кайм. Ширина последних в пределах одного минерального выделения обычно выдержанная и составляет от 0,01 до 0,07 мм. Иногда замещение настолько сильное, что в клокманите наблюдаются лишь очень мелкие реликтовые включения (рис. 3-26 приложения 1) замещенного минерала (т.е. клаусталита 3 генерации), а местами эти включения вообще отсутствуют. В этом случае клокманит наследует форму клаусталита, близкую к изометричной. В соответствии с этим и размер зерен клокманита колеблется от 0,1 до 0,05 мм.

Клокманит в свою очередь замещается более поздними нерудными минералами с образованием графической структуры замещения. Размеры этих минералов менее 0,001 мм, что затрудняет их диагностику в шлифах. Однако, согласно многочисленным литературным данным, наиболее типичными вторичными минералами, образующимися по клокманиту, являются малахит ( $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$ ) и халькомениит ( $\text{CuSeO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), имеющие такой же низкий коэффициент отражения и цвет, как и упомянутые выше вторичные минералы. Для большинства зерен клокманита характерно пятнистое строение, а также включения в нем, кроме клаусталита, других рудных минералов, но размер этих

включений на уровне разрешающей способности микроскопа.

Селенид меди в виде примесей содержит различные количества Pb, Te, S (табл. 3-10), из которых последняя составляет значительную долю в составе анионной части. В пересчете на формульные единицы отношение S: Se равно 1:4, что позволяет отнести исследованный минерал к сернистой разновидности клокманита, или ковеллин-клокманиту. Изоморфизм в системе CuS-CuSe доказан экспериментально (Bernardini et. al., 1976) и реализуется в сульфоселенидах меди в различных генетических типах месторождений.

Таблица 3-10

**Химический состав (мас. %) и кристаллохимическая формула клокманита**

№ образца	Cu	Pb	Se	Te	S	Сумма	Кристаллохимическая формула
Л-27	36,25	2,91	49,99	0,75	5,96	95,86	$Cu_{0,82}Pb_{0,02}Te_{0,01}(Se_{0,93}S_{0,22})_{1,15}$

Науманит  $Ag_2Se$  является достаточно редким минералом в рудах Прасоловского месторождения. При изучении в шлифах диагностируется по белому цвету, умеренной отражательной способности и явно выраженной анизотропии.

В виде более поздних каплевидных включений науманит присутствует в клаусталите, а также окаймляет минеральные выделения последнего, образуя с ним субграфические прорастания. Размер включений науманита варьирует от тысячных долей мм до 0,05 мм. Кроме того, отмечается его тесная ассоциация с теллуристыми минералами (самородным теллуром, селенистым теллуром и сильванитом), с которыми он находится в аналогичных взаимоотношениях.

Химический состав науманита (табл. 3-11) близок теоретическому и отвечает формуле  $Ag_2Se$ . Характерным является то, что данный минерал, как и все селениды Прасоловского месторождения, содержит существенную примесь теллура (до 0,62 мас. %) и серы (до 0,27 мас. %), изоморфно замещающих селен.

Таблица 3-11

**Химический состав (мас. %) и кристаллохимическая формула науманита**

№ обр.	Se	Te	S	Ag	Сумма	Кристаллохимическая формула
521-1 <sup>X</sup>	25,81	0,62	0,27	71,58	100,49	$Ag_{1,98}Te_{0,01}Se_{0,98}S_{0,02}$
521-2 <sup>X</sup>	25,55	0,48	0,27	74,13	100,49	$Ag_{2,01}Te_{0,01}Se_{0,96}S_{0,02}$

**Теллуρο-селениды(?) свинца и висмута.** По данным рентгено-спектрального анализа в рудах Прасоловского месторождения выделяется несколько минеральных фаз с переменным содержанием таких элементов, как: Ag, Cu, Fe, Zn, Pb, Bi, Te, As, Sb, Se, S, которые по относительному преобладанию селена над серой, теллуром и висмутом условно отнесены к группе селенидов. Они образуют редкие хлопьевидные микроскопические включения в кварцевых

жилах. Ввиду очень мелких размеров их оптические и физические свойства не изучены. В литературе минералы с подобным химическим составом не описаны. Ниже приведены результаты химического состава этих минеральных фаз (табл. 3-12), пересчитанные на нормативное формульное содержание и выраженные в виде кристаллохимических формул (табл. 3-13).

Таблица 3-12

Химический состав теллуру-селенидов (?) свинца и висмута (мас. %)

№ обр.	Fe	Cu	Zn	Se	As	Te	Sb	S	Pb	Bi	Ag	Сумма
P-16	0,41	7,01	0,32	32,86	1,71	27,95	0,43	3,89	12,43	9,86	2,01	98,88
ПС-90-16-31	0,26	6,05	0,12	31,58	1,65	27,63	0,41	3,48	15,23	11,84	1,81	100,06
ПС-90-16-32	0,20	11,67	0,67	17,81	1,37	15,54	1,78	7,22	21,46	18,40	0,79	96,91

Таблица 3-13

Нормативный состав и кристаллохимические формулы теллуру-селенидов (?) свинца и висмута (форм. ед.)

Фаза 1	P-16	$(Ag, Cu)(Pb, Bi)(Te, As, Sb)_2$ $(Se, S)_{4,0}$	$(Ag_{0,17}Cu_{0,81}Fe_{0,04}Zn_{0,02})_{1,06}(Pb_{0,43}Bi_{0,40})_{0,83}$ $(Te_{1,73}As_{0,15}Sb_{0,03})_{1,91}(Se_{3,24}S_{0,96})_{4,20}$
	П-16-31	$(Ag, Cu)(Pb, Bi)(Te, As, Sb)_2$ $(Se, S)_{4,0}$	$(Ag_{0,14}Cu_{0,76}Fe_{0,04}Zn_{0,02})_{0,96}(Pb_{0,59}Bi_{0,46})_{1,05}$ $(Te_{1,73}As_{0,18}Sb_{0,02})_{1,93}(Se_{3,20}S_{0,87})_{4,07}$
Фаза 2	П-16-32	$(Ag, Cu, Pb, Bi)_5$ $Te_2(Se, S)_6$	$(Ag_{0,09}Cu_{2,36}Fe_{0,05}Zn_{0,13}Pb_{2,49}Bi_{1,14})_{5,12}$ $(Te_{1,58}As_{0,23}Sb_{0,19})_{2,01}(Se_{2,9}S_{2,92})_{5,86}$

### 3.2.4. Теллуриды

Теллур, как и селен, является химическим аналогом серы, характерным элементом в рудах вулканогенных золотосеребряных месторождений (Некрасова, 1980) и имеет низкое кларковое содержание. В связи с этим он, как правило, рассеивается в массе сернистых соединений, изоморфно входя в их структуры. Но, несмотря на это, он почти всегда, даже при очень низких концентрациях, обособляется также в виде собственных минералов. Поэтому, этот элемент в рудах Прасоловского месторождения встречается как в собственных минеральных фазах, так и в виде изоморфных примесей в самородных металлах, сульфидах, селенидах и сульфосолях. Следовательно, изучение формы нахождения теллура в рудах месторождения будет способствовать выяснению причин и условий, приводящих к концентрированию и рассеиванию теллура в тех или иных минеральных типах.

Следует отметить, что проявления золотосеребряной минерализации теллуридного и селенидного типов широко распространены в молодых вулканических поясах Тихоокеанского кольца и Среднеземноморской провинции (Некрасов, 1991). Минералы теллура широко представлены в рудах Прасоловского месторождения. В них установлена большая группа бинарных, тройных и более сложных соединений, в том числе редких, и вероятно, новых (табл. 3-1).

#### 3.2.4.1. Теллуриды Au и Ag

Для понимания фазовых отношений теллуридов в золотосеребряных месторождениях важны диаграммы бинарных систем Au-Te и Ag-Te, а также трехкомпонентной системы Au-Ag-Te. Для системы Au-Te к настоящему времени установлено (Rose, 1908; Pelabon, 1909 и др.) существование лишь одного двойного соединения – AuTe<sub>2</sub> (калаверита). В системе Ag-Te выделены две бинарные фазы: одна – Ag<sub>2</sub>Te (соответствующая составу гессита) и вторая – точно не определенного состава, но более богатая теллуrom по сравнению с первой фазой. По данным разных авторов (Pellini, 1915; Kracek et al., 1955; Коваленкер и др, 1980 и др.), состав этой фазы соответствует формулам: AgTe, Ag<sub>2</sub>Te<sub>4</sub>, Ag<sub>12</sub>Te<sub>7</sub>, Ag<sub>3</sub>Te<sub>2</sub>, Ag<sub>5</sub>Te<sub>2</sub>, Ag<sub>5</sub>Te<sub>3</sub>, Ag<sub>5-x</sub>Te<sub>3</sub> и Ag<sub>2-x</sub>Te<sub>t+x</sub>.

Для трехкомпонентной системы Au-Ag-Te экспериментально установлена неограниченная взаимная смесимость Au-Ag, в результате чего образуются сильванит, креннерит, мутманнит, петцит и др. (Markham 1960; Щербина, Зарьян, 1964; Sabri, 1965; Безсмертная и др. 1969).

По данным минералогического и химического изучения в рудах Прасоловского месторождения установлены минералы как трехкомпонентной, так и обеих бинарных систем (рис. 3-27). Они представлены креннеритом, сильванитом, петцитом, мутманнитом, куриллитом, калаверитом, гесситом, штютцитом (Кемкина, 2002), а также, несколькими минеральными фазами, не описанными в литературе до настоящего времени Au(Ag,Cu)<sub>4</sub>(Te,S)<sub>2</sub>, (Ag,Cu)<sub>2</sub>(Te,S), (Cu,Ag)<sub>2</sub>TeS<sub>2</sub> и др.

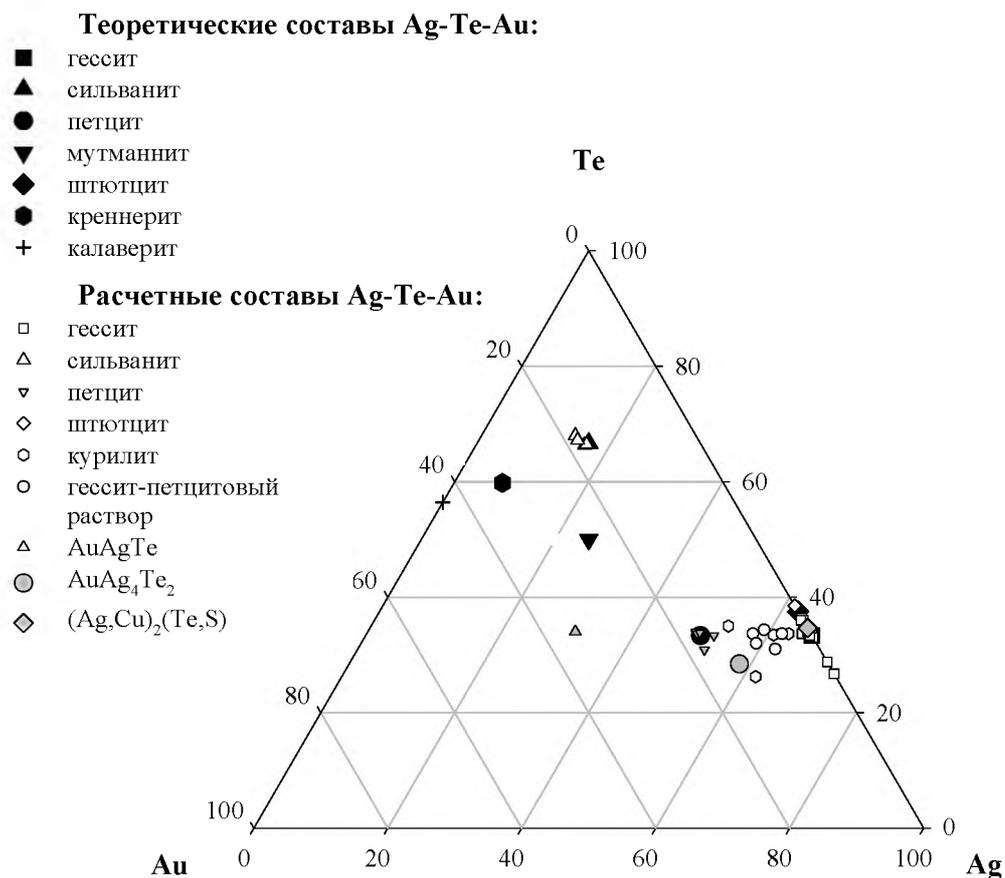


Рис. 3-27. Диаграмма составов теллуридов золота и серебра

Присутствие в рудах собственных минералов теллура свидетельствует о том, что кристаллизация их происходила на заключительных этапах рудообразования в условиях пониженных температур (Филимонова, Слюсарев, 1971), так как экспериментально доказано (Щербина, 1937), что при более высоких температурах теллур должен рассеиваться в сульфидах, изоморфно замещая серу ввиду высокого геохимического сродства этих элементов.

Ниже дается краткое описание минералов теллура по степени их встречаемости, начиная с более распространенных.

**Гессит  $Ag_2Te$**  является преобладающим минералом среди группы теллуридов на Прасоловском месторождении. Он развит в кварце, блеклых рудах, цементирует ранние сульфиды, находится в сростании с самородными золотом, теллуром и более сложными теллуридами Au, Ag, Cu. Выделяется несколько его разновидностей, которые отличаются цветовыми оттенками в отраженном свете, формой зерен и некоторыми особенностями химического состава (табл. 3-14).

*Гессит 1 генерации* в отраженном свете серовато-белого цвета. Приурочен, главным образом, к ксеноморфным выделениям теллурсодержащей блеклой руды (рис. 3-28 приложения 1) т.е. голдфилдиту, содержание теллура в котором составляет в среднем 16 мас. % и образует в нем мелкую беспорядочно рассеянную вкрапленность (до 0,008 мм), а также бесформенные выделения, размер которых в среднем около 0,07 мм. Гессит концентрируется в блеклой руде совместно с петцитом, сильванитом, с которыми часто образует сростки. Эти сростания тяготеют, как правило, к периферической ее части. Выделения гессита и блеклой руды иногда окаймляются высокопробным (880-900 ‰) самородным золотом.

По данным рентгеноспектрального анализа (табл. 3-14) гессит характеризуется повышенными содержаниями (в мас. %): меди (8,84), сурьмы (1,19), золота (0,80) и серы (2,12 мас. %). Он также содержит незначительные количества мышьяка (0,86 мас. %), селена (0,60 мас. %), железа (0,06 мас. %) и цинка (0,04 мас. %).

*Гессит 2 генерации* отличается от описанного выше гессита по цвету. В отраженном свете он серый с коричневатым оттенком, характеризуется хорошо проявленным двуотражением. Ярко выражены эффекты анизотропии, изменяющиеся от темно-коричневых до темно-серых цветов. Отчетливо видны следы спайности. Гессит 2 генерации приурочен, в основном, к кварцевым прожилкам и образует зерна как изометричной, так и пластинчатой (рис. 3-29 приложения 1) формы, размер которых от 0,2 мм до 0,6 мм. Реже он формирует вытянутые лапчатые минеральные выделения размером в среднем 0,05 x 0,5 мм. При детальном изучении выявляется мелкоагрегатное его внутреннее строение (состоит из мельчайших сростшихся зерен со своеобразным пластинчатым двойникованием некоторых индивидов).

С гесситом 2 генерации (также как и с гесситом первой генерации) часто ассоциируют самородное золото (рис. 3-30 приложения 1) и клаусталит (с содержанием серы, не превышающим 3 масс. %), находящиеся с ним в тесном сростании.

Минеральные выделения гессита подвержены интенсивным вторичным изменениям с образованием реликтовой структуры, что проявляется в корродировании и окислении краевых частей зерен, а также замещении его теллуратами золота и серебра (рис. 3-31 приложения 1).

В отношении химического состава данного минерала следует отметить, что он содержит в небольших количествах (табл. 3-14) примеси меди (1,03 мас. %), золота (0,21 мас. %) и серы (0,03 мас. %).

*Гессит 3 генерации* встречается в виде неправильной формы сростков с петцитом в минеральных выделениях сурьмяно-теллуристых блеклых руд (рис. 3-32 приложения 1) приуроченных, преимущественно, к центральным их участкам. В отраженном свете имеет грязно-коричневый цвет, в скрещенных николях сильно анизотропен (цветные эффекты от серых и зеленоватых до коричневых тонов). Благодаря анизотропии отчетливо наблюдается его мелкозернистое строение и характер сростания с петцитом (последний изотропен), с которым он об-

Таблица 3-14

Химический состав (мас. %) и кристаллохимические формулы теллуридов Au и Ag

№ обр.	Минерал, генерация	Формула	Fe	Cu	Ag	Au	Zn	As	Te	Sb	S	Se	Сумма	Кристаллохимическая формула
Л-1/1-6	Гессит 1	Ag <sub>2</sub> Te	0,05	5,86	59,14	-	0,01	0,86	34,86	1,19	-	0,54	102,57	(Ag <sub>1,77</sub> Cu <sub>0,22</sub> Te) <sub>0,01</sub> (Te <sub>0,98</sub> As <sub>0,01</sub> Sb <sub>0,01</sub> Se <sub>0,01</sub> ) <sub>0,99</sub>
Л-1/1-7	Гессит 1	Ag <sub>2</sub> Te	0,06	0,07	62,65	-	0,04	0,31	38,56	0,47	-	0,60	102,77	Ag <sub>1,92</sub> (Te <sub>1,02</sub> As <sub>0,01</sub> Sb <sub>0,01</sub> Se <sub>0,01</sub> ) <sub>0,97</sub>
ПС-4-39	Гессит 1	Ag <sub>2</sub> Te	-	5,82	55,80	0,36	-	-	34,62	-	1,61	-	98,23	(Ag <sub>1,66</sub> Cu <sub>0,28</sub> As <sub>0,01</sub> ) <sub>0,98</sub> (Te <sub>0,97</sub> Sb <sub>0,02</sub> ) <sub>0,99</sub>
ПС-4-40	Гессит 1	Ag <sub>2</sub> Te	-	0,34	59,66	0,80	-	-	38,11	-	-	-	98,91	(Ag <sub>1,92</sub> Cu <sub>0,02</sub> As <sub>0,01</sub> ) <sub>1,96</sub> Te <sub>1,04</sub>
ПС-26-68	Гессит 1	Ag <sub>2</sub> Te	-	8,84	50,29	-	-	-	34,06	-	2,12	-	96,17	(Ag <sub>1,47</sub> Cu <sub>0,44</sub> Fe <sub>0,05</sub> ) <sub>1,06</sub> (Te <sub>0,94</sub> Sb <sub>0,01</sub> ) <sub>0,97</sub>
ПС-2-17	Гессит 2	Ag <sub>2</sub> Te	-	1,03	58,16	0,21	-	-	36,52	-	0,03	-	95,95	(Ag <sub>1,9</sub> Cu <sub>0,08</sub> As <sub>0,02</sub> ) <sub>1,04</sub> (Te <sub>1,02</sub> Sb <sub>0,02</sub> ) <sub>1,01</sub>
1393-52	Гессит 3	Ag <sub>2</sub> Te	-	-	62,69	-	-	-	27,27	-	0,13	5,86	95,94	Ag <sub>2,00</sub> (Te <sub>0,97</sub> Sb <sub>0,02</sub> Se <sub>0,01</sub> ) <sub>0,99</sub>
1393-53	Гессит 3	Ag <sub>2</sub> Te	-	-	60,15	-	-	-	28,88	-	0,23	4,35	95,21	Ag <sub>1,98</sub> (Te <sub>0,97</sub> Sb <sub>0,02</sub> Se <sub>0,01</sub> ) <sub>1,00</sub>
ПС-3-67	Гессит 3	Ag <sub>2</sub> Te	-	-	57,19	-	-	-	38,04	-	-	-	95,23	Ag <sub>1,92</sub> Te <sub>1,02</sub>
3634-3	Гессит 3	Ag <sub>2</sub> Te	-	-	59,54	-	-	-	36,68	-	0,02	-	96,24	Ag <sub>1,97</sub> Te <sub>1,03</sub>
3634-4	Гессит 3	Ag <sub>2</sub> Te	-	-	61,71	-	-	-	37,14	-	0,04	-	98,89	Ag <sub>1,99</sub> Te <sub>1,01</sub>
3634-5	Гессит 3	Ag <sub>2</sub> Te	-	-	60,86	-	-	-	37,38	-	-	-	98,24	Ag <sub>1,97</sub> Te <sub>1,01</sub>
3634-6	Гессит 3	Ag <sub>2</sub> Te	-	-	61,17	-	-	-	36,38	-	0,07	-	97,61	Ag <sub>1,99</sub> (Te <sub>1,00</sub> Sb <sub>0,01</sub> ) <sub>1,01</sub>
3634-7	Гессит 3	Ag <sub>2</sub> Te	-	-	60,96	-	-	-	35,33	-	0,29	-	96,58	Ag <sub>1,99</sub> (Te <sub>0,98</sub> Sb <sub>0,01</sub> ) <sub>1,01</sub>
ПС-3-9	Гессит 4	Ag <sub>2</sub> Te	-	-	58,50	1,99	-	-	35,95	-	0,02	-	96,46	(Ag <sub>1,98</sub> Au <sub>0,04</sub> ) <sub>1,98</sub> Te <sub>1,01</sub>
ПС-3-10	Гессит 4	Ag <sub>2</sub> Te	-	-	60,27	0,51	-	-	36,73	-	-	-	97,52	(Ag <sub>1,97</sub> Au <sub>0,01</sub> ) <sub>1,98</sub> Te <sub>1,02</sub>
3634-14	Гессит 4	Ag <sub>2</sub> Te	-	-	61,93	0,34	-	-	36,88	-	-	-	99,16	(Ag <sub>1,99</sub> Au <sub>0,01</sub> ) <sub>1,99</sub> Te <sub>1,0</sub>
ПС-3-14	Петит 1	Ag <sub>3</sub> AuTe <sub>2</sub>	-	-	38,98	24,54	-	-	31,68	-	-	-	95,19	Ag <sub>2,98</sub> Au <sub>1,02</sub> Te <sub>2,03</sub>
ПС-3-16	Петит 1	Ag <sub>3</sub> AuTe <sub>2</sub>	-	-	39,20	24,94	-	-	32,11	-	-	-	96,25	Ag <sub>2,98</sub> Au <sub>1,02</sub> Te <sub>2,04</sub>
ПС-2-35	Петит 1	Ag <sub>3</sub> AuTe <sub>2</sub>	-	-	44,15	26,66	-	-	31,03	-	-	-	101,85	Ag <sub>3,12</sub> Au <sub>1,04</sub> Te <sub>2,06</sub>
1393-55	Петит 2	Ag <sub>3</sub> AuTe <sub>2</sub>	-	-	43,72	22,50	-	-	23,18	-	0,08	5,84	95,32	Ag <sub>3,12</sub> Au <sub>1,08</sub> (Te <sub>1,02</sub> Sb <sub>0,02</sub> Se <sub>0,01</sub> ) <sub>1,00</sub>

Описание таблицы 3-14

№ обр.	Минерал, генерация	Формула	Fe	Cu	Ag	Au	Zn	As	Te	Sb	S	Se	Сумма	Кристаллохимическая формула
567 <sup>а</sup>	Петшит 2	Ag <sub>2</sub> AuTe <sub>2</sub>	-	-	41,09	24,93	-	-	32,80	-	-	0,20	99,02	Ag <sub>2,08</sub> Au <sub>0,99</sub> (Te <sub>0,01</sub> Se <sub>0,02</sub> ) <sub>2</sub>
ПС-3-8	Гессит-петшитовый тв. раст-р	(AuAg) <sub>2</sub> Te	-	-	54,71	10,58	-	-	32,04	-	-	-	97,37	(Au <sub>0,2</sub> Ag <sub>0,8</sub> ) <sub>2</sub> Te <sub>0,97</sub>
ПР-3-12	Гессит-петшитовый тв. раст-р	(AuAg) <sub>2</sub> Te	-	-	52,21	13,99	-	-	34,87	-	-	-	101,07	(Au <sub>0,26</sub> Ag <sub>0,73</sub> ) <sub>2</sub> Te <sub>0,91</sub>
ПС-3-3	Гессит-петшитовый тв. раст-р	(AuAg) <sub>2</sub> Te	-	-	55,19	14,14	-	-	33,08	-	-	-	102,40	(Au <sub>0,27</sub> Ag <sub>0,72</sub> ) <sub>2</sub> Te <sub>0,98</sub>
ПС-3-3 в	Гессит-петшитовый тв. раст-р	(AuAg) <sub>2</sub> Te	-	-	52,92	10,86	-	-	36,45	-	-	-	100,23	(Au <sub>0,20</sub> Ag <sub>0,77</sub> ) <sub>2</sub> Te <sub>0,93</sub>
ПС-3-13	Гессит-петшитовый тв. раст-р	(AuAg) <sub>2</sub> Te	-	-	53,96	6,68	-	-	34,65	-	-	-	95,29	(Ag <sub>0,88</sub> Au <sub>0,12</sub> ) <sub>2</sub> Te <sub>0,91</sub>
ПС-3-4	Толлурид золота и серебра	AgAuTe	-	-	24,30	50,26	-	-	29,13	-	-	-	103,69	Au <sub>1,05</sub> Ag <sub>0,93</sub> Te <sub>1,02</sub>
ПС-4-36	Сильванит	AgAuTe <sub>4</sub>	-	0,10	10,32	25,56	-	-	62,06	-	-	-	98,03	Au <sub>1,08</sub> (Ag <sub>0,90</sub> Сu <sub>0,02</sub> ) <sub>0,99</sub> Te <sub>4,10</sub>
ПС-4-37	Сильванит	AgAuTe <sub>4</sub>	-	0,32	10,19	25,34	-	-	61,85	-	-	-	97,71	Au <sub>1,08</sub> (Ag <sub>0,98</sub> Сu <sub>0,02</sub> ) <sub>0,97</sub> Te <sub>4,08</sub>
ПС-4-41	Сильванит	AgAuTe <sub>4</sub>	-	1,17	9,60	24,65	-	-	61,83	-	-	-	97,25	Au <sub>1,06</sub> Ag <sub>0,73</sub> Сu <sub>0,16</sub> 0,09Te <sub>4,06</sub>
ПС-4-43	Сильванит	AgAuTe <sub>4</sub>	-	1,02	9,72	25,77	-	-	61,82	-	-	-	98,38	Au <sub>1,08</sub> (Ag <sub>0,71</sub> Сu <sub>0,14</sub> 0,08Te <sub>4,02</sub>
521-12 <sup>х</sup>	Сильванит	AgAuTe <sub>4</sub>	-	-	13,17	23,97	-	-	61,71	-	-	0,51	99,36	Au <sub>1,00</sub> Ag <sub>1,00</sub> (Te <sub>0,96</sub> Se <sub>0,04</sub> ) <sub>1,00</sub>
521-12 <sup>а</sup>	Шлотцит	Ag <sub>3</sub> Te	-	-	57,71	-	-	-	42,78	-	-	-	100,49	Ag <sub>2,93</sub> Te <sub>0,98</sub>
ПР-3-7	Мугъванит	(Ag <sub>2</sub> Au)Te	-	-	23,15	32,52	-	-	45,68	-	-	-	101,35	(Ag <sub>0,98</sub> Au <sub>0,02</sub> ) <sub>1,00</sub> Te <sub>0,98</sub>
1393-47	Курицит	(Ag <sub>2</sub> Au) <sub>2</sub> (Te,Se,S)	-	-	44,06	22,72	-	-	24,47	-	-	4,54	95,78	(Ag <sub>2,31</sub> Au <sub>0,67</sub> ) <sub>2</sub> Te <sub>0,98</sub> (Te,Se,S) <sub>0,91</sub>
1393-50	Курицит	(Ag <sub>2</sub> Au) <sub>2</sub> (Te,Se,S)	-	-	47,30	18,70	-	-	23,55	-	-	7,47	97,01	(Ag <sub>2,66</sub> Au <sub>0,33</sub> ) <sub>2</sub> Te <sub>0,99</sub> (Te,Se,S) <sub>0,95</sub>
1393-51	Курицит	(Ag <sub>2</sub> Au) <sub>2</sub> (Te,Se,S)	-	-	57,32	5,73	-	-	28,62	-	0,07	4,53	96,26	(Ag <sub>2,69</sub> Au <sub>0,30</sub> ) <sub>2</sub> Te <sub>0,99</sub> (Te,Se,S) <sub>0,91</sub>
1393-54	Курицит	(Ag <sub>2</sub> Au) <sub>2</sub> (Te,Se,S)	0,18	-	54,40	8,99	-	-	26,23	-	0,21	5,17	95,19	(Ag <sub>2,82</sub> Au <sub>0,17</sub> Fe <sub>0,01</sub> Bi <sub>0,00</sub> (Te,Se,S) <sub>0,93</sub> Sb <sub>0,01</sub> ) <sub>2,00</sub>

разует очень тонкие взаимные прорастания. При этом в отраженном свете обнаружить эти сростания не всегда удается, поскольку оба эти минерала имеют близкие физические и оптические свойства. Граница между ними четко определяется только по цветовому фону при наблюдении двуотражения и анизотропии. Гессит образует в петците изометричные, либо бесформенные выделения с расплывчатыми контурами.

Для гессита этой генерации характерны повышенные содержания (см. табл. 3-14) селена (до 5,86 мас. %) и незначительные серы (до 0,28 мас. %). Расчет кристаллохимических формул минералов показывает (табл. 3-14), что в них наблюдается превышение атомных количеств теллура (в среднем на 0,02 ат. в форм.), при незначительном дефиците серебра по отношению к теоретической формуле.

*Гессит 4 генерации* наблюдается в кварцевых прожилках и минеральных агрегатах блеклых руд и образует в них выделения различной формы: изометричные (до 0,3 мм), пластинчатые (0,2-0,5 мм) и бесформенные удлинённые (0,01 x 0,20 мм). В отраженном свете он серовато-белый с коричневым оттенком. Особенностью гессита этой генерации является то, что он пронизан мельчайшими пылинками и сетью тончайших волосовидных прожилков самородного золота.

Результаты рентгеноспектрального анализа показывают, что для данного гессита характерно высокое содержание золота до 1,99 мас. % (табл. 3-14), что обусловлено очевидно тонкодисперсной примесью его в гессите.

Из приведенных выше данных по гесситам разных генераций видно, что их химический состав отличается незначительно и близок к теоретическому. Следует также отметить, что гессит Прасоловского месторождения (в частности третья его генерация) имеет параметры кристаллической решетки, согласно данным рентгеноструктурного анализа (табл. 3-15), аналогичные гесситу из гидротермальных кварцевых жил с теллуридами и золотом одного из месторождений Канады (Михеев, 1957), т.е. типовому, по которому и были рассчитаны межплоскостные расстояния для этого минерала.

**Петцит  $\text{Ag}_3\text{AuTe}_2$**  в рудах Прасоловского месторождения достаточно редкий минерал. В отраженном свете он белый с серовато-голубоватым оттенком, по отражательной способности схож с гесситом, но в отличие от последнего изотропен. При микроскопическом изучении он установлен в минеральных ассоциациях, как минимум, двух типов руд, что дает основание выделить две его генерации.

*Петцит 1 генерации* представлен изометричными и ксеноморфными выделениями (до 0,05 мм) в кварцевых прожилках и теллуросодержащей (голдфилдите) блеклой руде, ассоциируя с такими теллуридами как гессит, калаверит, сильванит, а также самородным золотом (рис. 3-33 приложения 1). Такая тесная ассоциация петцита с перечисленными минералами отмечается многими исследователями в рудах месторождений Калгурли и Невады (Vikre, 1982; Baywater, 1984) Кроме того, он отмечается и в золото-полисульфидно-кварцевых рудах, где замещает сульфиды.

**Межплоскостные расстояния гессита Прасоловского месторождения  
и типового из кварц-золото-теллуридного месторождения Канады**

Прасоловское м-е, обр. 3634-9/1		hkl	Месторождение Канады	
I	d/n		I	d/n
2	7,13	001	1	7,14
2	4,48	330; 060	1	4,53
1	3,73	002	1	3,74
1	3,34	202; 071; 132	1	3,40
3	3,16	510; 271	2	3,19
5	2,98	152; 501	6	3,01
8	2,88	062	8	2,87
2	2,78	550; 402	1	2,80
1	2,69	600; 422; 352	1	2,69
10	2,30	710; 660	10	2,31
7	2,24	323; 730; 552	7	2,25
5	2,14	392; 413; 750	6	2,14
1	2,02	1. 11. 2	1	2,01
1	1,960		1	1,957
1	1,927		1	926
1	1,855		1	1,855

*Петцит 2 генерации* приурочен, главным образом, к центральным участкам минеральных выделений тетраэдрит-голдфилдитовых блеклых руд, где образует неправильной формы сростки с гесситом 3 генерации. Размер таких сростков не превышает 0,09 мм. Эти сростки представляют собой тесные взаимные прорастания (мирмекитовые сростания) обоих минералов с образованием субграфической структуры. Подобная форма сростаний свидетельствует о возможном распаде твердого раствора.

Химический состав петцита 1 и 2 генераций, приведенный в таблице 3-14, хорошо пересчитывается на формулу ( $\text{Ag}_3\text{AuTe}_2$ ). При этом для петцита 2 генерации отмечается повышенное содержание селена (до 5,84 мас. %) и незначительное серы (до 0,08 мас. %).

Кроме бинарных (Ag-Te и Au-Te) и трехкомпонентной (Au-Ag-Te) систем соединений теллуридов в рудах Прасоловского месторождения по данным рентгеноспектрального анализа выделяются еще две минеральные фазы, отношение Au:Ag в которых не позволяет пересчитать их состав на кристаллохимические формулы известных теллуридов золота и серебра (таких как гессит, петцит, мутманнит и др.).

В одной из них отношение Au и Ag изменяется в пределах от 0,12 до 0,28, что дает основание сопоставить ее с гессит-петцитовым твердым раствором  $(\text{AuAg})_2\text{Te}$ . Из литературных источников известно, что подобные фазы нередки в золото-теллуридных месторождениях и представляют собой, скорее всего, закаленные фазы, которые не испытали распада (Kracek, Rowland, 1955; Kracek

et al., 1966). Считается, что при температуре 300° между петцитом и гесситом имеется большой разрыв смесимости, который указывает на самостоятельность этих минералов. Но при температуре 250° между ними образуются твердые растворы (Markham, 1960).

Во второй минеральной фазе отношение Au:Ag близко к 1. Следует отметить, что теллуриды золота и серебра с таким соотношением в литературе на сегодняшний день не описаны. Ниже приведено краткое описание этих фаз.

**Гессит-петцитовый твердый раствор (AuAg)<sub>2</sub>Te.** Данная минеральная фаза приурочена к кварцевым жилам и представлена ксеноморфными выделениями (рис. 3-34 приложения 1), ассоциирующими с самородным золотом. Размер их изменяется от 0,005 до 0,01 мм.

Результаты рентгеноспектрального анализа (табл. 3-14) показывают, что основными минералообразующими элементами выделенной фазы являются присутствующие в разных пропорциях золото и серебро, а также теллур. Отношение Au:Ag = 0,12-0,28 (табл. 3-16). При этом, содержания теллура и серебра изменяются незначительно, в то время как золото подвержено наибольшим вариациям. Его состав в разных пробах колеблется от 6,68 до 14,14 мас. %. Данная минеральная фаза хорошо пересчитывается на формулу (AuAg)<sub>2</sub>Te.

Таблица 3-16

**Отношение Au:Ag в гессит-петциновом твердом растворе (AuAg)<sub>2</sub>Te**

№ обр.	ПС 3-8	ПР 3-12	ПС 3-3	ПС 3-3в	ПС 3-13
Отношение Au:Ag	0,19	0,28	0,26	0,21	0,12

**Теллурид золота и серебра AuAgTe** отмечен в виде единичных мельчайших включений округлой формы в теллуросодержащих (Te более 19 мас. %) блеклых рудах. Химический состав этой минеральной фазы приведен в таблице 3-14. Отношение Au:Ag близко к 1. Пересчет данных рентгеноспектрального анализа на три формульных единицы дает следующую кристаллохимическую формулу: Au<sub>1,05</sub>Ag<sub>0,93</sub>Te<sub>1,02</sub> (AgAuTe).

**Сильванит AgAuTe<sub>4</sub>** один из широко распространенных поздних теллуридов Прасоловского месторождения. В отраженном свете имеет отчетливый розовато-кремовый цвет. Сильно анизотропен. Цветные эффекты от темно-коричневых до серых с голубоватым оттенком. Хорошо проявлено двойниковое и мозаичное строение, которое отчетливо наблюдается в скрещенных николях. Типичны полисинтетические двойники. Ярко выражена спайность. Кристаллы имеют укорочено-призматическую, скелетную, близкую к идиоморфной, крючковатую, а в мелких зернах изометричную форму.

Сильванит встречается в виде многочисленных включений размером от 0,03 мм и менее до 0,15 мм, главным образом, в центральных частях минеральных выделений теллуросодержащих блеклых руд, а также голдфилдитах, где он ассоциирует с гесситом, алтанитом, штюцитом, науманитом и высокопроб-

ным (865 %) золотом, с которыми образует взаимные сростания. В блеклых рудах с невысоким содержанием теллура (теннантит-тетраэдрите) сильванит отсутствует. Изучение характера взаимоотношений сильванита с ассоциирующими с ним минералами показывает, что границы между ними ровные, извилистые (некоррозионные). Это свидетельствует о близодновременном их выделении. На границе сростания сильванита с науманитом отмечаются очень мелкие выделения самородного теллура и селенистого теллура. Отдельные минеральные выделения сильванита образуют коррозионные границы сростания с креннеритом, что, вероятно, указывает на замещение последним первого. Кроме того, отмечается замещение сильванитом минеральной фазы, химический состав которой хорошо пересчитывается на формулу  $\text{AuAg}_4\text{Te}_2$  (не описанный в литературе минерал). Вторичные минералы, развивающиеся по сильваниту представлены теллуратами.

Результаты рентгеноспектрального анализа показывают, что химический состав сильванита не обнаруживает сколько-нибудь существенных флуктуаций (табл. 3-14), хотя содержания золота несколько превышают содержания серебра по сравнению с теоретическим ( $\text{Au} - 24,19$ ;  $\text{Ag} - 13,22$ ;  $\text{Te} - 62,59$  мас. %) составом. Отношение  $\text{Au}:\text{Ag}$  в сильваните Прасоловского месторождения составляет 1-1,46:1. Аналогичные соотношения  $\text{Au}:\text{Ag} = 1,18-1,44:1$  описаны и для других золото-теллуридных месторождений (Markham, 1960). Нестехиометричность сильванита, т.е. повышенное содержание золота в сравнении с теоретическим составом, обусловлена, очевидно, несколькими высокими температурами (более  $200-220^\circ\text{C}$ ) его кристаллизации (Sabri, 1965).

Кроме того, для сильванита Прасоловского месторождения характерно присутствие незначительного количества  $\text{Cu}^+$  (от 0,10 до 1,17 мас. %), которая, очевидно, изоморфно входит в структуру минерала, компенсируя, таким образом, недостающее количество серебра. В одном анализе также отмечена незначительная примесь селена (до 0,51 мас. %), который, вероятно, также изоморфно замещает теллур (табл. 3-14).

**Штютцит  $\text{Ag}_{5-x}\text{Te}_3$**  белого цвета, с отражательной способностью выше галенита. Характеризуется умеренными эффектами анизотропии, цвет которых изменяется от темно-серого до темно-коричневого. Встречается в виде редких включений в краевых частях минеральных выделений теллурсодержащих блеклых руд, гессита и клаусталита. Форма этих включений изометричная, иногда удлиненная. Размер зерен измеряется сотыми и тысячными долями мм. Ассоциирует с сильванитом, халькопиритом, самородным теллуrom, алтаитом, находясь с ними в сростаниях.

Химический состав штютцита (табл. 3-14) близок теоретическому. Содержание минералообразующих компонентов (мас. %) составляет:  $\text{Ag} - 57,71$  и  $\text{Te} - 42,78$ . Его кристаллохимическая формула практически идеально пересчитывается на  $\text{Ag}_{5-x}\text{Te}_3$  и соответствует  $\text{Ag}_{4,92}\text{Te}_{3,08}$ .

**Калаверит  $\text{AuTe}_2$**  – дителлурид золота, образующийся при относительно высоких температуре (около  $400^\circ\text{C}$ ) и давлении, т.е. характеризуется глубинными условиями кристаллизации. В рудах месторождения калаверит является

довольно распространенным и наиболее ранним среди теллуридов. В отраженном свете он белый с кремовым оттенком. Эффекты анизотропии отчетливые, двуотражение слабое. Встречается в золото-калаверитовых рудах в виде зерен с устойчивой тенденцией к идиоморфизму, а также в виде неправильных включений от 0,002 до 0,1 мм в блеклых рудах (главным образом в голдфилдите). Кроме того, отмечаются редкие прожилки, сложенные калаверитом, которые секут мышьяковистые блеклые руды. Калаверит последовательно замещается алтаитом, петцитом, сильванитом, креннеритом, самородным золотом. В виде каемок по нему развивается мутманнит.

**Креннерит (Au,Ag)Te<sub>2</sub>** в отличие от калаверита является довольно редким минералом на месторождении. Имеет близкие к калавериту оптические свойства. Считается, что креннерит является его полиморфной модификацией, образующейся при более низких температурах и давлениях (Бессмертная и др., 1969). По данным Л. Дж. Кабри (Cabri, 1965), креннерит устойчив до температуры 382° С, а затем он переходит в моноклинную модификацию, аналогичную калавериту. Согласно Н. Л. Маркгаму (Markham, 1960), креннерит более типичен для близповерхностных низкотемпературных месторождений, связанных с вулканической деятельностью. Поэтому в глубоко эродированных месторождениях наблюдается смена креннерита калаверитом на глубоких горизонтах.

При изучении руд Прасоловского месторождения отмечается, что в шлифах креннерит характеризуется высоким коэффициентом отражения. В отраженном свете имеет бледно-кремовый цвет и слабо выраженные анизотропию и двуотражение. Этот минерал образует как самостоятельные выделения неправильной пластинчатой формы размером до 0,07 мм, так и сростки с блеклыми рудами. Ассоциирует преимущественно с поздними минералами группы теллуридов, корродируя сильванит-петцитовые агрегаты, а сам, в свою очередь, замещается курилитом (Ag,Au)<sub>2</sub>(Te,Se,S). В единичных случаях отмечаются реликтовые образования креннерита среди минеральных выделений, сложенных самородным золотом и оксителлуритами, что, по-видимому, является результатом окисления креннерита в зоне гипергенеза. В зоне окисления креннерит неустойчив и разлагается с образованием «горчичного» золота и оксителлуритов (Некрасов, 1991).

Данные рентгеноструктурного анализа (табл. 3-17) показывают, что рентгенограмма креннерита Прасоловского месторождения сопоставима с рентгенограммой креннерита Рудник Муз, плато Колорадо (Михеев, 1957).

**Мутманнит (Ag,Au)Te** также крайне редкий минерал среди теллуридов Прасоловского месторождения (впрочем, как и для других золото-теллуридных месторождений мира). Присутствует в золото-теллуридно-кварцевых рудах в виде мельчайших зерен, максимальный размер которых не превышает 0,1 мм. Этот минерал в отраженном свете имеет светло-серый цвет. Анизотропия проявлена слабо. Образует сростания с другими теллуридами, а также замещает калаверит по краям зерен. В отдельных случаях отмечаются полные псевдоморфозы его по калавериту. Такой характер взаимоотношения мутманнита с другими минералами указывает на то, что, скорее всего, он является вторичным минералом,

**Межплоскостные расстояния креннерита  
Прасоловского месторождения и Рудника Муз**

Прасоловское м-е, № обр.				hkl	Рудник Муз, Колорадо	
P-55		P-56			I	d/n
I	d/n	I	d/n			
3	3,79	2	3,785	220; 111	3	3,88
10	3,004	10	2,998	401	10	3,03
3	2,960	4	2,952	030; 221	7	2,94
1	2,275	1	2,227	002; 331	6	2,23
4	2,142	6	2,142	012	2	2,16
3	2,027	4	2,023	312	2	2,01
10	1,966	-	-	141; 402	3	1,97
1	1,907	-	-	241; 412; 222	3	1,92
1	1,786	1	1,787	032	5	1,78
-	-	1	1,698	-	5	1,69
-	-	1	1,515	-	5	1,52

развивающимся по теллуридам золота, что согласуется с данными Э.М Спиридонова и Т.Н Чвилевой (1985), описавшими мутманнит из руд месторождения Бая-де-Арьеш (Румыния) как типичный гипергенный минерал.

Химический состав мутманнита соответствует теоретическому и пересчитывается на формулу  $(Ag,Au)Te$ . Отношение  $Au : Ag$  близко к 1 (табл. 3-14).

**Куриллит  $(Ag,Au)_2(Te,Se,S)$ .** Впервые минерал с таким соотношением минералообразующих компонентов и, соответственно, такой формулой (но без названия) был описан В.А. Коваленкером с соавторами (1989) именно из руд Прасоловского месторождения. Материалы по этому минералу были переданы ими в КНМ ММА для апробации в качестве нового минерального вида с названием «курулит». Впоследствии это название было закреплено за этим минералом.

В отраженном свете он имеет белый цвет с едва различимым желтоватым оттенком. В шлифах обычно наблюдается в виде мелких (до 0,005 мм) обособленных ксеноморфных выделений среди кварца, иногда образующих скопления, реже он встречается в виде вкрапленности неправильной формы в блеклых рудах и приурочен к их краевым частям. Отмечаются также срастания курилита с гесситом и петцитом. При этом, куриллит чаще всего образует каемки вокруг гессита, а петцит содержится в нем в виде неправильных выделений.

Химический состав курилита и его кристаллохимические формулы приведены в таблице 3-14. Однако следует отметить, что в наших анализах содержание золота несколько выше его количества, которые были описаны В.А. Коваленкером с соавторами (1989), и меняется от 5,73 до 22,72 мас. %.

#### 3.2.4.2. Теллуриды Pb

**Алгаит  $PbTe$**  значительных скоплений не образует. Характерен только

для золото-теллуридно-кварцевого типа руд, где присутствует в виде немногочисленных обособленных минеральных выделений размером от 0,0001 до 0,07 мм, а также образует сростания с другими минералами, главным образом с теллуридами, как в кварцевых жилах, так и в блеклых рудах.

В отраженном свете этот минерал белый со слегка зеленоватым оттенком, с отражательной способностью близкой к самородным металлам ( $R \sim 60$  %). Изотропен. При изучении в шлифах отмечается, что в кварцевых жилах алтаит тесно ассоциирует как с ранними теллуридами (самородным теллуrom, селеносодержащим теллуридом висмута), так и с поздними (петцитом, сильванитом, селенистым гесситом), с которыми образует взаимные прорастания. Это обстоятельство указывает на относительную длительность его кристаллизации. В блеклых рудах, в частности в зональных зернах голдфилдита, алтаит ассоциирует с самородным теллуrom, гесситом, халькопиритом, концентрируясь в виде включений изометричной, линзовидной, неправильной формы по зонам их роста. В отдельных случаях наблюдается цементация алтаитом раздробленных зерен галенита и сфалерита. По алтаиту развиваются такие вторичные минералы как церуссит, с образованием коррозионных структур разъедания, так и теллулаты.

Химический состав алтаита ( $Pb - 61,73$ ,  $Te - 37,58$  мас. %) близок теоретическому. Однако отмечается незначительная примесь серы до 0,28 мас. %. Расчетная формула алтаита соответствует  $Pb_{0,99}(Te_{0,98}S_{0,03})_{1,01}$ .

### 3.2.4.3. Селеносодержащие теллуриды

**Селенистый теллур  $Te_3Se_4$ .** В природных соединениях самородный теллур часто содержит некоторое количество селена в качестве изоморфной примеси. Однако, экспериментальными исследованиями установлено (Синдеева, 1959), что теллур и селен могут также смешиваться в различных соотношениях, образуя непрерывный ряд твердых растворов. Действительно, в кварц-баритовых жилах серебряного рудника Эль-Пломо в Гондурасе был обнаружен самородный теллур, содержащий селена 29,31 мас. % (Синдеева, 1959). Его состав хорошо пересчитывался на формулу  $Te_3Se_2$ . Вместе с тем, В.А. Коваленкер с соавторами (1989) в золото-теллуридно-кварцевых рудах Прасоловского месторождения обнаружили аналогичный селенистый теллур с содержанием  $Te - 54,11$  и  $Se - 44,99$  мас. %, состав которого соответствует формуле  $Te_3Se_4$ . Очевидно, что приведенные выше примеры иллюстрируют варианты различного состава селенотеллуrowого твердого раствора, а не представляют самостоятельные минеральные виды.

Среди теллуридов Прасоловского месторождения нами также установлен селенистый теллур, содержания теллура и селена которого, согласно данным микрозондового анализа, соответственно 53,16 и 45,74 мас. %. Расчет состава этого селенистого теллура на 7 атомов в формуле соответствует формуле  $Te_{2,93}Se_{4,07}$ . Селенистый теллур присутствует в виде редких мелких включений в кварце. Их размер в среднем составляет 0,005 мм. Кроме того, он образует мало-

мощные прожилки (0,002 мм) в клаусталите и самородном теллуре. Оптические характеристики (цвет и величина отражения) селенистого теллура близки соответствующим показателям самородного теллура.

**Селеносодержащий теллурид висмута  $\text{Bi}_2\text{SeTe}_2$ .** В настоящее время среди собственно теллуридов висмута известно, пожалуй, только три минерала – телуровисмутит, хедлэйт и верлит, которые содержат в незначительных количествах (первые проценты) примесь серы и следы селена, а верлит еще и серебра. Кроме того, известны теллуриды висмута, с относительно высоким содержанием (5-8 мас. %) серы (тетрадимит, жозеит, грюнлингит и др.), сурьмы (так называемый стибиотеллуровисмутит, по Магакьян, 1957) и свинца (свинецсодержащий теллурид висмута, по Качаловская и др., 1971). Широкие вариации составов выше перечисленных теллуридов висмута М.С. Бессмертная с соавторами (1969) объясняют проявлением изоморфизма, что приводит к образованию разновидностей с промежуточными свойствами, неупорядоченными структурами и отсутствию четких критериев разграничения между отдельными минеральными видами.

Вместе с тем, в рудах Прасоловского месторождения нами обнаружен теллурид висмута, содержащий более 8 мас. % селена. Следует отметить, что сведения о подобных селеносодержащих практически бессернистых теллуридах висмута на сегодняшний день в литературе отсутствуют. К сожалению, авторам не удалось выполнить рентгеноструктурных исследований данного минерала по причине его очень мелких выделений и тесного срастания с блеклыми рудами (рис. 4-11а), гесситом и алтаитом, что не позволяет отнести его к самостоятельному минеральному виду. В связи с этим, в настоящей работе селеносодержащий теллуровисмутит рассматривается как минеральная фаза.

В отраженном свете описываемый минерал имеет кремово-белый цвет, едва заметное двуотражение, ясную анизотропию с цветными эффектами от голубоватых до желтоватых оттенков. Местами хорошо проявлена спайность. Он образует мелкие (до 0,015 мм и менее) удлиненные, изометричные близкие к идиоморфным зерна, находящиеся в тесном срастании с самородным теллуром, алтаитом и гесситом, и также локализуется в кварцевых прожилках и краевых частях голдфилдита.

Химический состав селеносодержащего теллуровисмутита (табл. 3-18) хорошо пересчитывается на формулу  $\text{Bi}_2\text{SeTe}_2$ . Из таблицы также видно, что для него характерны незначительные количества меди и серы.

Таблица 3-18

**Химический состав (мас. %) и кристаллохимическая формула селеносодержащего теллурида висмута**

№ обр.	Cu	Zn	Se	Te	S	Bi	Сумма	Кристаллохимическая формула
P-71/3	1,45	0,09	8,12	32,71	0,18	52,83	95,43	$\text{Cu}_{0,18}\text{Zn}_{0,01}\text{Bi}_{1,97}\text{Se}_{0,80}\text{S}_{0,04}\text{Te}_{2,00}$

### 3.2.4.4. Медно-золото-серебряные сульфотеллуриды

Среди рудных минералов золото-теллуридно-кварцевого типа Прасоловского месторождения при микроскопическом изучении отмечаются редкие мельчайшие выделения, которые по своим оптическим свойствам очень сходны с описанными выше теллуридами. Однако, данные рентгеноспектрального анализа показывают, что они характеризуются переменным количеством таких элементов как Au, Ag, Cu и S, при относительно высоком содержании Te, а при пересчете имеют разные кристаллохимические формулы. Скорее всего, это новые минеральные фазы (не описанные пока в литературе), краткая характеристика которых приводится ниже.

**Au(Ag,Cu)<sub>4</sub>(Te,S)<sub>2</sub>.** В отраженном свете этот минерал по цвету схож с галенитом, но имеет слегка желтоватый оттенок. В шлифах характеризуется зернами неправильной формы, которые образуют сростания с низкопробным (771 ‰) самородным золотом, а также пересекаются тонкими прожилками гессита, содержащего более высокопробное (855 ‰) самородное золото. В отдельных случаях наблюдается замещение его силъванитом. Данные рентгеноспектрального анализа показывают, что описываемый минерал содержит существенное количество меди (2,01 мас. %) и серы (0,75 мас. %). Состав основных химических элементов приведен в таблице 3-19, из которого видно, что отношение Au:Ag составляет 0,24. Пересчет анализов дает следующую кристаллохимическую формулу –  $Au_{0,93}(Ag_{3,81}Cu_{0,27})_{4,08}(Te_{1,80}S_{0,19})_{1,99}$ , которая может быть представлена в обобщенном виде как  $Au(Ag,Cu)_4(Te,S)_2$ .

**(Ag,Cu)<sub>2</sub>(Te,S).** Данная минеральная фаза по оптическим свойствам близка гесситу. В отраженном свете имеет белый цвет и слабо выраженную анизотропию. Представлена очень редкими мельчайшими зернами, размер которых не превышает 0,003 мм. Образования данной фазы локализуются, главным образом, по периферии аллотриоморфных выделений теллурсодержащих (Te более 18 мас. %) блеклых руд. Особенностью химического состава этой фазы является высокое содержание меди (до 8,84 мас. %) и полное отсутствие золота, а также умеренные количества железа и серы (табл. 3-19). Кристаллохимическая формула выделенной фазы соответствует  $(Ag_{1,47}Cu_{0,44}Fe_{0,05})_{1,96}(Te_{0,84}S_{0,20})_{1,04}$  или в упрощенном виде –  $(Ag,Cu)_2(Te,S)$ .

**(Cu,Ag)<sub>2</sub>TeS<sub>2</sub>.** Выделения этой фазы характеризуются белым цветом с кремовым оттенком и высокой отражательной способностью. Они встречается в виде мелких (до 0,004 мм) включений изометричной формы, расположенных в краевых участках относительно крупных (0,03-0,5 мм) зерен теллуристых блеклых руд, содержащих реликты сфалерита. Химическая индивидуальность данного минерала (табл. 3-19) заключается в высоком содержании серы (до 21,01 мас. %) и меди (до 35,54 мас. %), а также повышенных количествах мышьяка (3,24 мас. %) и сурьмы (4,14 мас. %) при сравнительно невысоких концентрациях серебра (5,49 мас. %). Кристаллохимическая формула данного минерала может быть представлена в виде  $(Ag_{0,16}Cu_{1,80}Zn_{0,01})_{1,97}(Te_{0,78}As_{0,14}Sb_{0,09})_{1,01}S_{2,02}$  или как  $(Cu,Ag)_2TeS_2$ .

Таблица 3-19

Химический состав (мас. %) и кристаллохимические формулы минеральных фаз медно-золотосеребряных сульфотеллуридов

№ обр.	Минеральная фаза	Fe	Cu	Ag	Au	Zn	As	Te	Sb	S	Сумма	Кристаллохимическая формула
ПС-2-33	$\text{Au}(\text{Ag}_x\text{Cu}_y)(\text{Te}_z\text{S}_2)$	-	2,01	48,91	21,77	-	-	27,25	-	0,75	100,69	$(\text{Ag}_{0,81}\text{Cu}_{0,17})_{1,02}\text{Au}_{0,93}(\text{Te}_{0,86}\text{S}_{0,19})_{1,99}$
ПС-26-68	$(\text{AgCu})_x(\text{Te}_y\text{S})$	0,86	8,84	50,29	-	-	-	34,06	-	2,12	96,17	$(\text{Te}_{0,81}\text{S}_{0,20})_{1,04}(\text{Ag}_{1,47}\text{Cu}_{0,44}\text{Fe}_{0,03})_{1,96}$
ПС-90-11	$(\text{Cu}_x\text{Ag}_y)_z\text{TeS}_2$	-	35,54	5,38	-	0,28	3,24	31,01	3,32	20,06	98,83	$(\text{Ag}_{0,16}\text{Cu}_{1,80}\text{Zn}_{0,01})_{1,97}(\text{Te}_{0,78}\text{As}_{0,14}\text{Sb}_{0,09})_{1,01}\text{S}_{2,02}$
Л-16	$(\text{Cu}_x\text{Ag}_y)_z\text{TeS}_2$		35,44	5,49		0,31	3,19	30,88	4,14	21,01	99,46	$(\text{Ag}_{0,17}\text{Cu}_{1,79}\text{Zn}_{0,06})_{1,98}(\text{Te}_{0,77}\text{As}_{0,14}\text{Sb}_{0,10})_{1,00}\text{S}_{2,08}$

Таблица 3-20

Химический состав (мас. %) и кристаллохимическая формула виттихенита

№ обр.	Формула	Cu	Se	Te	S	Bi	Сумма	Кристаллохимическая формула
ПС-5-64	$\text{Cu}_3\text{BiS}_3$	35,79	0,11	1,28	18,19	40,42	95,79	$\text{Cu}_{2,99}(\text{Bi}_{1,01}\text{Te}_{0,05})_{1,06}(\text{S}_{2,97}\text{Se}_{0,01})_{2,98}$
ПС-5-65	$\text{Cu}_3\text{BiS}_3$	34,78	0,08	1,83	17,95	39,84	94,48	$\text{Cu}_{2,92}(\text{Bi}_{1,02}\text{Te}_{0,08})_{1,10}(\text{S}_{2,98}\text{Se}_{0,01})_{2,99}$
Р-30-3	$\text{Cu}_3\text{BiS}_3$	35,81	0,09	1,56	18,02	40,98	96,46	$\text{Cu}_{2,96}(\text{Bi}_{1,05}\text{Te}_{0,07})_{1,10}(\text{S}_{2,99}\text{Se}_{0,01})_{2,99}$

### 3.2.5. Галогениды

**Хлораргирит (кераргирит)  $\text{AgCl}$**  один из редких минералов месторождения. Присутствует только в рудах вторичного обогащения. Его образование связано с гипергенным изменением таких серебросодержащих минералов как гессит, акантит и блеклые руды. Встречается в виде многочисленных выделений ажурной формы размером 0,03-0,25 мм. Содержит обильные мелкие включения самородного серебра, как результат вторичного преобразования.

### 3.2.6. Сульфосоли

На Прасоловском месторождении минералы группы сульфосолей представлены сульфовисмутитом меди (виттихенит) и сульфоарсенатом серебра (прустит), а также разнообразными по составу блеклыми рудами. При этом, если первые две разновидности встречаются крайне редко, то последние, в зависимости от типа руд, составляют от 30 до 40 % всех рудных минералов.

**Виттихенит  $\text{Cu}_3\text{BiS}_3$** . Встречается, в основном, в золото-теллуридно-кварцевых рудах. В шлифах имеет кремово-беловато-серый цвет и умеренную отражательную способность, близкую к таковой блеклой руды. Анизотропия выражена слабо.

Образует редкие мелкие (тысячные доли мм) выделения аллотриоморфной формы, в маломощных (0,5-1,0 см) кварцевых прожилках, сформировавшихся путем выполнения полостей трещин в измененных вмещающих породах вблизи их контакта с рудным телом. Кроме виттихенита в них также отмечаются отдельные зерна сфалерита, пирита, блеклых руд (иногда в сростании с халькопиритом). При этом данная блеклая руда характеризуется высоким содержанием  $\text{Bi}$  (до 12,6 мас. %). Результаты рентгеноспектрального анализа виттихенита приведены в таблице 3-20. Следует отметить, что минерал характеризуется повышенным содержанием теллура, который, вероятно, изоморфно замещает висмут, а также небольшим количеством селена, изоморфно замещающего серу. Несмотря на недостаток суммы, анализы этого минерала пересчитываются на теоретическую формулу виттихенита (табл. 3-20).

**Прустит  $\text{Ag}_3\text{AsS}_3$** , также как и виттихенит, присутствует только в золото-теллуридно-кварцевых рудах. Характеризуется белым цветом с сероватым оттенком, отчетливым двуотражением и сильными эффектами анизотропии. Внутренние рефлексы яркие – от кирпичных до красных. В рудах Прасоловского месторождения данная сульфосоли серебра образует редкую рассеянную вкрапленность в кварце в виде ксеноморфных выделений. Размер их редко превышает десятые доли мм. При микроскопическом изучении в зернах прустита наблюдаются реликты халькопирита, что указывает на замещение первым последнего. В свою очередь, прустит замещается науманитом, хлораргиритом и образует тесные сростания с гесситом.

Особенностью химического состава данного прустита являются высокие содержания селена, сурьмы и железа, при незначительном количестве меди

Таблица 3-21  
Химический состав (мас. %) и кристаллохимическая формула прустита

№ обр.	Fe	Cu	Se	As	Au	Te	Sb	S	Ag	Сумма	Кристаллохимическая формула
3634-8	4,84	1,13	5,87	13,02	-	-	-	17,99	55,09	97,93	$(Ag_{2,69}Fe_{0,41}Cu_{0,08}S_{1,18}As_{0,82}(S_{1,65}Se_{0,35})_{1,00})$
3634-9	4,87	1,22	7,49	12,74	-	-	-	15,78	54,64	96,74	$(Ag_{2,56}Fe_{0,44}Cu_{0,10}S_{1,14}As_{0,87}(S_{2,51}Se_{0,49})_{1,00})$
3634-10	4,57	1,85	2,60	11,89	0,16	0,02	-	18,50	57,01	96,60	$(Ag_{2,64}Fe_{0,36}Cu_{0,15}S_{1,15}As_{0,79}(S_{2,69}Se_{0,17})_{1,05})$
3634-11	4,50	2,33	2,49	13,93	-	-	0,16	18,71	58,12	100,35	$(Ag_{2,58}Fe_{0,39}Cu_{0,18}S_{1,15}(As_{0,89}Sb_{0,11})_{0,99}(S_{1,69}Se_{0,15})_{1,05})$
3634-12	5,40	2,72	3,81	10,04	0,13	-	4,99	16,69	46,28	90,07	$(Ag_{2,29}Sb_{0,22}S_{2,99}(S_{1,78}Se_{0,16})_{1,01})$

(табл. 3-21). Содержание селена, изоморфно замещающего серу, достаточно высокое и колеблется в интервале величин от 2,49 до 7,49 мас. %. Сурьма присутствует не во всех анализах и содержание ее в различных зернах прустита резко варьирует (0,26 и 4,99 мас. %). Следует отметить, что для прустита, в целом, не характерно высокое содержание сурьмы (обычно оно не превышает 1-1,5 мас. %). Однако, прустит из руд месторождения Чаньярсильо (Чили) характеризуется присутствием сурьмы в количестве 3,62 мас. % (Дэна и др., 1950).

Присутствие меди может быть объяснено изоморфным замещением ею атомов серебра, так как для сульфосолей характерен широкий изоморфизм в катионной части, в особенности между серебром и медью. Для прустита Прасоловского месторождения отмечается определенная зависимость между изоморфными замещениями в парах серебро-медь и сера-селен. Чем выше содержание мышьяка, тем меньше меди и селена в минерале.

**Блеклые руды** – изоморфный ряд минералов с общей формулой  $Me_{12}X_4S_{13}$ , где Me – металлы, а X – полуметаллы. На месторождении вторая по распространенности (после пирита) группа минералов, присутствующая, в переменных количествах, практически во всех минеральных типах руд, при относительном преобладании в золото-теллуридно-кварцевых рудах. Они образуют разнообразные по форме (от изометричных и овальных до удлинённых и ксеноморфных) выделения в кварце (рис. 3-22, 3-28, 3-35 и др. приложения 1), размер которых изменяется от тысячных долей до 1-2 мм. Нередко минеральные выделения блеклых руд формируют относительно крупные скопления, состоящие из многочисленных зе-

рен. При микроскопическом изучении отмечается, что блеклые руды образуют не только самостоятельные выделения, но также встречаются и в виде сростаний с другими минералами (Kemkina et al., 2001). Так, например, в золото-пирит (халькопирит)-кварцевом типе руд блеклые руды ассоциируют с самородным золотом, пиритом, сфалеритом и другими минералами. При этом в большинстве случаев они замещают отмеченные минералы, на что указывает характер их взаимоотношений, а также частое присутствие в блеклых рудах реликтов пирита, сфалерита, галенита и др.

Для золото-полисульфидно-кварцевых руд наиболее характерны мирмецитовые сростания блеклых руд с халькопиритом (рис. 3-36 приложения 1). Реже отмечается ассоциация блеклых руд с золотом, которое присутствует в них в виде немногочисленных овальных включений (рис. 3-5 приложения 1). В отдельных аншлифах наблюдается, что подобная золото-блеклорудная ассоциация развивается по зернам молибденита, корродируя их (рис. 3-9 приложения 1). Кроме того, отмечается замещение блеклыми рудами борнита и сфалерита.

В золото-теллуридно-кварцевых рудах минеральные ассоциации с участием блеклых руд гораздо многообразнее и представлены они сростаниями блеклых руд с самородным золотом, теллуrom, селенсодержащим теллуридом висмута, сильванитом, клаусталитом, акантитом, гесситом, петцитом и некоторыми другими минералами. С одними из них они образуют тесные парагенезисы, т.е. кристаллизация их происходила близодновременно. Другие минералы, такие как гессит (рис. 3-37 приложения 1), петцит (рис. 3-38 приложения 1), клаусталит и другие имеют коррозионный характер границ с блеклыми рудами или развиваются по ним, что указывает на их разновременное выделение (более позднее по отношению к блеклым рудам).

В рудах вторичного обогащения блеклые руды замещаются ковеллином (рис. 3-39 приложения 1), халькозином и борнитом (рис. 3-40 приложения 1). Крупные выделения интенсивно корродированны, замещены и разъедены с образованием кавернозной структуры. Иногда это замещение настолько сильно, что от блеклых руд остаются лишь петли и каркасы. С другой стороны, отмечается также и замещение блеклыми рудами гессит-петцитовых сростков.

Анализ взаимоотношений блеклых руд с другими рудными минералами позволяет заключить, что кристаллизация их осуществлялась многостадийно, возможно, с каждой порцией рудоносных растворов. Но, установить конкретное число генераций затруднительно, поскольку в шлифах блеклые руды характеризуются близкими оптическими и физическими свойствами. В отраженном свете они имеют светло-серую окраску со слабо зеленоватым или коричневатым оттенком, среднюю отражательную способность. Изотропны. Однако, учитывая, что блеклые руды встречаются во всех минеральных типах, где ассоциируют с определенными парагенезисами, можно выделить, как минимум, четыре их генерации.

В тех случаях, когда блеклые руды не образуют сростки с другими минералами (или не содержат включения последних), а представляют собой мономинеральные выделения в кварцевых прожилках, отличить более ранние их

фазы от относительно поздних можно лишь основываясь на данных химического состава, поскольку, вероятно, одновременные рудоносные растворы продуцировали блеклые руды с разным соотношением химических элементов. Забегая вперед, можно отметить, что в рудах месторождения выделяется несколько минеральных видов (теннантит, тетраэдрит и голдфилдит, т.е. As, Sb и Te-содержащие фазы), а также между- и внутривидовых разновидностей блеклых руд, каждая из которых характерна для определенных минеральных типов (Кемкина, 1998<sub>а</sub>, 1998<sub>в</sub>).

Очевидно, что для выяснения особенностей состава блеклых руд и уточнения количества генераций, а также приуроченности определенных их разновидностей к конкретным минеральным типам руд необходимо проведение детального химического изучения этой группы минералов. Результаты таких исследований представлены в следующей главе.

\*\*\*

Таким образом, в результате изучения вещественного и минерального состава руд Прасоловского месторождения установлено, что они характеризуются большим разнообразием рудных минералов. Последние представлены, главным образом, самородными элементами и интерметаллидами, сульфидами, теллуридами, селенидами, сульфосолями, галогенидами, гидроксидами. Наиболее распространенными среди них являются самородное золото, пирит, блеклые руды, халькопирит, борнит, сфалерит, галенит, клаусталит, гессит, петцит, сильванит, ковеллин. Для многих из этих минералов выделено несколько генераций, что свидетельствует о многостадийности процесса рудообразования. Часть минералов, такие как идаит, рокезит, клокманит, мутманнит и виттихенит впервые описаны на данном месторождении. Кроме общеизвестных минералов в рудах Прасоловского месторождения выделены новые минеральные фазы, не описанные еще в литературе –  $Cu_3S_2$ ,  $(CuZn)S$ ,  $CuZn_2S_4$ ,  $AgS$ ,  $AuAgTe$ ,  $(Ag,Cu)(Pb,Bi)(Te,As,Sb)(Se,S)_{4,0}$ ,  $(Ag,Cu,Pb,Bi)_5Te_2(Se,S)_6$ ,  $Au(Ag,Cu)_4(Te,S)_2$ ,  $(Ag,Cu)_2(Te,S)$ ,  $(Cu,Ag)_2TeS_2$ .

Основываясь на приведенных выше данных вещественно-минералогического изучения руд Прасоловского месторождения нетрудно определить круг входящих в них токсичных элементов. Он включает Cu, Pb, Cd, Zn, Fe, Mo, Sb, As, Te, Bi, Se, In, которые относятся к 1 и 2 классам опасности. Кроме того, по результатам выполненных рентгеноспектральных анализов выяснены особенности химических составов рудных минералов, на основе чего рассчитаны их кристаллохимические формулы и определены формы вхождения вышеуказанных экологически опасных элементов в кристаллические структуры – собственная минеральная или изоморфная (табл. 3-22), а также вариации содержания этих элементов как в отдельных минералах, так и в различных минеральных классах (табл. 3-23) руд Прасоловского месторождения.

В частности, собственными (или минералообразующими) формами вхождения токсичных элементов являются: для Se – клаусталит, клокманит, науманит; для Te – самородный теллур, гессит, петцит, сильванит, теллурид золота и

Таблица 3-22

## Формы вхождения экологически опасных элементов в рудные минералы месторождения

Элементы	Форма	
	Собственная минеральная	Изоморфная и микропримесная
As	Теннантит, прустит	Самородные золото и теллур, халькопирит, халькозин, ковеллин, сфалерит, акантит, ряд галенит-клаусталит, теллуру-селениды свинца и висмута, гессит, блеклые руды, фазы: $(Cu,Ag)_2TeS_2$ , $Cu_3S_2$
Pb	Галенит, клаусталит, теллуру-селениды, алтаит	Ковеллин, акантит, клокманит, блеклые руды
Cd	-	Сфалерит
Bi	Селенсодержащий теллурид висмута, виттихенит	Акантит, клаусталит, блеклые руды
Te	Самородный теллур, гессит, петцит, сильванит, шлотцит, халаверит, креннерит, мутманнит, курилит, алтаит, селенистый теллур, селеносодержащий теллурид висмута	Самородное золото, электрум, ковеллин, сфалерит, акантит, ряд галенит-клаусталит, клокманит, науманит, виттихенит, прустит, блеклые руды, фазы: $Cu_3S_2$ , $(Cu,Zn)S$
In	Рокезит	-
Cu	Халькопирит, борнит, идаит, халькозин, ковеллин, рокезит, клокманит, виттихенит, фазы: $Cu_3S_2$ , $(Cu,Zn)S$ , $CuZn_2S_4$	Самородные золото и теллур, пирит, сфалерит, ряд галенит-клаусталит, теллуру-селениды свинца и висмута, гессит, сильванит, селенсодержащий теллурид висмута, прустит, $Au(Ag,Cu)_4(Te,S)_2$ , $(AgCu)_2(Te,S)$
Fe	Пирит, марказит, халькопирит, борнит, идаит	Самородные золото и теллур, ковеллин, сфалерит, акантит, рокезит, ряд галенит-клаусталит, теллуру-селениды свинца и висмута, гессит, курилит, прустит, блеклые руды, $(AgCu)_2(Te,S)$ , фаза $Cu_3S_2$ , фаза $(Cu,Zn)S$
Se	Клаусталит, науманит, клокманит, теллуру-селениды, селенистый теллур	Самородное золото, халькопирит, халькозин, ковеллин, сфалерит, акантит, рокезит, галенит, гессит, петцит, сильванит, курилит, виттихенит, селенсодержащий теллурид висмута, прустит, блеклые руды, фаза $Cu_3S_2$
Sb	Тетраэдрит	Самородный теллур, халькопирит, халькозин, ковеллин, фаза $Cu_3S_2$ , сфалерит, акантит, рокезит, ряд галенит-клаусталит, теллуру-селениды свинца и висмута, гессит, прустит, блеклые руды, $(Cu,Ag)_2TeS_2$
Zn	Сфалерит, фазы $(Cu,Zn)S$ , $CuZn_2S_4$	Самородный теллур, халькопирит, ковеллин, акантит, рокезит, ряд галенит-клаусталит, теллуру-селениды свинца и висмута, гессит, селенсодержащий теллурид висмута, блеклые руды, фаза $(Cu,Ag)_2TeS_2$
Mo	Молибденит	-

**Пределы колебания содержаний (в мас. %) экологически опасных элементов в разных классах минералов руд Прасоловского месторождения**

Элементы	Классы минералов				
	Самородные	Сульфиды	Селениды	Теллуриды	Сульфосоли
<b>As</b>	0,18-0,82 (2)	0,13-2,15 (7)	0,37-3,58 (17)	0,31-3,24 (3)	1,17-18,00 (66)
<b>Pb</b>	-	0,09-84,43 (11)	2,88-79,95 (23)	-	0,12-2,53 (4)
<b>In</b>	-	48,24 (1)	-	-	-
<b>Cd</b>	-	0,01-0,42 (8)	-	-	-
<b>Te</b>	0,01-99,85 (7)	0,01-2,84 (9)	0,08-28,44 (17)	0,07-62,59 (50)	0,06-25,91 (60)
<b>Cu</b>	0,06-4,78 (5)	0,01-77,45 (31)	0,46-35,67 (12)	0,10-8,84 (6)	1,13-47,42 (68)
<b>Fe</b>	0,05-0,22 (2)	0,07-46,48 (18)	0,20-0,33 (3)	0,05-0,86 (4)	0,05-6,70 (48)
<b>Se</b>	0,19-1,16 (2)	0,01-5,58 (18)	19,85-50,04 (22)	0,20-7,47 (11)	0,12-7,49 (39)
<b>Sb</b>	1,29 (1)	0,01-2,26 (8)	0,41-1,78 (5)	3,32 (1)	0,26-25,32 (62)
<b>Bi</b>	-	0,18 (1)	0,02-18,40 (11)	52,83 (1)	0,13-40,42 (8)
<b>Zn</b>	0,23 (1)	0,01-64,77 (16)	0,12-0,67 (8)	0,28 (1)	0,04-7,68 (57)

**Примечание:** « - » – элемент не обнаружен; в скобках – количество проб.

серебра, шпюцит, калаверит, креннерит, мутманнит, курилит, алтаит, селенистый теллур и некоторые вновь выделенные минеральные фазы; для Cu – халькопирит, борнит, рокезит, идаит, халькозин, ковеллин, флокманит, блеклые руды; для As и Sb – блеклые руды и прустит; для Bi – виттихенит, селеносодержащий теллурид висмута; для Pb – галенит, клаусталит, алтаит; для Zn – сфалерит.

Изоморфными формами токсичных элементов являются: для Se и Cu – самородные металлы, сульфосоли, теллуриды, сульфиды; для Te – селениды, самородные металлы, сульфосоли; для As и Sb – самородные металлы, сульфиды, селениды, теллуриды; для Bi и Pb – сульфосоли, селениды; для Zn – самородные металлы, сульфосоли; для Cd – сульфиды.

#### ГЛАВА 4. ОСОБЕННОСТИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА БЛЕКЛЫХ РУД ПРАСОЛОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ИХ ОБРАЗОВАНИЯ

Блеклые руды – группа минералов сложного химического состава, относящаяся к классу сульфоселей. Они, с одной стороны, являются носителем ряда ценных в промышленном отношении химических элементов (при соответствующих содержаниях этих минералов в рудах) и, в то же время, экологически опасных токсичных металлов, таких, как теллур, селен, мышьяк, сурьма, висмут, цинк, свинец, медь, железо (см. Гл. 3). В этой связи весьма актуальным является выяснение количественных и структурных особенностей вхождения этих элементов в состав блеклых руд на примере проведения кристаллохимического анализа.

Для выяснения отличий химического состава блеклых руд в разных минеральных типах Прасоловского месторождения было изучено более 60 зерен из различных минеральных ассоциаций. Аналитические работы проводились на электронных микроанализаторах “Самебах” (ИВиС ДВО РАН, аналитик Чубаров В.М.) и “JXA-5A” (ДВГИ ДВО РАН, аналитики Сапин В.И. и Екимова Н.И.) по стандартным методикам. Условия съемок приведены в таблице 3-2.

Блеклые руды представляют собой сложные соединения переменного состава с широким изоморфизмом как в катионной, так и в анионной частях и с различной координацией и структурным положением двух- и трехвалентных катионов (Годовиков, Иляшева, 1972; Андреевко и др., 1974; Гамянин, Бортников, 1989 и др.). В связи с этим, многие исследователи по-разному представляют их кристаллохимическую формулу. Одна из первых, предложенная К. Хинцем (Hintze, 1904) и структурно обоснованная Н.В. Беловым (Белов, 1947; 1952; 1965), К. Леви (Levy, 1967), Н.В. Беловым и Е.Ф. Победимской (1968), записывалась как  $Cu_3(Sb,As)S_3$ . Позднее была предложена формула  $R^{+}_{10}R^{++}_2X_4S_{13}$  (Werry, Foshag, 1920), подтвержденная в дальнейшем рентгеноструктурными исследованиями (Pauling, Neuman, 1934; Wuensch, 1963; 1964) и которая наиболее широко применяется в настоящее время. Символом R в данной формуле обозначаются металлы, X – полуметаллы, S – сера. При этом основными катионами одновалентных металлов являются  $Cu^+$ , реже Ag, а двухвалентных металлов – Zn, Fe,  $Cu^{++}$ , Pb, Hg и некоторые другие. Полуметаллы представлены, главным образом, As, Sb, Te, иногда Bi.

Согласно существующим классификациям (Сахарова, 1966<sub>б</sub>; Мозгова, Цепин, 1983; Спиридонов, 1984, 1985 и др.), по соотношению основных элементов-полуметаллов (т.е. явному преобладанию какого-либо из перечисленных элементов), среди блеклых руд выделяются четыре минеральных вида, а именно – сурьмянистые (тетраэдрит), мышьяковистые (теннантит), теллуристые (голдфилдит) и висмутистые (аннивит). При примерно равных количествах или при незначительном преобладании какого-либо элемента, принято говорить о междувидовых разновидностях (например, теннантит-голдфилдит или мышьяковистый голдфилдит, тетраэдрит-теннантит или сурьмянистый теннантит и т. д.).

Кроме того, по соотношению двухвалентных катионов (если их количество более 1 атома в формуле) выделяются и внутривидовые разновидности блеклых руд, например Zn-теннантит, либо Fe-тетраэдрит и т.д.

#### 4.1. Вариации химического состава блеклых руд и их минеральные виды

На Прасоловском месторождении блеклые руды являются вторыми по распространенности среди рудных минералов и наиболее распространенной группой минералов из числа сульфосолей. Как отмечалось ранее (см. Главу 3), они присутствуют во всех минеральных типах руд, но преобладают в золото-теллуридно-кварцевых. Блеклые руды месторождения характеризуются сложным химическим составом со значительными вариациями содержания слагающих их компонентов (см. табл. 4-1). Результаты рентгеноспектральных анализов блеклых руд, в пересчете на кристаллохимические формулы (табл. 4-2), показывают, что они представлены тремя (исключая аннивит) минеральными видами и несколькими междувидами разновидностями, т.е. блеклыми рудами смешанного состава (рис. 4-1), а также целым рядом внутривидовых разновидностей (Кемкина, 1998<sub>а</sub>, 1998<sub>б</sub>).

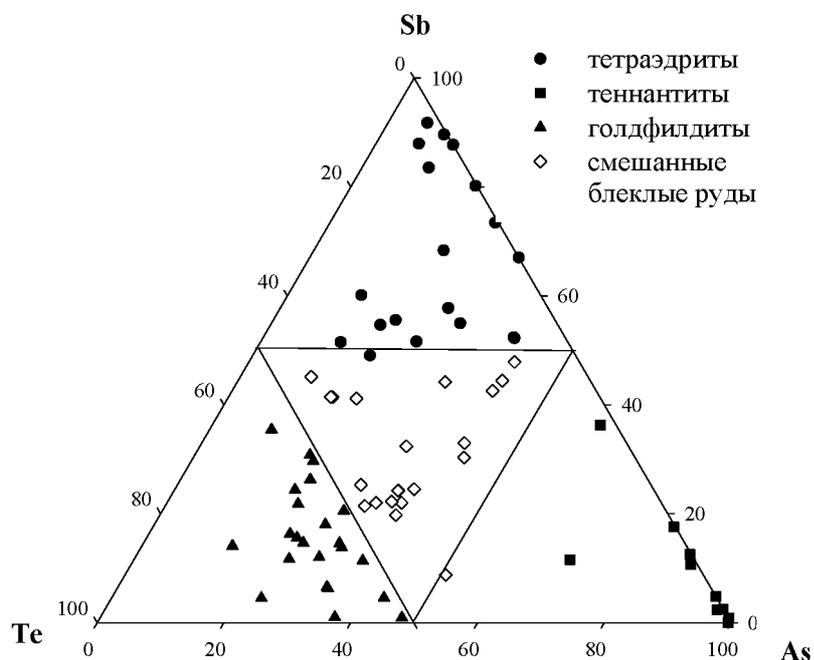


Рис. 4-1. Диаграмма Sb-As-Te, иллюстрирующая состав блеклых руд

Расчет кристаллохимических формул осуществлялся на 29 формульных единиц, согласно распространенной методике (Некрасова, Сандомирская, 1979; Мозгова, Цепин, 1983; Спиридонов, 1984, 1985 и др.).

Таблица 4-1

Химический состав (мас. %) блеклых руд Прасоловского месторождения по результатам рентгеноспектральных анализов

№ п/п	№ обр.	Fe	Cu	Zn	Se	As	Au	Te	Sb	S	Pb	Bi	Ag	Сумма
<b>Первая генерация</b>														
1	ПС-90-12	2,82	41,73	4,21	-	18,58	-	0,17	-	29,60	-	-	-	97,11
2	ПС-90-16	2,34	44,87	2,27	-	17,16	-	-	1,42	29,19	-	-	-	97,25
3	ПС-90-16	2,01	43,67	3,39	-	17,32	-	0,32	0,67	29,84	-	-	-	97,22
4	ПС-90-32	6,70	41,60	0,52	-	12,94	-	-	0,24	28,49	-	-	-	96,49
5	ПС-90-32	3,04	39,63	6,63	-	10,24	-	0,70	9,83	27,19	-	-	-	97,26
6	Л-8	3,08	45,21	4,42	0,29	15,78	-	0,11	5,48	27,25	-	-	-	101,62
7	ПС-90-12	0,42	40,88	6,88	-	15,91	-	0,30	3,17	28,65	-	-	0,99	97,20
8	ПС-90-57	-	37,95	4,50	0,80	14,60	-	7,17	3,97	27,36	0,25	-	2,06	98,66
9	ПС-90-57	-	43,57	3,75	0,91	17,24	-	0,06	4,05	28,44	0,12	-	1,10	99,24
10	Л-1-2	3,50	33,50	0,13	0,40	18,00	-	-	0,74	25,76	-	-	16,76	98,79
11	ПС-2	0,07	39,51	6,05	4,40	7,53	-	5,09	12,79	26,56	-	0,13	-	102,13
12	Р-71-3	-	47,28	2,86	0,87	6,18	-	2,18	13,35	25,11	-	0,87	-	98,70
<b>Вторая генерация</b>														
13	ПС-2	-	43,17	3,17	-	2,88	-	8,05	14,88	25,31	-	-	-	97,46
14	П-90-49	-	41,80	5,60	-	3,50	-	3,32	19,05	25,67	-	-	-	98,94
15	П-90-49	0,17	40,27	7,12	-	4,50	-	0,14	20,82	26,38	-	-	-	99,4
16	ПС-90-57	0,22	40,03	4,31	-	1,78	-	1,70	22,88	25,81	-	-	-	96,73
17	Л-1-1	0,19	41,07	5,94	0,11	8,28	-	3,41	15,4	25,60	-	-	-	100
18	Р-11-2	0,33	37,63	7,68	0,28	3,69	-	0,11	24,82	25,66	-	-	-	100,20
19	Р-11-2	0,41	38,34	7,24	0,33	4,34	-	0,10	23,87	25,49	-	-	-	100,12
20	ПС-90-26	0,45	38,37	7,53	0,42	5,73	-	-	19,12	26,77	-	-	-	98,39

Продолжение таблицы 4-1

№ п/п	№ обр.	Fe	Cu	Zn	Se	As	Au	Te	Sb	S	Pb	Bi	Ag	Сумма
21	ПС-90-43	-	41,12	6,38	4,02	1,70	-	-	19,78	25,91	-	-	-	98,91
22	Р-71-13	0,70	42,21	1,16	2,87	5,02	-	4,38	16,08	25,55	-	-	-	97,97
23	ПС-90-12	0,06	39,15	6,35	-	1,17	-	1,62	25,32	25,30	-	-	0,61	99,58
24	П-90-49	0,16	38,92	6,74	-	1,88	-	0,19	27,41	25,33	-	-	0,16	100,79
25	ПС-90-57	0,18	40,73	4,05	-	4,45	-	4,52	15,90	26,04	-	-	1,44	97,31
26	Л-1-2	0,13	40,97	4,29	0,16	6,82	-	8,21	14,97	25,02	-	-	2,52	103,09
27	Л-1-2	2,68	41,84	0,92	0,45	4,52	-	7,50	15,51	25,28	-	-	0,90	99,60
28	ПС-90-16	0,35	42,29	2,61	-	1,70	-	7,17	14,55	24,65	-	-	4,04	97,36
29	ПС-90-16	0,77	37,84	4,67	-	0,79	-	0,46	18,92	24,18	-	-	8,45	96,08
<b>Третья генерация</b>														
30	ПС-2	-	44,73	1,53	-	2,07	-	10,88	13,75	25,56	-	-	-	98,52
31	ПС-2	0,05	40,73	3,29	0,88	6,48	-	12,01	10,52	24,76	-	0,16	0,11	98,99
32	ПС-2	0,12	43,21	1,65	1,67	5,64	-	14,52	6,27	25,60	-	0,76	2,02	101,46
33	ПС-5	0,97	37,04	2,38	-	1,24	-	8,29	8,17	24,51	2,53	12,16	-	97,29
34	Р-71-13	0,21	47,31	0,53	0,97	3,29	-	15,10	8,33	24,75	-	-	-	100,49
35	ПС-90-57	0,06	34,43	2,35	-	2,80	-	6,33	13,19	25,46	-	-	15,03	99,65
36	ПС-90-57	0,06	38,02	2,20	-	3,01	-	9,18	13,10	23,73	-	-	9,59	98,89
37	Л-1-2	0,43	35,02	0,22	0,93	2,94	-	12,92	12,11	23,42	-	-	12,36	100,35
<b>Четвертая генерация</b>														
38	ПС-4	-	47,42	-	-	5,35	-	16,08	4,06	25,81	-	-	-	98,72
39	ПС-5	-	46,32	-	-	5,67	-	17,91	1,85	26,21	-	-	-	97,96
40	ПС-5	0,17	45,58	-	-	5,60	-	17,49	1,73	26,12	-	-	-	96,69
41	ПС-90-26	-	46,80	-	-	4,02	-	18,03	3,19	24,97	-	-	-	97,01
42	ПС-2	-	46,69	0,14	-	6,00	-	11,90	3,02	25,53	-	-	-	97,28

Окончание таблицы 4-1

№ п/п	№ обр.	Fe	Cu	Zn	Se	As	Au	Te	Sb	S	Pb	Bi	Ag	Сумма
43	ПС-90-11	-	47,21	0,56	-	4,85	-	14,66	5,67	25,94	-	-	-	98,89
44	ПС-2	0,08	39,55	0,55	4,17	3,64	-	18,77	7,75	25,39	-	0,54	-	100,44
45	ПС-90-49	-	45,94	0,15	0,43	1,63	-	15,66	9,71	24,74	-	-	-	98,26
46	P-78-2	0,08	45,86	0,67	0,91	5,9	-	17,45	4,21	25,09	-	-	-	100,17
47	P-78-2	0,05	44,22	0,54	1,41	5,51	-	19,14	3,72	23,49	-	-	-	98,08
48	P-71-13	0,16	43,61	0,43	2,71	7,56	-	15,03	6,54	23,84	-	-	-	99,88
49	ПС-2	-	45,15	-	-	4,10	-	16,80	3,82	25,49	-	-	1,53	96,89
50	ПС-2	-	45,68	0,21	0,53	4,03	-	17,73	4,29	24,88	-	-	1,47	98,82
51	ПС-4	-	44,24	-	0,25	1,65	0,17	19,56	7,81	23,42	-	-	-	97,10
52	ПС-4	-	39,34	0,04	-	5,01	2,77	25,91	1,57	23,98	-	-	1,56	100,18
53	ПС-90-26	0,12	40,38	0,90	0,74	3,65	-	17,38	4,35	25,77	-	-	4,62	97,91
54	P-78-2	1,14	39,82	0,29	1,95	2,37	-	20,47	3,78	24,38	-	-	4,4	98,60
55	Л-1-2	-	45,47	0,29	0,12	3,57	-	17,25	9,93	24,13	-	-	0,21	100,79
56	Л-1-2	0,18	44,03	-	1,07	4,05	-	18,06	8,49	23,01	-	-	2,8	101,69
57	Л-1-2	0,31	40,72	-	1,24	9,03	-	18,82	1,55	23,20	-	-	4,81	99,68
58	Л-1-2	0,19	45,88	0,07	0,20	6,97	-	15,92	0,98	25,79	-	-	1,43	97,43
59	ПС-90-26	0,37	45,41	1,37	1,18	4,64	-	12,57	6,57	24,84	-	-	1,90	98,85
60	Л-9	1,67	40,77	1,89	1,83	6,98	-	7,33	9,05	24,56	-	-	5,83	99,91
61	Л-1-2	0,07	44,45	3,18	1,29	6,27	-	12,20	7,04	26,50	-	-	0,05	101,05

**Примечание:** Условия съемки: рабочее напряжение 25 кВ, ток поглощенных электронов на образце 36 А, размер электронного зонда 1-2 мкм, время экспозиции 10 сек. Аналитики: Чубаров В.М., Сапин В.И., Екимова Н.И.

“ - “ - элемент не обнаружен.

Таблица 4-2

## Кристаллохимические формулы блеклых руд Прасоловского месторождения

№ п/п	№ обр.	Кристаллохимические формулы	Минеральные виды и разновидности
<b>Первая генерация</b>			
1	ПС-90-12	$[Cu^{+}_{9,80}(Zn_{0,96}Fe_{0,75})_{1,71}]_{11,51}(As_{9,70}Te_{0,02})_{9,72}S_{13,77}$	теннантит
2	ПС-90-16	$[Cu^{+}_{10,00}(Cu^{+}_{0,19}Zn_{0,32}Fe_{0,63})_{1,74}]_{11,74}(Sb_{0,17}As_{3,49}Te_{0,04})_{3,69}S_{13,65}$	теннантит
3	ПС-90-16	$[(Cu^{+}_{10,00}(Cu^{+}_{0,25}Zn_{0,77}Fe_{0,54})_{1,56})_{11,56}(Sb_{0,08}As_{3,45}Te_{0,04})_{3,57}S_{13,88}]$	теннантит
4	ПС-90-32	$[Cu^{+}_{10,00}(Cu^{+}_{0,29}Zn_{0,12}Fe_{1,88})_{2,29}]_{12,29}(Sb_{0,03}As_{2,71}Te_{0,04})_{3,74}S_{13,96}$	Fe-теннантит
5	ПС-90-32	$[Cu^{+}_{9,77}(Zn_{1,59}Fe_{0,83})_{2,44}]_{12,21}(Sb_{1,27}As_{2,14}Te_{0,09})_{3,50}S_{13,29}$	Zn-теннантит
6	Л-8	$[Cu^{+}_{10,00}(Cu^{+}_{0,61}Zn_{1,01}Fe_{0,82})_{2,44}]_{12,44}(Sb_{0,67}As_{3,14}Te_{0,01})_{3,82}(S_{13,68}Se_{0,05})_{12,73}$	селенсодержащий Zn-теннантит
7	ПС-90-12	$[(Cu^{+}_{9,82}Ag_{0,14})_{9,96}(Zn_{1,61}Fe_{0,11})_{1,72}]_{11,68}(Sb_{0,40}As_{3,24}Te_{0,04})_{3,68}S_{13,64}$	серебросодержащий Zn-теннантит
8	ПС-90-57	$[(Cu^{+}_{9,45}Ag_{0,30})_{9,75}(Zn_{1,09}Pb_{0,02})_{1,11}]_{10,86}(Sb_{0,52}As_{3,08}Te_{0,89})_{4,49}(S_{13,50}Se_{0,16})_{13,66}$	(Ag, Se)-содержащий Zn-теннантит
9	ПС-90-57	$[(Cu^{+}_{9,85}Ag_{0,15})_{10,00}(Cu^{+}_{0,33}Zn_{0,87}Pb_{0,01})_{1,41}]_{11,41}(Sb_{0,19}As_{3,48}Te_{0,01})_{3,69}(S_{13,42}Se_{0,17})_{13,49}$	(Ag, Se)-содержащий теннантит
10	Л-1-2	$[(Cu^{+}_{7,50}Ag_{2,50})_{10,00}(Cu^{+}_{0,98}Zn_{0,03}Fe_{1,01})_{2,02}]_{12,02}(Sb_{0,10}As_{3,87})_{3,97}(S_{12,93}Se_{0,08})_{13,01}$	селенсодержащий Ag-Fe-теннантит
11	ПС-2	$[Cu^{+}_{9,77}(Zn_{1,45}Fe_{0,02})_{1,47}]_{11,24}(Sb_{1,65}As_{1,58}Te_{0,63}Bi_{0,01})_{3,87}(S_{13,02}Se_{0,88})_{13,90}$	селенсодержащий Zn-теннантит-тетраэдрит
12	Р-71-3	$[Cu^{+}_{10,00}(Cu^{+}_{2,02}Zn_{0,71})_{2,73}]_{12,73}(Sb_{1,77}As_{1,33}Te_{0,28}Bi_{0,07})_{3,45}(S_{12,65}Se_{0,18})_{12,83}$	селенсодержащий теннантит-тетраэдрит
<b>Вторая генерация</b>			
13	ПС-2	$[Cu^{+}_{10,00}(Cu^{+}_{1,23}Zn_{0,81})_{2,13}]_{12,12}(Sb_{2,04}As_{0,64}Te_{1,05})_{3,73}S_{13,14}$	тетраэдрит
14	ПС-90-49	$[Cu^{+}_{10,00}(Cu^{+}_{0,76}Zn_{1,40})_{2,16}]_{12,16}(Sb_{2,56}As_{0,76}Te_{0,43})_{3,75}S_{13,09}$	Zn - тетраэдрит
15	ПС-90-49	$[Cu^{+}_{10,00}(Cu^{+}_{0,21}Zn_{1,75}Fe_{0,05})_{2,01}]_{12,01}(Sb_{2,75}As_{0,97}Te_{0,02})_{3,74}S_{13,24}$	Zn - тетраэдрит
16	ПС-90-57	$[Cu^{+}_{10,00}(Cu^{+}_{0,56}Zn_{1,11}Fe_{0,07})_{1,74}]_{11,73}(Sb_{3,15}As_{0,40}Te_{0,22})_{3,77}S_{13,50}$	Zn - тетраэдрит
17	Л-1-1	$[Cu^{+}_{10,00}(Cu^{+}_{0,39}Zn_{1,46}Fe_{0,05})_{1,90}]_{11,90}(Sb_{2,03}As_{1,78}Te_{0,43})_{4,24}(S_{13,12}Se_{0,60})_{12,85}$	селенсодержащий Zn - тетраэдрит
18	Р-11-2	$[Cu^{+}_{9,68}(Zn_{1,92}Fe_{0,10})_{2,02}]_{11,70}(Sb_{3,33}As_{0,81}Te_{0,01})_{4,15}(S_{13,09}Se_{0,06})_{13,15}$	селенсодержащий Zn - тетраэдрит
19	Р-11-2	$[Cu^{+}_{9,82}(Zn_{1,81}Fe_{0,12})_{1,93}]_{11,75}(Sb_{3,20}As_{0,95}Te_{0,01})_{4,16}(S_{12,99}Se_{0,07})_{13,05}$	селенсодержащий Zn - тетраэдрит
20	ПС-90-26	$[Cu^{+}_{9,79}(Zn_{1,82}Fe_{0,13})_{1,95}]_{11,74}(Sb_{3,53}As_{1,23})_{3,76}(S_{13,45}Se_{0,09})_{13,54}$	селенсодержащий Zn - тетраэдрит
21	ПС-90-43	$[Cu^{+}_{10,00}(Cu^{+}_{0,49}Zn_{1,38})_{2,07}]_{12,07}(Sb_{2,63}As_{0,37})_{3,00}(S_{13,10}Se_{0,83})_{13,93}$	селенсодержащий Zn - тетраэдрит
22	Р-71-13	$[Cu^{+}_{10,00}(Cu^{+}_{0,94}Zn_{0,29}Fe_{0,21})_{1,44}]_{11,44}(Sb_{2,17}As_{1,10}Te_{0,51})_{3,84}(S_{13,32}Se_{0,60})_{13,72}$	селенсодержащий тетраэдрит
23	ПС-90-12	$[(Cu^{+}_{9,91}Ag_{0,09})_{10,00}(Cu^{+}_{0,33}Zn_{1,61}Fe_{0,02})_{1,96}]_{11,96}(Sb_{1,46}As_{0,26}Te_{0,21})_{3,93}S_{13,11}$	серебросодержащий Zn - тетраэдрит
24	ПС-90-49	$[(Cu^{+}_{9,98}Ag_{0,02})_{10,00}(Cu^{+}_{0,10}Zn_{1,70}Fe_{0,05})_{1,85}]_{11,85}(Sb_{3,71}As_{0,41}Te_{0,02})_{4,14}S_{13,00}$	серебросодержащий Zn - тетраэдрит
25	ПС-90-57	$[(Cu^{+}_{9,78}Ag_{0,22})_{10,00}(Cu^{+}_{0,80}Zn_{1,02}Fe_{0,05})_{1,87}]_{11,87}(Sb_{2,16}As_{0,98}Te_{1,58})_{3,72}S_{13,40}$	серебросодержащий Zn - тетраэдрит
26	Л-1-2	$[(Cu^{+}_{9,62}Ag_{0,38})_{10,00}(Cu^{+}_{0,79}Zn_{1,06}Fe_{0,04})_{1,85}]_{11,85}(Sb_{3,98}As_{1,47}Te_{1,04})_{4,49}(S_{12,59}Se_{0,03})_{12,62}$	(Ag, Se)-содержащий Zn - тетраэдрит
27	Л-1-2	$[(Cu^{+}_{9,86}Ag_{0,14})_{10,00}(Cu^{+}_{0,53}Zn_{0,23}Fe_{0,79})_{1,55}]_{11,95}(Sb_{2,06}As_{0,99}Te_{0,96})_{4,04}(S_{12,92}Se_{0,09})_{13,01}$	(Ag, Se)-содержащий тетраэдрит
28	ПС-90-16	$[(Cu^{+}_{9,37}Ag_{0,63})_{10,00}(Cu^{+}_{1,87}Zn_{0,67}Fe_{0,11})_{2,65}]_{12,65}(Sb_{2,02}As_{0,38}Te_{0,95})_{3,35}S_{12,90}$	серебросодержащий тетраэдрит
29	ПС-90-16	$[(Cu^{+}_{9,65}Ag_{1,35})_{10,00}(Cu^{+}_{1,61}Zn_{1,23}Fe_{0,24})_{3,08}]_{13,08}(Sb_{2,69}As_{0,18}Te_{0,06})_{2,92}S_{13,00}$	Ag-Zn - тетраэдрит
30	ПС-2	$[Cu^{+}_{10,00}(Cu^{+}_{1,66}Zn_{0,39})_{2,05}]_{12,05}(Sb_{1,87}As_{0,46}Te_{1,41})_{3,74}S_{13,21}$	голдфиллит-тетраэдрит

№ п/п	№ обр.	Кристаллохимические формулы	Минеральные виды и разновидности
<b>Третья генерация</b>			
31	ПС-2	$[(Cu^{+}_{9,98}Ag_{0,02})_{10,00}(Cu^{+2}_{0,68}Zn_{0,84}Fe_{0,01})_{11,52}(Sb_{1,44}As_{1,44}Te_{1,52}Bi_{0,01})_{4,45}(S_{12,82}Se_{0,15})_{13,03}]$	(Ag, Se)-содержащий голдфиллит-тетраздрит
32	ПС-2	$[(Cu^{+}_{9,70}Ag_{0,30})_{10,00}(Cu^{+2}_{1,32}Zn_{0,41}Fe_{0,03})_{11,76}(Sb_{0,82}As_{1,22}Te_{1,84}Bi_{0,06})_{3,95}(S_{12,94}Se_{0,14})_{13,28}]$	(Ag, Se)-содержащий голдфиллит-тетраздрит
33	ПС-5	$[Cu^{+}_{10,00}(Cu^{+2}_{0,43}Zn_{0,65}Fe_{0,31}Pb_{0,02})_{11,61}(Sb_{1,20}As_{0,16}Te_{1,16}Bi_{1,04})_{3,70}S_{13,68}]$	висмутсодержащий голдфиллит-тетраздрит
34	Р-71-13	$[Cu^{+}_{10,00}(Cu^{+2}_{2,19}Zn_{0,13}Fe_{0,06})_{2,38}(Sb_{1,12}As_{0,72}Te_{1,94})_{3,78}(S_{12,64}Se_{0,20})_{12,84}]$	селенсодержащий голдфиллит-тетраздрит
35	ПС-90-57	$[(Cu^{+}_{7,83}Ag_{2,17})_{10,00}(Cu^{+2}_{1,47}Zn_{0,61}Fe_{0,02})_{2,20}(Sb_{1,84}As_{0,63}Te_{0,84})_{3,31}S_{13,49}]$	Ag-голдфиллит-тетраздрит
36	ПС-90-57	$[(Cu^{+}_{8,47}Ag_{1,53})_{10,00}(Cu^{+2}_{1,84}Zn_{0,59}Fe_{0,02})_{2,45}(Sb_{1,86}As_{0,69}Te_{1,24})_{3,79}S_{12,76}]$	Ag-голдфиллит-тетраздрит
37	Л-1-2	$[(Cu^{+}_{8,00}Ag_{2,00})_{10,00}(Cu^{+2}_{1,83}Zn_{0,06}Fe_{0,13})_{11,82}(Sb_{1,74}As_{0,89}Te_{1,77})_{4,20}(S_{12,77}Se_{0,31})_{12,98}]$	селенсодержащий Ag-голдфиллит-тетраздрит
<b>Четвертая генерация</b>			
38	ПС-4	$(Cu^{+}_{10,00}Cu^{+2}_{2,14})_{12,14}(Sb_{0,54}As_{1,16}Te_{2,05})_{3,75}S_{13,10}]$	голдфиллит
39	ПС-5	$(Cu^{+}_{10,00}Cu^{+2}_{1,89})_{11,89}(Sb_{0,25}As_{1,23}Te_{2,29})_{3,77}S_{13,54}]$	голдфиллит
40	ПС-5	$[Cu^{+}_{10,00}(Cu^{+2}_{1,87}Fe_{0,05})_{1,86}(Sb_{0,23}As_{1,23}Te_{2,26})_{3,72}S_{13,42}]$	голдфиллит
41	ПС-90-26	$[Cu^{+}_{10,00}Cu^{+2}_{2,30}]_{12,30}(Sb_{0,44}As_{0,90}Te_{2,36})_{3,70}S_{13,01}]$	голдфиллит
42	ПС-2	$[Cu^{+}_{10,00}(Cu^{+2}_{2,31}Zn_{0,04})_{2,35}(Sb_{0,42}As_{1,34}Te_{1,56})_{3,32}S_{13,34}]$	голдфиллит-теннантит
43	ПС-90-11	$[Cu^{+}_{10,00}(Cu^{+2}_{2,06}Zn_{0,14})_{2,20}(Sb_{0,76}As_{1,05}Te_{1,86})_{3,67}S_{13,13}]$	голдфиллит-теннантит
44	ПС-2	$[Cu^{+}_{10,00}(Cu^{+2}_{0,38}Zn_{0,14}Fe_{0,02})_{0,54}(Sb_{1,06}As_{0,81}Te_{1,45}Bi_{0,04})_{4,36}(S_{12,21}Se_{0,88})_{14,09}]$	селенсодержащий голдфиллит
45	ПС-90-49	$[Cu^{+}_{10,00}(Cu^{+2}_{2,14}Zn_{0,04})_{2,18}(Sb_{1,34}As_{0,37}Te_{2,06})_{3,77}(S_{12,96}Se_{0,09})_{13,01}]$	селенсодержащий голдфиллит
46	Р-78-2	$[Cu^{+}_{10,00}(Cu^{+2}_{1,77}Zn_{0,17}Fe_{0,02})_{1,96}(Sb_{0,46}As_{1,28}Te_{2,23})_{4,04}(S_{12,77}Se_{0,19})_{12,95}]$	селенсодержащий голдфиллит
47	Р-78-2	$[Cu^{+}_{10,00}(Cu^{+2}_{2,02}Zn_{0,14}Fe_{0,02})_{2,18}(Sb_{0,53}As_{1,27}Te_{2,59})_{4,39}(S_{12,12}Se_{0,31})_{12,43}]$	селенсодержащий голдфиллит-теннантит
48	Р-71-13	$[Cu^{+}_{10,00}(Cu^{+2}_{1,40}Zn_{0,11}Fe_{0,05})_{1,56}(Sb_{0,80}As_{1,68}Te_{1,96})_{3,53}(S_{12,31}Se_{0,17})_{12,93}]$	селенсодержащий голдфиллит-теннантит
49	ПС-2	$[(Cu^{+}_{9,76}Ag_{0,24})_{10,00}Cu^{+2}_{2,10}]_{12,10}(Sb_{0,52}As_{0,91}Te_{2,20})_{3,63}S_{13,27}]$	серебросодержащий голдфиллит
50	ПС-2	$[(Cu^{+}_{9,77}Ag_{0,23})_{10,00}(Cu^{+2}_{2,17}Zn_{0,05})_{2,22}(Sb_{0,59}As_{0,89}Te_{2,51})_{3,75}(S_{12,85}Se_{0,11})_{13,00}]$	(Ag, Se)-содержащий голдфиллит
51	ПС-4	$[(Cu^{+}_{9,99}Au_{0,01})_{10,00}Cu^{+2}_{2,10}]_{12,10}(Sb_{1,11}As_{0,38}Te_{2,66})_{4,15}(S_{12,68}Se_{0,05})_{12,73}]$	(Au, Se)-содержащий голдфиллит
52	ПС-4	$[(Cu^{+}_{9,51}Ag_{0,23}Au_{0,24})_{10,00}(Cu^{+2}_{1,16}Zn_{0,01})_{1,19}(Sb_{0,22}As_{1,16}Te_{2,51})_{4,88}S_{12,92}]$	(Au, Ag)-содержащий голдфиллит
53	ПС-90-26	$[(Cu^{+}_{9,28}Ag_{0,72})_{10,00}(Cu^{+2}_{1,38}Zn_{0,23}Fe_{0,04})_{1,65}(Sb_{0,60}As_{0,82}Te_{2,29})_{3,71}(S_{13,49}Se_{0,16})_{13,65}]$	(Ag, Se)-содержащий голдфиллит
54	Р-78-2	$[(Cu^{+}_{9,30}Ag_{0,70})_{10,00}(Cu^{+2}_{1,39}Zn_{0,08}Fe_{0,04})_{1,82}(Sb_{0,53}As_{0,54}Te_{2,74})_{3,81}(S_{12,67}Se_{0,41})_{13,29}]$	(Ag, Se)-содержащий голдфиллит
55	Л-1-2	$[(Cu^{+}_{9,97}Ag_{0,03})_{10,00}(Cu^{+2}_{1,92}Zn_{0,01})_{1,99}(Sb_{1,36}As_{0,80}Te_{2,26})_{4,42}(S_{12,57}Se_{0,03})_{12,60}]$	(Ag, Se)-содержащий голдфиллит
56	Л-1-2	$[(Cu^{+}_{9,56}Ag_{0,44})_{10,00}(Cu^{+2}_{2,13}Fe_{0,05})_{2,18}(Sb_{1,18}As_{0,91}Te_{2,39})_{4,48}(S_{12,11}Se_{0,23})_{12,34}]$	(Ag, Se)-содержащий голдфиллит
57	Л-1-2	$[(Cu^{+}_{9,24}Ag_{0,76})_{10,00}(Cu^{+2}_{1,62}Fe_{0,09})_{1,71}(Sb_{0,22}As_{1,98}Te_{2,46})_{4,78}(S_{12,36}Se_{0,27})_{12,53}]$	(Ag, Se)-содержащий голдфиллит
58	Л-1-2	$[(Cu^{+}_{9,78}Ag_{0,22})_{10,00}(Cu^{+2}_{2,03}Zn_{0,02}Fe_{0,06})_{2,11}(Sb_{0,13}As_{1,52}Te_{2,04})_{3,69}(S_{13,16}Se_{0,04})_{13,20}]$	(Ag, Se)-содержащий голдфиллит
59	ПС-90-26	$[(Cu^{+}_{9,71}Ag_{0,29})_{10,00}(Cu^{+2}_{2,04}Zn_{0,34}Fe_{0,11})_{2,49}(Sb_{0,83}As_{1,01}Te_{1,62})_{3,58}(S_{12,74}Se_{0,24})_{12,99}]$	(Ag, Se)-содержащий голдфиллит-теннантит-тетраздрит
60	Л-9	$[(Cu^{+}_{9,08}Ag_{0,92})_{10,00}(Cu^{+2}_{1,83}Zn_{0,49}Fe_{0,51})_{2,83}(Sb_{1,26}As_{1,38}Te_{1,98})_{3,82}(S_{11,96}Se_{0,39})_{12,35}]$	(Ag, Se)-содержащий голдфиллит-теннантит-тетраздрит
61	Л-1-2	$[(Cu^{+}_{9,99}Ag_{0,01})_{10,00}(Cu^{+2}_{1,10}Zn_{0,77}Fe_{0,02})_{1,89}(Sb_{0,92}As_{1,33}Te_{1,52})_{3,77}(S_{12,10}Se_{0,26})_{13,36}]$	(Ag, Se)-содержащий голдфиллит-теннантит-тетраздрит

По соотношению элементов-полуметаллов (см. табл. 4-2) часть блеклых руд характеризуется повышенными количествами либо сурьмы, либо теллура, либо мышьяка (т.е. более 2 атомов в формуле из возможных 4), что позволяет отнести их, соответственно, к тетраэдриту, голдфилдиту или теннантиту (Кемкина, 1998<sub>б</sub>). Другая часть содержит эти элементы в приблизительно равных количествах, образуя смешанные блеклые руды (или блеклые руды переменного состава) ((Кемкина, 1998<sub>б</sub>). Анализ результатов химического состава блеклых руд в выделенных минеральных ассоциациях показывает, что в золото-пирит (халькопирит)-кварцевом типе присутствуют, главным образом, теннантиты, реже смешанные блеклые руды теннантит-тетраэдритового состава. В золото-полисульфидно-кварцевом типе развиты преимущественно тетраэдриты, а также их внутривидовые разновидности. Блеклые руды золото-теллуридно-кварцевого типа представлены голдфилдитами и, несколько в меньшей степени, сурьмянистыми голдфилдитами. При этом в распределении полуметаллов (сурьмы, теллура и мышьяка), а также одно- и двухвалентных металлов ( $\text{Cu}^+$ , Ag, Au,  $\text{Cu}^{++}$ , Fe, Zn и Pb) в установленных видах блеклых руд наблюдается определенная закономерность, которая рассмотрена ниже.

### Полуметаллы

**Мышьяк.** Содержание этого элемента в блеклых рудах варьирует от 0,79 до 18,58 мас. %. Наибольшие его количества (за исключением, естественно, теннантитов) отмечаются в смешанных разновидностях блеклых руд (в среднем 4,96 мас. %), тогда как наименьшие характерны для голдфилдитов (среднее значение не превышает 1,00 мас. %). Для сурьмянистых блеклых руд (тетраэдритов) среднее значение составляет 3,96 мас. %.

**Сурьма.** Содержания ее изменяются от 0,24 до 27,41 мас. %. При этом среднее значение для смешанных блеклых руд составляет (в мас. %) 9,41, для голдфилдитов – 4,79, а для теннантитов – 2,95. Таким образом, содержание сурьмы в блеклых рудах Прасоловского месторождения примерно в два раза превышает содержание мышьяка, что подтверждает сложившееся представление о том, что блеклые руды золото-серебряных месторождений Тихоокеанского пояса характеризуются сурьмяной спецификацией (Сахарова, 1966<sub>а</sub>).

**Теллур.** Распределение этого элемента в блеклых рудах крайне неравномерно. Его содержание в голдфилдитах достигает 25,91 мас. %, в то время как в теннантитах его среднее значение всего лишь 0,83 мас. %. В смешанных и сурьмянистых блеклых рудах среднее содержание теллура составляет, соответственно, 10,33 и 2,99 мас. %. Анализ диаграммы соотношения Te к сумме As и Sb (рис. 4-2) показывает, что между этими элементами существует устойчивая обратная корреляционная зависимость, а именно, с увеличением количества теллура уменьшается содержание сурьмы и мышьяка и, соответственно, наоборот. Такое взаимоотношение между рассматриваемыми элементами позволяет говорить, что, скорее всего, теллур в структуре блеклых руд изоморфно замещает сурьму и мышьяк. Но учитывая, то, что в сурьмянистых блеклых рудах содержа-

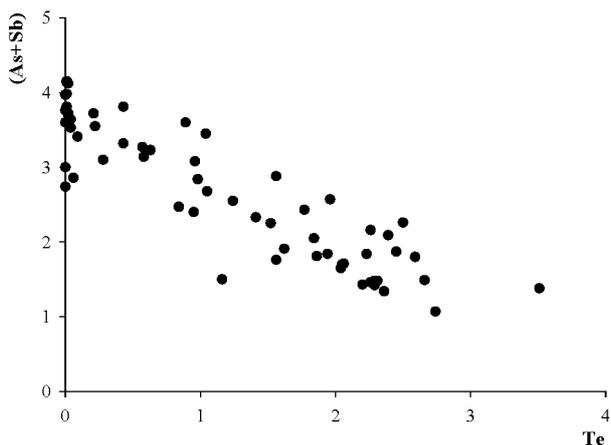


Рис. 4-2. Диаграмма зависимости количества Te от As + Sb (в форм. ед.)

ние его более чем в три раза выше, чем в мышьяковистых, можно заключить, что для блеклых руд Прасоловского месторождения предпочтителен изоморфизм в паре Te-Sb, нежели Te-As. Аналогичная тенденция изоморфизма между рассматриваемыми полуметаллами в блеклых рудах отмечается и в ряде других месторождений (Новгородова, Цепин, 1978; Спиридонов, 1984, 1985 и др.).

**Висмут.** Для блеклых руд Прасоловского месторождения, наряду с теллуром, сурьмой и мышьяком, характерно присутствие еще и висмута. Однако количества его незначительны (от 0,13 до 0,87, в единичном случае 12,16 мас. %) и приурочен он, главным образом, к смешанным блеклым рудам. Явно выраженной зависимости количества висмута от содержания других полуметаллов в рассматриваемых блеклых рудах не отмечается. В этой связи можно предположить, что висмут, скорее всего, изоморфно замещает все перечисленные полуметаллы приблизительно в равных количествах, что хорошо согласуется с данными Э.М. Спиридонова (1985), который отмечает широкий изоморфизм в ряду As-Sb-Te-Vi для блеклых руд.

#### Одновалентные катионы

Результаты рентгеноспектральных анализов показывают, что одновалентные катионы блеклых руд представлены  $\text{Cu}^+$ , Ag и Au, но количество их в разных минеральных видах существенно различно.

**Медь ( $\text{Cu}^+$ ).** Блеклые руды Прасоловского месторождения, равно как и некоторых других золоторудных вулканогенных месторождений, таких как Озерновское, Кочбулак, Кайрагач и др. (Коваленкер, Русинов, 1986; Коваленкер и др., 1989; Спиридонов и др., 1990 и др.) характеризуются высокими содержаниями меди (табл. 4-1, 4-2), т.е. являются высокомедистыми. При этом, медь занимает позиции как одновалентных, так и двухвалентных катионов. В виду отсутствия надежных аналитических критериев для определения количеств

$\text{Cu}^+$  и  $\text{Cu}^{+2}$  расчет  $\text{Cu}^{+2}$  осуществлялся по формуле  $\text{Cu}^{+2} = \text{Cu}_{\text{общ.}} + \text{Ag}(\text{Au}) - 10$ , которая широко используется разными исследователями (Некрасова, Сандомирская, 1979; Спиридонов, 1985 и др.). По количеству  $\text{Cu}^+$  выделенные минеральные виды блеклых руд месторождения практически не отличаются (в среднем 9,60-10,00 форм. ед.), за исключением, может быть, теннантитов, в которых, в единичных случаях, ее количество снижается до 7,5 форм. ед.

**Серебро.** Поскольку серебро в блеклых рудах изоморфно замещает  $\text{Cu}^+$  (Индолев др., 1974; Sack, Loucks, 1985), то его содержание находится в прямой зависимости от этого элемента (рис. 4-3) и изменяется от 0,05 до 15,03 мас. %. Оно встречается во всех минеральных видах, но частота встречаемости его различна. Чаще всего серебро присутствует в смешанных блеклых рудах (8 анализов из 15) и голдфилдитах (9 анализов из 19), несколько реже в теннантитах (4

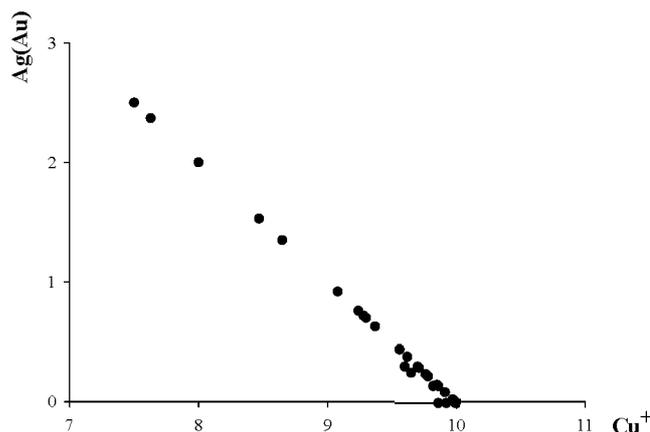


Рис. 4-3. Диаграмма соотношения в блеклых рудах  $\text{Ag}(\text{Au})$  и  $\text{Cu}^+$

анализа из 10) и еще реже в тетраэдритах (6 анализов из 17). При этом, наибольшие его содержания отмечены в смешанных блеклых рудах (до 15,03 мас. %). Самые низкие концентрации серебра установлены в теннантитах (до 2,06 мас. %, за исключением единственного анализа с ураганным содержанием), т. е. в блеклых рудах с низкими содержаниями теллура. Это обусловлено, вероятно, тем, что теллур связал основную часть серебра, образовав такие теллуриды как сальванит, гессит и другие. Отдельные минеральные виды содержат серебро в количествах более 1 форм. ед. (см. табл. 4-2). В соответствии с этим, а также следуя рекомендациям Н.Н. Мозговой (Мозгова, Цепин, 1983), среди блеклых руд можно выделить следующие внутривидовые разновидности:  $\text{Ag}$ -тетраэдрит,  $\text{Ag}$ -теннантит и  $\text{Ag}$ -голдфилдит-тетраэдрит (Кемкина, 1998<sub>а</sub>).

**Золото.** Отмечено всего лишь в двух проанализированных образцах, где его содержание составляет 0,17 и 2,77 мас. %. Примечательно то, что оно присутствует в теллуристой блеклой руде, характеризующейся низким содержанием серебра, т.е. голдфилдите. Существует мнение, что теллуриды золота кристаллизуются на начальных этапах минералообразования, тогда как теллуриды се-

ребра на завершающих (Спиридонов, 1985) и, если в растворе остается золото, то оно не образует собственных минералов, а изоморфно замещает медь вместо серебра в блеклых рудах. По-видимому, наш случай и есть пример данного варианта изоморфизма среди одновалентных катионов.

### Двухвалентные катионы

Двухвалентные катионы блеклых руд Прасоловского месторождения, согласно данным рентгеноспектрального анализа, представлены  $\text{Cu}^{+2}$ , Fe, Zn и Pb, содержания которых в разных минеральных видах также значительно варьирует (рис. 4-4).

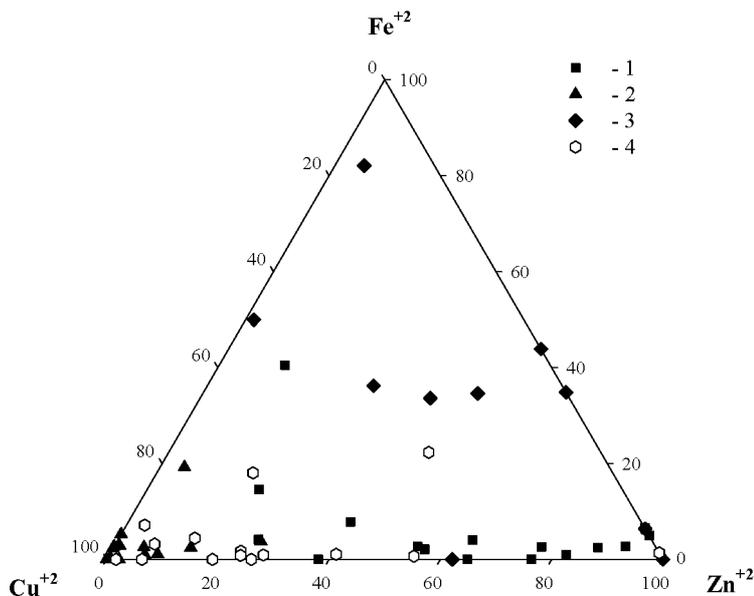


Рис. 4-4. Диаграмма количественного соотношения двухвалентных катионов в различных минеральных видах блеклых руд

1 – тетраэдриты, 2 – голдфилдиты, 3 – теннантиты, 4 – смешанного типа

**Медь ( $\text{Cu}^{+2}$ ).** Присутствует во всех минеральных видах, но наибольшие ее содержания (более 1,5 форм. ед. из возможных 2) выявлены в голдфилдитах и смешанных блеклых рудах (рис. 4-5). Среднее количество двухвалентной меди в тетраэдритах составляет порядка 0,8 форм. ед. Меньше всего  $\text{Cu}^{+2}$  содержится в теннантитах (в среднем до 0,3 форм. ед.). Анализ распределения двухвалентной меди в различных минеральных видах показывает, что, в целом, ее количество находится в прямой корреляционной зависимости от содержания в блеклых рудах теллура (рис. 4-6). Аналогичная тенденция отмечается и для некоторых других золото-серебряных месторождений (Мозгова, Цепин, 1983).

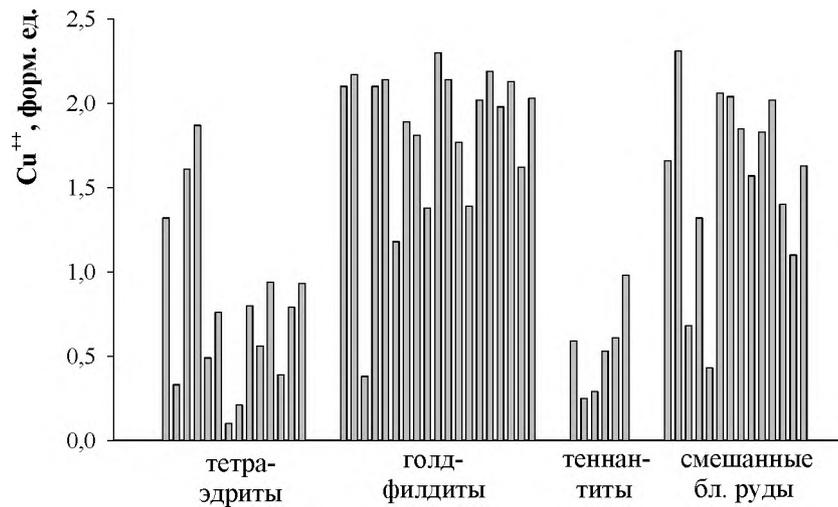


Рис. 4-5. Распределение  $\text{Cu}^{+2}$  в различных минеральных видах блеклых руд

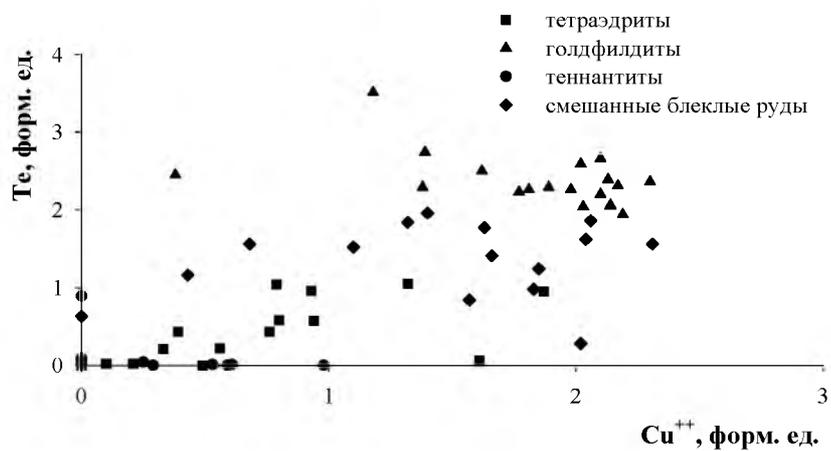


Рис. 4-6. Диаграмма зависимости содержания  $\text{Cu}^{+2}$  от количества Te

**Цинк.** Наряду с  $\text{Cu}^{+2}$  и Fe данный элемент является наиболее обычным двухвалентным металлом блеклых руд и находится с ними в изоморфной смеси (Мозгова, Цепин, 1983). В соответствии с этим, его количество, во многом, определяется содержанием этих элементов и, в частности,  $\text{Cu}^{+2}$ . Согласно данным рентгеноспектрального анализа, практически все блеклые руды Прасоловского месторождения содержат цинк (рис. 4-7).

Однако, количество его в разных минеральных видах крайне неравномерное и изменяется от 0,04 до 7,53 мас. %. Результаты кристаллохимического

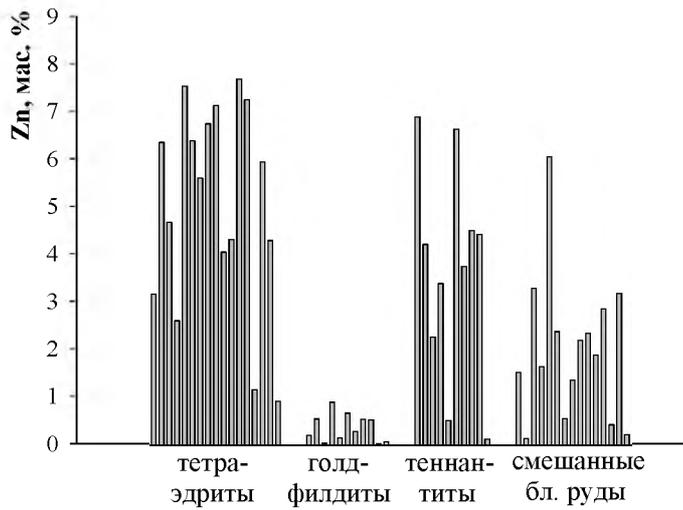


Рис. 4-7. Распределение Zn в различных минеральных видах блеклых руд

пересчета показывают, что тетраэдрит и теннантит содержат цинк в количествах более 1 форм. ед. Это позволяет выделить среди блеклых руд такие внутривидовые разновидности как Zn-тетраэдрит и Zn-теннантит. При этом отмечается четкая прямая корреляционная зависимость в паре Sb-Zn (рис. 4-8).

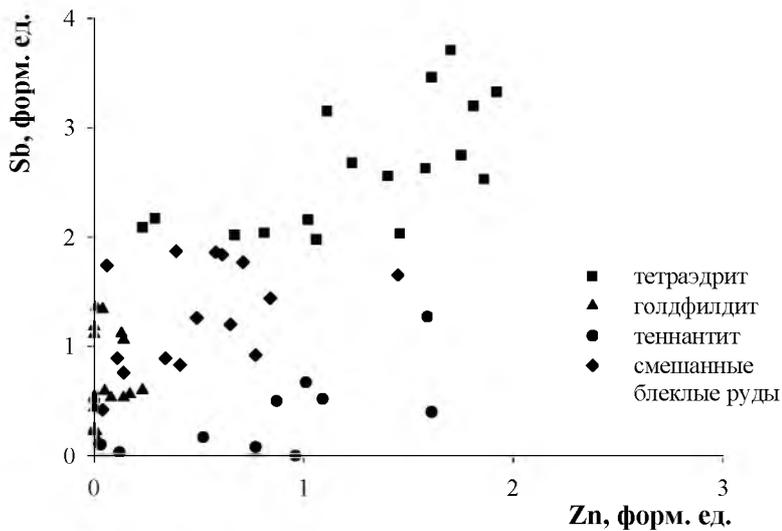


Рис. 4-8. Диаграмма зависимости содержания Zn от количества Sb

В тоже время в голдфилдитах и смешанных блеклых рудах (где теллура более 1 форм. ед.), т.е. теннантит-голдфилдитах и тетраэдрит-голдфилдитах содержание цинка низкое (от 0,01 до 0,6 форм. ед., см. рис. 4-9). Выявленная специфическая особенность изученных блеклых руд, как установлено Н.Н. Мозговой для ряда других месторождений (Мозгова, Цепин, 1983), является характерной чертой состава теллуристых блеклых руд.

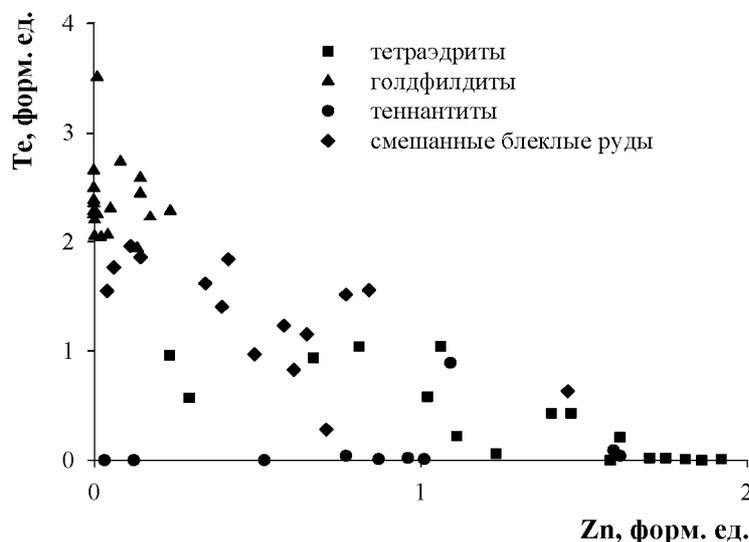


Рис. 4-9. Диаграмма зависимости содержания Zn от количества Te

**Железо.** Данный металл, как и предыдущие два, присутствует во всех минеральных видах блеклых руд, однако его содержание на порядок меньше (см. табл. 4-1). Среднее значение не превышает 0,2 мас. % и лишь для теннантитов оно составляет 0,6 мас. %. Пересчет анализов на кристаллохимические формулы показал, что в одной пробе, соответствующей теннантиту, количество железа составляет 1,88 форм. ед. (рис. 4-10), что дает основание отнести данную блеклую руду к внутривидовой разновидности – Fe-теннантит.

**Свинец** отмечен лишь в трех пробах (две из них теннантит, а одна – блеклые руды переменного состава) в количествах 0,12, 0,25 и 2,53 мас. % соответственно. В виду малых количеств и редкой частоты встречаемости этого металла, определенной зависимости от других химических элементов не установлено, но считается (Мозгова, Цепин, 1983), что он изоморфно замещает двухвалентные металлы.

#### Анионная группа

Анионная группа блеклых руд представлена серой, количество которой обычно (Спиридонов, 1985) составляет 24-28 мас. % (или 13 форм. ед.) и селеном, который изоморфно замещает серу (Мозгова, Цепин, 1983).

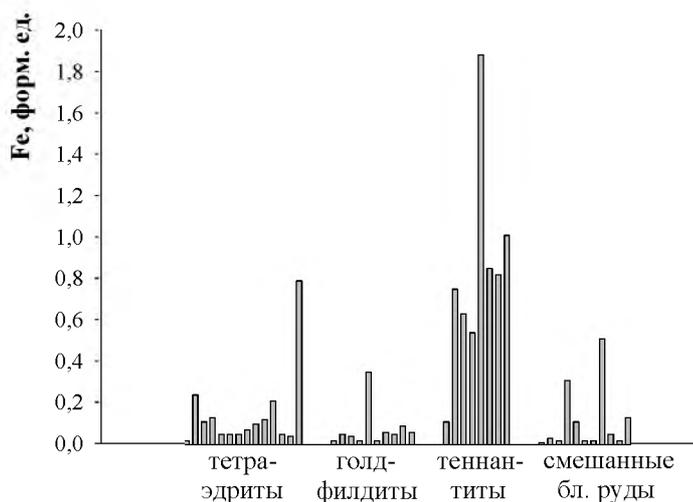


Рис. 4-10. Распределение Fe в различных минеральных видах блеклых руд

**Сера.** Для блеклых руд Прасоловского месторождения ее содержания варьируют в пределах 23,01 – 29,84 мас. %. При этом, минимальные значения этого диапазона отмечаются, главным образом, для голдфиллитов (т.е. теллуристых блеклых руд), а максимальные – для теннантитов, т.е. мышьяковистых (практически безтеллуристых) блеклых руд. Возможно, это объясняется некой геохимической зависимостью между этими элементами, обусловленной их термодинамическими свойствами.

**Селен.** Согласно данным рентгеноспектрального анализа присутствует во всех минеральных типах блеклых руд, без явного преобладания в каком-либо из них. Следует только отметить, что в блеклых рудах переменного состава среднее содержание селена немного выше (1,05 мас. %), чем в голдфиллитах, тетраэдритах и теннантитах (0,73, 0,51 и 0,24 мас. % соответственно). Изоморфное замещение селеном серы, а не теллура в блеклых рудах объясняется тем, что Te (равно как и Se) в соединениях с металлами проявляет валентность -2, а с неметаллами - +4, +6. Селен же в соединениях с неметаллами имеет валентность +2, +6 (Синдеева, 1959). Поскольку Te в блеклых рудах присутствует в четырехвалентном состоянии, то, естественно, предпочтителен изоморфизм S-Se.

Таким образом, блеклые руды Прасоловского месторождения характеризуются сложным химическим составом и широкими вариациями содержания элементов как в катионной части (одно и двухвалентные металлы и полуметаллы), так и анионной (сера и селен). Все это свидетельствует об отличных физико-химических условиях (Кемкина, 1998<sub>6</sub>) и многостадийности их кристаллизации, а также различном составе рудообразующих растворов.

Согласно данным пересчета рентгеноспектральных анализов на кристаллохимические формулы среди блеклых руд выделены следующие минераль-

ные виды – теннантиты, тетраэдриты, голдфилдиты и блеклые руды переменного состава (Кемкина, 1998<sub>в</sub>). Кроме того, по соотношению двух- или одновалентных катионов они подразделены на 18 внутривидовых разновидностей как то: Zn-тетраэдрит, Zn-теннантит, Fe-теннантит, Ag-Zn-тетраэдрит и Fe-Ag-теннантит и др. Среди смешанных блеклых руд также выделяется 12 междувидовых разновидностей – теннантит-тетраэдрит, теннантит-голдфилдит, голдфилдит-тетраэдрит, теннантит-тетраэдрит-голдфилдит и их разности – Zn-теннантит-тетраэдрит, Ag-голдфилдит-тетраэдрит и т.д. (табл. 4-2). При этом следует подчеркнуть относительно высокую селенистость всех выделенных видов и разновидностей и висмутистость блеклых руд переменного состава (смешанных).

Завершая описание особенностей химического состава блеклых руд следует также отметить нестехиометричность их кристаллохимических формул (табл. 4-2), основными причинами которой являются, с одной стороны широкий изоморфизм элементов, а с другой – прецизионность выполненных анализов.

#### 4. 2. Порядок кристаллизации блеклых руд

Результаты изучения особенностей химического состава блеклых руд Прасоловского месторождения в разных минеральных типах позволяет более обоснованно выделить 4 генерации и установить последовательность кристаллизации различных минеральных видов и разновидностей блеклых руд.

*Блеклые руды ранней (1) генерации* представлены теннантитам, цинкистыми теннантитам (с содержанием Zn от 4,42 до 6,88 мас. %) и теннантит-тетраэдритами из группы переменного состава (смешанных). Они характеризуются пониженными, в целом, значениями серебра, двухвалентной меди и незначительными содержания сурьмы и селена, но повышенными количествами железа и, соответственно, цинка (см. табл. 4-1). Минеральные выделения этой генерации локализуются в золото-пирит (халькопирит)-кварцевом типе руд, где ассоциируют с пиритом, а также образуют тесные сростания с халькопиритом, совместно с которым замещаются более поздним ковеллином. Кроме того, для блеклых руд рассматриваемой генерации характерны включения сфалерита, которые приурочены преимущественно к их центральным частям, и самородного золота.

*Блеклые руды 2 генерации* представлены тетраэдритами и их внутривидовыми разновидностями, которые содержат незначительные примеси теллура и мышьяка (см. табл. 4-1). Для них также, как и для блеклых руд 1 генерации, характерно повышенное содержание цинка (до 7,68 мас. %), но в отличие от них отмечаются более высокие содержания Ag (до 8,45 мас. %) и  $\text{Cu}^{+2}$  (до 1,87 форм. ед.) и незначительные количества Fe. Данная генерация блеклых руд выделяется в составе золото-полисульфидно-кварцевого минерального типа, где она встречается совместно со сфалеритом, галенитом с повышенным содержанием селена, халькопиритом, борнитом с продуктами распада твердого раствора, клаусталитом, а также с самородным золотом, которое присутствует в них в виде немногочисленных овальных включений.

*Блеклые руды 3 генерации* образуют минеральные зерна смешанного состава, представленные разновидностями промежуточного ряда тетраэдрит-голдфиллит. Среди них, по данным рентгеноспектрального анализа, выделены теллуристые тетраэдриты (голдфиллит-тетраэдрит и Ag-голдфиллит-тетраэдрит) и сурьмянистые голдфиллиты (тетраэдрит-голдфиллит). Данные разновидности, в отличие от блеклых руд первых двух генераций, характеризуются еще большими содержаниями серебра (до 15,03 мас. %), теллура (15,03 мас. %), селена (1,83 мас. %),  $\text{Cu}^{+2}$  (до 1,85 форм. ед.), а также присутствием в различных количествах висмута, на фоне общего снижения цинка и железа (см. табл. 4-1). Вероятнее всего блеклые руды 3 генерации соответствуют начальному этапу кристаллизации рудных минералов золото-теллуридно-кварцевого типа, поскольку они одновременно ассоциируют и с сульфидами (халькопирит, пирит, сфалерит и т. д.) и с теллуридами (креннерит, сивьянит). Кроме того, отмечаются тесные сростания минеральных выделений данной генерации с самородными золотом и теллуридом.

*Блеклые руды 4 генерации* это преимущественно голдфиллиты и селенистые голдфиллиты (среднее содержание селена 0,84 мас. %, против 0,58 мас. % для блеклых руд 3 генерации). Они характеризуются высокими содержаниями серебра,  $\text{Cu}^{+2}$ , висмута и, соответственно, селена при очень низких значениях цинка и железа (см. табл. 4-1, рис. 4-7, 4-10). В отдельных анализах голдфиллитов отмечается присутствие повышенных количеств мышьяка (до 9,03 мас. %). Аналогичная особенность выявлена также для самых поздних генераций блеклых руд Озерновского месторождения на Камчатке (Спиридонов и др., 1990). Минеральные выделения голдфиллитов и селенистых голдфиллитов ассоциируют с самородным золотом, теллуридами и селенидами (клаусталит, сивьянит, гессит, петцит, селенистый теллурид, теллуридо-селениды (?) свинца и висмута, селенсодержащий теллурид висмута), виттихенитом, акантитом а также с минеральными фазами  $\text{Au}(\text{Ag},\text{Cu})_4(\text{Te},\text{S})_2$ ,  $(\text{Ag},\text{Cu})_2(\text{Te},\text{S})$ ,  $(\text{Cu},\text{Ag})_2\text{TeS}_2$ , впервые установленными нами на данном месторождении. Формирование этих фаз осуществлялось на заключительном этапе кристаллизации руд золото-теллуридно-кварцевого типа.

На основании вышеизложенного эволюция химического состава блеклых руд от ранних стадий их кристаллизации к поздним представляется следующим образом: теннантиты (иногда с незначительными содержаниями серебра и сурьмы), тетраэдриты (иногда с незначительными содержаниями мышьяка, но повышенными содержаниями серебра и двухвалентной меди), тетраэдриты-голдфиллиты (иногда с незначительными содержаниями висмута), голдфиллиты (селенистые голдфиллиты). Иначе говоря, в ходе рудоотложения существенно мышьяковистая генерация блеклых руд сменялась сурьмянистой, далее теллуристо-сурьмянистой, а затем теллуристой, продуцируя в рудах повышенные концентрации таких токсичных элементов как As, Sb, Te, Se, Pb, Zn, Cu, Bi и т. д.

Аналогичная эволюция химического состава блеклых руд отмечается и для некоторых других золотосеребряных месторождений. В частности, для блеклых руд большинства вулканогенных месторождений (Спиридонов, 1984; 1985; Спи-

ридонов и др., 1990 и др.) установлена сложная дифференциация слагающих их компонентов с резкими изменениями сурьмянистости, медистости, содержаний серебра и других элементов, а также отмечено, что более поздние генерации блеклых руд обогащены Ag, Te, Se или Bi. При этом выявлено, что для одних Au-Ag вулканогенных месторождений ранние генерации блеклых руд отвечают теннантиту, более поздние – тетраэдриту, а еще более поздние – обогащенному серебром тетраэдриту. Для других – ранние генерации блеклых руд представлены теннантитом или мышьяковистым тетраэдритом, более поздние генерации – тетраэдритом, еще более поздние теллуристым тетраэдритом, голдфилдитом и (или) селенистым голдфилдитом.

Считается (Hackbarth, Petersen 1984), что такая эволюция химического состава блеклых руд во многом обусловлена химизмом исходного рудообразующего раствора (т.е. соотношением в нем Cu, Ag, Sb, As, Te и др. элементов), а также физико-химическими характеристиками этих элементов при определенных термо-барометрических условиях, обуславливающих их реакционную активность (т.е. способность образовывать твердые фазы). В соответствии с этим, ранние блеклые руды характеризуются низкими содержаниями серебра и сурьмы, а в поздних генерациях концентрация указанных элементов повышается, тогда как концентрация мышьяка, железа и цинка снижается. Кроме того, установлено, что состав блеклых руд во многом определяется окислительно-восстановительным потенциалом рудоносных гидротерм (Бортников и др., 1987), а также их температурой (Сахарова, 1966<sub>а</sub>; Feiss, 1974). В частности, окислительные условия благоприятствуют вхождению двухвалентной меди, теллура и селена в состав блеклых руд. В восстановительных условиях из растворов того же состава кристаллизуются, главным образом, тетраэдрит и теллуриды золота и серебра. Согласно экспериментальным данным М.С. Сахаровой (1966<sub>а</sub>) мышьяковистые блеклые руды формируются при высоких температурах (более 500<sup>0</sup> С), в то время как существенно сурьмянистые при температуре менее 400<sup>0</sup> С, соответственно, теллуристые при еще более низких.

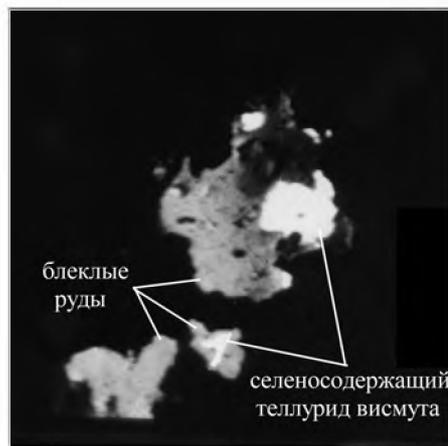
Таким образом, можно заключить, что формирование руд Прасоловского месторождения осуществлялось на фоне снижения температуры рудогенерирующих растворов и возрастания их окислительного потенциала от ранних стадий к поздним.

#### **4. 3. Неоднородность химического состава блеклых руд**

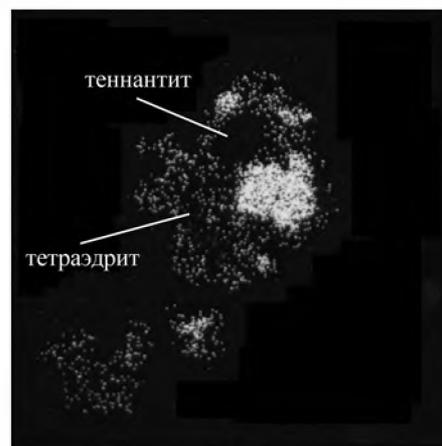
При микроскопическом изучении блеклых руд в аншлифах было установлено, что они представлены не только однородными (т.е. мономинеральными) зернами, но и выделениями зонального (неоднородного) строения. При одинаковой отражательной способности, они имеют слегка отличные цветовые оттенки (зеленоватые, голубоватые, розоватые), что, скорее всего, обусловлено вариациями их химического состава. В этой связи авторами был выполнен рентгено-спектральный анализ микронеоднородностей блеклых руд, который подтвердил, что они, в большинстве случаев, представляют собой сростки зерен с разным химическим составом (т.е. сростки различных минеральных видов).

На микроанализаторе УХА-5А (аналитик В.И. Сапин, ДВГИ ДВО РАН) зональные блеклые руды были подвержены площадному сканированию в режиме вторичных электронов, а также в характеристических рентгеновских лучах  $SbL_{\alpha}$ ,  $AgL_{\alpha}$ ,  $TeL_{\alpha}$ ,  $BiL_{\alpha}$ , и  $CuK_{\alpha}$  (рис. 4-11). Анализ растровых изображений результатов сканирования показал, что микрогетерогенная структура зональных блеклых руд обусловлена сосуществованием в одном выделении сразу нескольких минеральных фаз. То есть, каждое такое образование состоит из 2-3 однородных фаз неправильной формы, которые срастаясь, образуют пятнисто-мозаичное или зональное строение. В качестве примера на рис. 4-11 представлены фотографии сканированных поверхностей трех выделений блеклых руд, в одном из которых (находящемся в срастании с минеральной фазой селенсодержащего теллурида висмута) отчетливо наблюдается такая неоднородность. На поверхности этого выделения в рентгеновских лучах висмута видно, что этот элемент распределен, главным образом, по периферии зерна и отсутствует в центральной части (рис. 4-11б). Растровые изображения этого же выделения, но в лучах теллура показывают, что теллуrom обогащены лишь узкие краевые части (рис. 4-11в). Аналогичное изображение в лучах меди показывает, что распределение этого элемента примерно равномерное (рис. 4-11г), в то время как на изображении в лучах сурьмы видно, что по данному элементу четко обособляется самостоятельное зерно (рис. 4-11д), которое также хорошо отслеживается и по отсутствию теллура (рис. 4-11в). Таким образом, мы видим, что в пределах данного выделения блеклой руды четко обособляются три участка: первый, где, отсутствуют  $Bi$ ,  $Te$  и  $Sb$ , и который соответствует, скорее всего, теннантиту; второй, который характеризуется отсутствием или незначительным содержанием  $Te$  и  $Bi$ , но высокими содержаниями  $Sb$  и  $Cu$ , что позволяет диагностировать его как тетраэдрит и третий (краевая часть рассматриваемого минерального выделения) – по высоким содержаниям  $Te$ ,  $Cu$  и  $Bi$ , при практическом отсутствии  $Sb$  идентифицируется с голдфилдитом. Границы между этими участками расплывчатые, заливообразные, что указывает на их одновременное образование (т.е. последовательное обрастание теннантита тетраэдритом, а затем их обоих голдфилдитом). Образование таких многофазных блеклых руд может быть объяснено наложением, т.е. взаимодействием поздних порций рудогенерирующих растворов с ранними минеральными фазами блеклых руд с частичным замещением их вновь кристаллизующимися (более поздними) минеральными фазами.

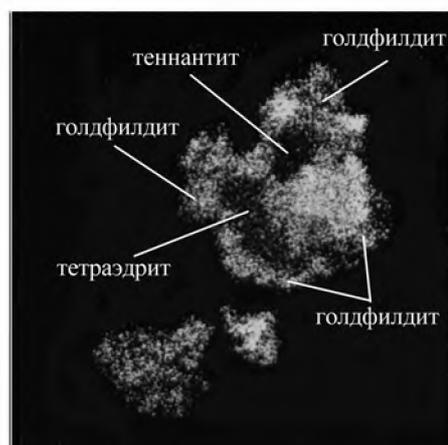
Различия в химическом составе отдельных частей зональных блеклых руд подтверждаются и данными рентгеноспектрального анализа. В таблице 4-3 приведены данные о химических составах зональных блеклых руд в их центральных и краевых частях. Анализ этих данных показывает, что указанные части характеризуются различными содержаниями  $As$ ,  $Sb$ ,  $Te$ ,  $Zn$ ,  $Cu$ ,  $Bi$ ,  $Se$  и т. д. В частности, для одних таких выделений блеклых руд отмечается уменьшение содержания от центральных частей к краям  $As$ ,  $Fe$ ,  $Zn$ , но увеличение  $Sb$ ,  $Cu$  и  $Ag$  (например, табл. 4-4, образец Л-8,9/1). Для других, наоборот, характерно уменьшение от центра к краю содержания  $Sb$ ,  $Fe$ ,  $Zn$ , но увеличение  $Te$ ,  $Cu$  и  $Se$  (табл. 4-3, оставшиеся образцы).



а



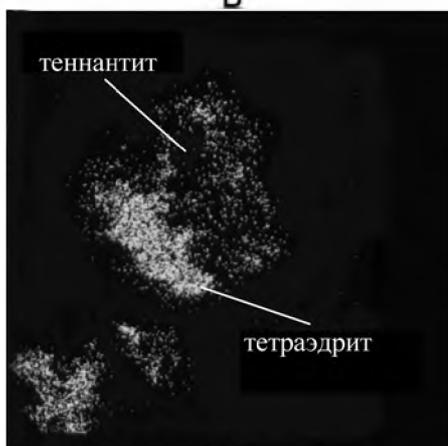
б



в



г



д

Рис. 4-11. Зональность блеклых руд, выявленная в характеристическом рентгеновском излучении.

а – фотография во вторичных электронах; б-д – растровые изображения в рентгеновских лучах:  $\text{BiL}_\alpha$  (б),  $\text{TeL}_\alpha$  (в),  $\text{CuL}_\alpha$  (г) и  $\text{SbL}_\alpha$  (д). Размер кадра 100 x 100 мкм

**Изменение содержания химических элементов (мас. %) в разных фазах блеклых руд по результатам рентгеноспектральных анализов**

№ образца	Точка наблюдения.	Fe	Cu	Zn	Se	As	Te	Sb	S	Ag	Сумма
П-90-49/1	Центр 60	-	41,80	5,60	-	3,50	3,32	19,05	25,67	-	98,94
	Край 61	-	45,94	0,15	0,43	1,63	15,66	9,71	24,74	-	98,26
Л-1-2/1	Центр 22	2,68	41,84	0,92	0,45	4,52	7,50	15,51	25,28	0,90	99,60
	Край 23	0,43	35,02	0,22	0,93	2,94	12,92	12,11	23,42	12,36	100,35
ПС-2/1	Центр 22	-	46,69	0,14	-	6,00	11,90	3,02	25,53	-	97,28
	Край 23	-	45,15	-	-	4,10	16,80	3,82	25,49	2,53	97,89
Р-78-2/1	Центр 5	0,08	45,86	0,67	0,91	5,90	17,45	4,21	25,09	-	100,17
	Край 7	0,05	44,22	0,54	1,41	5,51	19,14	3,72	23,49	-	98,08
Л-8,9/1	Центр 1	3,08	45,21	4,42	0,29	15,78	0,11	5,48	27,25	-	101,62
	Край 2	1,67	40,77	1,89	1,83	6,98	7,33	9,05	24,56	5,83	99,91

**Примечание:** Условия съемки: рабочее напряжение 25 КВ, ток поглощенных электронов на образце 36 А, размер электронного зонда 1-2 мкм, время экспозиции 10 сек. Аналитики: В.М. Чубаров, В.И. Сапин  
 “ - “ – элемент не обнаружен.

Распределение разновидностей блеклых руд по минеральным типам

Таблица 4-4

Тип руд	Минеральный парагенезис	Разновидности блеклых руд
Золото-пирит (халькопирит)- кварцевый	пирит, халькопирит, сфалерит, самородное золото	теннантит, Fe-теннантит, Zn-теннантит, Se-содержащий Zn-теннантит, Ag-содержащий Zn-теннантит, (Ag, Se)-содержащий Zn-теннантит, (Ag, Se)-содержащий теннантит, Se-содержащий Ag-Fe-теннантит, Se-содержащий Zn-теннантит-тетраэдрит, Se-содержащий теннантит-тетраэдрит
Золото-полисульфидно- кварцевый	сфалерит, селенистый галенит, халькопирит, борнит, клаусталит, рокезит, самородное золото	тетраэдрит, Zn-тетраэдрит, Se-содержащий Zn-тетраэдрит, Se-содержащий тетраэдрит, Ag-содержащий Zn-тетраэдрит, (Ag, Se)-содержащий Zn-тетраэдрит, (Ag, Se)-содержащий тетраэдрит, Ag-содержащий тетраэдрит, Ag-Zn-тетраэдрит
Ранняя стадия золото- теллуридно-кварцевого типа	молибденит, халькопирит, пирит, сфалерит, галенит, креннерит, сильванит, самородные золото и теллур	голдфиллит-тетраэдрит, (Ag, Se)-содержащий голдфиллит-тетраэдрит, Bi-содержащий голдфиллит-тетраэдрит, Se-содержащий голдфиллит-тетраэдрит, Ag-голдфиллит-тетраэдрит, Se-содержащий Ag-голдфиллит-тетраэдрит
Поздняя стадия золото- теллуридно-кварцевого типа	самородное золото, клаусталит, сильванит, гессит, петцит, курилит, селенистый теллур, теллуроселениды(?) свинца и висмута, селенсодержащий теллурид висмута, виттихенит, акантит и минеральные фазы $Au(Ag, Cu)_4(Te, S)_2$ , $(Ag, Cu)_2(Te, S)$ , $(Cu, Ag)_2TeS_2$	голдфиллит, голдфиллит-теннантит, Se-содержащий голдфиллит, Se-содержащий голдфиллит-теннантит, Ag-содержащий голдфиллит, (Ag, Se)-содержащий голдфиллит, (Au, Se)-содержащий голдфиллит, (Au, Ag)-содержащий голдфиллит, (Ag, Se)-содержащий голдфиллит-теннантит-тетраэдрит

\*\*\*

Таким образом, результаты изучения блеклых руд Прасоловского месторождения показывают, что они представляют собой сложные соединения, характеризующиеся как значительными вариациями слагающих их химических элементов, так и количественными соотношениями последних. Среди наиболее распространенных элементов блеклых руд являются Cu, As, Sb, Te, Zn, Fe, Se, Pb, Bi, которые кроме промышленной ценности характеризуются также высокой токсичностью и при соответствующих концентрациях представляют угрозу экологическому состоянию окружающей среды. По соотношению основных минералообразующих компонентов блеклые руды подразделены на три минеральных вида и тридцать внутри- и междувидовых разновидностей (табл. 4-2).

В результате сопоставления данных по химизму блеклых руд и приуроченности их к определенным минеральным ассоциациям в разных типах руд определена последовательность кристаллизации различных их минеральных видов и разновидностей, согласно которой существенно мышьяковистая генерация блеклых руд сменялась в ходе рудоотложения сурьмянистой, далее теллуристо-сурьмянистой, а затем теллуристой. Таким образом, отмечается отчетливая эволюция состава рудогенерирующих растворов от обогащенных мышьяком, цинком и железом на ранних стадиях до обогащенных сурьмой, теллуром и селеном на поздних, что свидетельствует об отличных физико-химических условиях образования различных минеральных типов руд Прасоловского месторождения.

Полученные данные об эволюции химического состава блеклых руд в сочетании с минералогическими исследованиями позволили определить минеральные парагенезисы для каждого конкретного вида и разновидности (табл. 4-4). Эти данные дают основание заключить, что блеклые руды тесно ассоциируют или находятся во взаимном сростании с большинством рудных минералов месторождения, включающих сульфиды, теллуриды, селениды, а также золото. Из этого следует, что при добыче и обогащении золотосодержащих руд (а они и составляют промышленную ценность Прасоловского месторождения) вся совокупность рудных минералов, содержащих в разных количествах токсичные металлы попадет в горнотехнические отвалы, либо, в лучшем случае, в хвостохранилища.

## ГЛАВА 5. ВОЗМОЖНЫЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ПРИ ОТРАБОТКЕ ПРАСОЛОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Согласно данным минералогического и физико-химического изучения (см. Гл. 3, 4), руды Прасоловского месторождения содержат в виде минеральных образований более 20 элементов периодической системы. Они представлены как самородными формами, так и теллуридами, селенидами, сульфидами и сульфосолями различных металлов, наиболее распространенными из которых являются Zn, Pb, Cu, Mo, Fe, As, Sb, In, Bi, Cd, Te, Se, Ag, Au, и др. (Кемкина, Севериненко, 2006<sub>б</sub>; Kemkina R.A., Severinenko, 2006<sub>а</sub>, 2006<sub>б</sub>). В минералогическом отношении это самородные золото, серебро, теллур, пирит, халькопирит, галенит, акантит, прустит, калаверит, креннерит, сильванит, клаусталит, науманит, рокезит, разнообразные по составу блеклые руды и другие минералы, количество которых приближается к 50. Каждый из перечисленных металлов, при условии соответствующих их содержаний, является важным компонентом минерально-сырьевой базы, обеспечивающей экономическую и политическую стабильность страны. Однако, на Прасоловском месторождении промышленный интерес представляют только минералы и минеральные фазы Au и Ag, средние содержания которых составляют 15-25 г/т и 45-60 г/т соответственно. Все остальные химические элементы руд месторождения (имеется в виду металлы) имеют некондиционные содержания. Естественно, что в условиях рыночной (не рациональной) экономики, когда главная задача горнодобывающих предприятий подчинена основной цели – получение максимальной прибыли при минимальных затратах, в промышленное обращение будут вовлечены только Au-Ag руды, а руды других металлов месторождения попадут в техногенные отвалы или, в лучшем случае, будут складироваться в хвостохранилищах. Очевидно, что невостребованная часть рудного вещества, будучи извлеченной на поверхность, окажется в зоне гипергенеза\*, где будет подвержена окислению, растворению, преобразованию в другие минеральные формы и водные растворы, что существенно повлияет на экологическую обстановку в прилегающих к месторождению территориях.

### 5.1. Краткая характеристика экологической токсичности некоторых металлов

Известно, что многие металлы, кроме промышленной ценности, характеризуются также и различной степенью токсического воздействия как на биосферу в целом (животный и растительный мир), так и на человека в частности (Мур, Рамамурти, 1987). Попадая в организм человека и животных с пищей, водой и воздухом, такие металлы являются причиной многих заболеваний, функциональных расстройств и, даже, смерти. Порой последствия токсического

\* - Гипергенез – процесс изменения и преобразования горных пород и минералов в приповерхностной части литосферы (кора выветривания) и биосфере в условиях повышенной обводненности и аэрации (Геологический..., 1973).

воздействия металлов проявляются в следующем поколении. Многочисленные статистические данные свидетельствуют об ухудшении генофонда, увеличении количества детей с теми или иными отклонениями от физиологической или психической нормы. В настоящее время выделено несколько различных групп или "рядов опасности" металлов по степени их токсичности. В основу одних (ГОСТ, 1985) положено среднее содержание металла в миллиграммах на килограмм живого веса, приводящее к гибели (т.е. смертельная доза). В других разделение на классы произведено в зависимости от характера и тяжести причиняемого организму вреда (Токсичные..., 2005; Давыдова, 1991 и др.). В третьих, в качестве определяющего фактора приняты значения предельно допустимых концентраций в воде (Емлин, 1991), в продуктах (Шеннон, 1991) и т.д. В соответствии с этими классификациями к числу наиболее опасных (токсичных) металлов сегодня относятся: свинец, кадмий, ртуть, мышьяк, хром, сурьма, висмут, медь, молибден, марганец, олово, теллур, вольфрам, кобальт, никель, селен, цинк, ванадий, барий, галлий, таллий, индий, германий, алюминий и ряд других.

В рудах Прасоловского месторождения насчитывается более 10 из них, а именно Pb, Cu, Zn, Mo, Bi, Te, Se, As, Sb, Cd, In и Fe. Они присутствуют как в виде собственных минеральных форм (т.е. являются минералообразующими), так и в виде примесей (см. Гл. 3 и табл. 3-22), изоморфно входя в структуры разных минералов. В этой связи содержания токсичных металлов как в различных минеральных классах, так и внутри их существенно варьируют (см. табл. 3-23) и изменяются от 0,01 до 90 мас. % (рис. 5-1).

О характере их токсического воздействия и последующих биологических и биохимических последствиях можно судить как по многочисленным опубликованным в специальной литературе, так и озвученным в средствах массовой информации и Интернете данным. Ниже приводится краткая экотоксическая характеристика некоторых металлов.

**Свинец (Pb)** – политропный яд, вызывающий патологические изменения в нервной системе, в крови и сосудах (Бондарев, 1976; Емлин, 1991 и др.). У детей вызывает легочные заболевания, приводит к задержке роста, наносит вред развитию двигательных навыков и влияет на нейротрансмиссию, изменяя выделение и использование мозговых химических веществ, таких как допамин, серотонин и гамма-аминомасляная кислота, которые управляют поведением и эмоциями. Токсичность этого металла может также вызвать дефицит внимания, поведенческие расстройства, пониженный коэффициент интеллекта, плохую зрительно-слуховую координацию, бедный словарный запас и плохие навыки чтения (Токсичные..., 2005). Свинец угнетает также ферменты крови и тканей, гонадо- и эмбриотоксичен. При содержании в растворах свыше 0,8 мг/л является канцерогеном. Неорганические соединения свинца ( $Pb^{2+}$ ) нарушают обмен веществ в организме, усиливают развитие заболеваний группы анемий, болезни периферической нервной системы как-то цефалгия, ишалгия, миалгия (Тарасенко, Зиньков, 2001). Свинец накапливается в костях, волосах, тканях аорты, печени и почек, вызывает паралич нервной системы, анемию и спазмы кишечника.

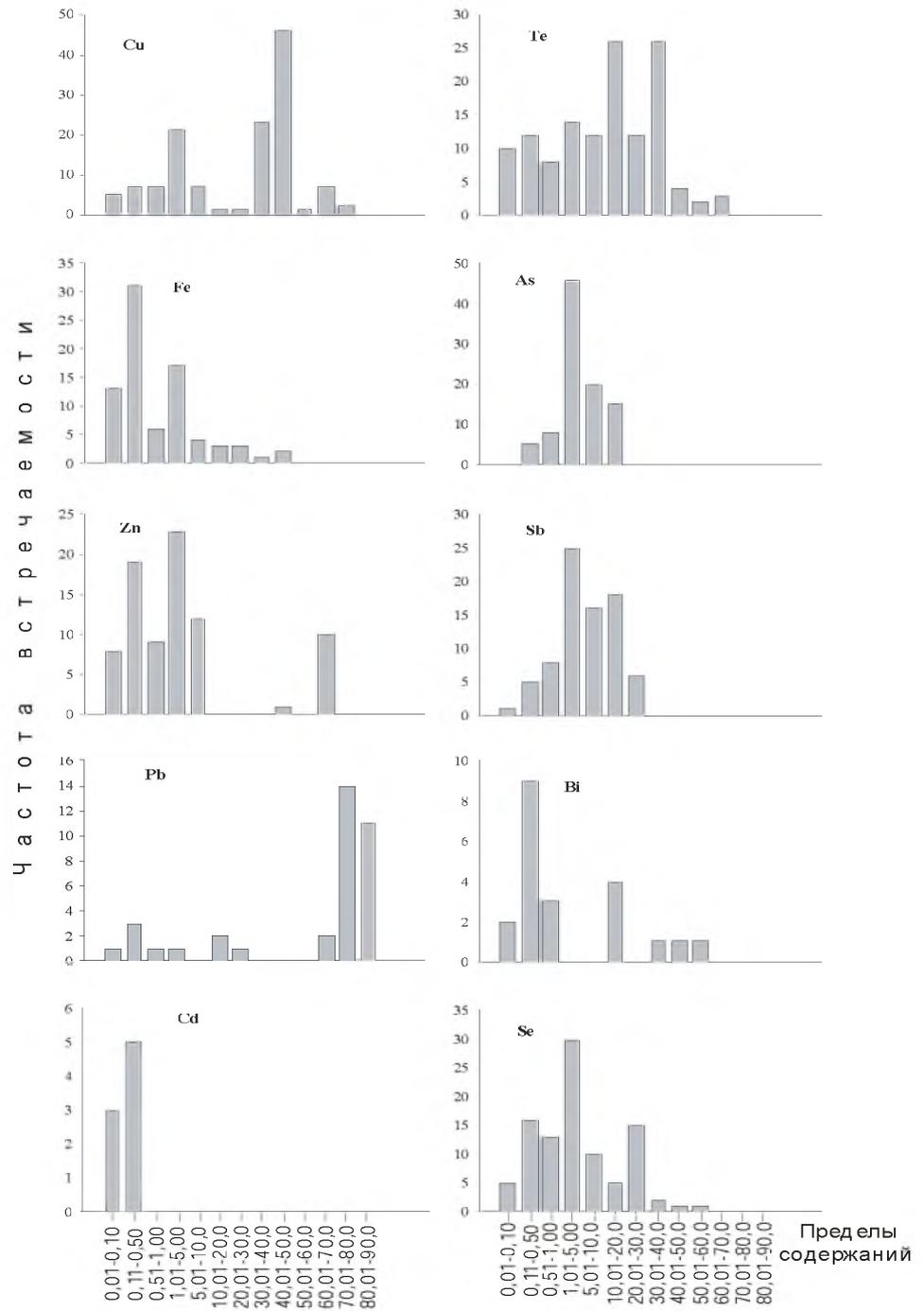


Рис. 5-1. Гистограммы частот встречаемости токсичных металлов в рудах Прасоловского месторождения

ка. Избыток свинца в крови приводит к замещению кальция в костях (Сутурин, 1986).

Опыты с лабораторными животными (мыши, крысы, кролики) показали, что при ежедневном 6-часовом воздействии оксидов свинца в концентрации 10 мкг/м<sup>3</sup> через 6 месяцев наблюдается 10-кратное увеличение содержания свинца в костном скелете, изменение условно-рефлекторной деятельности, активности некоторых ферментов и гистологической структуры головного и спинного мозга. При меньших воздействиях, не вызывающих изменений в крови и нервной системе, наблюдалось увеличение массы семенников и предстательной железы, нарушение сперматогенеза: появление патологических форм сперматозоидов, снижение их подвижности, а у самок – дегенеративные изменения в яйцеклетках. У потомства таких крыс на 30% была уменьшена масса тела и на 67% – выживаемость.

**Ртуть (Hg)** – кумулятивный яд, вызывающий понижение диапазона внимания, раздражительность и беспокойство, усталость, потерю памяти и общее снижение сопротивляемости организма к заболеваниям (Емлин, 1991). Ртуть снижает количество белых клеток крови, включая Т-клетки, убивающие чужеродные тела в организме. Поражает также центральную и периферическую нервные системы, приводя к повреждению головного мозга, мутаген, гонадо- и эмбриотоксичен. Этот металл может пройти через плаценту беременной женщины и заразить плод. Общие признаки ртутного отравления – артрит и воспаление, сердечно-сосудистые болезни, пищеварительные проблемы, слабоумие, аллергия и психосоматическое состояние. При длительном контакте с ртутью возможны кома и смертельный исход (Токсичные..., 2005).

Ртуть широко используется со времен Римской империи для очистки серебра и золота от примесей. С древних времен и до наших дней шахтеры и рабочие очистных установок страдали от различных заболеваний. Были и другие опасные профессии. Выражение "сумасшедший как шляпный мастер" объясняется тем, что шляпные мастера постоянно подвергались воздействию ртутных соединений, использовавшихся при изготовлении фетровых шляп, и впоследствии часто сходили с ума.

**Кадмий (Cd)** – кумулятивный яд, приводящий к отравлениям разной степени. Воздействие кадмия на организм вызывает гипертонию, приводит к серьезным заболеваниям почек и легких, способствует развитию рака (Шеннон, 1991). Избыток кадмия в организме уменьшает продолжительность жизни, вызывает анемию, влияет на метаболизм цинка, создавая его дефицит в организме. Повышенные содержания кадмия в крови способствуют сокращению количества Т-клеток в организме, что приводит к снижению общего иммунитета из-за нарушения функций печени и почек, жизненно важных для иммунной системы. Кроме того, кадмий вызывает нарушение ферментного обмена, разрушение нервной и костно-мышечной системы. Из организма кадмий выводится чрезвычайно медленно – в течение 20-40 лет (Ильин, Юданова, 1989).

Признаки токсического отравления кадмием – воспаленные суставы, пониженный аппетит, медленный рост и камни в почках (Токсичные..., 2005).

**Алюминий (Al)** – в избыточных количествах (начиная с 4-8 моль/л) токсичный металл (Емлин, 1991). Он является причиной повышенной возбудимости и нарушения психомоторных реакций, анемии, головной боли, заболеваний почек и печени, изменения в клетках мозга и нервной системы, слабоумия у пожилых людей (болезнь Альцгеймера), угнетения функции паращитовидной железы, нарушения функции щитовидной железы и неврологических изменений, связанных с болезнью Паркинсона (Шеннон, 1991).

Повышенное содержание алюминия в детском организме вызывает гиперактивность, агрессивность, нарушения памяти и учебные трудности, а также подавление нейротрансмиссии и ослабление двигательной координации. У пожилых людей приводит к рассеянности и потере памяти (Токсичные..., 2005).

Физическими признаками отравления алюминием могут быть ломкие кости или остеопороз, поскольку алюминий откладывается в костях.

**Медь (Cu)** – канцероген, гонадотоксична. Соединения меди раздражают слизистые оболочки верхних дыхательных путей и желудочно-кишечного тракта. Повышенное содержание в организме приводит к острым и хроническим воспалительным заболеваниям, бронхиальной астме, заболеваниям почек, печени, инфаркту миокарда, некоторым злокачественным новообразованиям. Хроническая интоксикация медью и ее солями вызывает функциональные расстройства нервной системы, печени и почек, изъязвлению и перфорации носовой перегородки, аллергодерматоз (Емлин, 1991).

**Мышьяк (As)** – кумулятивный яд. При остром отравлении наблюдаются сильные боли в животе, понос, поражение почек; возможны коллапс, судороги. Главными осложнениями острой интоксикации являются внутрисосудистый гемолиз, острая почечная, печеночная недостаточность, кардиогенный шок. Отдаленными последствиями острых отравлений у детей может быть значительное снижение остроты слуха.

При хроническом отравлении наиболее часты желудочно-кишечные расстройства, нарушения чувствительности, катары слизистых оболочек дыхательных путей (фарингит, ларингит, бронхит), поражения нервной системы, периферических сосудов, кожи (экзантема, меланоз, гиперкератоз), жирового и углеводородного обмена, развитие апластической анемии. Поражение нервной системы проявляются в виде токсической энцефалопатии (нарушение речи, координации движений, эпилептиформных судорог, психозов). Арсеникозные миелополиневриты имеют свои особенности и характеризуются болевым синдромом, симметричностью поражения, амиотрофией, нарушением чувствительности, развитием вторичных контрактур (Вредные..., 1977; Емлин, 1991).

**Цинк (Zn)** – мутаген, гонадо- и эмбриотоксичен. Длительная интоксикация приводит к желудочно-кишечным заболеваниям, увеличению числа ОРЗ, кариесу зубов, изменению морфологического состава крови, повышению заболеваемости детей (Тарасенко, Зиньков, 2001; Емлин, 1991). Цинк-дефицитные состояния характеризуются наличием таких симптомов, как снижение аппетита, анемия, аллергические заболевания, гиперактивность, дерматит, дефицит массы,

снижение остроты зрения, выпадение волос, может происходить задержка полового развития у мальчиков и потеря сперматозоидами способности оплодотворения яйцеклетки у мужчин.

**Марганец (Mn)** – характеризуется плохой выводимостью из организма, а накапливаясь, влияет на нервную систему. Повышенные содержания марганца в организме препятствуют выработке нейротрансмиттеров (серотонина и дофамина) – нейрогомонов, синтезируемых в центральной нервной системе и клетках желудочно-кишечного тракта для формирования нервных импульсов. Используя эти импульсы нейроны головного мозга участвуют в регуляции многих форм поведения, процессов сна, терморегуляции организма, моторики желудочно-кишечного тракта (Тарасенко, Зиньков, 2001). При хронической интоксикации характерными являются астенические расстройства (повышенная утомляемость, сонливость, снижение активности, круга интересов, ухудшения памяти). В неврологическом статусе отмечается гипомимия, дистония или гипертонус, возможно оживление или снижение сухожильных рефлексов, гиперестезия в дистальных отделах конечностей, периферические и центральные вегетативные нарушения.

**Висмут (Bi)** – тяжелый металл – излучатель естественных альфа-лучей. Однако патологические изменения в организме под воздействием висмута и его соединений пока не изучены.

**Теллур (Te)** – достаточно токсичен. Повышенные содержания теллура и его соединений в организме вызывают облысение, влияют на состав крови, блокируют различные ферментные системы (Емлин, 1991). Симптомы хронического отравления элементарным теллуrom – тошнота, сонливость, исхудание; выдыхаемый воздух приобретает скверный чесночный запах алкилтеллуридов. Из соединений теллура самое опасное – теллуrowодород  $H_2Te$ , бесцветный ядовитый газ с неприятным запахом. Он раздражает бронхи, вредно влияет на нервную систему. Белые крысы, которым вводили аэрозоль теллура, проявляли беспокойство, чихали, терли мордочки, делались вялыми и сонливыми. Аналогичным образом действует теллур и на людей. В нашей стране предельно допустимой концентрацией теллура в воздухе считается  $0,01 \text{ мг/м}^3$ .

**Селен (Se)** – и все его соединения являются политропным ядом, канцерогеном, и гораздо в большей степени, чем соединения мышьяка. Высокие концентрации селена в организме ингибируют окислительно-восстановительные ферменты, нарушают рост опорно-покровных тканей и синтез аминокислоты метионина, недостаток которой приводит к тяжелым функциональным расстройствам, вызывают анемию. Токсические отравления селеном приводят к поражению печени, почек, вызывают расстройства нервной системы, хроническое воспаление суставов (Вредные..., 1977; Емлин, 1991).

Избыток селена в почве – причина известного заболевания скота, так называемого алколоиза. При содержании селена в рационе более  $2 \text{ мг/кг}$  у животных возникают острые и хронические формы отравлений, у них начинает выпадать шерсть, деформируются, принимая уродливые формы, рога и копыта. Предельно допустимая концентрация аморфного селена в воздухе рабочих поме-

щений 2 мг/м<sup>3</sup>, а для большинства его соединений – 0,2 мг/м<sup>3</sup> в пересчете на селен.

**Сурьма (Sb)** – в больших концентрациях представляет кумулятивный яд. Хроническая интоксикация приводит к изменению обмена веществ, к функциональным расстройствам нервной системы и патологическим изменениям миокарда (Емлин, 1991).

**Молибден (Mo)** – при повышенных концентрациях в организме вызывает артриты, боли в суставах, непостоянство кровяного давления, нарушение обмена веществ, нарушение течения беременности, повышение заболеваемости детей. Хронические отравления приводят к желудочно-кишечным заболеваниям и эндемической подагре (Ивлев, 1983; Емлин, 1991).

**Индий (In)** – растворимые соединения индия нарушают белковый обмен и функции нервной системы. Основные симптомы при отравлении этим металлом – боли в суставах и костях (Емлин, 1991).

**Железо (Fe)** – избыток железа, в первую очередь, оказывает токсическое влияние на печень, селезенку, головной мозг, усиливает воспалительные процессы в организме человека. Повышенные содержания железа в организме приводят к дефициту Cu, Zn и Ca, а также к избытку Co. Аэрозоли при длительном воздействии вызывают разновидность пневмокониоза (сидероз), возможны бронхиты и сухой плеврит (Емлин, 1991).

**Бериллий (Be)** – при накоплении в организме отмечаются поражения легочной ткани (фиброз, саркоидоз), реже – кожи (эритемы, экземы), миокарда, печени, костей, эрозии в желудочно-кишечном тракте.

**Кобальт (Co)** – повышенные содержания кобальта в окружающей среде оказывают раздражающее и аллергическое действия. Длительные интоксикации характеризуются хроническими заболеваниями верхних дыхательных путей, бронхов. Развивается бронхиальная астма и аллергодерматозы, а также так называемая "кобальтовая кардиомиопатия". Известны также случаи нарушения функции щитовидной железы (Емлин, 1991). Считается аллергеном и канцерогеном. Избыток кобальта может приводить к дефициту кальция в организме. В растениях избыток кобальта приводит к образованию на листьях омертвевших пятен (Ивлев, 1983; Сотников, 1997).

**Никель (Ni)** – необходимый для организма микроэлемент, в частности для регуляции обмена ДНК. Однако, его поступление в избыточных количествах может представлять опасность для здоровья. При повышенных концентрациях обычно проявляется в виде аллергических реакций (дерматит, ринит и пр.), анемии, повышенной возбудимости центральной и вегетативной нервной системы. Хроническая интоксикация никелем повышает риск развития новообразований в легких, почках, на коже (никель влияет на ДНК и РНК), а также приводит к бронхогенному раку, гипотонии, гастритам, патологическим изменениям печени, функциональным изменениям нервной системы. Гонадотоксичен, канцероген.

Список токсичных металлов и, соответственно, характер их воздействия на организм человека и животных можно увеличить, как минимум, вдвое (при

этом не включая радиоактивные металлы). Однако и приведенных выше (наиболее распространенных в рудах Прасоловского месторождения) вполне достаточно, чтобы убедиться в их экологической опасности.

Следует также отметить, что избыток (повышенные содержания) в организме одних металлов снижает метаболизм других, приводя к их дефициту. Недостаток же металлов в организме, равно как и чрезмерная их концентрация, также негативно сказывается на жизненно важных функциях, вызывая серьезные заболевания и патологические изменения. В подтверждение сказанного достаточно привести лишь один пример (из нескольких десятков). Так повышенные концентрации в организме Pb и (или) As, Cd, Hg приводят к уменьшению содержания селена. Вместе с тем, клиническими исследованиями установлено, что при дефиците в организме селена возникают такие изменения как: снижение иммунитета, повышение склонности к воспалительным заболеваниям, снижение функции печени, кардиопатия, болезни кожи, волос и ногтей, атеросклероз, катаракта, репродуктивная недостаточность, замедление роста, патология легких. Дефицит Se ускоряет развитие атеросклероза, ИБС, вероятность возникновения инфаркта миокарда. При недостатке селена возрастает вероятность мужского бесплодия. Кроме того, отмечена взаимосвязь между дефицитом селена и частотой внезапной “колыбельной” смерти у детей, а также выявлена зависимость между раком и дефицитом Se, особенно это относится к раку желудка, простаты, толстого кишечника, молочной железы. Инфаркт, инсульт, диабет, нарушение потенции, проницаемость и ломкость капилляров, выпадение волос, заболевания кожи – вот основные недуги, связанные с недостатком или отсутствием селена. Из-за недостаточности селена в организме не работают три основные защитные системы: антиоксидантная, которая спасает нас от излишков кислорода. Вторая система – система детоксикации (снятие действия токсинов, отравляющих веществ), и прежде всего печени. Она не может работать нормально, если в организме не хватает селена. И, наконец, иммунная система. Как только в организме становится мало селена, иммунные клетки, рождаясь, догоняют вредные вирусы, микробы, поглощают их, но не убивают, поскольку работают симулятивно, то есть вхолостую. Это и приводит к развитию тех заболеваний, о которых было сказано выше. В частности диабет – это болезнь недоокисления, которая развивается на фоне дефицита селена. Последний также крайне нужен и для профилактики и лечения онкологических заболеваний. Каждый день у нас из двух миллионов клеток одна становится раковой, поскольку теряет контроль над делением. Селен препятствует этому.

У животных из-за недостатка селена возникают десятки заболеваний, известна даже их цифра – 64. Основные среди них: так называемая беломышечная болезнь, некротическая дегенерация печени, экссудативный диатез.

Приведенные данные показывают, что степень воздействия токсичных металлов на организм, как минимум, в два раза выше, чем это принято обычно понимать. С одной стороны это непосредственная интоксикация и связанные с ней заболевания, с другой – снижение содержания других металлов и связанные с этим заболевания.

Таким образом, краткий обзор биохимического значения токсичных металлов с точки зрения влияния их на здоровье людей и животных показывает, что техногенные отвалы и хвостохранилища горнодобывающей промышленности представляют собой потенциальную и реальную экологическую угрозу.

## 5.2. Физико-химические преобразования руд в условиях гипергенеза

Очевидно, что степень токсического воздействия металлов на биосферу находится в прямой зависимости от их концентрации в воде, воздухе, почве и пище, а последняя (концентрация), соответственно, от скорости мобилизации токсичных металлов (т. е. их подвижности). Скорость же мобилизации токсичных металлов определяется как физической и химической устойчивостью содержащих их минеральных фаз, так и формой нахождения (собственные минералы, минеральные включения в других минералах или изоморфная примесь) их в рудах (Сахарова и др., 1994). Например, такой токсичный металл как теллур, находясь в минеральной фазе  $\text{TeO}_2$  (теллурид) и (или)  $\text{TeO}_3$  (теллурический ангидрид), где его содержание составляет 80 % и 73 % соответственно, характеризуется слабой подвижностью, поскольку данные минеральные фазы практически нерастворимы в воде, в кислотах и концентрированных щелочах. Вместе с тем, другая минеральная фаза теллура, например  $\text{Bi}_2\text{SeTe}_2$  (селенсодержащий теллурид висмута), в условиях гипергенеза легко растворяется в воде с образованием теллурида ( $\text{TeO}_2$ ) и ионов  $\text{Bi}^{+3}$ ,  $\text{BiO}^+$ ,  $\text{BiOH}^{+2}$ ,  $\text{HSeO}_3$ ,  $\text{HBiO}_2$ ,  $\text{HTeO}_3$ ,  $\text{TeO}_4^{-2}$ , что обуславливает высокую подвижность висмута, и селена, и теллура. Другой случай, когда содержание токсичных металлов в исходной минеральной фазе изначально невелико, но скорость мобилизации их высокая по сравнению с другими токсичными металлами, содержащимися в больших количествах, но в устойчивых минеральных фазах. Например, окисление (растворение) пирита приводит к мобилизации мышьяка, селена и теллура, изоморфно замещающих серу, а также кобальта и никеля, изоморфно замещающих железо (Емлин, 1991).

Естественно предположить, что при формировании рудных тел внутри массивов горных пород образуется изолированная равновесная система, где все химические элементы (в том числе и металлы, кроме самородных) находятся в связанной форме в виде минеральных образований, т.е. подвижность их крайне низка. Однако, при попадании руд в зону гипергенеза равновесие этой системы нарушается за счет взаимодействия их с атмосферой, водой, микроорганизмами и некоторыми другими окислителями, что приводит к резкому увеличению подвижности химических элементов.

### 5.2.1. Растворение гипогенных минералов

Первое чему подвергаются горные породы и минералы в зоне гипергенеза – это растворение и окисление. В результате взаимодействия минералов (как составных частей пород и руд) с природными водами происходит так называемое инконгруэнтное растворение (Зверев, 1997), в результате которого

часть твердой фазы переходит в раствор, а другая образует вторичные продукты. Под инконгруэнтным растворением понимается процесс многоступенчатого взаимодействия гипогенных минералов с водой, который начинается с активного взаимодействия ионов гидроксила ( $\text{OH}^-$ ) и водорода ( $\text{H}^+$ ) с поверхностными зонами минералов (Зверев, 1997; Яхонтова, Грудев, 1973, 1974). В результате смачивания, т.е. «прилипания» воды к поверхностям минералов, между ними возникают сильные молекулярные связи. Установлено, что при смачивании твердого тела водой в последней происходит разрыв водородных связей между молекулами с образованием ионов  $\text{H}^+$  и  $\text{OH}^-$  и возникают новые связи между этими ионами и поверхностью твердого тела (Поспелов, 1973).

Воздействие гидроксил-ионов и ионов водорода на кристаллическую решетку первичного минерала приводит к вытеснению ионами  $\text{H}^+$  и  $\text{OH}^-$  катионов металлов. Вследствие этого атомы металлов, находящиеся на поверхности раздела фаз (т.е. вода-минерал), переходят с поверхности кристаллической решетки в раствор или, пользуясь терминологией авторов электрохимического направления (Яхонтова, Грудев, 1974), происходит коррозия минерала. Образующиеся при этом вакансии в кристаллической решетке первичного минерала частично занимаются ионами водорода (Singer, Stamm, 1986). Они сохраняют электронейтральность кристаллической структуры, но так как ионы водорода очень малы относительно размеров катионов металлов, то в кристаллической решетке образуются пустоты, которые служат путями выноса находящихся в более глубоких частях кристаллической решетки других ионов металлов. Последние, диффундируя через эти пустотки, также переходят в водный раствор. В результате структура минерала становится еще менее прочной, что приводит к постепенному растворению минерала и поступлению продуктов его разрушения в раствор (Зверев, 1997). Процесс инконгруэнтного растворения протекает в две стадии (Карпов, 1981; Кашик, Карпов, 1988). Первая заключается в транспортировке ионов или молекул к поверхности кристалла с образованием новой минеральной фазы на границе раздела минерал – водный раствор. Вторая стадия включает вынос компонентов, не принимающих участие в этом новообразовании, и обогащение водного раствора катионами металлов первичного минерала.

Немаловажным фактором разрушения первичных минералов в зоне гипергенеза является также частая смена окислительно-восстановительного потенциала (Eh), т.е. изменение концентрации  $\text{H}^+$  и  $\text{OH}^-$  ионов в растворе (Луговская и др. 2003). Известно, что увеличение Eh приводит к окислению закисных форм металлов (т.е. повышению валентности металлов за счет отдачи электронов), а понижение Eh, соответственно, к восстановлению оксидов (т.е. понижению валентности металлов за счет присоединения электронов). Такое изменение валентностей элементов вызывает изменение радиуса ионов в кристаллической решетке минералов (за счет отдачи или присоединения электронов), что убыстряет ее разрушение (Копейкин, 1984).

Таким образом, первая стадия гипергенных преобразований в техногенных отвалах и хвостохранилищах характеризуется интенсивным растворени-

ем первичных минералов и экстрагированием из них рудогенных металлов. При этом часть катионов металлов, соединяясь с анионами гидроксила, осаждается в виде новообразованных минеральных фаз гидроксидов металлов, а другая переходит в водный раствор и выносится.

### 5.2.2. Окисление гипогенных минералов

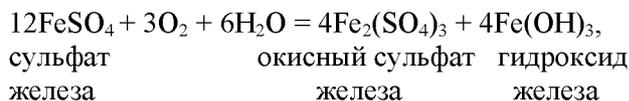
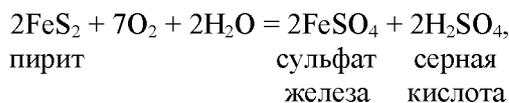
Растворение минералов в зоне гипергенеза не единственный и, вероятно, не самый главный механизм минерального преобразования первичных руд и выноса рудогенных компонентов, так как приповерхностная часть литосферы, кроме существенной обводненности, характеризуется еще и повышенной аэрацией. К тому же известно, что растворимость многих минералов в воде невелика (Смирнов, 1955). Следовательно, первичные минералы, кроме растворения, должны подвергаться также и окислению за счет кислорода воздуха. Однако, работами Ю.И. Коробова (1985) установлено, что окисление минералов, в частности сульфидов, кислородом воздуха возможны только при высоких температурах. Например, экспериментально установлено, что даже мелко измельченный порошок пирита ( $\text{FeS}_2$ ) начинает окисляться до сульфата только при температуре  $170^\circ \text{C}$ . Маловероятно, что подобная температура может возникать в горнотехнических отвалах и хвостохранилищах. В этой связи, многие исследователи признают, что процесс окисления минералов возможен только в водно-воздушной среде (Коробов, 1985). Поэтому следующей стадией гипергенных преобразований гипогенных пород и минералов является окисление их в водно-воздушных средах.

Многочисленные эксперименты по окислению минералов посредством воздействия кислородсодержащих водных растворов показывают, что они разлагаются на ряд простых соединений с высвобождением металлов, которые переходят в раствор в виде сульфатов, карбонатов, арсенатов, оксидов, гидроксидов и др. (Смирнов, 1955; Листова, Бондаренко, 1969; Авдонин, 1984; Постникова, Яхонтова, 1984; Лазарева, Сиденко, 2003; Макаров, Павлов, 2003 и др.). При этом авторы многочисленных публикаций по экспериментированию, а также изучению минеральных преобразований в зоне гипергенеза выделяют несколько механизмов окисления гипогенных образований, которые могут быть представлены в виде гидрогеохимической, электрохимической и биогенной моделей окисления гипогенных минералов.

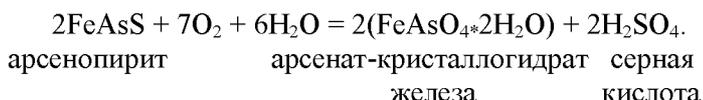
#### 5.2.2.1. Гидрогеохимическая модель окисления гипогенных минералов

Основная суть данной модели заключается в том, что в результате инфильтрации (т.е. просачивании) атмосферных осадков, обогащенных растворенным в них кислородом и углекислым газом воздуха, в приповерхностных частях литосферы начинают протекать химические реакции, приводящие к перераспределению элементов и преобразованию первичного минерального состава слагающих эту зону горных пород или техногенных отвалов. Главная роль,

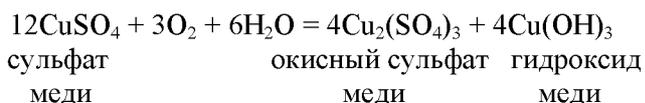
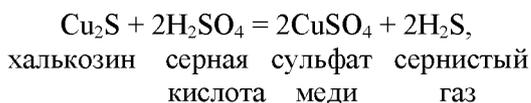
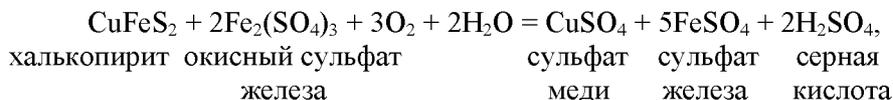
при этом, отводится кислороду, как одному из главных окислителей. В частности, в результате взаимодействия растворенного в воде кислорода с сульфидами образуются сульфаты (реже арсенаты), серная кислота и гидроксиды (Емлин, 1991; Тарасенко, Зиньков, 2001 и др.). Уравнение реакции, например, для пирита выглядит следующим образом:



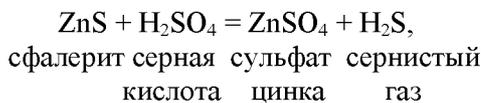
а для арсенопирита:

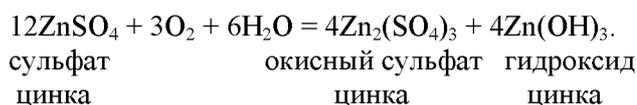


Из приведенного примера видно, что в результате окисления пирита образуется два новых сильных окислителя – окисный сульфат железа и серная кислота. Аналогичным образом образуются сульфаты других металлов и серная кислота при окислении разнообразных сульфидов. Вновь образованные окислители, совместно с кислородом и водой, проникая в более нижние горизонты, усиливают и ускоряют процесс дальнейшего преобразования гипогенных пород и минералов и вынос металлов. Например, комплексное воздействие указанных выше реагентов на сульфиды меди и цинка приводит к образованию сульфатов, окисных сульфатов и гидроксидов этих металлов и новых количеств серной кислоты.



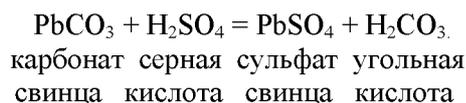
или





Таким образом, процесс окисления пород и минералов представляется следующим образом. Сначала, под действием воды и кислорода, происходит образование сульфатов, арсенатов, карбонатов, силикатов и т.д., а также гидроксидов различных металлов и кислот. При этом часть новообразованных химических соединений (хорошо растворимые сульфаты, карбонаты и гидроксиды металлов) выносятся раствором, а другая часть осаждается в виде новых минеральных фаз, которые продолжают участвовать в окислении либо как окисляемые, либо как окислители. В дальнейшем, по мере увеличения в исходном растворе содержания кислот, к процессу окисления добавляется еще и кислотное выщелачивание, что приводит к резкому увеличению выноса в раствор всех халькофильных и большинства литофильных элементов.

Приведенный выше механизм является лишь принципиальной схемой реальных процессов. В действительности же протекающие в условиях гипергенеза химические реакции гораздо сложнее и многообразнее, что обуславливается целым рядом дополнительных факторов как-то: исходный состав руд и вмещающих их горных пород, их структурно-текстурная характеристика, тектоника района, реагентная способность новообразованных химических соединений, сезонные колебания температуры, влажности и многие другие. В частности, экспериментально доказано (Листова, Бондаренко, 1969; Gas'kova, Kolonin, 1995; Тарасенко, Зиньков, 2001), что наличие в гипогенных породах карбоната существенно способствует разложению сульфидов при повышенной кислотности природных вод ( $\text{pH} < 5$ ) и, напротив, замедляет, вплоть до полного прекращения реакций, в нормальных и щелочных условиях. Например, растворение галенита и сфалерита протекает намного интенсивнее в присутствии кальцита, в результате чего образуются карбонаты свинца и цинка, а кальций выносятся в раствор. При последующем взаимодействии карбонатов металлов с серной кислотой, образовавшейся в результате окисления сульфидов, образуются новые окислители – угольная кислота и сульфаты, которые, как отмечалось выше, обладают хорошей растворимостью и свободно выносятся потоками инфильтрующихся атмосферных осадков.



Таким образом, гидрогеохимическое окисление и растворение в водно-воздушных средах являются важными механизмами минерального преобразования первичных руд и выноса токсичных металлов.

### 5.2.2.2. Электрохимическая модель окисления гипогенных минералов

В основу данного механизма преобразования первичного минерального состава пород и руд положено понятие о природных микрогальванических элементах, внутренней цепью которых служат окружающие рудные минералы ионные растворы, а внешней – сами рудные минералы (Свешников, 1967; Рысс, Воронин, 1971; Макаров и др., 1999 и др.). При этом считается, что возникновение стационарного естественного электрического поля обусловлено вертикальной зональностью зоны гипергенеза. Верхняя часть этой зоны, будучи в окислительных условиях за счет растворенного в воде кислорода, является анодом, а нижняя, располагающаяся в восстановительной среде, соответственно, катодом. Таким образом, и рудные минералы, находящиеся в приповерхностных частях горных отвалов или хвостохранилищ, играют роль анода, а расположенные на более глубоких уровнях – катода. Естественно, что дальнейший процесс рассматривается как электрохимическое взаимодействие между минералами-полупроводниками и раствором-электролитом. На аноде в раствор поступают катионы металлов, в связи с чем в растворе создается избыток положительного заряда. На катоде же, наоборот, происходит восстановление металлов и раствор заряжается отрицательно. В результате возникает электрическое поле, под воздействием которого катионы металлов начинают мигрировать от «плюса» к «минусу», при этом часть их выносятся природными водными растворами в окружающую среду.

Существует и другая точка зрения электрохимического направления. Представители ее (Яхонтова, Грудев, 1966; 1973; 1974) считают, что процессы, происходящие в зоне гипергенеза, обусловлены не столько возникновением гальванических пар, сколько проявлениями гальванического эффекта на границе электрод (рудный минерал) – электролит (омывающий рудные минералы ионный раствор). Суть этого эффекта заключается в анодном растворении рудных минералов (т.е. отдаче ими и, соответственно, захвате электролитом, электронов), которое протекает по схеме:

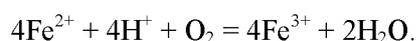


где  $\text{Me}^0$  – металл,  $\text{Me}^{n+}$  - катион металла и  $n\text{e}^-$  - электроны.

Другими словами, процессы окислительно-восстановительных реакций разрушения рудных минералов осуществляются не за счет протекающего тока, а вследствие «коррозии» металлов. Этот механизм представляется следующим образом. Окружающий минерал ионный раствор отбирает у металлов, входящих в его кристаллическую решетку, электроны. В результате связь металлов с атомами других элементов данного минерала ослабевает и металлы в виде катионов поступают в раствор. По мере выноса катионов металлов из минерала происходит его разрушение (или коррозия), а раствор обогащается продуктами разрушения минерала в виде катионов и анионов.

### 5.2.2.3. Биогенное окисления гипогенных минералов

Кроме химического окисления горных пород и минералов в зоне гипергенеза в последнее время большое значение придается также и биологическому фактору и, в частности, микроорганизмам. Еще в середине прошлого столетия в дренажных водах одного из сульфидных месторождений были выделены анаэробные бактерии *Thiobacillus ferroxidans* (Colmer, Hinkle, 1947), которые, как в последствии выяснилось, способны окислять железо и восстановленные соединения серы для получения необходимой для своей жизнедеятельности энергии. К настоящему времени список таких бактерий намного шире. Однако, механизм бактериологического окисления рудных минералов пока еще недостаточно ясен. Предполагается, что воздействие бактерий на процесс окисления осуществляется как прямым путем, так и косвенным. Одни исследователи (Полькин и др., 1982) считают, что при прямом воздействии клетка бактерии выступает в роли акцептора электронов, т.е. микроорганизм служит живым катодом, а рудный минерал анодом. Процесс окисления, например железа, запиывается следующей реакцией (Емлин, 1991):



По представлениям других (Яхонтова и др., 1994) взаимодействие минералов и микроорганизмов осуществляется по принципу донорно-акцепторной связи, когда минерал выступает в роли донора, а микроорганизм – акцептора.

Косвенное участие бактерий в окислении рудных минералов проявляется в повышении окислительного потенциала раствора, окружающего минералы, например за счет регенерации оксид сульфатов с образованием и, соответственно, увеличением концентрации в растворе дополнительных окислителей.

Экспериментально установлено (Taylor, Wheeler, 1984), что бактерии ускоряют процесс окисления рудных минералов на шесть порядков. Л.К. Яхонтова и Л.Г. Нестерович (1983) отмечают, что при химическом окислении сульфидов концентрация в растворе, например,  $\text{Fe}^{3+}$  достигает 0,3 г/л, а за тоже время, но при участии бактерий *Thiobacillus ferroxidans* концентрация повышается до 4 г/л. Это обусловлено высокой биопродуктивностью бактерий и неприхотливостью их к условиям обитания. Они могут существовать и размножаться при очень низких рН (до 0,5) и высокой минерализации растворов (до 300 г/л). Концентрация, например тиобацилловых бактерий, составляет  $10^5$ - $10^8$  клеток на 1 мл раствора. Их количество удваивается каждые 20-30 минут, а за сутки одна особь дает 60-70 поколений.

Таким образом, как видно из приведенного выше краткого обзора, горные породы и минералы в условиях гипергенеза претерпевают существенные минеральные преобразования, окисляясь, растворяясь и разлагаясь на более простые химические соединения. Не вдаваясь в дискуссию какой из описанных механизмов более определяющий, важно отметить то, что в результате их совокупного действия из горнотехнических отвалов и хвостохранилищ дренажными водами в

окружающую среду выносятся большое количество токсичных металлов, создающих серьезную угрозу экологического состояния прилегающих территорий.

### **5.2.3. Компьютерное моделирование физико-химического преобразования рудных минералов Прасоловского месторождения в условиях гипергенеза**

В целях качественной и относительной количественной оценки вероятного экологического загрязнения площади района Прасоловского месторождения нами было выполнено моделирование физико-химических процессов минерального преобразования для наиболее распространенных рудных минералов с помощью программного продукта «Селектор-Windows» (адаптированная для операционных систем Windows версия продукта «Селектор-С», разработчики И.К. Карпов, К.В. Чудненко, В.А. Бычинский). В основу компьютерного моделирования природного минералообразования и, в частности, минералообразования, происходящего в результате химических реакций в системе вода (раствор) – горная порода (минерал), положены представления об изменении свободной энергии Гиббса ( $\Delta G$ ) и стремлении ее к минимуму (Карпов и др., 1976; Карпов, 1981). Энергия Гиббса ( $\Delta G$ ) – термодинамическая функция состояния системы, являющаяся критерием ее равновесности и направленности процесса реакций и которая определяется изменениями изобарно-изотермического потенциала (т.е. интегральными функциям энтальпии –  $H$ , энтропии –  $S$  и температуры –  $T$ ). Поэтому при термодинамических расчетах химических реакций минералообразования обычно используют предварительно рассчитанные значения изменения стандартного изобарно-изотермического потенциала образования химического соединения путем реакции из простых веществ. Программа «Селектор-Windows» не рассчитывает реакции, а находит глобальный минимум того или иного термодинамического потенциала, т.е. минимум функции свободной энергии Гиббса и вычисляет, на этой основе, минеральный парагенезис. При этом метод минимизации энергии Гиббса подразумевает как равновесие водного раствора с его компонентами и минералами, выпадающими из него, так и равновесие раствора и выпадающих из него минералов с первичной породой (минералом).

Таким образом, не вдаваясь в детали методического и математического описания принципа минимизации  $\Delta G$ , следует отметить, что с помощью программы «Селектор-Windows» можно выяснить некоторые физико-химические особенности необратимых процессов минерального преобразования, в том числе и в условиях гипергенеза.

При моделировании процессов гипергенного преобразования руд Прасоловского месторождения были рассмотрены два варианта задач – поведение отдельного минерала во взаимодействии с природными водами, а также их совокупности, с целью определения потенциальной токсической опасности конкретного минерала и, соответственно, их естественной ассоциации. При этом в каждом варианте были смоделированы по две системы – приповерхностная (резервуар 1), включающая природную воду, приведенную в равновесие с атмос-

ферой + минерал (группа минералов) и более глубинная (резервуар 2), состоящая из просачивающегося из первой системы раствора, обедненного растворенным кислородом, но обогащенного различными ионами + минерал (группа минералов). Для всех моделей были выбраны единые термо-барометрические условия –  $T = 25^{\circ}\text{C}$  и  $P = 1$  атм.

Результаты моделирования показывают (см. табл. 5-1 – 5-20 приложения 2), что в обоих вариантах (будь то один минерал или минеральная ассоциация) наибольшую экологическую опасность представляет первая (т.е. приповерхностная) система, в которой, в результате окислительных процессов и растворения, в водный раствор поступает наибольшее количество токсичных металлов. Так при окислении сульфидов, например 1 моля\* кадмийсодержащего сфалерита ( $97 \text{ г Zn}_{0,96}\text{Cu}_{0,01}\text{Cd}_{0,01}\text{S}_{1,03}$ ) в 1 т воды, приведенной в равновесие с атмосферой, данный минерал полностью растворяется (табл. 5-1 приложения 2) с образованием 258,76 г новой минеральной фазы  $\text{ZnSO}_4(\text{H}_2\text{O})_6$  (бианкит). При этом часть исходного минерала в виде катионов  $\text{Cd}^{+2}$ ,  $\text{CdO}$ ,  $\text{CdOH}^+$ ,  $\text{Cu}^{+2}$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{CuOH}^+$  и анионов  $\text{HSO}_4^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$  переходит в раствор, pH которого снижается до 4,0078 за счет высокой концентрации анионов серной кислоты (6,7259 мг/кг  $\text{H}_2\text{O}$  или мг/литр воды). Количество ионов кадмия и меди в образовавшемся растворе составляет соответственно 1,125 и 0,635 мг/литр воды. Принимая во внимание предельно-допустимые концентрации этих элементов ( $\text{Cd}^{+2} - 0,005$ , а  $\text{Cu}^{+2} - 0,01$  мг/литр воды, Емлин, 1991) можно заключить, что при растворении одного моля сфалерита концентрация упомянутых элементов превышает ПДК для рыбохозяйственных водоемов, соответственно, в 225 и 63,7 раз. При растворении сфалерита, не содержащего изоморфных примесей других металлов (табл. 5-2 приложения 2) также образуется новая минеральная фаза  $\text{ZnSO}_4(\text{H}_2\text{O})_6$  (бианкит), а pH раствора снижается до 5,6737.

Взаимодействие 1 моля галенита (239,27 г  $\text{PbS}$ ) с 1 т воды, находящейся в равновесии с воздухом, приводит к образованию 265,40 г англезита ( $\text{PbSO}_4$ ) и обогащению раствора катионами  $\text{Pb}^{+2}$ ,  $\text{PbOH}^+$ ,  $\text{PbO}$  и анионами  $\text{HPbO}_2^-$ ,  $\text{HSO}_4^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ , суммарная концентрация которых составляет 38,004 мг/литр воды (табл. 5-3 приложения 2). При этом pH раствора снижается до 5,0549. Наибольшее количество ионов в растворе представлено  $\text{Pb}^{+2}$  (24,116 мг/литр воды) и  $\text{PbOH}^+$  (1,896 мг/литр воды). Таким образом, результаты данной модели показывают, что концентрация всего лишь одного катиона  $\text{Pb}^{+2}$ , не считая других ионов, в 24116 раз превышает ПДК (см. табл. 5-21 приложения 2).

Следует подчеркнуть, что результаты моделирования, по крайней мере в части новообразованной минеральной фазы (т.е. англезита), подтверждаются как непосредственными микроскопическими исследованиями (при изучении руд установлено широкое развитие англезита по галениту, см. Гл. 3), так и данными рентгеноструктурных анализов вторичных минералов из зоны окисления (рис.

\* - Молярное количество химически чистого вещества, масса которого, выраженный в граммах, численно совпадает с его молекулярным весом (Карпов и др., 1976).

5-2; табл. 5-22 приложения 2), которые фиксируют присутствие англезита среди окисленных руд.

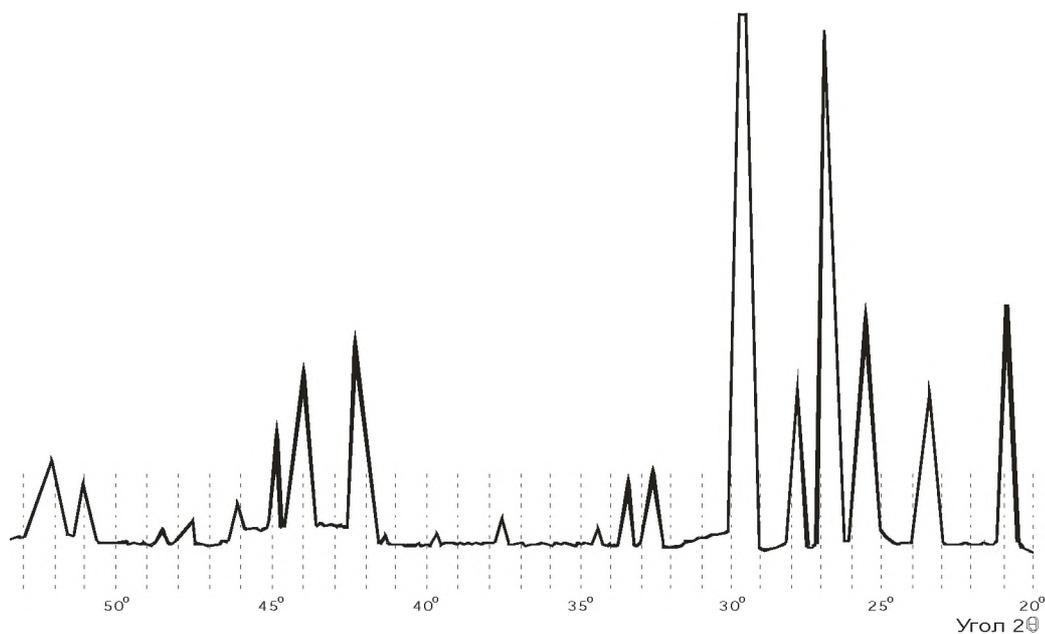


Рис. 5-2. Рентгенограмма англезита из зоны окисления Прасоловского месторождения

Аналогичным образом в условиях гипергенеза ведут себя и другие сульфиды. В частности при растворении пирита (табл. 5-4 приложения 2) образуется новоминеральная фаза гематит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), а в раствор переходят следующие ионы  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{FeO}^+$ ,  $\text{FeOH}^{+2}$ ,  $\text{HFeO}_2$ ,  $\text{HSO}_4^-$ ,  $\text{SO}_4^{+2}$ . При этом суммарная концентрация ионов железа для одного моля исходного вещества составляет 0,0244 мг/л, а серной кислоты - 192,56 мг/л, что приводит к понижению pH раствора до величины 2,4769. При растворении халькопирита (табл. 5-5 приложения 2) чуть менее половины его также образует новую минеральную фазу – гематит, а раствор, кроме ионов железа и серной кислоты, обогащается еще и ионами меди:  $\text{Cu}^{+2}$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{CuOH}^+$ . Суммарная концентрация образовавшихся ионов (в мг/л) следующая: железа 0,005, меди 63,550, а серной кислоты 192,374. pH раствора, при этом, снижается до 2,7797, что характерно для сильноокислых растворов.

Еще больше ионов токсичных металлов (как в количественном, так и в качественном отношении) продуцируют в водный раствор теллуриды и селениды. Например, компьютерное моделирование процесса окисления 1 моля теллуроселенида свинца и висмута (т.е. 652 г минеральной фазы  $\text{Ag}_{0,3}\text{Cu}_{0,7}\text{Pb}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{As}_{0,5}\text{Sb}_{0,48}\text{Te}_{0,02}\text{Se}_3\text{S}_{1,0}$ ) в 1 тонне воды, приведенной в равновесие с атмосферой, показывает (табл. 5-6 приложения 2), что в результате такого взаимодействия образуется 114,38 г  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  (бисмит), 140,67 г  $\text{PbSO}_4$  (ан-

глезит) и 80,87 г  $\text{Sb}_2\text{O}_5$  (оксид сурьмы). Остальная часть данного минерального образования (примерно половина) переходит в раствор в виде таких ионов как:  $\text{AgCO}_3^-$ ,  $\text{Ag}^+$ ,  $\text{AgNO}_3$ ,  $\text{AgOH}$ ,  $\text{AsO}_4^{3-}$ ,  $\text{Bi}^{+3}$ ,  $\text{BiO}^+$ ,  $\text{BiO}_2^-$ ,  $\text{BiOH}^{+2}$ ,  $\text{Cu}^+$ ,  $\text{Cu}^{+2}$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{CuOH}^+$ ,  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ ,  $\text{HSeO}_3$ ,  $\text{H}_3\text{AsO}_4$ ,  $\text{HAsO}_4^{-2}$ ,  $\text{HBiO}_2$ ,  $\text{HSO}_4^-$ ,  $\text{HSeO}_4^-$ ,  $\text{Pb}^{+2}$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{PbOH}^+$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{SeO}_4^{-2}$ , суммарная концентрация которых составляет 610,26 мг/литр воды. При этом около 2/3 их количества составляют анионы сelenистой, селеновой, мышьяковой и серной кислот, что обуславливает увеличение кислотности образующегося раствора ( $\text{pH} = 4,1323$ ). Максимальные концентрации ионов токсичных металлов приходится (мг/литр) на  $\text{Cu}^{+2}$  (44,479),  $\text{Pb}^{+2}$  (7,432),  $\text{BiO}^+$  (1,726 или 1,61 в пересчете на  $\text{Bi}^{+3}$ ),  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  (69,38 или 37,46 в пересчете на  $\text{As}^{3+}$ ),  $\text{HSeO}_3$  (383,92 или 238,03 в пересчете на  $\text{Se}^{+6}$ ). Учитывая нормы допустимых концентраций (табл. 5-21 приложения 2) видно, что по меди превышение ПДК составляет в 4447,9 раза, по свинцу – 7432 раза, по висмуту – 3,22 раза, по мышьяку – 749 раз, а по селену в 238030 раз.

Моделирование процессов гипергенного преобразования других селенидов (клаусталита, науманита и клокманита) показывает, что при их растворении (см. табл. 5-7 – 5-9 приложения 2) в новоминеральные фазы связывается лишь незначительная часть свинца и меди с образованием платтнерита ( $\text{PbO}_2$ ) и малахита ( $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$ ). Большая же часть упомянутых минералов (а науманит полностью) растворяется природными водами, продуцируя в раствор ионы токсичных металлов. Для клаусталита это  $\text{HSeO}_3$ ,  $\text{HSeO}_4^-$ ,  $\text{SeO}_4^{-2}$  (суммарная концентрация которых составляет 127,972 мг/л),  $\text{Pb}^{+2}$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{PbOH}^+$ ,  $\text{HPbO}_2^-$  (3,831 мг/л). Для науманита –  $\text{HSeO}_3$ ,  $\text{HSeO}_4^-$ ,  $\text{SeO}_4^{-2}$  (127,97 мг/л),  $\text{AgCO}_3^-$ ,  $\text{Ag}^+$ ,  $\text{AgNO}_3$ ,  $\text{AgOH}$  (339,70 мг/л),  $\text{HSO}_4^-$  (142,27 мг/л), а для клокманита –  $\text{Cu}^+$ ,  $\text{Cu}^{+2}$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{CuOH}^+$ ,  $\text{HCuO}_2^-$  (12,499 мг/л),  $\text{HPbO}_2^-$ ,  $\text{Pb}^{+2}$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{PbOH}^+$  (4,167 мг/л),  $\text{HSeO}_4^-$ ,  $\text{HSeO}_3$ ,  $\text{SeO}_4^{-2}$  (120,29 мг/л) и  $\text{SO}_4^{-2}$  и  $\text{HSO}_4^-$  (21,136 мг/л).

Аналогичным образом ведут себя и теллуриды. Так при окислении 1 моля алтаита (334,8 г  $\text{PbTe}$ ) в 1 т воды, приведенной в равновесие с атмосферой, данный минерал полностью растворяется с образованием новых минеральных фаз в виде 235,04 г  $\text{PbO}_2$  (платтнерит) и 159,60 г  $\text{TeO}_2$  (теллурит). При этом раствор обогащается ионами  $\text{HPbO}_2^-$ ,  $\text{Pb}^{+2}$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{PbOH}^+$ , суммарная концентрация которых достигает 3,82 мг/литр воды (см. табл. 5-10 приложения 2), что в пересчете на  $\text{Pb}^{+2}$  составляет 3,59 мг/литр. Это означает, что концентрация ионов свинца в растворе, образующемся при растворении алтаита, превышает ПДК в 3590 раз. О достоверности результатов моделирования можно судить как по данным минералогического изучения руд месторождения (как правило теллурит, который согласно данным моделирования является новообразованной минеральной фазой, обычно наблюдается в ассоциации с минералами группы теллуридов, образуя выделения петлеобразной и прожилковой формы, а также каемки замещения, что указывает на более позднее его происхождение, см. Гл. 3), так и по данным рентгеноструктурных анализов вторичных минералов из зоны окисления (рис. 5-3; табл. 5-23 приложения 2), которые показывают присутствие этого минерала среди окисленных руд.

При растворении других теллуридов (таких как селеносодержащий теллу-

рид висмута –  $\text{Bi}_2\text{SeTe}_2$  и селенистый теллур –  $\text{Te}_3\text{Se}_4$ ) образованные ново-минеральные фазы представлены бисмитом ( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ) и теллуридом ( $\text{TeO}_2$ ), которые составляют примерно половину от объема исходных минералов. Вторая половина переходит в раствор (табл. 5-11 и 5-12 приложения 2) в виде ионов  $\text{Bi}^{+3}$ ,  $\text{BiO}^+$ ,  $\text{BiO}_2^-$ ,  $\text{BiOH}^{+2}$ ,  $\text{HBiO}_2$ ,  $\text{HSeO}_3$ ,  $\text{HSeO}_4^-$ ,  $\text{SeO}_4^{-2}$ . При этом, концентрация, например,  $\text{HSeO}_3$  в селенотеллуре достигает 511,904 мг/л. В пересчете на чистый селен это составит 317,381 мг/л, что в 317381 раз превышает ПДК.

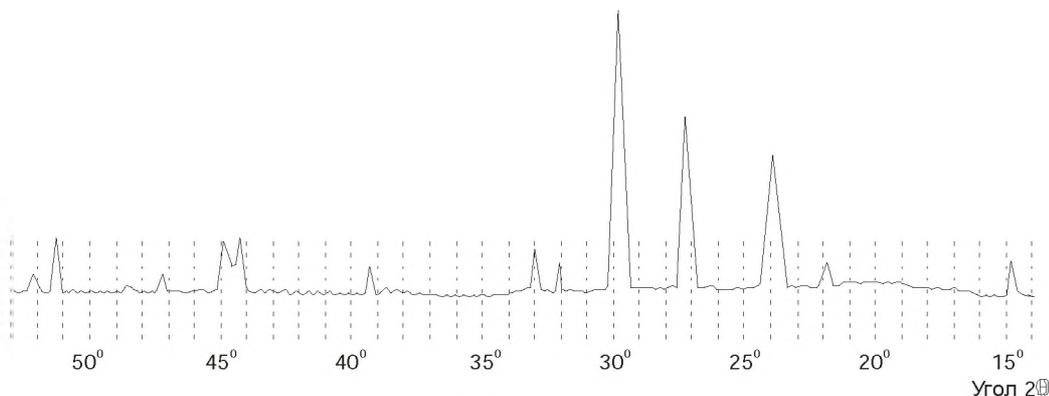


Рис. 5-3. Рентгенограмма теллурида из зоны окисления Прасоловского месторождения

К сожалению, в базах данных программы «Селектор-Windows» на сегодняшний день заложены термодинамические данные еще не для всех химических соединений. В частности, таковые отсутствуют для водных растворов теллура, в связи с чем программа переводит весь теллур в твердую (новоминеральную) фазу. Однако, учитывая то, что теллур является геохимическим двойником селена, можно предположить, что часть его все-таки переходит в раствор в виде анионов теллуристой и теллуровой кислот ( $\text{HTeO}_3$ ,  $\text{HTeO}_4^-$  и  $\text{TeO}_4^{-2}$ ), как переходит в раствор Se (см. табл. 5-7 приложения 2) при окислении клаусталита ( $\text{PbSe}$ ). В подтверждение сказанного можно привести данные В.В.Щербиной по геохимическому изучению минералов зоны вторичного сульфидного обогащения ряда месторождений уральской зоны (Щербина, 1937). Несмотря на значительные концентрации теллура в первичных рудах, он практически отсутствует в гипергенных минералах, что объясняется его выносом теллура в виде теллуристой или теллуровой кислот (т.е.  $\text{TeO}_3^{-2}$  и  $\text{TeO}_4^{-2}$  или даже  $\text{TeO}_6^{-2}$ ).

Сульфосоли и, в частности, наиболее распространенная их группа блеклые руды, являются самыми опасными в экологическом отношении рудными минералами месторождения (Кемкина, Севериненко, 2006<sub>a</sub>). Например, при окислении 1 моля висмутсодержащего теннантита – мышьяковистой блеклой руды (т.е.  $1635,14 \text{ г } (\text{Cu}_{11,1}\text{Ag}_{0,1}\text{Zn}_{0,2}\text{Fe}_{0,3}\text{Pb}_{0,3}\text{As}_{2,2}\text{Sb}_{1,5}\text{Bi}_{0,3}\text{S}_{13})$ ) в 1 тонне воды, приведенной в равновесие с атмосферой, данный минерал полностью растворяется в воде с образованием новых минеральных фаз (табл. 5-13 приложения 2), представлен-

ных  $\text{Bi}_2(\text{SO}_4)_3$  (сульфат висмута) – 105,92 г,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (гематит) – 23,95 г,  $\text{PbSO}_4$  (англезит) – 90,18 г,  $\text{Sb}_2\text{O}_5$  (оксид сурьмы) – 242,62 г и  $\text{ZnSO}_4(\text{H}_2\text{O})_6$  (бианкит) – 53,91 г. Оставшаяся часть этого минерала (1118,56 г) переходит в раствор в виде таких ионов металлов как  $\text{AgCO}_3^-$ ,  $\text{Ag}^+$ ,  $\text{AgNO}_3$ ,  $\text{AgOH}$ ,  $\text{AsO}_4^{3-}$ ,  $\text{Bi}^{3+}$ ,  $\text{BiO}^+$ ,  $\text{BiOH}^{+2}$ ,  $\text{Cu}^+$ ,  $\text{Cu}^{+2}$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{CuOH}^+$ ,  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{FeO}^+$ ,  $\text{FeOH}^{+2}$ ,  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ ,  $\text{H}_3\text{AsO}_4$ ,  $\text{HAsO}_4^{-2}$ ,  $\text{HBiO}_2$ ,  $\text{HFeO}_2$ ,  $\text{HSO}_4^-$ ,  $\text{Pb}^{+2}$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{PbOH}^+$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ , суммарная концентрация которых составляет 2233,60 мг/л воды. При этом наибольшие значения приходятся на ионы (в мг/литр воды)  $\text{Cu}^{+2}$  (705,45),  $\text{Ag}^+$  (4,382),  $\text{AgNO}_3$  (10,09),  $\text{Pb}^{+2}$  (0,544), а также анионы мышьяковой и серной кислот –  $\text{H}_3\text{AsO}_4$  (75,60 мг/л),  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  (235,01 мг/л),  $\text{HSO}_4^-$  (142,27 мг/л) и  $\text{SO}_4^{-2}$  (1017,20 мг/л), что приводит к увеличению кислотности раствора, pH которого понижается до 2,7271 (сильнокислый раствор). Очевидно, что в образовавшемся растворе концентрация ионов меди превышает ПДК в 70545 раз, серебра в 245, свинца в 544, мышьяка 3293.

При моделировании процесса растворения селенсодержащего теннантита ( $\text{Cu}_{10,38}\text{Ag}_{0,15}\text{Zn}_{0,87}\text{Pb}_{0,01}\text{Sb}_{0,50}\text{As}_{3,49}\text{S}_{13,42}\text{Se}_{0,17}$ ) новообразованные минеральные фазы представлены  $\text{PbSO}_4$  (англезит),  $\text{Sb}_2\text{O}_5$  (оксид сурьмы) и  $\text{ZnSO}_4(\text{H}_2\text{O})_6$  (бианкит), а состав поступающих в раствор ионов токсичных металлов аналогичен предыдущей модели за исключением того, что вместо ионов висмута раствор обогащается ионами селена (табл. 5-14 приложения 2), суммарная концентрация которых достигает 22 мг/л. Следует также отметить, что в данной модели концентрация ионов мышьяка почти в два раза превышает таковую в предыдущей, а соответственно выше предельно допустимой нормы в 5460 раз.

Моделирование процесса окисления 1 моля селенсодержащего тетраэдрита (т.е.  $1595,926 \text{ г } [\text{Cu}^{+}_{10,00}(\text{Cu}^{+2}_{0,94}\text{Zn}_{0,29}\text{Fe}_{0,21})_{1,44}]_{11,44}(\text{Sb}_{2,44}\text{As}_{1,40})_{3,84}(\text{S}_{13,12}\text{Se}_{0,60})_{13,72}$  – сурьмянистая блеклая руда), в 1 тонне воды, находящейся в равновесии с воздухом, показывает, что данный минерал преобразуется в новые минеральные фазы, а именно – 78,17 г  $\text{ZnSO}_4(\text{H}_2\text{O})_6$  (бианкит), 394,67 г  $\text{Sb}_2\text{O}_5$  (оксид сурьмы) и 16,75 г  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (гематит), а водный раствор обогащается следующими ионами:  $\text{AsO}_4^{3-}$ ,  $\text{Cu}^+$ ,  $\text{Cu}^{+2}$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{CuOH}^+$ ,  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{FeO}^+$ ,  $\text{FeOH}^{+2}$ ,  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ ,  $\text{HSeO}_3$ ,  $\text{H}_3\text{AsO}_4$ ,  $\text{HAsO}_4^{-2}$ ,  $\text{HFeO}_2$ ,  $\text{HSO}_4^-$ ,  $\text{HSeO}_4^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$  и  $\text{SeO}_4^{-2}$ , суммарная концентрация которых составляет 2204,47 мг/л воды. При этом, наибольшие значения приходятся на катионы  $\text{Cu}^{+2}$  (695,29 мг/л) и селенистую ( $\text{HSeO}_3 = 76,79$  мг/л), мышьяковую ( $\text{H}_2\text{AsO}_4^- + \text{H}_3\text{AsO}_4 = 197,75$  мг/л) и серную ( $\text{HSO}_4^- + \text{SO}_4^{-2} = 1234,61$  мг/л) кислоты, что приводит к образованию сильнокислого раствора (pH = 2,5993) (табл. 5-15 приложения 2). Таким образом, в данном растворе концентрация ионов токсичных металлов превышает предельно-допустимые нормы: по меди в 69529 раз, по селену – 47609, а по мышьяку – 2096. Аналогичная картина наблюдается и при растворении висмутсодержащего тетраэдрита (табл. 5-16 приложения 2).

Если посмотреть результаты компьютерного моделирования взаимодействия новообразованных минеральных фаз с водяно-воздушной смесью (табл. 5-17 - 5-19 приложения 2), то можно видеть, что эти фазы также полностью или частично растворяются, увеличивая в водном растворе концентрацию ионов токсичных металлов и анионов серной кислоты. Например, при

окислении 1 моля англезита ( $303,26 \text{ г PbSO}_4$ ) в 1 т воды, приведенной в равновесие с атмосферой,  $37,41 \text{ г}$  данного минерала переходит в раствор в виде ионов  $\text{HPbO}_2^-$ ,  $\text{HSO}_4^-$ ,  $\text{Pb}^{+2}$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{PbOH}^+$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ , суммарная концентрация которых составляет  $37,99 \text{ мг/л}$  (табл. 5-17 приложения 2). Из них  $25,30 \text{ мг/л}$  приходится на  $\text{Pb}^{+2}$  и  $\text{PbOH}^+$ , что в пересчете на  $\text{Pb}^{+2}$  составляет  $25,21 \text{ мг/л}$ , т.е. в 25210 раз превышает ПДК.

Моделирование процесса окисления 1 моля окисного сульфата висмута (т.е.  $706,15 \text{ г Bi}_2(\text{SO}_4)_3$ ) в 1 тонне воды, также находящейся в равновесии с атмосферой, показывает, что незначительная его часть образует новую минеральную фазу – бисмит ( $13,68 \text{ г Bi}_2\text{O}_3$ ) и небольшая часть ( $15,63 \text{ г}$ ) переходит в раствор, обогащая его такими ионами, как  $\text{Bi}^{+3}$ ,  $\text{BiO}^+$ ,  $\text{BiO}_2^-$ ,  $\text{BiOH}^{+2}$ ,  $\text{HBiO}_2$ ,  $\text{HSO}_4^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ . При этом концентрация ионов висмута составляет  $5,48 \text{ мг/л}$  (табл. 5-18 приложения 2), что в пересчете на  $\text{Bi}^{+2}$  составляет  $5,04 \text{ мг/л}$ , превышая ПДК немногим более чем в 10 раз.

Таким образом, результаты компьютерного моделирования гипергенного преобразования наиболее распространенных рудных минералов Прасоловского месторождения убедительно показывают потенциальную экологическую опасность каждого из них (Кемкина, Севериненко, 2006<sub>б</sub>). Однако степень токсического воздействия на окружающую среду возрастает на несколько порядков, если окислению и растворению подвергается не отдельный минерал, а вся их естественная ассоциация. Ярким подтверждением этому могут служить данные моделирования одновременного процесса окисления всех вышеперечисленных рудных минералов и новообразованных минеральных фаз, взятых в количестве по 1 молю каждый, в 1 тонне воды, уравновешенной с атмосферой (табл. 5-20 приложения 2, резервуар 1). В результате такого взаимодействия чуть более половины исходной минеральной смеси (порядка 55 % из  $11282 \text{ г}$ ) преобразуется во вторичные минералы – окисный сульфат висмута ( $2108,92 \text{ г Bi}_2(\text{SO}_4)_3$ ), гематит ( $229,15 \text{ г Fe}_2\text{O}_3$ ), англезит ( $1831,51 \text{ г PbSO}_4$ ), бианкит ( $1261,47 \text{ г ZnSO}_4(\text{H}_2\text{O})_6$ ), оксид сурьмы ( $1365,15 \text{ г Sb}_2\text{O}_5$ ) и хлораргирит ( $143,25 \text{ г AgCl}$ ). Оставшаяся часть переходит в раствор в виде различных ионов (рис. 5-4), суммарная концентрация которых составляет  $10291,74 \text{ мг/л}$  воды. В химическом отношении это  $\text{AgCO}_3^-$ ,  $\text{Ag}^+$ ,  $\text{AgCl}$ ,  $\text{AgCl}_2^-$ ,  $\text{AgNO}_3$ ,  $\text{AgOH}$ ,  $\text{AsO}_4^{-3}$ ,  $\text{Bi}^{+3}$ ,  $\text{BiO}^+$ ,  $\text{BiOH}^{+2}$ ,  $\text{Cd}^{+2}$ ,  $\text{CdCl}^+$ ,  $\text{CdCl}_2$ ,  $\text{CdOH}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Cu}^+$ ,  $\text{Cu}^{+2}$ ,  $\text{CuCl}^+$ ,  $\text{CuCl}_2$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{CuOH}^+$ ,  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{FeCl}^{+2}$ ,  $\text{FeO}^+$ ,  $\text{FeOH}^{+2}$ ,  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ ,  $\text{HSeO}_3$ ,  $\text{H}_3\text{AsO}_4$ ,  $\text{HAsO}_4^{-2}$ ,  $\text{HBiO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HFeO}_2$ ,  $\text{HSO}_4^-$ ,  $\text{HSeO}_4^-$ ,  $\text{Pb}^{+2}$ ,  $\text{PbCl}^+$ ,  $\text{PbCl}_2$ ,  $\text{PbOH}^+$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{SeO}_4^{-2}$ . Из них наибольшие количества приходятся (в мг/л) на  $\text{Ag}^+$  ( $130,28$ ),  $\text{AgNO}_3$  ( $224,96$ ),  $\text{Cd}^{+2}$  ( $1,13$ ),  $\text{Cu}^{+2}$  ( $2951,41$ ),  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  ( $920,02$ ),  $\text{HSeO}_3$  ( $1074,59$ ),  $\text{H}_3\text{AsO}_4$  ( $324,77$ ),  $\text{HSO}_4^-$  ( $612,65$ ),  $\text{Pb}^{+2}$  ( $0,14$ ) и  $\text{SO}_4^{-2}$  ( $4012,23$ ). Из этого следует, что концентрации ионов токсичных металлов, таких как  $\text{Ag}^+$ ,  $\text{Cd}^{+2}$ ,  $\text{Cu}^{+2}$  и  $\text{Pb}^{+2}$  превышают ПДК соответственно в 2606, 226, 295141 и 140 раз, а ионов мышьяка и селена в пересчете на  $\text{As}^{+3}$  и  $\text{Se}^{+6}$  соответственно в 13195 и 666246 раз (рис. 5-5). При этом отметим, что в расчет данной модели не включены теллуриды и теллур-содержащие минералы по оговоренным выше причинам, из чего следует, что в действительности состав и концентрация токсичных металлов будет еще выше.

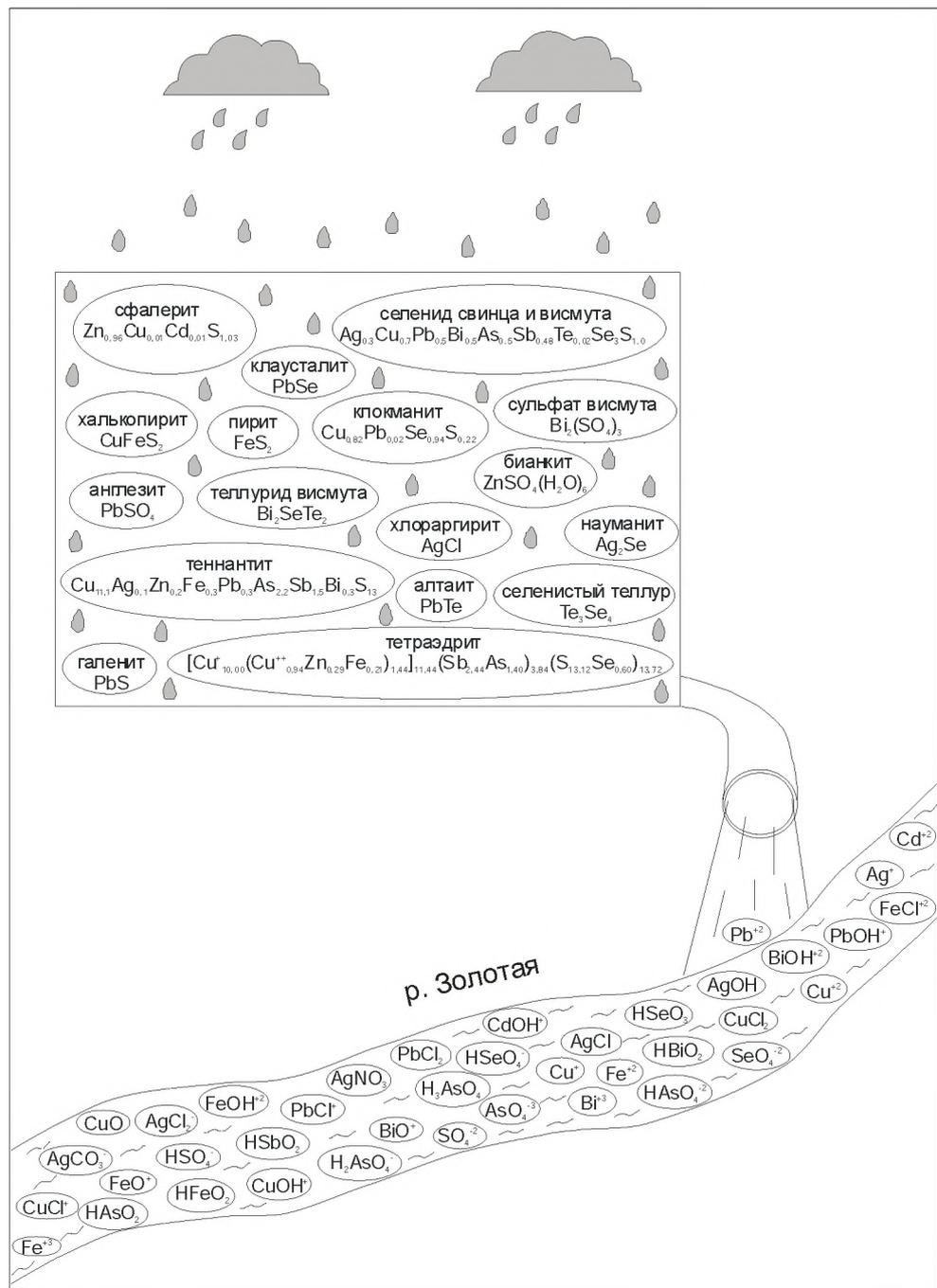


Рис. 5-4. Состав ионов токсичных металлов дренажных вод, согласно данным компьютерного моделирования гипергенного преобразования рудных минералов Прасоловского месторождения

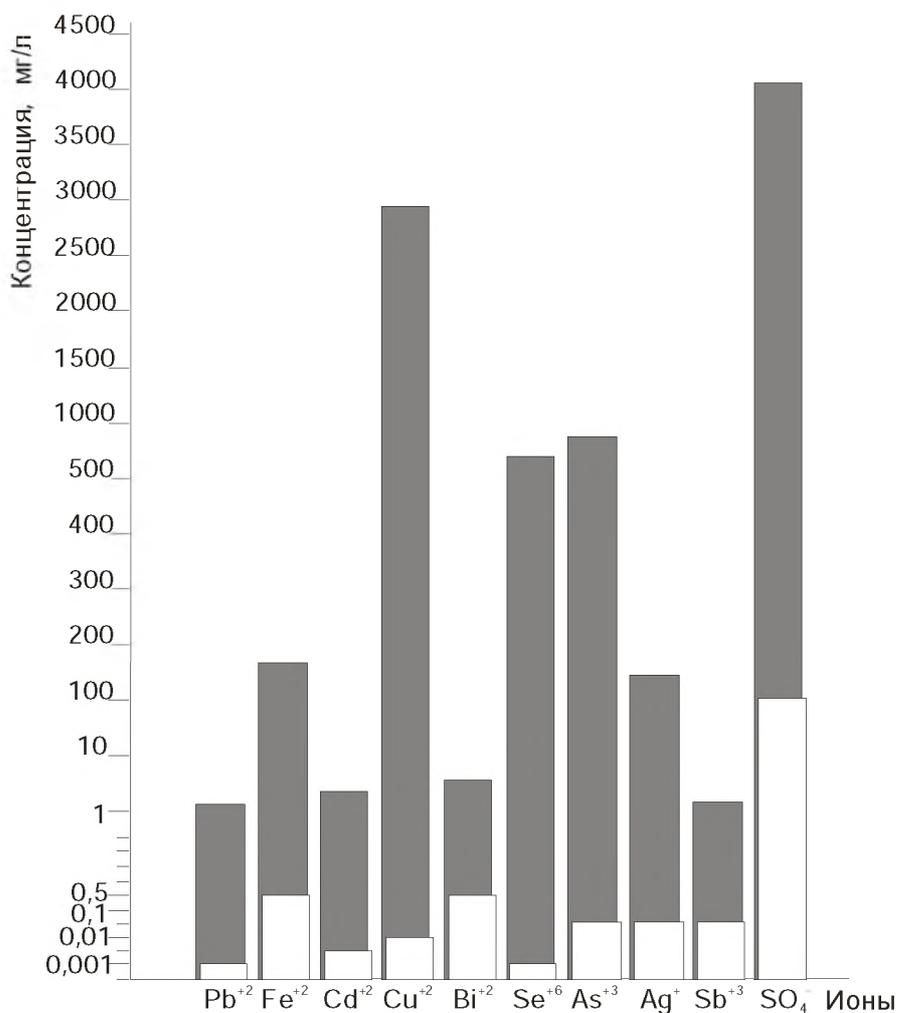


Рис. 5-5. Соотношение концентраций токсичных элементов  
Белым цветом показаны ПДК, серым – концентрация по результатам моделирования.

Вполне естественно и то, что высокие концентрации анионов селенистой, мышьяковой и серной кислот приводят к понижению рН раствора до 2,6939, превращая его, по сути, в сильноокислый раствор. Заметим попутно, что ПДК для сульфатов (в частности для  $SO_4^{2-}$ ) составляет 100 мг/л (табл. 5-21 приложения 2), т.е. концентрация анионов серной кислоты превышает допустимую норму более чем в 40 раз.

Перечисленные выше минералы, но из более глубинного уровня, взаимодействуя с насыщенным ионами водным раствором, поступающим из приповерхностной зоны, также подвергаются растворению и окислению, добавляя к уже имеющимся в растворе ионам токсичных металлов новые их формы, такие

как  $\text{AgCl}_3^{2-}$ ,  $\text{AsO}_2^-$ ,  $\text{HSbO}_2$ ,  $\text{SbO}_2^-$ ,  $\text{HAsO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{PbCl}_3^-$ ,  $\text{PbCl}_4^{2-}$ ,  $\text{CdCl}_3^-$ ,  $\text{CdCl}_4^{2-}$ ,  $\text{CuCl}$ ,  $\text{CuCl}_2^-$ ,  $\text{CuCl}_3^-$ ,  $\text{CuCl}_3^{2-}$  (табл. 5-20 приложения 2, резервуар 2). При этом концентрации некоторых из них достигают высоких значений. Среди них  $\text{HSbO}_2$  и  $\text{HAsO}_2$ , количества которых составляют, соответственно, 1,81 мг/л (или в пересчете на  $\text{Sb}^{+3}$  – 1,41 мг/л), т.е. более чем в 28 раз выше ПДК и 1164,1 мг/л, что в пересчете на  $\text{As}^{+3}$  в 16300 раз выше ПДК (рис. 5-5). Кроме того, во втором резервуаре отмечается резкое увеличение концентрации  $\text{Fe}^{+2}$  (в 321 раз выше ПДК),  $\text{Cd}^{+2}$  (в 436 раз),  $\text{PbCl}_3^+$  (в пересчете на  $\text{Pb}^{+2}$  в 1216 раз) и  $\text{HSO}_4^-$  (в 33 раза).

Таким образом, согласно результатам компьютерного моделирования, наибольшую экологическую опасность представляют рудные минералы, извлеченные на поверхность и складированные в виде горнотехнических отвалов или хвостохранилищ.

Естественно, что при разработке моделей для компьютерного моделирования гипергенного преобразования рудных минералов невозможно учесть всех обстоятельств, влияющих на направленность и скорость химических реакций, которые, в конечном счете, определяют какие элементы, и в каких количествах, будут выноситься дренажными водами. Например, такой маленький нюанс как количество и состав промывочной жидкости, которой пропитывается рудная масса при забурировании шпуров при проходке горных выработок или технические жидкости (масла), утекающие из горного оборудования (и те и другие могут выступать либо в роли катализатора некоторых химических реакций, либо, наоборот, буферировать их). Поэтому, приведенные выше данные являются лишь первым приближением в оценке реальной геохимической картины, призванные показать качественную и, с некоторой долей условности, количественную сторону потенциальной экологической угрозы извлеченного на поверхность, но не востребованного рудного вещества. А то, что загрязнение окружающей среды в местах сосредоточения хвостохранилищ и горнотехнических отвалов токсичными металлами и их соединениями имеет место, подтверждается многочисленными исследованиями по экологическому состоянию в различных горно-рудных районах.

#### **5.2.4. Примеры загрязнения окружающей среды токсичными элементами некоторыми предприятиями горнодобывающей промышленности**

Согласно отчетам геоэкологических исследований Беянина В.И., Казовского Г.Л., Чучалина Л.К. за 1998-1999 г.г. (Божедомова, 2005) по загрязняющему (отравляющему) воздействию на окружающую среду горнодобывающей промышленности в Восточно-Казахстанской области Республики Казахстан отмечено, что наибольший ущерб при обработке полиметаллических месторождений, рудные минералы которых содержат такие металлы как  $\text{Cu}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Mn}$ ,  $\text{Ag}$ ,  $\text{Ba}$ ,  $\text{Au}$ ,  $\text{Cd}$ ,  $\text{As}$ ,  $\text{Sb}$ ,  $\text{Tl}$ ,  $\text{Hg}$ ,  $\text{Se}$  и др., наносится поверхностными (дренажными) и подземными (рудничными) водами. В зоне окисления сульфидных месторождений в условиях гумидного климата происходит окисление сульфидов и вынос токсичных элементов этими водами в окружающую среду. В

настоящее время на территории этой области имеется 10 законсервированных объектов – предприятий горнодобывающей промышленности, на которых прекращена производственная деятельность, но оставшиеся на предприятиях бесхозными шахты, рудники, карьеры, отвалы, хвостохранилища, накопители и др. продолжают оказывать негативное воздействие на окружающую среду.

В частности, данные отчетов показывают, что только за 1998 год из Березовского рудника в р. Красноярка с шахтными водами поступило 92 тонны цинка. Нанесенный окружающей среде ущерб оценивается в 404 млн. тенге. На момент проведения геоэкологических исследований загрязнение р. Красноярка остротоксичными металлами составляло: по цинку до 1000 ПДК (для рыбохозяйственного водоема), по меди- 12,5 ПДК, по кадмию -32 ПДК. Аналогичная ситуация отмечается и на руднике Чекмарь, отработка которого была начата карьерным способом в начале 80<sup>-х</sup> годов в пределах ранее пройденных разведочных штолен. Отвалы пород и некондиционных руд этих горных выработок складированы неподалеку от карьера на правом борту долины р. Уба (приток р. Иртыш). Несмотря на то, что еще в начале 90<sup>-х</sup> годов работы на карьере были прекращены, а рудник законсервирован, до настоящего времени из нарабатанных техногенных образований происходит вынос снеготалыми и дождевыми водами токсичных металлов (меди, цинка, свинца, мышьяка, кадмия, железа), которые с дренажными водами попадают в р. Уба. Замеры в ручьях, впадающих в р. Уба, показывают, что реакция воды в них от слабо щелочной (рН = 7,6) в 1989 году изменилась до сильно кислой (рН = 3,17) в 1992 году, а содержание токсичных металлов существенно возросло, а именно, меди от 14 до 1410 ПДК, железа до 35,8 ПДК, кадмия до 20,4 ПДК, цинка до 4216 ПДК.

Близким экологическим состоянием характеризуется и Тишинский рудник. Отсыпка отходов здесь производилась в период с 1967 по 1977 год без специальной подготовки основания на галечно-валунные отложения долины реки Ульбы. По данным геохимического опробования на 1997 г. в дренажных водах этих отвалов среднее годовичное содержание загрязняющих веществ составляло (в мг/л): меди – 3, свинца – 0,03, цинка – 158, кадмия – 1, марганца – 90. При этом, валовой сброс загрязняющих веществ в р. Ульба с Тишинского рудника составлял (в т/год): меди – 9, свинца – 0,09, цинка – 480, кадмия – 3, железа – 5, марганца – 272. За 1998 г. дренажными водами из отвалов Тишинского и, расположенного рядом, Шубинского рудников в р. Ульба поступило (в т/год): меди – 15,8, цинка – 395, марганца – 107,5, кадмия – 1,2, свинца – 0,75.

В результате загрязнения окружающей среды токсичными металлами из техногенных образований вышеуказанных горнодобывающих предприятий в регионе сложилась неблагоприятная экологическая обстановка, которая оказывает значительное влияние на состояние здоровья населения. В области самый высокий по Казахстану показатель заболеваемости новообразованиями. Продолжается негативная тенденция снижения естественного прироста населения.

Сходная ситуация выявлена и для ряда оловянно-полиметаллических и полиметаллических месторождений Приморского края. Например, в Дальнегорском рудном районе в настоящее время имеется несколько хвосто- и шламохра-

нилищ, в которых сосредоточены соответственно большие объемы некондиционных руд, представленных отвалами «пустых пород» с низкими концентрациями добываемых рудных элементов и отходы обогащения руд, содержащие большое количество применяемых при этом процессе компонентов – ксантогенаты, фенолы, цианистые соединения, керосин, сосновое масло, жидкое стекло и др. Согласно данным В.П. Зверевой (Зверева, Кравченко, 2003) дренажные воды этих техногенных образований содержат повышенные количества токсичных металлов и веществ (мг/л): железа – 0,33, цинка – 0,07, свинца – 0,06, меди – 0,101, магния – 3,49, мышьяка – 0,15, а также цианитов – 0,04 и ксантогенатов – 0,68.

В Краснореченском рудном узле на базе месторождений Южное и Смирновское в начале 1950<sup>х</sup> годов была построена обогатительная фабрика (КОФ) с расположенным в 1 км от нее хвостохранилищем (так называемое «старое» хвостохранилище). Заполнялось оно с 1956 по 1972 годы. В течение этого периода в нем накоплены большие количества токсичных металлов, как то As, Pb, Cd, Zn, Co, V, Ni, Cu, Cr и др. За время существования хвостохранилища атмосферные воды, взаимодействуя с рудными минералами, превращаясь в растворы и инфильтруясь сквозь эфельные пески, образовали «кровоавое озеро». В ходе недавно проведенных И.А. Тарасенко (Тарасенко, Зиньков, 2001) исследований по выяснению особенностей гипергенного преобразования рудных минералов в пределах рассматриваемого хвостохранилища установлено, что дренажные воды обогащены следующими химическими элементами (в мг/л): As – 0,225, P – 0,026, Ca<sup>+2</sup> – 121,95, Mg<sup>+2</sup> – 67,78, Na<sup>+</sup> – 11,29, K<sup>+</sup> – 6,17, Fe – 7,568, Al – 4,02, Zn – 0,249, Mn – 6,841, Cu – 0,0135, Pb – 0,018, Cd – 0,00344, SO<sub>4</sub> – 382,5. В то же время, в водах «кровоавого озера» содержания перечисленных элементов на порядки выше: As – 5,04, P – 2,34, Ca<sup>+2</sup> – 472, Mg<sup>+2</sup> – 913, Na<sup>+</sup> – 9,93, K<sup>+</sup> – 4,86, Fe – 3398, Al – 1232,9, Zn – 659,9, Mn – 4192,9, Cu – 2,214, Pb – 0,42, Cd – 2,552, SO<sub>4</sub> – 27393,2. Из «кровоавого озера» сточные воды поступают в левый приток реки Рудной, вдоль которой расположен ряд населенных пунктов, в том числе и районный центр г. Дальнегорск.

В результате комплексного загрязнения окружающей среды токсичными металлами в Дальнегорском районе обозначилась серьезная угроза здоровью проживающего здесь населения. Это подтверждается результатами медико-экологического исследования – наиболее характерными заболеваниями здесь являются болезни периферической нервной системы, органов дыхания, сердечно-сосудистой системы и др. (Зверева, Кравченко, 2003).

Перечень примеров о негативном влиянии дренажных и рудничных вод техногенных образований горно-промышленных предприятий на окружающую среду может быть увеличен многократно. В частности, имеются данные о составе сточных вод золоторудного месторождения Богунай (юг Красноярского края), медных месторождений Урала (Гайское и др.), апатито-нефелиновых месторождений Хибин и т. д. (Сотников, 1997; Зверева, 2005; Калабин, 2000; Ивашов, 1996 и др.). Однако и приведенная информация убедительно свидетельствует о серьезной экологической опасности, возникающей при отработке

месторождений полезных ископаемых, если не сопровождать ее соответствующим комплексом природоохранных работ.

\*\*\*

Суммируя вышеизложенное можно заключить, что руды Прасоловского месторождения будучи извлеченными на поверхность будут представлять собой серьезную экологическую опасность для окружающей среды, что подтверждается также и данными Б.Г. Саксина (2002) по прогнозно-экологической оценке основных золотодобывающих районов Дальнего Востока. Убедительным доказательством этого являются результаты компьютерного моделирования физико-химического преобразования рудных минералов в условиях гипергенеза (т.е. повышенной обводненности и аэрации), а также данные геоэкологических исследований в районах сосредоточения горнодобывающих и горноперерабатывающих предприятий. При окислении и растворении низкокондиционной рудной массы в горно-технических отвалах и хвостохранилищах часть ее преобразуется в новые минеральные формы, формируя так называемые руды вторичного обогащения. Другая часть (примерно половина, согласно результатам моделирования) перейдет в раствор и с дренажными водами проникнет в местную гидросеть, обусловив в ней высокие концентрации токсичных элементов. Попадая с растворами или в виде коллоидных частиц в водоемы, токсичные металлы включаются в трофические цепи от планктона до зообентоса и свободно плавающих организмов (Бортникова, 2001), создавая тем самым серьезную экологическую угрозу биосфере. При этом, наибольшую опасность представляют ионные и комплексные формы тяжелых металлов. Потенциальными поллютантами руд Прасоловского месторождения, согласно данным моделирования, являются  $\text{AgCO}_3^-$ ,  $\text{Ag}^+$ ,  $\text{AgCl}$ ,  $\text{AgCl}_2^-$ ,  $\text{AgNO}_3$ ,  $\text{AgOH}$ ,  $\text{AsO}_4^{-3}$ ,  $\text{Bi}^{+3}$ ,  $\text{BiO}^+$ ,  $\text{BiOH}^{+2}$ ,  $\text{Cd}^{+2}$ ,  $\text{CdOH}^+$ ,  $\text{Cu}^+$ ,  $\text{Cu}^{+2}$ ,  $\text{CuCl}^+$ ,  $\text{CuCl}_2$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{CuOH}^+$ ,  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{FeCl}^{+2}$ ,  $\text{FeO}^+$ ,  $\text{FeOH}^{+2}$ ,  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ ,  $\text{HSeO}_3$ ,  $\text{H}_3\text{AsO}_4$ ,  $\text{HAsO}_2$ ,  $\text{HAsO}_4^{-2}$ ,  $\text{HBiO}_2$ ,  $\text{HFeO}_2$ ,  $\text{HSO}_4^-$ ,  $\text{HSbO}_2$ ,  $\text{HSeO}_4^-$ ,  $\text{Pb}^{+2}$ ,  $\text{PbCl}^+$ ,  $\text{PbCl}_2$ ,  $\text{PbOH}^+$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{SeO}_4^{-2}$ . При этом следует учесть, что выше перечисленные токсичные элементы будут загрязнять окружающую среду не только в форме ионов, поступающих с растворами, но и в виде мельчайшей механической примеси (пылевидные частички в воздухе и тонкодисперсные минеральные обломки в воде).

Для более наглядной иллюстрации степени потенциальной экологической угрозы окружающей среде рудами Прасоловского месторождения можно рассчитать примерное количество каждого из токсичных металлов, которое поступит в результате самопроизвольной миграции из техногенных тел в гидросеть района за год. Например, содержание  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ , согласно данным моделирования, составляет 920,02 мг/л или 0,920 кг/т воды. Если принять в среднем площадь хвостохранилища 60000 м<sup>2</sup> (200x300 м) при условии, что среднегодовая норма осадков на о. Кунашир составляет 1000-1300 мм, то количество воды, выпавшей на эту площадь равняется 60000 т. Соответственно количество  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ , вынесенное этим объемом воды будет составлять порядка 55,2 т. В пересчете на чистый мышьяк это составит 29,26 т (в соединении  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  мышьяк составляет 53

%). Аналогичным образом можно рассчитать прогнозируемые количества и остальных токсичных элементов, которые поступят в гидросеть в течение года (табл. 5-24).

Таблица 5-24

**Прогнозируемые количества токсичных элементов (кг/год)**

Элеметы	Pb	Fe	Cd	Cu	Bi	Se	As	Sb	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Количество	81	9630	130	177085	302	39972	48945	85	240734

Следует учесть, что эти количества образуются при растворении всего лишь 1 моля рудных минералов. Чтобы получить истинные цифры, необходимо эти количества умножить на содержания этих элементов в рудах и на объем рудного вещества.

В соответствии с вышеизложенным, а также учитывая, что дорогостоящие работы по рекультивации хвостохранилищ, очищению почв, водоемов и т.д. неприменимы в России в обозримом будущем, в целях охраны окружающей среды при отработке Прасоловского месторождения можно предложить два возможных варианта. Это либо полное комплексное извлечение всех рудных элементов, что на сегодняшний день при существующих технологиях и оборудовании достаточно сложно. Либо планирование грамотного складирования и хранения рудно-породной массы в специально подготовленные изолированные хвостохранилища, где процессы растворения, миграции и переотложения металлов будут находиться под контролем. В этом отношении весьма привлекательной является схема, предложенная С.Б. Бортниковой (2001). Суть ее кратко заключается в следующем. Днище укладывается материалом, способным легко и надежно осаждать металлы из раствора и нейтрализовать кислоты (например, известняк). Далее складировается некондиционная рудная масса, которая переслаивается породой для разрыхления вещества и предотвращения застойных явлений. Верхняя часть хвостохранилища засыпается пиритовым концентратом (либо другими сульфидами) для увеличения кислотности раствора, который при просачивании вниз будет ускорять процесс окисления и растворения рудных минералов. На карбонатном барьере находящиеся в растворе ионы металлов будут переотлагаться, формируя вторичные рудные тела, которые по прошествии определенного времени (по мере их накопления) будут служить дополнительным источником минерального сырья. Избыточная вода сбрасывается через контролируемые скважины в нейтрализующие и собирающие металлы фильтры. Таким образом, токсичные элементы превращаются в полезные компоненты, а из хвостохранилищ вытекает чистая вода. Естественно, что приведенная выше схема экологической реабилитации при хранении техногенных отходов не является единственно возможной. Для каждого конкретного месторождения должна разрабатываться собственная такая схема, учитывающая особенности минерального и вещественного состава руд, геолого-геофизического строения района, а также физико-географические и экономические условия.

## Заключение

Подводя итог вещественно-минералогического изучения руд Прасоловского месторождения, выполненного в целях выяснения их потенциальной экотоксичной опасности воздействия на окружающую среду, при условии введения данного месторождения в промышленное освоение, ссумируем полученные авторами основные научно-практические результаты.

Установлено, что руды Прасоловского месторождения характеризуются большим разнообразием рудных минералов. Последние представлены, как самородными формами, так и теллуридами, селенидами, сульфидами и сульфосолями различных металлов (в большинстве своем токсичных), наиболее распространенными из которых являются Au, Ag, Pb, Cu, Zn, Bi, Te, Se, As, Sb, Cd, In и др. Для многих из этих минералов выделено несколько генераций, что свидетельствует о многостадийности процесса рудообразования. Часть минералов, такие как идаит, рокезит, клокманит, мутманнит и виттихенит, впервые описаны на данном месторождении. Кроме того, в рудах Прасоловского месторождения выделены новые минеральные фазы, не описанные еще в литературе ( $\text{Cu}_3\text{S}_2$ ,  $(\text{CuZn})\text{S}$ ,  $\text{CuZn}_2\text{S}_4$ ,  $\text{AgS}$ ,  $\text{Au}(\text{Ag,Cu})_4(\text{Te,S})_2$ ,  $(\text{Ag,Cu})(\text{Pb,Bi})(\text{Te,As,Sb})(\text{Se,S})_{4,0}$ ,  $(\text{Ag,Cu,Pb,Bi})_5\text{Te}_2(\text{Se,S})_6$ ,  $\text{AuAgTe}$ ,  $(\text{Ag,Cu})_2(\text{Te,S})$ ,  $(\text{Cu,Ag})_2\text{TeS}_2$ ), но также содержащие большое количество токсичных металлов.

Выполненные рентгеноспектральные анализы рудных минералов позволили выяснить особенности их химического состава, на основе чего были рассчитаны кристаллохимические формулы минералов, что дало возможность определить как количества, так и формы вхождения различных токсичных элементов в их кристаллические структуры (собственная минеральная или изоморфная). Собственно минеральными формами вхождения токсичных элементов являются: для Se – клаусталит, клокманит, науманит; для Te – самородный теллур, гессит, петцит, сивьянит, теллуриды золота и серебра, штютцит, калаверит, креннерит, мутманнит, курилит, алтаит, селенистый теллур и некоторые вновь выделенные минеральные фазы; для Cu – халькопирит, борнит, рокезит, идаит, халькозин, ковеллин, клокманит; для As и Sb – блеклые руды и прустит; для Bi – виттихенит, селенсодержащий теллурид висмута; для Pb – галенит; для Zn – сфалерит. Соответственно изоморфными формами вхождения этих элементов являются: для Se и Cu – самородные металлы, сульфосоли, теллуриды, сульфиды; для Te – селениды, самородные металлы, сульфосоли; для As и Sb – самородные металлы, сульфиды, селениды, теллуриды; для Bi и Pb – сульфосоли, селениды; для Zn – самородные металлы, сульфосоли; для Cd – сульфиды.

Выявлено, что по разнообразию и количеству токсичных металлов наибольшую экологическую опасность среди руд Прасоловского месторождения представляют сульфосоли и, главным образом, наиболее распространенная их группа – блеклые руды, которые широко представлены на месторождении (30-40 % от всех рудных минералов, в зависимости от минерального типа руд).

По соотношению основных минералообразующих компонентов блеклые руды подразделены на несколько минеральных видов и разновидностей. На ос-

нове анализа распределения их в различных минеральных типах руд выявлена последовательность кристаллизации и определены минеральные парагенезисы для каждого конкретного вида и разновидности. По совокупности этих данных установлено, что блеклые руды тесно ассоциируют или находятся во взаимном сростании с большинством рудных минералов месторождения, включающих сульфиды, теллуриды, селениды, а также самородные металлы. Из этого следует, что при добыче и обогащении золотосеребряных руд (а они и составляют промышленную ценность Прасоловского месторождения) вся совокупность рудных минералов, содержащих в разных количествах токсичные элементы, попадет в горнотехнические отвалы, либо, в лучшем случае, в хвостохранилища.

Согласно данным компьютерного моделирования физико-химического преобразования рудных минералов Прасоловского месторождения в условиях гипергенеза (т.е. повышенной обводненности и аэрации) убедительно показано, что будучи извлеченной на поверхность низкокондиционная рудная масса будет представлять собой серьезную экологическую опасность для окружающей среды. При окислении и растворении этой массы в горнотехнических отвалах и хвостохранилищах часть ее преобразуется в новые минеральные формы, формируя так называемые руды вторичного обогащения. Другая часть (примерно половина, согласно результатам моделирования) перейдет в раствор и с дренажными водами проникнет в местную гидросеть, обусловив в ней высокие концентрации токсичных элементов, создавая тем самым экологическую угрозу биосфере. Определено, что наибольшую опасность будут представлять ионные и комплексные формы тяжелых металлов, главными поллютантами из которых являются  $\text{AsO}_4^{-3}$ ,  $\text{Bi}^{+3}$ ,  $\text{BiO}^+$ ,  $\text{BiOH}^{+2}$ ,  $\text{Cd}^{+2}$ ,  $\text{CdOH}^+$ ,  $\text{Cu}^+$ ,  $\text{Cu}^{+2}$ ,  $\text{CuCl}^+$ ,  $\text{CuCl}_2$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{CuOH}^+$ ,  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{FeCl}^{+2}$ ,  $\text{FeO}^+$ ,  $\text{FeOH}^{+2}$ ,  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ ,  $\text{HSeO}_3$ ,  $\text{H}_3\text{AsO}_4$ ,  $\text{HAsO}_2$ ,  $\text{HAsO}_4^-$ ,  $\text{HBiO}_2$ ,  $\text{HFeO}_2$ ,  $\text{HSO}_4^-$ ,  $\text{HSbO}_2$ ,  $\text{HSeO}_4^-$ ,  $\text{Pb}^{+2}$ ,  $\text{PbCl}^+$ ,  $\text{PbCl}_2$ ,  $\text{PbOH}^+$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{SeO}_4^{-2}$ .

В целях разработки охранных мероприятий по защите окружающей среды при отработке Прасоловского месторождения предложено два варианта: либо комплексное извлечение всех рудных элементов, либо планирование грамотного складирования и хранения рудно-породной массы в специально подготовленные изолированные хвостохранилища, где процессы растворения, миграции и перетложения токсичных элементов будут находиться под контролем.

Актуальность проблемы потенциального загрязнения токсичными металлами прилегающей к Прасоловскому месторождению территории обуславливается еще и тем, что оно соседствует с государственным природным заповедником "Курильский". Флора заповедника и его охранных зон насчитывает (Неведомская, Еременко, 2000; Иванова и др. 2001) 835 видов высших растений, относящихся к 443 родам и 126 семействам, что составляет 78 % от общего числа видов во флоре о-ва Кунашир и около 60 % – во флоре Курильских островов в целом. Из них в Красную Книгу МСОП занесены 44 вида растений и грибов, которые являются глобально редкими и находятся на грани исчезновения. Среди представителей фауны наиболее богатой является орнитофауна острова, которая насчитывает более 260 видов 18 отрядов. Кроме того, здесь обитают виды лососевых рыб, свойственные Охотскому морю. В пресноводных водоемах острова

встречаются 22 вида рыб (горбуша, кета, сима, сахалинский таймень, красноперка, мальма, корюшка-зубатка, корюшка малоротная, колюшки, камбала речная и др.). Гидросеть о. Кунашир представляет собой ядро нереста лососевых, где сосредоточена большая часть естественных нерестовых площадей острова. Следует также отметить, что заповедник обеспечивает исполнение обязательств России по международным договорам – Конвенции по охране мигрирующих птиц между Россией и Японией и Конвенции по сохранению биоразнообразия.

Вместе с тем, с 1999 года в долине одной из основных нерестовых рек – р. Северянка (район Прасоловского месторождения) акционерным обществом "Курильская горно-геологическая компания" началось создание горно-химического комплекса по добыче и переработке золотоносной руды. В ближайшее время на побережье Охотского моря на траверзе мыса Сиретоко планируется постройка золото-обогатительной фабрики. Обогащение будет производиться методом цианирования. Ядовитые стоки от обогащения руды совместно с токсичными металлами дренажных вод техногенных отвалов неминуемо попадут в море. Рыбодобывающей отрасли будет нанесен ущерб, размеры которого трудно даже представить, потому, что состояние прибрежных вод Кунашира оказывает влияние на обитателей суши всех Курильских островов, Камчатки и Хоккайдо. После разработки открытого карьера в долине ручья Удачный будет уничтожена одна из самых богатых и продуктивных рек острова, здесь подвергнутся разрушению и заиливанию основные нерестилища лосося, будут уничтожены гнёзда птиц, занесенных в Красные книги, превратятся в свалки и будут обезображены склоны и долины, вырублены древние водоохранные леса первой группы.

## ЛИТЕРАТУРА

- Авдонин В.Н.* Техногенное окисление сульфидов Красногвардейского месторождения на Урале // *Материалы по минералогии месторождений Урала*. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1984. С. 63-69.
- Андреевко В.С., Бородаев Ю.С., Щибрик В.И.* Неоднородность состава блеклых руд месторождения Жайрем // *Известия АН СССР. Серия геол.* 1974. № 7. С. 89-94.
- Белов Н.В.* Очерки по структурной минералогии // *III Минерал. сб.* Львов. геол. об-ва, 1952. № 6. С. 21-34.
- Белов Н.В.* Очерки по структурной минералогии // *XVI Минерал. сб.* Львов. гос. ун-та, 1965. Вып. 1. № 19. С. 3-9.
- Белов Н.В.* Структура ионных кристаллов и металлических фаз. М.: АН СССР, 1947. 182 с.
- Белов Н.В., Победимская Е.Ф.* Ковеллин (клокманит)-халькозин (акантит, штоммейерит, борнит)-блеклые руды // *Кристаллография*, 1968. Т. 13. № 6. С. 969-975.
- Бессмертная М.С., Логинова Л.А., Соболева Л.Н.* Определение теллуридов под микроскопом. М.: Наука, 1969. 175 с.
- Бетехтин А.Г.* Курс минералогии. М.: Госгеолтехиздат, 1961. 539 с.
- Богатиков О.А., Цветков А.А.* Магматическая эволюция островных дуг. М.: Наука, 1988. 249 с.
- Божедомова С.А.* Экологическое воздействие горнодобывающей промышленности на окружающую среду Восточно-Казахстанской области Республики Казахстан // *Электронный научно-образовательный журнал "Полисфера"*. № 3. (<http://www/polysphere.freenet.kg/news/print.php?id=69>. 2005).
- Бондарев Л.Г.* Ландшафты, металлы и человек. М.: Мысль, 1976. 72 с.
- Бортников Е.С., Генкин А.Д., Коваленкер В.А.* Минералого-геохимические показатели условий гидротермального рудообразования // *Эндеогенные рудные районы и месторождения*. М.: Наука, 1987. С. 40-59.
- Бортникова С.Б.* Геохимия тяжёлых металлов в техногенных системах (вопросы формирования, развития и взаимодействия с компонентами экосферы) // *Автореф. дис. ... докт. геол.-минерал. наук*. Новосибирск, 2001. 48 с.
- Виноградов А.П.* Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // *Геохимия*, 1962. № 7. С. 555-571.
- Воган Д., Крейг Дж.* Химия сульфидных минералов. М.: Мир, 1981. 575 с.
- Вредные вещества в промышленности*. Л.: Химия. (Справочник для химиков, инженеров и врачей. Т. 3. Неорганические и элементоорганические соединения. Под ред. Н.В. Лазарева и И.Д. Гадаскиной), 1977. 608 с.
- Вулканизм северо-западной части Тихого океана и структур переходной зоны. Динамика эксплозивного вулканического процесса*. (Под ред. Б.Н. Пискунова, В.Я. Данченко, А.В. Рыбина, В.А. Мелкого). Южно-Сахалинск. ИМГиГ ДВО АН СССР, 1990. Часть II. С. 102-202.
- Гавриленко Б.В., Реженева С.А.* Рудные минералы золотосодержащих кварцевожильных зон // *Минеральные парагенезисы метаморфических и метасоматических пород*. Кольский филиал АН СССР. Апатиты, 1987. С. 58-67.
- Гамянин Г.Н., Бортников Н.С.* Особенности химического состава блеклых руд из месторождений золота различных рудных формаций Восточной Якутии // *Геология рудных месторождений*, 1989. № 2. С. 50-62.
- Генкин А.Д., Муравьева И.В.* Индит и джалиндит – новые минералы индия //

Записки Всесоюзного Минералогического Общества. Москва-Ленинград. Изд-во АН СССР, 1963. Серия 2. Ч.92. Вып. 4. С. 445-457.

*Геологический словарь*. М.: Недра, 1973. Т. 1. 487 с.

*Геологический словарь*. М.: Недра, 1973. Т. 2. 456 с.

*Говоров Г.И.* Фанерозойские магматические пояса и формирование структуры Охотоморского геоблока. Владивосток: Дальнаука, 2002. 198 с.

*Годовиков А.А., Иляшева Н.А.* Особенности химического состава блеклых руд // Известия АН СССР. Серия геол., 1972. № 5. С. 72-83.

*ГОСТ 17.4.1.02-83. Охрана природы. Почвы*. М.: Изд-во стандартов, 1985. 383 с.

*Григорьев Д.П.* Онтогения минералов. Львов: Изд-во ЛГУ, 1961. 284 с.

*Давыдова С.Л.* О токсичности ионов металлов // Химия, 1991. №3. С. 48-57.

*Данченко В.Я.* Особенности структурной позиции золотосеребряной минерализации островодужного вулканического пояса // Структуры рудных полей и месторождений вулканических поясов. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1986. С. 104-117.

*Данченко В.Я.* Золоторудные формации Сахалина и Курильских островов // Автореф. дисс. канд. геол.-минерал. наук. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1987. 19 с.

*Данченко В.Я.* Золотосеребряная минерализация Большой Курильской гряды // Препринт. Южно-Сахалинск. ИМГиГ ДВО РАН, 1990. 63 с.

*Данченко В.Я.* Соотношение разных типов золотосеребряной минерализации в рудном поле островодужного вулканического пояса // Соотношение разных типов оруденения вулcano-плутонических поясов Азиатско-Тихоокеанской зоны сочленения. Владивосток. ДВО РАН, 1991. С. 24-42.

*Данченко В.Я.* Стрoение и эволюция вулcanoгенных рудно-магматических систем Курильских островов // Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Том II. Петрология и рудоносность магматических образований Курильской островной дуги. Южно-Сахалинск, 1997. С. 94-123.

*Данченко В.Я., Иванов В.В.* Самородное золото проявлений островодужного вулканического пояса // Самородные элементы рудных месторождений Тихоокеанской окраины Азии. Владивосток, 1989. С. 47-58.

*Дунищев В.М.* Вулканизм Большой Курильской гряды. М.: Недра, 1983. 120 с.

*Дэна Дж. Д., Дэна Э.С., Пэлаг Ч., Берман Г., Фрондель К.* Система минералогии. М.: Изд-во иностранной литературы, 1950. Т. 1. 608 с.

*Евзикова Н.З.* Поисковая кристалломорфология. М.: Недра, 1984. 143 с.

*Емлин Э.Ф.* Техногенез колчеданных месторождений Урала. Свердловск: Изд-во Урал. ун-та, 1991. 254 с.

*Зверев В.П.* Взаимодействие природных вод с горными породами - химическое выветривание // Геоэкология, 1997. № 1. С. 70-77.

*Зверева В.П.* Гипергенные и техногенные минералы как показатель экологического состояния оловорудных районов Дальнего Востока // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2005. № 6. С. 533-538.

*Зверева В.П., Кравченко В.Н.* Техногенное воздействие горнопромышленного комплекса и его экологические последствия (Дальнегорский район, Приморье) // Минералогия техногенеза-2003. Миасс: ИМин УрО РАН, 2003. С. 215-221.

*Злобин Т.К., Федорченко В.М., Петров А.В.* Структура литосферы о-ва Кунашир (Курильские острова) по сейсмическим данным // Тихоокеанская геология, 1982. С. 92-100.

*Иванова О.В., Неведомская И.А., Еременко Н.А., Изотов А.Б.* Курильский заповедник. <http://www.floranimal.ru/national/park.php?pid=15>. 2001.

- Ивашов П.В.* Вещественный состав оруденения как фактор потенциального загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами в районе объекта «Рудник Многовершинный» // Биохимические и экологические исследования природных и техногенных экосистем Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 1996. С. 3-22.
- Ивлев А.М.* Курс биогеохимии. Учебное пособие. Владивосток: Изд-во Дальневосточного университета, 1983. 108 с.
- Ильин И.Б., Юданова Л.А.* Тяжелые металлы в почвах и растениях // Поведение ртути и других тяжелых металлов в экосистемах. Новосибирск: Наука, 1989. С.6-35.
- Индолеев Л.Н., Невойса Г.Г., Паринаова З.Ф.* Новые данные о блеклых рудах и вопросы изоморфизма серебра и меди // Минералогия эндогенных месторождений Якутии. Новосибирск: Наука, 1974. С. 109-119.
- Калабин Г.В.* Экодинамика техногенных провинций Севера. Апатиты: Изд-во КНЦ, 2000. 292 с.
- Карнов И.К.* Физико-химическое моделирование на ЭВМ в геохимии. Новосибирск: Наука, 1981. 247 с.
- Карнов И.К., Киселев А.И., Летников Ф.А.* Моделирование природного минералообразования на ЭВМ. М.: Недра, 1976. 256 с.
- Качаловская В.М., Кукоев В.А., Козлова Е.В.* Теллуриды в рудах месторождения Уруп // Геология рудных месторождений. № 6, 1971. С. 98-104.
- Кашик С.А., Карнов И.К.* Формирование минеральной зональности при различных режимах протекания процессов выветривания // Физико-химические модели в геохимии. Новосибирск: Наука, 1988. С. 160—177.
- Кемкина Р.А.* Новые минеральные разновидности блеклых руд и особенности их химического состава Au- Ag месторождения о. Кунашир // Закономерности строения и эволюции геосфер. Материалы IV международного междисциплинарного научного симпозиума. Хабаровск: ИТИГ ДВО РАН, 1998<sub>а</sub>. С.218-220.
- Кемкина Р.А.* Особенности химического состава блеклых руд золото-серебряного месторождения о. Кунашир // Проблемы геологии и освоения недр. Материалы докладов II Международной конференции им. Академика М.А. Усова. Томск: Изд-во НТЛ, 1998<sub>б</sub>. С. 13-15.
- Кемкина Р.А.* Смешанные блеклые руды Юго-Западной зоны Прасоловского месторождения о. Кунашир // Материалы конференции преподавателей ДВГТУ. Владивосток: ДВГТУ, 1998<sub>в</sub>. С. 15-17.
- Кемкина Р.А.* Зависимость состава блеклых руд Au-Ag месторождения о. Кунашир от физико-химических условий рудообразования // Генезис месторождений Au и методы добычи благородных металлов. Материалы международной научной конференции. Благовещенск: АмурКНИИ АмурНЦ ДВО РАН, 2001<sub>а</sub>. С. 39-40.
- Кемкина Р.А.* Серебряная минерализация близповерхностного золото-серебряного месторождения // Горные и геологические науки. Экология и безопасность жизнедеятельности. Материалы конференции. Вологдинские чтения. Владивосток: ДВГТУ, 2001<sub>б</sub>. С. 9-10.
- Кемкина Р.А.* Теллуровая минерализация вулканогенного золото-серебряного месторождения // Горные и геологические науки. Экология и безопасность жизнедеятельности. Материалы конференции. Вологдинские чтения. Владивосток: ДВГТУ, 2002. С. 9-10.
- Кемкина Р.А., Севериненко А.П.* Вещественный состав руд Прасоловского месторождения, как потенциальный фактор загрязнения окружающей среды токсичными металлами // Изучение природных катастроф на Сахалине и Курильских

островах. Материалы I (XIX) международной конференции. Ю-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006<sub>а</sub>. С. 142-143.

**Кемкина Р.А., Севериненко А.П.** Блеклые руды Прасоловского месторождения как потенциальный источник загрязнения прилегающей территории и акватории Кунаширского пролива // Современные проблемы геологии, геохимии и геоэкологии Дальнего Востока России. Тезисы докладов региональной конференции молодых ученых. Владивосток: Дальнаука, 2006<sub>б</sub>. С. 82-83.

**Кемкина Р.А.** Прогнозная оценка потенциальной экологической опасности руд Прасоловского месторождения // Проблемы экологии, безопасности жизнедеятельности и рационального природопользования Дальнего Востока и стран АТР. Материалы II Международной конференции. Владивосток: ДВТГУ, 2006. С. 186-190.

**Кемкина Р.А.** Особенности химического состава блеклых руд Прасоловского вулканогенного Au-Ag месторождения (о. Кунашир) и последовательность их образования // Тихоокеанская геология, 2007. Т. 26. № 1. в печати.

**Коваленкер В.А., Русинов В.Л.** Голдфилдит: особенности химического состава, парагенезисы, условия образования // Минералогический журнал, 1986. Т. 8. № 2. С. 57-70.

**Коваленкер В.А.** Минералогия и геохимия селена и теллура (в медно-никелевых месторождениях Талнахского рудного узла). М.: Наука, 1977. 136 с.

**Коваленкер В.А., Вильсов Л.Н., Тронева Н.В., Завьялов Е.Н.** О находке редких минералов системы Ag-Te // Записки Всесоюзного Минералогического Общества. Л.: Наука, 1980. Вып. 1. Ч. 109. С. 52-61.

**Коваленкер В.А., Лапутина И.П., Вильсов Л.Н.** О первой находке минералов ряда галенит-клаусталит в сульфидных медно-никелевых рудах // Геология рудных месторождений, 1971. № 2. С. 98-101.

**Коваленкер В.А., Некрасов И.Я., Сандомирская С.М., Некрасова А.Н., Малов В.С., Данченко В. Я., Дмитриева М.Т.** Сульфидно-селенидно-теллуридная минерализация эпитермальных проявлений Курило-Камчатского вулканического пояса // Минералогический журнал, 1989. Т. 8. № 6. С. 3-18.

**Ковтунович П.Ю.** О правомерности выделения формации зеленых туфов на островах Большой Курильской дуги // Актуальные вопросы геологии, геофизики и биологии. Материалы XVI конференции молодых ученых ИМГиГ. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО АН СССР, 1990. С. 25-30.

**Копейкин В.А.** Моделирование на ЭВМ поведения марганца в гипергенном процессе // Геохимия, 1984. № 6. С. 913-928.

**Коробов Ю.И.** Условия образования алюмосульфатов // Перспективная оценка алюминиевого сырья Сибири. Новосибирск: СНИИГГиМС, 1985. С. 32-54.

**Кошкин В.Л.** Датирование вулканических пеплов из четвертичных и неогеновых отложений по трекам от осколков деления урана // Автореф. дисс. канд. технич. наук. Пермь, 1984. 24 с.

**Лазарева Е.В., Сиденко Н.В.** Трансформация минеральных форм токсичных компонентов (As, Zn, Cu, Pb) в зоне окисления сульфидных отходов (Берикуль, Кемеровская область) // Минералогия техногенеза 2003. Миасс: ИМин УрО РАН, 2003. С. 34-51.

**Листова Л.П., Бондаренко Г.П.** Растворение сульфидов свинца, цинка и меди в окислительных условиях. М.: Наука, 1969. 183 с.

**Луговская А.С., Нестеров Д.П., Васильева Т.Н., Макаров Д.В., Макарова В.Н.** Минералообразование при взаимодействии горнопромышленных отходов с кислотными

дождями и кислыми поровыми растворами // Минералогия техногенеза 2003. Миасс: ИМин УрО РАН, 2003. С. 85-97.

**Магакьян И.Г.** Сурьмянистый теллурувисмутит Зодского золоторудного месторождения (Басаргечарский район Армянской ССР // Записки Всесоюзного Минералогического Общества. Москва-Ленинград: Наука, 1957. Сер. 2. Вып. 3. Ч. 86. С. 343-346.

**Макаров В.Н., Макаров Д.В., Васильева Т.Н.** Электрохимическое окисление халькопирита в щелочных растворах. ЖПХ, 1999. Т. 72. № 3. С. 406-409.

**Макаров Д.В., Павлов В.В.** Исследование окисления сульфидных минералов и изменения состава твердых фаз и растворимых новообразований в условиях моделирующего хранения техногенного сырья // Минералогия техногенеза 2003. Миасс: ИМин УрО РАН, 2003. С. 67-84.

**Минералы.** Справочник. М.: Изд-во АН СССР. Т. 1. 1960. 617 с.

**Михеев В.И.** Рентгенометрический определитель минералов. М.: Государственное научно-техническое изд-во литературы по геологии и охране недр, 1957. Т. 1. 867 с.

**Мицук В.В.** Эндогенная зональность золоторудного месторождения юга Курил // Актуальные вопросы геологии, геофизики и биологии. (Материалы XVI конференции молодых ученых ИМГиГ). Южно-Сахалинск: ИМГиГ, 1990. С. 17-24.

**Мицук В.В., Сидоренко Ю.А., Пачин А.Г., Антишин В.Е. и др.** Поиски рудного золота в пределах Прасоловского рудного поля. – Отчет Прасоловской геолого-поисковой партии Сахалинской ГРЭ за 1982-1987 гг. Южно-Сахалинск. 1987.

**Мозгова Н.Н., Ценин А.И.** Блеклые руды (особенности химического состава и свойств). М.: Наука, 1983. 280 с.

**Мур Дэв.В., Рамамурти С.** Тяжелые металлы в природных водах. М.: Мир. 1987. 288 с.

**Неведомская И.А., Еременко Н.А.** Курильский государственный заповедник // Вестник ДВО РАН, 2000. №1. С. 39-49.

**Неверов Ю.Л.** Магматизм и рудная минерализация южной группы Курильских островов // Автореф. дисс. канд. геол.-минерал. наук, 1970. Владивосток. 26 с.

**Неверов Ю.Л.** О типах рудной минерализации южной группы Курильских островов (Кунашир, Итуруп, Уруп) // Геология и геофизика, 1964. № 7. С. 34-40.

**Некрасов И.Я.** Геохимия, минералогия и генезис золоторудных месторождений. - М.: Наука, 1991. 302 с.

**Некрасова А.Н.** Распределение селена и теллура в рудах вулканогенного золото-серебряного месторождения // Москва, 1980. Труды ЦНИГРИ. Вып. 150. С. 51-55.

**Некрасова А.Н., Сандомирская С.М.** Химический состав высокосеребристых блеклых руд из вулканогенных золотосеребряных месторождений // Москва, 1979. Труды ЦНИГРИ. Вып. 142. С. 19-22.

**Новгородова М.И., Ценин А.И.** Новый изоморфный ряд в группе блеклых руд // Записки Всесоюзного Минералогического Общества, 1978. Серия 2. Ч. 107. Вып. 1. С. 100-110.

**Петровская Н.В.** Самородное золото. Общая характеристика, типоморфизм, вопросы генезиса. М.: Наука, 1973. 347 с.

**Пискунов Б.Н.** Кайнозойские вулканические комплексы островных дуг северо-западной части Тихого океана (состав, условия формирования, происхождение) // Автореф. дисс. докт. геол.-минерал. наук. ИГЕМ АН СССР. Москва, 1984. 40 с.

**Полькин С.И., Адамов Э.В., Панин В.В.** Технология бактериального выщелачивания цветных и редких металлов. М.: Недра, 1982. 288 с.

- Поспелов Г.Л.** Парадоксы, геолого-физическая сущность и механизмы метасоматоза. Новосибирск: Наука, 1973. 355 с.
- Постникова В.П., Яхонтова Л.К.** Минералогия зоны гипергенеза оловорудных месторождений Комсомольского района. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1984. 122 с.
- Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе и воде.** Изд. 2-е. пер. и доп. Л.: Химия, 1975. 456 с.
- Происхождение вулканических серий островных дуг.** (Под ред. Т.И. Фроловой, А.И. Буриковой, А.В. Гущина, В.Т. Фролова, В.Л. Сывороткина) М.: Недра, 1985. 275 с.
- Рамдор П.** Рудные минералы и их сростания. М.: Изд-во ИЛ, 1962. 1132 с.
- Рафиенко Н.И.** О гипергенном борните в одном из месторождений Восточной Тувы // Записки Весоюзного Минералогического Общества, 1957. Ч. 86. Вып. 3. С. 405-408.
- Роготнев Г.Н.** Поисково-оценочные работы на участках золоторудных проявлений Удачный и Прасоловский. – Отчет Прасоловской геолого-поисковой партии за 1985-1991 гг. Южно-Сахалинск, 1992.
- Рыбин А.В., Данченко В.Я.** Интрузивные породы Большой Курильской Гряды: петрология и петрогенезис // Препринт. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1994. 53 с.
- Рысс Ю.С., Воронин Д.В.** Вторичное минералообразование на верхних горизонтах рудных месторождений под действием естественного электрического тока // Методика и техника разведки, 1971. № 76. С. 64-78.
- Саксин Б.Г.** Региональная оценка и прогноз экологического риска горного производства на примере золоторудных районов Востока России // Автореф. дисс. доктора геол.-минерал. наук. Хабаровск: ИВЭП ДВО РАН, 2002. 43 с.
- Сахарова М.С.** О зависимости химического состава блеклых руд от условий рудообразования // Очерки геохимии эндогенных и гипергенных процессов. М.: Наука, 1966а. С. 109-118.
- Сахарова М.С.** Основные вопросы изоморфизма и генезиса блеклых руд // Геология рудных месторождений, 1966б. № 1. С. 23-41.
- Сахарова М.С., Китаенко А.Э., Рябов А.Н.** Формы нахождения и особенности накопления экологически потенциально вредных элементов на месторождениях золото-серебряной формации Северо-Востока России // Вестник Московского университета, 1994. Серия 4. № 2. С. 55-62.
- Свеишников Г.Б.** Электрохимические процессы на сульфидных месторождениях. Л.: Изд-во ЛГУ, 1967. 160 с.
- Сергеев К.Ф.** Тектоника Курильской островной системы. М.: Наука, 1976. 239 с.
- Синдеева Н.Д., Годовиков А.А.** Об изоморфизме между серой и теллуrom в галените // Доклады. АН СССР, 1959. Т. 127. С. 431-434.
- Синдеева Н.Д.** Минералогия, типы месторождений и основные черты геохимии селена и теллура. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 257 с.
- Смирнов С.С.** Зона окисления сульфидных месторождений. М.: Наука, 1955. 331 с.
- Сотников В.И.** Влияние рудных месторождений и их отработки на окружающую среду // Соросовский образовательный журнал, 1997. № 5. С. 62-65.
- Спиридонов Э.М., Чвилева Т.Н.** Мутманнит AuAgTe<sub>2</sub> – новые данные // Доклады АН СССР, 1985. Т. 280. № 4. С. 994-997.
- Спиридонов Э.М.** Виды и разновидности блеклых руд и их рациональная номенклатура // ДАН СССР, 1984. Т. 279. № 2. С. 447-453.
- Спиридонов Э.М.** О видах и разновидностях блеклых руд и рациональной номен-

клатуре минералов группы. Некоторые замечания об условиях образования блеклых руд // Новые данные о минералах. Вып. 32, 1985. С. 128-146.

*Спиридонов Э.М., Игнатова А.И., Шубина Е.В.* Эволюция блеклых руд вулканогенного месторождения Озерновское (Камчатка) // Известия Академии наук СССР. Серия геол., 1990. № 9. С. 82-94.

*Стрельцов М.И.* Дислокации южной части Курильской островной дуги. М.: Наука, 1976. 132 с.

*Сутурин А.Н.* Геохимия антропогенеза: проблемные вопросы // Геохимия техногенеза. Новосибирск: Наука, 1986. С. 9-40.

*Сушкова Т.П., Семенова Г.В., Стрыгина Е.В.* Термодинамическая оценка стабильности твердых растворов на основе халькогенидов свинца // Вестник ВГУ. Серия: Химия. Биология. Фармация, 2004. № 1. С. 94-100.

*Сывороткин В.Л., Русинова С.В.* Есть ли лавовые плато на о. Кунашир // Тихоокеанская геология, 1991. № 4. С. 103-107.

*Тарасенко И.А., Зиньков А.В.* Экологические последствия минералогеохимических преобразований хвостов обогащения Sn-Ag-Pb-Zn руд. Владивосток: Дальнаука, 2001. 184 с.

*Токсичные металлы.* По материалам статьи доктора Лауры Томпсон: Toxic Metals. // [http://adhd-kids.narod.ru/articles/heavy\\_metal\\_toxicity.html](http://adhd-kids.narod.ru/articles/heavy_metal_toxicity.html). 2005.

*Филимонова А.А.* Опыты по нагреванию борнитсодержащих руд // Известия АН СССР. Серия геол., 1952. № 3. С. 76-94.

*Филимонова Л.Е., Слюсарев А.П.* Минералы теллура в рудах медно-молибденового месторождения Бошекуль // Труды ордена Трудового Красного Знамени института геологических наук им. К.И. Сатпаева Академии наук Казахской ССР. Алма-Ата., 1971. Том 31. С. 42-51.

*Фирсов Л.В.* Абсолютный возраст интрузивных пород островов Кунашир и Уруп (Курильские острова) // Доклады АН СССР, 1964. Т. 156. № 4. С. 841-842.

*Шеннон С.* Питание в атомном веке, или как уберечь себя от малых доз радиации. Минск: Изд-во Беларусь, 1991. 246 с.

*Щербина В.В.* Основные черты геохимии теллура // Известия АН СССР. Серия геол., 1937. № 5. С. 965-991.

*Щербина В.В., Зарьян Р.Н.* Парагенезис теллуридов серебра и золота как минералов системы Ag-Au-Te // Геохимия, 1964. №1. С. 552-559.

*Яренская М.А.* Борнит-теннантит-халькозиновая ассоциация в колчеданных рудах Казахстана // Труды ордена Трудового Красного Знамени института геологических наук им. К.И. Сатпаева Академии наук Казахской ССР. Алма-Ата, 1971. Том 31. С. 5-15.

*Яренская М.А., Слюсарев А.П.* Первая в СССР находка рокезита // ДАН СССР, 1970. Т. 191. № 5. С. 1138-1141.

*Яхонтова Л.К., Грудев А.П.* Изучение электрохимического взаимодействия арсенидов, контактирующих друг с другом // Вестник МГУ. Сер. геол., 1966. № 3. С. 96-101.

*Яхонтова Л.К., Грудев А.П.* О механизме окисления арсенидопирита // Тр. минер. музея им. Ферсмана, 1973. Вып. 220. С. 172-178.

*Яхонтова Л.К., Грудев А.П.* Проблема электрохимического фактора в зоне гипергенеза рудных месторождений // Изв. АН СССР. Сер. геол., 1974. № 6. С. 68-78.

*Яхонтова Л.К., Грудев А.П., Зув В.В.* Проблемы изучения системы минеральный субстрат - микроорганизм // Вестник МГУ. Сер. геол., 1994. № 5. С. 80-92.

- Яхонтова Л.К., Нестерович Л.Г.** Зона гипергенеза рудных месторождений как биокосная система. М.: Изд-во МГУ, 1983. 57 с.
- Baywater S.** Kalgoorline tellurides // Austral. Cem. and Treas. Hunter, 1984. no 94. P. 45-46.
- Bernardini G.P., Cjrsini F., Mazetti G., Tanelli G.** Investigation in the Cu-S-Se System // Chemische Erde, 1976. Vol. 35. no 1. P. 50-62.
- Cabri L. J.** Phase relations in the Au-Ag-Te system and their mineralogical significance // Econ. Geol, 1965. Vol. 60. no 8. P. 1569-1606.
- Coleman R.G.** The natural occurrence of galena-claughalite solid solution series // Amer. Mineralogist, 1959. Vol. 44. no 1-2 P. 166-179.
- Colmer A.R., Hinkle M.E.** The role of microorganisms in acid drainage // Science, 1947. Vol. 106. 253 p.
- Danchenko V.Y.** Gold-Silver Mineralization Types of the Kuril Islands // Resource Geology Special Issue, 1995. no 18. P. 277-290.
- Earley I. W.** Description and synthesis of the selenide minerals // Amer. Mineralogist, 1950. Vol. 35. no 5-6. P. 337-364.
- Feiss P.G.** Reconnaissance of the tetrahedrite-tennantite enargite-famatinite phase relations as a possible geothermometer // Econ. Geol, 1974. Vol. 69. no 3. P. 383-390.
- Frensel G.** Ein neus Mineral Idait // Neue Jahrbuch fur Mineralogie, 1958. no 6. 142 p.
- Gas'kova O.L., Kolonin G.R.** Theoretical modeling of mineral dissolution at sulfide mine dumps and tailings: A kinetic approach // Water-Rock Interaction. Rotterdam, 1995. P.149-152.
- Hackbarth C.J., Petersen U.** A fractional crystallization model for the deposition of argentian tetrahedrite // Econ. Geol, 1984. Vol. 79. no 3. P. 448-460.
- Hatert F.** Occurrence of sulphides on the bormite-idaite join from Vielsalm, Stavelot Massif, Belgium // European Journal of Mineralogy, 2003. Vol. 15. no 6. P. 1063-1068.
- Hintze C.** Handbuch der Mineralogie. Lipsia, 1904. 120 p.
- Kemkina R.A., Belova A.G., Rybakova A.S.** Mineral composition and texture-structure features of Au-Ag ore deposits // Fourth International Young Scholars\* Forum of the Asia-Pacific Regional Countries. Vladivostok, 2001. P. 116.
- Kemkina R.A., Severinenko A.P.** Chemical composition of ores of the Praslovka deposit as potential factor of pollution of nature environment by toxic metals // Stady of natural catastrophes on Sakhalin and Kuril islands. Proceedings of the I (XIX) International Conference. Yuzhno-Sakhalinsk, 2006<sub>a</sub>. P. 143-145.
- Kemkina R.A., Severinenko A.P.** Chemical composition of ores of the Praslovka deposit as potential factor of pollution of nature environment by toxic metals ([http:// www.imgg.ru/ rus/ conf2006\\_list.php?page=4](http://www.imgg.ru/rus/conf2006_list.php?page=4). 2006<sub>b</sub>).
- Kracek F.C., Rowland C.** Phase rltation. The system silver – tellurium // Annual Rept. Geophys. Lab. Yearbook. Carnegie Inst. Washington, 1955. Vol. 54. 76 p.
- Kracek K.L., Ksanda C.J., Cabri L.J.** Phase relations in the system silver-tellurium // Amer. Miner, 1966. Vol. 51. no 1. P. 14-28.
- Levy C.** Contribution a la mineralogia des sulfures de cuivre du type Cu<sub>3</sub>XS<sub>4</sub> // Mem. Bur. rech. geol. et minieres, 1967. no 54. p. 1-178
- Markham N.L.** Syntetic and natyral phase in the system Au-Ag-Te // Econ. Geol, 1960. Vol. 55. no 6. P. 1148-1178.
- Pauling L., Neuman E.W.** The crystal structure of binnite (Cu,Fe)<sub>12</sub>As<sub>4</sub>S<sub>13</sub> and the chemical composition and structure of the tetrahedrite group // Ztschr. Kristallogr, 1934. Vol. 88. P. 54-62.

- Pelabon H.* Sur la fusibilité des mélanges d'or et de tellure // C. r. Acad. Sci. Paris, 1909. Vol. 148. 125-136.
- Pellini, G. I.* Tellururi d'argento e d'oro // Chim. Ital, 1915. Vol. 45. P. 1101-1112.
- Rose T.K.* The alloys of gold tellurium // Trans. Min. Met. Soc. London, 1908. Vol. 17. P. 12-27.
- Sack R.O., Loucks R.R.* Thermodynamic properties of tetrahedrite-tennantites: constraints on the interdependence of the  $Ag \leftrightarrow Cu$ ,  $Fe \leftrightarrow Zn$ ,  $Cu \leftrightarrow Fe$  and  $As \leftrightarrow Sb$  exchange reactions // Amer. Mineral, 1985. Vol. 70. P. 1270-1289.
- Schwartz G. M.* Intergrowths of bornite and chalcopyrite // Econ. Geol., 1931. Vol. 26. P. 186-201.
- Shikazono N.* Selenium content of acantite and the chemical environments of Japanese vein-type deposits // Econ. Geol., 1978. Vol. 73. P. 524-533.
- Singer P.S., Stamm W.* Kinetics of the oxidation of ferrous iron // in: Second Symp. Coal. Mine Drainage Res. Pittsburgh, 1986. P. 12-34.
- Taylor B.E., Wheeler M.C.* Stable isotope geochemistry of acid mine drainage: Experimental oxidation of pyrite // Geochim. et cosmochim. acta. Pergamon Press Ltd. Printed in U.S.A, 1984. Vol. 48. P. 2669-2678.
- Tischendorf G., Undethum H.* Über die Bildungsbedingungen von Claustalit-Galenit und Bemerkungen zur Selenverteilung im Galenit in Abhängigkeit vom Redox-potenzial und vom pH-Wert // Chemische Erde, 1964. Vol. 23. no 4. P. 279-311.
- Vikre P.G.* Zoned precious metal vein system in the national district Humboldt country, Nevada, USA // Условия образования рудных месторождений. Тр. VI симпози. МАГРМ. Тбилиси, 1982. С. 163-171.
- Werry, Foshag* // Wash. Acad. Sci., I-II, 1920.
- Wuensch B.J.* Confirmation of the crystal structure of tetrahedrite,  $Cu_{12}Sb_4S_{13}$  // Science, 1963. Vol. 141. P. 804-805.
- Wuensch B.J.* The crystal structure of tetrahedrite,  $Cu_{12}Sb_4S_{13}$  // Ztschr. Kristallogr., 1964. Vol. 119, pt 5// 6. P. 437-453.

## Приложение 1

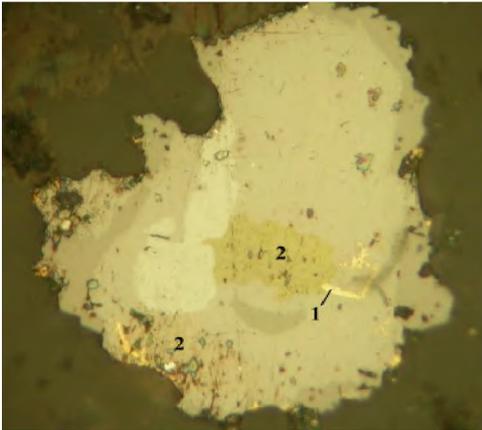


Рис.3-5. Прожилковые включения золота (1) в гессите (2).  
Ув. 400

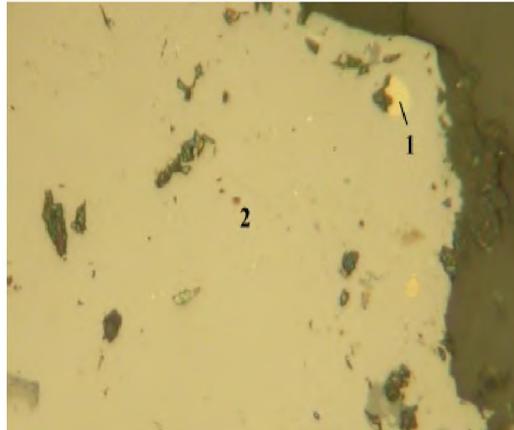


Рис. 3-6. Овальные включения золота (1) в блеклых рудах (2). Ув. 160

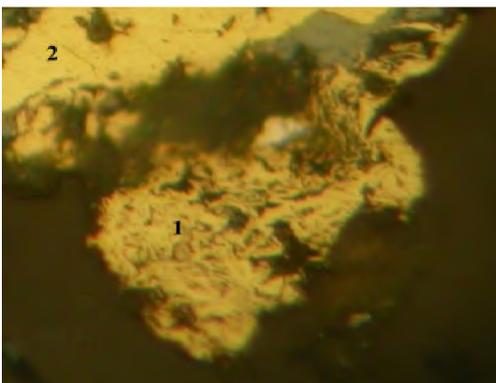


Рис. 3-7. Срастание высокопробного (1) и низкопробного (2) золота. Ув. 25

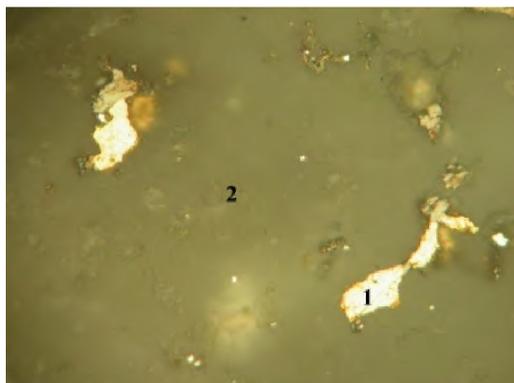


Рис. 3-8. Пластинчатые выделения золота (1) в кварце (2). Ув. 250

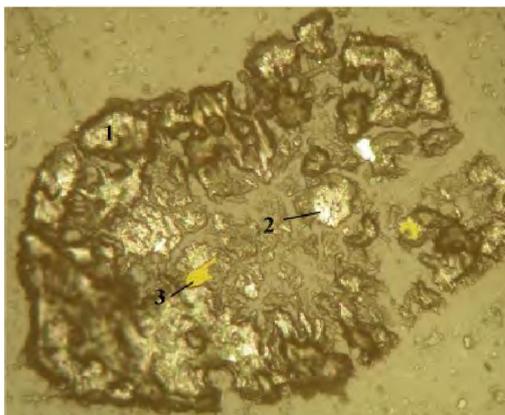


Рис. 3-9. Почковидная структура молибденита (1) с включениями блеклых руд (2) и золота (3). Ув. 70

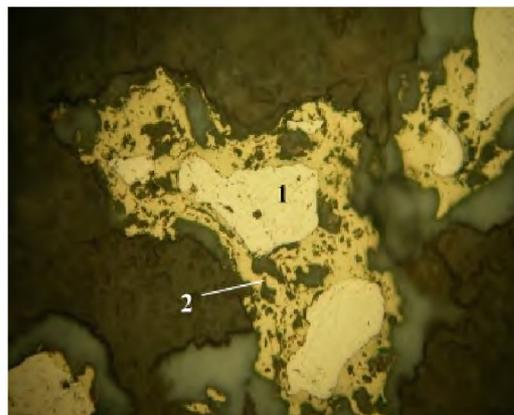


Рис. 3-11. Реликты пирита (1) в халькопирите (2) среди нерудных минералов. Ув. 400



Рис. 3-12. Идиоморфные кристаллы пирита (1) в кварце (2). Ув. 700

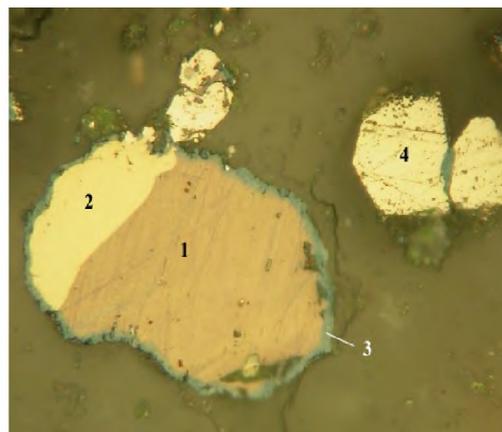


Рис. 3-13. Структура замещения борнита (1) и халькопирита (2) ковеллином (3). Идиоморфные зерна пирита (4). Ув. 350

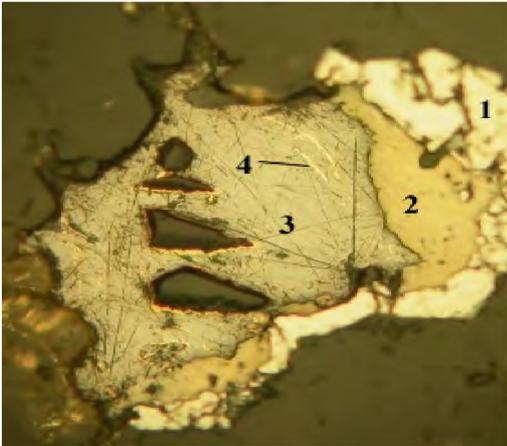


Рис. 3-14. Замещение пирита (1) халькопиритом (2) и гесситом (3) с прожилками золота (4). Ув. 150

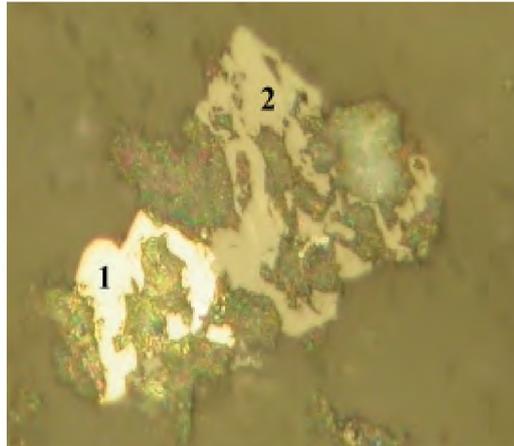


Рис. 3-15. Срастание халькопирита (1) со сфалеритом (2) в кварце. Ув. 200

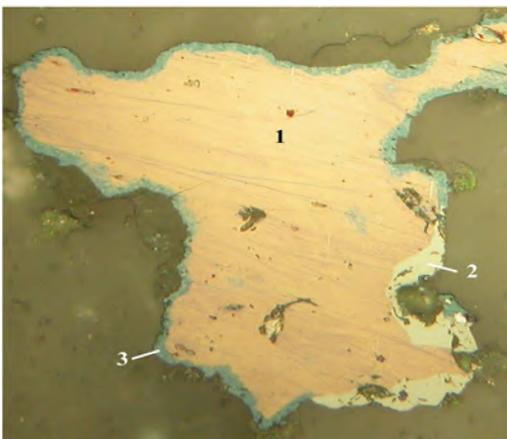


Рис. 3-16. Замещение борнита (1) халькозином (2) и ковеллином (3). Ув. 400

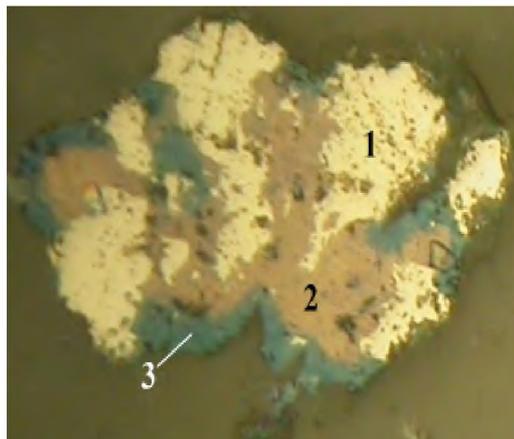


Рис. 3-17. Замещение халькопирита (1) борнитом (2) и халькозином (3). Ув. 150

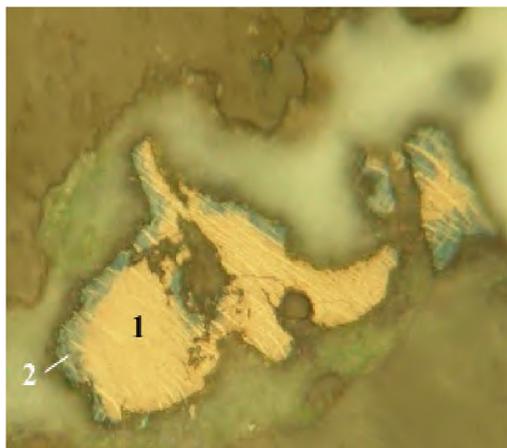


Рис. 3-18. Замещение идаита (1) ковеллином (2). Ув. 350

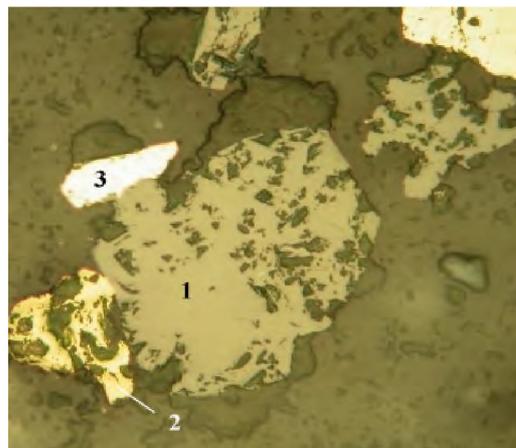


Рис. 3-20. Срастание сфалерита 2<sup>ой</sup> генерации (1) с халькопиритом (2) и пиритом (3). Ув. 350

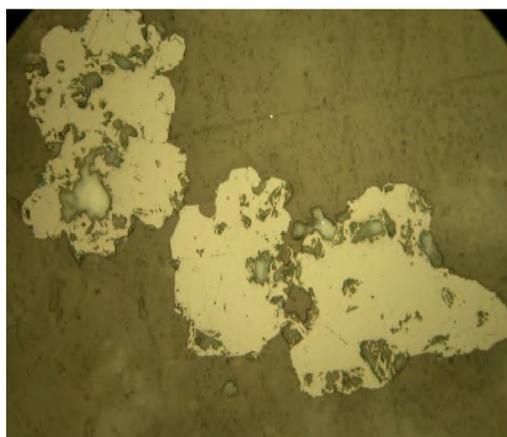


Рис. 3-21. Ксеноморфные выделения сфалерита 3<sup>ей</sup> генерации. Ув. 400

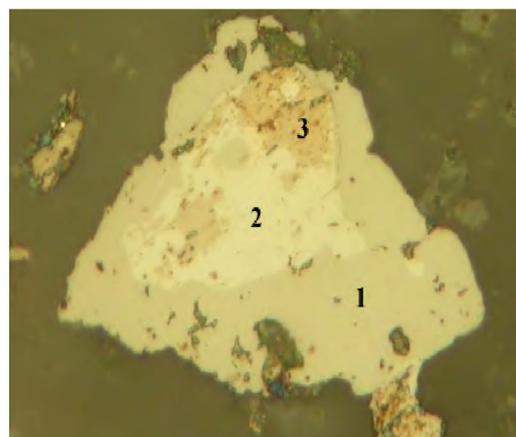


Рис. 3-22. Замещение блеклых руд (1) акантитом (2) и теллуратами (3). Ув. 300

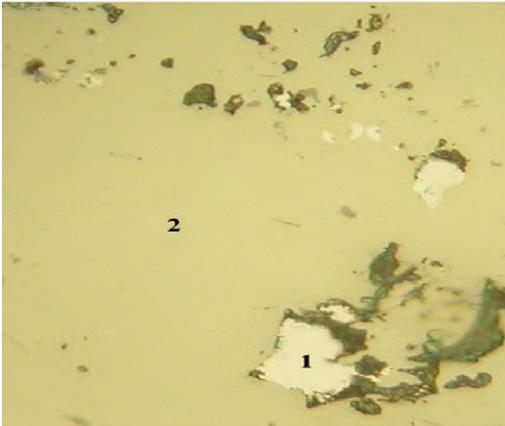


Рис. 3-24. Включения клаусталита 1<sup>ой</sup> генерации (1) в блеклых рудах (2) Ув. 200

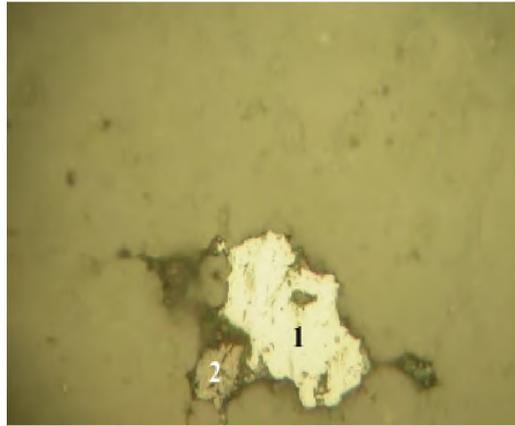


Рис. 3-25. Замещение клаусталита 3<sup>ей</sup> генерации (1) клокманитом (2). Ув. 200

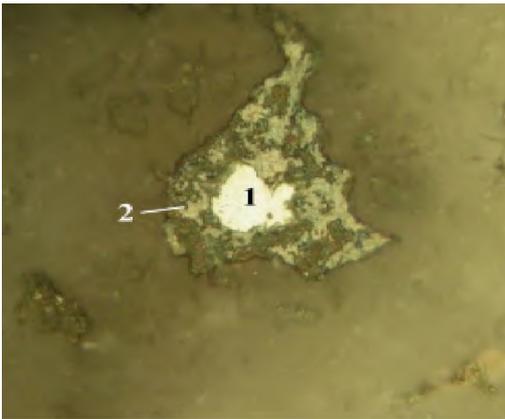


Рис. 3-26. Реликтовые включения клаусталита (1) в клокманите (2). Ув. 250

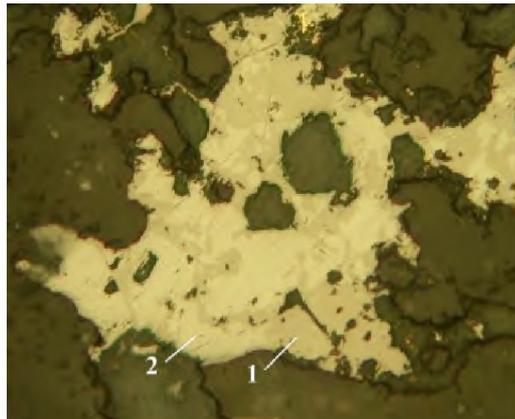


Рис. 3-28. Замещение блеклых руд (1) гесситом (2). Ув. 350

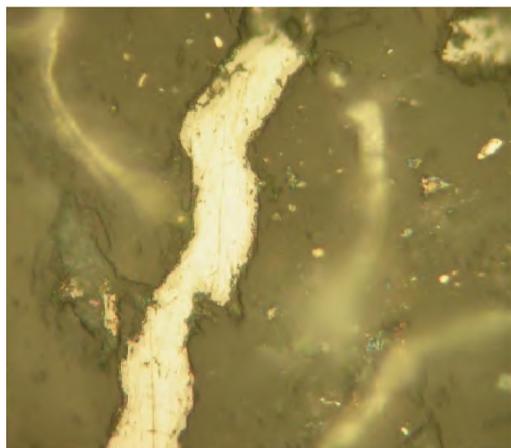


Рис. 3-29. Пластинчатые выделения гессита в кварце Ув. 200

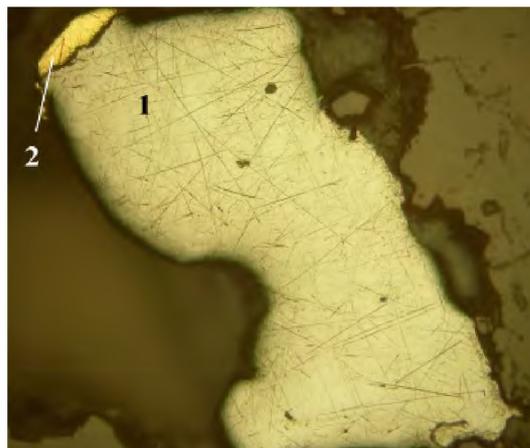


Рис. 3-30. Срастание гессита (1) с золотом (2). Ув. 375

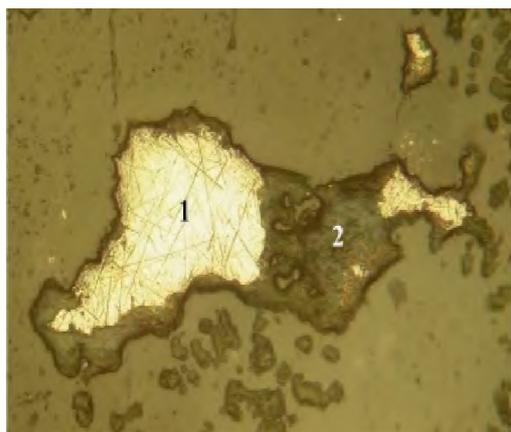


Рис. 3-31. Замещение гессита (1) теллуриатами (2). Ув. 350

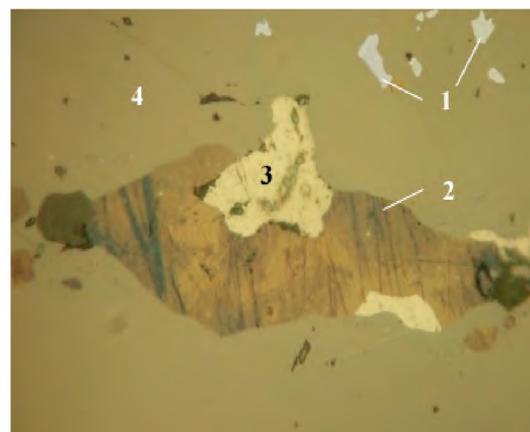


Рис. 3-32. Включения гессита (1), боронита (2) и пирита (3) в блеклых рудах (4). Ув. 200

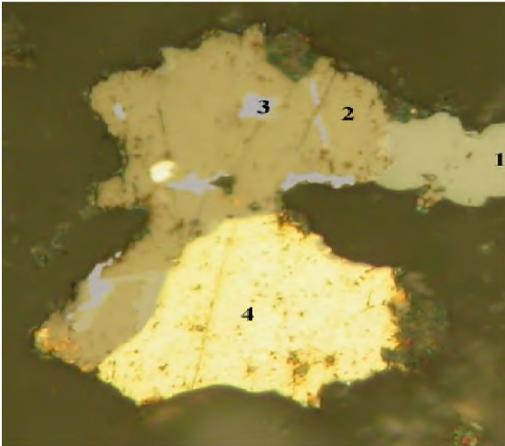


Рис. 3-33. Замещение блеклых руд (1) гесситом (2) с включениями пеццита (3) и золотом (4). Ув. 150

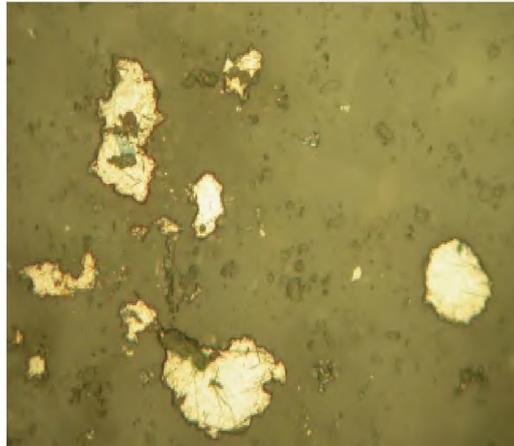


Рис. 3-34. Выделения, представляющие собой гессит-петцитовый твердый раствор. Ув. 400

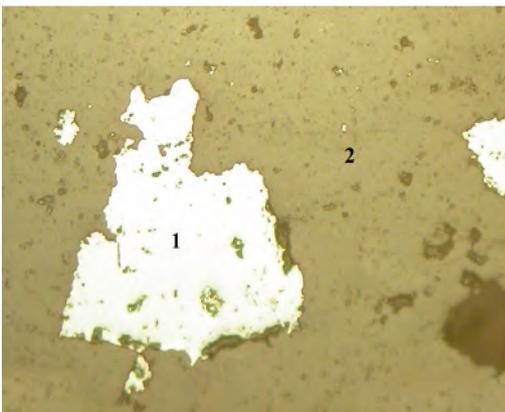


Рис. 3-35. Ксеноморфные выделения блеклых руд (1) в кварце (2). Ув. 400

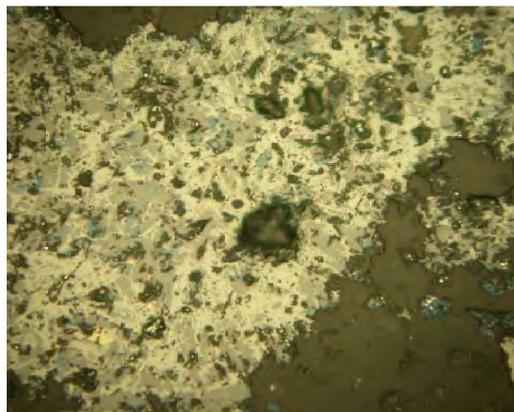


Рис. 3-36. Мирмекитовое срастание блеклых руд с халькопиритом. Ув. 200

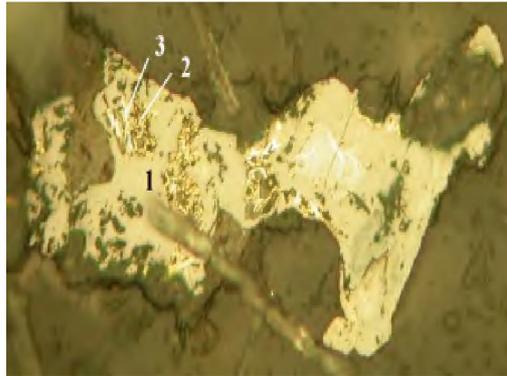


Рис. 3-37. Блеклые руды (1) с включениями гессита (2), содержащего золото (3). Ув. 800

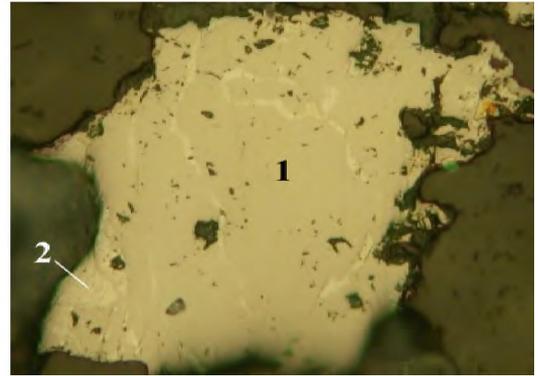


Рис. 3-38. Блеклые руды (1) с включениями пирита (2). Ув. 200

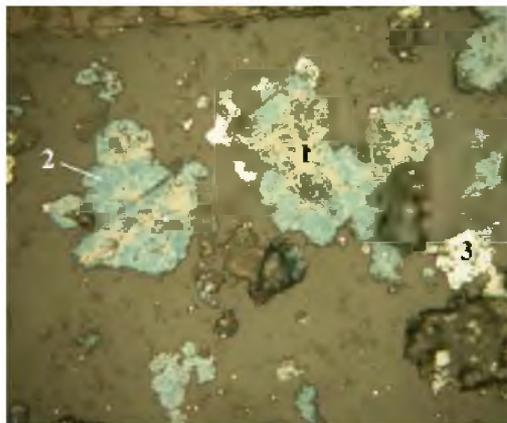


Рис. 3-39. Замещение блеклых руд (1) ковеллином (2). Ксеноморфные выделения галенита (3). Ув. 250

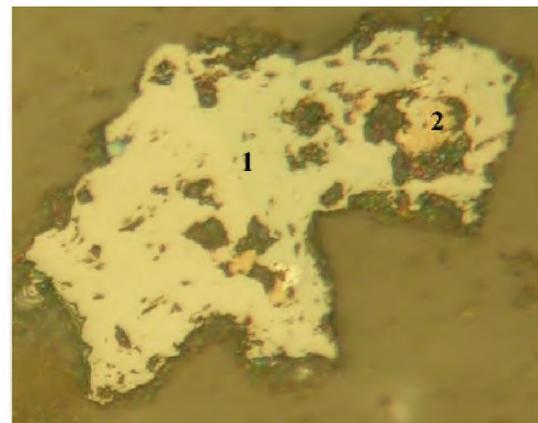


Рис. 3-40. Замещение блеклых руд (1) борнитом (2). Ув. 200

**ПРИЛОЖЕНИЕ 2**

**Результаты компьютерного моделирования гипергенного  
преобразования рудных минералов  
Прасоловского Au-Ag месторождения**

Таблица 5-1

**Результаты моделирования взаимодействия Cd и Cu-содержащего сфалерита  
( $Zn_{0,96}Cu_{0,01}Cd_{0,01}S_{1,03}$ ) с природными водами (резервуар 1) и ионным раствором  
(резервуар 2)**

Резервуар - 1					
Температура, °C -	25,00	Давление, бар -	1,00	Масса, кг -	1100,097
Объем мультисистемы, см <sup>3</sup> -	8,57215e+07	Плотность мультисистемы, г/см <sup>3</sup> -			0,012833
G, кал -	-3147543296	H, кал -	-3792468480	S, кал /K -	1120211,375
U, кал -	-3745213184	Ср, кал -	1022717,06	Ионная сила -	0,0002
Eh, В -	0,9796	ре -	16,5930	pH -	4,0078

Наименование фазы	Объем, см <sup>3</sup>	Молярное количество	Масса, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание, вес, %
Водный раствор	1002914,96226	5,55037e+04	999942,1250	9,97036e-01	90,89578
Газ	84718543,34635	3,46458e+03	99896,4922	1,17916e-03	9,08070
Твердая фаза					
ZnSO <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub>	0,00000	9,60000e-01	258,7635	0,00000e+00	0,02352

Состав фазы	Функция gT, кал/моль	Молярное количество	Концентрация мг/кг H <sub>2</sub> O	log молярности	Коэф. активности	log коэф. активности
<b>Водный раствор</b>						
CO <sub>2</sub>	-89870	9,776020e-03	4,3030e-01	-5,010	1,0000	0,000
CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	-123839	2,286845e-11	1,3725e-09	-13,641	0,9526	-0,021
Cd <sup>+2</sup>	-16209	9,999987e-03	1,1243e+00	-5,000	0,9524	-0,021
CdO	-45120	4,591465e-15	5,8967e-13	-17,338	1,0000	0,000
CdOH <sup>+</sup>	-59128	8,347651e-09	1,0805e-06	-11,078	0,9879	-0,005
Cu <sup>+2</sup>	18026	9,998855e-03	6,3547e-01	-5,000	0,9524	-0,021
CuO	-18420	1,531257e-09	1,2182e-07	-11,815	1,0001	0,000
CuOH <sup>+</sup>	-27827	1,135153e-06	9,1453e-05	-8,945	0,9879	-0,005
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-137909	4,624607e-05	2,8222e-03	-7,335	0,9880	-0,005
HNO <sub>3</sub>	-9720	3,385614e-10	1,5919e-08	-12,470	1,0000	0,000
HNO <sub>2</sub>	-22350	2,772515e-01	1,7473e+01	-3,557	1,0000	-0,000
HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-178257	6,267311e-04	6,0846e-02	-6,203	0,9880	-0,005
N <sub>2</sub>	6727	5,174864e-01	1,4499e+01	-3,286	1,0000	-0,000
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-8029	8,973425e-08	5,5647e-06	-10,047	0,9880	-0,005
O <sub>2</sub>	6334	2,584046e-01	8,2698e+00	-3,588	1,0000	-0,000
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	-175578	6,937326e-02	6,6651e+00	-4,159	0,9526	-0,021
OH <sup>-</sup>	-35222	1,057769e-07	1,7992e-06	-9,976	0,9880	-0,005
H <sup>+</sup>	2372	9,942087e-02	1,0022e-01	-4,002	0,9878	-0,005
H <sub>2</sub> O	-56678	5,550249e+04	1,0000e+00	1,744	1,0000	0,000
<b>Газ</b>						
CO <sub>2</sub>	-94263	1,011427e+00	0,04	0,005	0,9949	-0,002
N <sub>2</sub>	0	2,754586e+03	77,25	3,440	0,9998	-0,000
NO <sub>2</sub>	12420	4,919827e-07	0,00	-6,308	1,0000	0,000
N <sub>2</sub> O	24767	8,729458e-16	0,00	-15,059	0,9946	-0,002
O <sub>2</sub>	0	7,089851e+02	22,71	2,851	0,9994	-0,000
<b>Твердая фаза</b>						
Бианкит ZnSO <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub>	-612591	9,600000e-01	100,00	-0,018	1,0000	0,000

Резервуар - 2					
Температура, °С -	25,00	Давление, бар -	1,00	Масса, кг -	1000,040
Объем мультисистемы, см <sup>3</sup> -	1003145,562	Плотность мультисистемы, г/см <sup>3</sup> -		0,996904	
G, кал -	-3145945088	H, кал -	-3791823104	S, кал/К -	928098,312
U, кал -	-3742549760	Ср, кал -	998565,44	Ионная сила -	0,0002
Eh, В -	-0,5754	ре -	-9,7452	pH -	9,9658

Наименование фазы	Объем, см <sup>3</sup>	Молярное количество	Масса, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание, вес, %
Водный раствор	1002771,95514	5,54962e+04	999776,2500	9,97013e-01	99,97366
Газ	373,65366	1,52188e-02	0,1685	4,50833e-04	0,00002
Твердая фаза					
CdS	0,00000	2,00000e-02	2,8895	0,00000e+00	0,00029
Cu <sub>2</sub> S	0,00657	9,99999e-03	1,5916	2,42371e+02	0,00016
ZnSO <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub>	0,00000	2,00000e-01	53,9091	0,00000e+00	0,00489
sphalerite	0,00000	3,81350e-06	0,0004	1,71103e+02	0,00000

Состав фазы	Функция gT, кал/моль	Молярное количество	Концентрация мг/кг H <sub>2</sub> O	log молярности	Коэф. активности	log коэф. активности
Водный раствор						
H <sub>2</sub>	6616	2,770244e-01	5,5860e-01	-3,557	1,0000	0,000
H <sub>2</sub> S	-4293	1,126346e-04	3,8399e-03	-6,948	1,0000	0,000
HS <sup>-</sup>	5231	1,098874e-01	3,6354e+00	-3,959	0,9857	-0,006
HZnO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	-108348	3,145777e-13	3,0962e-11	-15,502	0,9857	-0,006
N <sub>2</sub>	6727	7,920678e-15	2,2195e-13	-17,101	1,0000	-0,000
NH <sub>3</sub>	-4003	1,103779e+00	1,8803e+01	-2,957	1,0000	0,000
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	-16619	2,084449e-01	3,7611e+00	-3,681	0,9855	-0,006
S <sub>2</sub> <sup>-2</sup>	21346	6,495424e-15	4,1668e-13	-17,187	0,9436	-0,025
Zn <sup>+2</sup>	-32855	2,178836e-15	1,4251e-13	-17,662	0,9433	-0,025
ZnO	-65040	2,123341e-13	1,7287e-11	-15,673	1,0000	0,000
ZnOH <sup>+</sup>	-78819	2,856068e-13	2,3540e-11	-15,544	0,9855	-0,006
OH <sup>-</sup>	-35231	9,855766e-02	1,6767e+00	-4,006	0,9857	-0,006
H <sup>+</sup>	2364	1,096936e-07	1,1060e-07	-9,960	0,9854	-0,006
H <sub>2</sub> O	-56678	5,549444e+04	1,0000e+00	1,744	1,0000	0,000
Газ						
H <sub>2</sub> S	-7905	1,370118e-08	0,00	-7,863	0,9923	-0,003
H <sub>2</sub>	0	5,396517e-03	6,46	-2,268	1,0000	0,000
CH <sub>4</sub>	-12151	9,822263e-03	93,54	-2,008	0,9983	-0,001
N <sub>2</sub>	0	1,852346e-16	0,00	-15,732	0,9998	-0,000
Твердая фаза						
Гринокит CdS	-37404	1,999999e-02	1,10	-1,699	1,0000	0,000
Халькозин Cu <sub>2</sub> S	-20602	9,999991e-03	0,60	-2,000	1,0000	0,000
Биванкит ZnSO <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub>	-612591	9,599962e-01	98,30	-0,018	1,0000	0,000
Сфалерит ZnS	-48110	3,813503e-06	0,00	-5,419	1,0000	0,000

Таблица 5-2

**Результаты моделирования взаимодействия сфалерита (ZnS)  
с природными водами (резервуар 1) и ионным раствором (резервуар 2)**

<b>Резервуар - 1</b>					
Температура, °С -	25,00	Давление, бар -	1,00	Масса, кг -	1100,097
Объем мультисистемы, см <sup>3</sup> -	8,57223e+07	Плотность мультисистемы, г/см <sup>3</sup> -			0,012833
G, кал -	-3147543296	H, кал -	-3792470272	S, кал/К -	1120207,750
U, кал -	-3745214464	Ср, кал -	1022721,81	Ионная сила -	0,0000
Eh, В -	0,8813	pe -	14,927	pH -	5,6737

Наименование фазы	Объем, см <sup>3</sup>	Мольное количество	Масса, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание, вес. %
Водный раствор	1002910,96210	5,55034e+04	999930,1875	9,97028e-01	90,89471
Газ	84719347,56179	3,46462e+03	99897,5234	1,17916e-03	9,08079
<b>Твердая фаза</b>					
ZnSO <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub>	0,00000	1,00000e+00	269,5453	0,00000e+00	0,02450

Состав фазы	Функция gT, кал/моль	Мольное количество	Концентрация мг/кг H <sub>2</sub> O	лог молярности	Коэф. активности	лог коэф. активности
<b>Водный раствор</b>						
CO <sub>2</sub>	-89870	9,747911e-03	4,2906e-01	-5,011	1,0000	0,000
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	-123812	4,666831e-08	2,8009e-06	-10,331	0,9976	-0,001
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-137902	2,106089e-03	1,2853e-01	-5,676	0,9994	-0,000
HNO <sub>3</sub>	-9720	3,385731e-10	1,5920e-08	-12,470	1,0000	0,000
HNO <sub>2</sub>	-22350	2,772231e-01	1,7471e+01	-3,557	1,0000	-0,000
HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-178250	4,531042e-13	4,3990e-11	-15,344	0,9994	-0,000
N <sub>2</sub>	6727	5,176595e-01	1,4503e+01	-3,286	1,0000	-0,000
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-8022	4,090379e-06	2,5366e-04	-8,388	0,9994	-0,000
O <sub>2</sub>	6334	2,583516e-01	8,2681e+00	-3,588	1,0000	-0,000
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-175551	2,245503e-09	2,1574e-07	-11,649	0,9976	-0,001
OH <sup>-</sup>	-35215	4,826416e-06	8,2096e-05	-8,316	0,9994	-0,000
H <sup>+</sup>	2379	2,115104e-03	2,1322e-03	-5,675	0,9994	-0,000
H <sub>2</sub> O	-56678	5,550230e+04	1,0000e+00	1,744	1,0000	0,000
<b>Газ</b>						
CO <sub>2</sub>	-94263	1,009395e+00	0,04	0,004	0,9949	-0,002
N <sub>2</sub>	0	2,754585e+03	77,24	3,440	0,9998	-0,000
NO <sub>2</sub>	12420	4,970253e-07	0,00	-6,304	1,0000	0,000
N <sub>2</sub> O	24767	8,729631e-16	0,00	-15,059	0,9946	-0,002
O <sub>2</sub>	0	7,090202e+02	22,71	2,851	0,9994	-0,000
<b>Твердая фаза</b>						
Бианкит ZnSO <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub>	-612591	1,000000e+00	100,00	-0,000	1,0000	0,000

<b>Резервуар - 2</b>					
Температура, °С -	25,00	Давление, бар -	1,00	Масса, кг -	1000,028
Объем мультисистемы, см <sup>3</sup> -	1003242,250	Плотность мультисистемы, г/см <sup>3</sup> -			0,996796
G, кал -	-3145917696	H, кал -	-3791790592	S, кал/К -	928093,312
U, кал -	-3742516736	Ср, кал -	998565,88	Ионная сила -	0,0001
Eh, В -	-0,5867	pe -	-9,9374	pH -	10,1479

Окончание таблицы 5-2

Наименование фазы	Объем, см <sup>3</sup>	Мольное количество	Масса, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание, вес, %
Водный раствор	1002775,09635	5,54965e+04	999778,0625	9,97011e-01	99,97505
Газ	467,07337	1,90173e-02	0,2046	4,38072e-04	0,00002
<b>Твердая фаза</b>					
ZnSO <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub>	0,00000	1,00000e+00	269,5453	0,00000e+00	0,02450
ZnS	0,06689	1,17432e-01	11,4444	1,71103e+02	0,00114

Состав фазы	Функция gT, кал/моль	Мольное количество	Концентрация мг/кг H <sub>2</sub> O	log молярности	Коэф. активности	log коэф. активности
<b>Водный раствор</b>						
H <sub>2</sub>	6616	2,971020e-01	5,9909e-01	-3,527	1,0000	0,000
H <sub>2</sub> S	-4293	2,992825e-10	1,0203e-08	-12,524	1,0000	0,000
HS <sup>-</sup>	5233	4,115787e-07	1,3616e-05	-9,385	0,9878	-0,005
HZnO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	-108347	2,050891e-07	2,0186e-05	-9,688	0,9879	-0,005
N <sub>2</sub>	6727	7,170097e-15	2,0091e-13	-17,144	1,0000	-0,000
NH <sub>3</sub>	-4003	1,166341e+00	1,9869e+01	-2,933	1,0000	0,000
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	-16618	1,462052e-01	2,6380e+00	-3,835	0,9877	-0,005
Zn <sup>+2</sup>	-32850	4,756287e-10	3,1110e-08	-12,323	0,9517	-0,022
ZnO	-65040	1,055072e-07	8,5895e-06	-9,977	1,0000	0,000
ZnO <sub>2</sub> <sup>-2</sup>	-90939	5,733054e-10	5,5849e-08	-12,241	0,9519	-0,021
ZnOH <sup>+</sup>	-78818	9,646529e-08	7,9507e-06	-10,016	0,9877	-0,005
OH <sup>-</sup>	-35223	1,462047e-01	2,4872e+00	-3,835	0,9878	-0,005
H <sup>+</sup>	2372	7,210471e-08	7,2697e-08	-10,142	0,9876	-0,005
H <sub>2</sub> O	-56678	5,549470e+04	1,0000e+00	1,744	1,0000	0,000
<b>Газ</b>						
H <sub>2</sub> S	-7905	4,551224e-14	0,00	-13,342	0,9923	-0,003
H <sub>2</sub>	0	7,163273e-03	7,06	-2,145	1,0000	0,000
CH <sub>4</sub>	-12151	1,185405e-02	92,94	-1,926	0,9983	-0,001
N <sub>2</sub>	0	2,095365E-16	0,00	-15,679	0,9998	-0,000
<b>Твердая фаза</b>						
Бианкит ZnSO <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub>	-612591	8,825680e-01	95,41	-0,054	1,0000	0,000
Сфалерит ZnS	-48110	1,174316e-01	4,59	-0,930	1,0000	0,000

Таблица 5-3

**Результаты моделирования взаимодействия галенита (PbS)  
с природными водами (резервуар 1) и ионным раствором (резервуар 2)**

<b>Резервуар - 1</b>					
Температура, °C -	25,00	Давление, бар -	1,00	Масса, кг -	1100,239
Объем мультисистемы, см <sup>3</sup> -	8,57224e+07	Плотность мультисистемы, г/см <sup>3</sup> -			0,012835
G, кал -	-3147465472	H, кал -	-3792360960	S, кал/К -	1120264,000
U, кал -	-3745103360	Ср, кал -	1022751,31	Ионная сила -	0,0005
Eh, В -	0,9178	pe -	15,5458	pH -	5,0549

Наименование фазы	Объем, см <sup>3</sup>	Мольное количество	Масса, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание, вес, %
Водный раствор	1003019,16377	5,55096e+04	1000076,0625	9,97066e-01	90,89626
Газ	84719382,14683	3,46462e+03	99897,5859	1,17916e-03	9,07963
<b>Твердая фаза</b>					
PbSO <sub>4</sub>	1,00289	8,75158e-01	265,4034	2,64639e+02	0,02412

Состав фазы	Функция g Г, кал/моль	Мольное количество	Концентрация мг/кг H <sub>2</sub> O	log молярности	Коеф. активности	log коеф. активности
<b>Водный раствор</b>						
CO <sub>2</sub>	-89870	9,761601e-03	4,2962e-01	-5,010	1,0000	0,000
CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	-123827	2,782777e-09	1,6700e-07	-11,556	0,9723	-0,012
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-137906	5,119190e-04	3,1237e-02	-6,291	0,9930	-0,003
HNO <sub>2</sub>	-9720	3,386048e-10	1,5919e-08	-12,470	1,0000	0,000
HNO <sub>3</sub>	-22350	2,773303e-01	1,7476e+01	-3,557	1,0000	-0,000
HPbO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-78624	2,086220e-14	5,0114e-12	-16,681	0,9930	-0,003
HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-178254	1,028468e-04	9,9838e-03	-6,988	0,9930	-0,003
N <sub>2</sub>	6727	5,175104e-01	1,4498e+01	-3,286	1,0000	-0,000
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-8026	9,954757e-07	6,1726e-05	-9,002	0,9930	-0,003
O <sub>2</sub>	6334	2,584774e-01	8,2712e+00	-3,588	1,0000	-0,000
Pb <sup>+2</sup>	-3347	1,163857e-01	2,4116e+01	-3,934	0,9721	-0,012
PbO	-36970	1,903173e-08	4,2480e-06	-10,721	1,0000	0,000
PbOH <sup>+</sup>	-51574	8,456633e-03	1,8961e+00	-5,073	0,9930	-0,003
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	-175566	1,247395e-01	1,1983e+01	-3,904	0,9723	-0,012
OH <sup>-</sup>	-35219	1,172720e-06	1,9945e-05	-8,931	0,9931	-0,003
H <sup>+</sup>	2375	8,867936e-03	8,9386e-03	-5,052	0,9929	-0,003
H <sub>2</sub> O	-56678	5,550829e+04	1,0000e+00	1,744	1,0000	0,000
<b>Газ</b>						
CO <sub>2</sub>	-94263	1,010975e+00	0,04	0,005	0,9949	-0,002
N <sub>2</sub>	0	2,754585e+03	77,24	3,440	0,9998	-0,000
NO <sub>2</sub>	12420	4,975766e-07	0,00	-6,303	1,0000	0,000
N <sub>2</sub> O	24767	8,729629e-16	0,00	-15,059	0,9946	-0,002
O <sub>2</sub>	0	7,090200e+02	22,71	2,851	0,9994	-0,000
<b>Твердая фаза</b>						
Англезит PbSO <sub>4</sub>	-194362	8,751576e-01	100,00	-0,058	1,0000	0,000

<b>Резервуар - 2</b>					
Температура, °C -	25,00	Давление, бар -	1,00	Масса, кг -	1000,315
Объем мультисистемы, см <sup>3</sup> -	1003303,438	Плотность мультисистемы, г/см <sup>3</sup> -			0,997022
G, кал -	-3146227968	H, кал -	-3792151040	S, кал/К -	928227,250
U, кал -	-3742864896	Ср, кал -	998742,00	Ионная сила -	0,0005
Eh, В -	0,0038	pe -	0,0637	pH -	5,0589

## Окончание таблицы 5-3

Наименование фазы	Объем, см <sup>3</sup>	Мольное количество	Масса, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание, вес, %
Водный раствор	1003006,85062	5,55094e+04	1000060,6250	9,97063e-01	99,97455
Газ	295,75370	1,20939e-02	0,3388	1,14571e-03	0,00003
<b>Твердая фаза</b>					
PbS	0,52477	6,97313e-01	166,8434	3,17933e+02	0,01668
PbSO <sub>4</sub>	0,33073	2,88605e-01	87,5234	2,64639e+02	0,00875

Состав фазы	Функция gT, кал/моль	Мольное количество	Концентрация мг/кг H <sub>2</sub> O	log молярности	Коэф. активности	log коэф. активности
<b>Водный раствор</b>						
CO <sub>2</sub>	-89870	9,745878e-03	4,2893e-01	-5,011	1,0001	0,000
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	-123890	3,185744e-09	1,9118e-07	-11,497	0,9002	-0,046
H <sub>2</sub>	6616	4,401130e-11	8,8724e-11	-13,356	1,0000	0,000
H <sub>2</sub> S	-4293	4,031305e-12	1,3740e-10	-14,395	1,0001	0,000
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-137922	5,240791e-04	3,1979e-02	-6,281	0,9742	-0,011
HPbO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	-78640	2,252127e-14	5,4099e-12	-16,647	0,9743	-0,011
HS <sup>-</sup>	5225	4,906937e-14	1,6230e-12	-16,309	0,9743	-0,011
HSO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-123766	2,283588e-13	1,8514e-11	-15,641	0,9742	-0,011
HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-178270	1,037755e-04	1,0074e-02	-6,984	0,9742	-0,011
N <sub>2</sub>	6727	6,439313e-01	1,8039e+01	-3,191	0,9999	-0,000
NH <sub>3</sub>	-4003	1,948410e-08	3,3183e-07	-10,710	1,0001	0,000
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	-16626	3,088525e-04	5,5714e-03	-6,510	0,9737	-0,012
Pb <sup>+2</sup>	-3410	1,300726e-01	2,6952e+01	-3,886	0,8991	-0,046
PbO	-36970	1,926292e-08	4,2996e-06	-10,715	1,0001	0,000
PbOH <sup>+</sup>	-51590	8,851387e-03	1,9846e+00	-5,053	0,9740	-0,011
SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	-113982	1,774923e-15	1,4211e-13	-17,751	0,9002	-0,046
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-175629	1,388203e-01	1,3336e+01	-3,858	0,9001	-0,046
OH <sup>-</sup>	-35234	1,218821e-06	2,0729e-05	-8,914	0,9744	-0,011
H <sup>+</sup>	2360	8,964143e-03	9,0356e-03	-5,047	0,9736	-0,012
H <sub>2</sub> O	-56678	5,550843e+04	1,0000e+00	1,744	1,0000	0,000
<b>Газ</b>						
CO <sub>2</sub>	-94263	3,561967e-06	0,05	-5,448	0,9949	-0,002
H <sub>2</sub> S	-7905	3,897768e-16	0,00	-15,409	0,9923	-0,003
H <sub>2</sub>	0	6,778972e-13	0,00	-12,169	1,0000	0,000
N <sub>2</sub>	0	1,209030e-02	99,95	-1,918	0,9998	-0,000
<b>Твердая фаза</b>						
Галенит PbS	-23590	6,973134e-01	65,59	-0,157	1,0000	0,000
Англезит PbSO <sub>4</sub>	-194362	2,886049e-01	34,41	-0,540	1,0000	0,000

Таблица 5-4

**Результаты моделирования взаимодействия пирита ( $\text{FeS}_2$ ) с природными водами  
(резервуар 1) и ионным раствором (резервуар 2)**

<b>Резервуар - 1</b>					
Температура, °C -	25,00	Давление, бар -	1,00	Масса, кг -	1100,120
Объем мультисистемы, $\text{см}^3$ -	8,56797e+07	Плотность мультисистемы, $\text{г}/\text{см}^3$ -			0,012840
G, кал -	-3147624960	H, кал -	-3792431616	S, кал /K -	1120252,750
U, кал -	-3745180672	Ср, кал -	1022604,56	Ионная сила -	0,0052
Eh, В -	1,0700	ре -	18,1237	pH -	2,4769

Наименование фазы	Объем, $\text{см}^3$	Мольное количество	Масса, г	Плотность, $\text{г}/\text{см}^3$	Содержание, вес, %
Водный раствор	1003019,71762	5,55129e+04	1000198,3125	9,97187e-01	90,91721
Газ	84676637,69700	3,46287e+03	99841,6406	1,17909e-03	9,07552
<b>Твердая фаза</b>					
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,36185	4,99814e-01	79,8165	2,20579e+02	0,00726

Состав фазы	Функция gT, кал/моль	Мольное количество	Концентрация мг/кг $\text{H}_2\text{O}$	log молярности	Коэф. активности	log коэф. активности
<b>Водный раствор</b>						
$\text{CO}_2$	-89870	9,761549e-03	4,2963e-01	-5,010	1,0009	0,000
$\text{CO}_3^{2-}$	-123975	2,496087e-14	1,4980e-12	-16,603	0,7572	-0,121
$\text{Fe}^{+2}$	-19660	8,211268e-10	4,5861e-08	-12,086	0,7508	-0,125
$\text{Fe}^{+3}$	-2123	1,517439e-04	8,4750e-03	-6,819	0,5240	-0,281
$\text{FeO}^+$	-50762	1,752957e-05	1,2595e-03	-7,756	0,9320	-0,031
$\text{FeOH}^{+2}$	-55590	2,019622e-04	1,4715e-02	-6,695	0,7508	-0,125
$\text{HCO}_3^-$	-137942	1,437990e-06	8,7748e-05	-8,842	0,9342	-0,030
$\text{HFeO}_2$	-98720	2,130152e-09	1,8928e-07	-11,672	1,0008	0,000
$\text{HNO}_3$	-9720	3,380286e-10	1,5893e-08	-12,471	1,0003	0,000
$\text{HNO}_2$	-22351	2,767693e-01	1,7441e+01	-3,558	0,9996	-0,000
$\text{HSO}_4^-$	-178291	4,104382e-01	3,9845e+01	-3,387	0,9338	-0,030
$\text{N}_2$	6726	5,179817e-01	1,4511e+01	-3,286	0,9995	-0,000
$\text{NO}_3^-$	-8063	2,792273e-09	1,7315e-07	-11,554	0,9335	-0,030
$\text{O}_2$	6333	2,581235e-01	8,2602e+00	-3,588	0,9992	-0,000
$\text{SO}_4^{2-}$	-175715	1,589562e+00	1,5271e+02	-2,799	0,7564	-0,121
$\text{OH}^-$	-35254	3,288717e-09	5,5936e-08	-11,483	0,9359	-0,029
$\text{H}^+$	2336	3,588687e+00	3,6174e+00	-2,445	0,9291	-0,032
$\text{H}_2\text{O}$	-56678	5,550630e+04	1,0000e+00	1,744	1,0000	0,000
<b>Газ</b>						
$\text{CO}_2$	-94263	1,011486e+00	0,04	0,005	0,9949	-0,002
$\text{N}_2$	0	2,754585e+03	77,29	3,440	0,9998	-0,000
$\text{NO}_2$	12420	4,961144e-07	0,00	-6,304	1,0000	0,000
$\text{N}_2\text{O}$	24767	8,721056e-16	0,00	-15,059	0,9946	-0,002
$\text{O}_2$	0	7,072710e+02	22,67	2,850	0,9994	-0,000
<b>Твердая фаза</b>						
Гематит						
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	-177366	4,998144e-01	100,00	-0,301	1,0000	0,000

<b>Резервуар - 2</b>					
Температура, °C -	25,00	Давление, бар -	1,00	Масса, кг -	1000,318
Объем мультисистемы, $\text{см}^3$ -		1002998,125	Плотность мультисистемы, $\text{г}/\text{см}^3$ -		0,997328
G, кал -	-3146488320	H, кал -	-3792439552	S, кал /K -	928302,000
U, кал -	-3743156224	Ср, кал -	998567,19	Ионная сила -	0,0068
Eh, В -	0,1478	ре -	2,5029	pH -	2,4601

Окончание таблицы 5-4

Наименование фазы	Объем, см <sup>3</sup>	Мольное количество	Масса, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание, вес, %
Водный раствор	1002997,75236	5,55131e+04	1000226,0000	9,97237e-01	99,99077
Газ	0,36944	1,51033e-05	0,0004	1,14571e-03	0,00000
Твердая фаза					
FeS <sub>2</sub>	0,00000	7,69231e-01	92,2915	0,00000e+00	0,00923

Состав фазы	Функция gT, кал/моль	Мольное количество	Концентрация мг/кг H <sub>2</sub> O	log молярности	Коэф. активности	log коэф. активности
<b>Водный раствор</b>						
CO <sub>2</sub>	-89869	9,761369e-03	4,2963e-01	-5,010	1,0013	0,001
CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	-124173	3,741384e-14	2,2453e-12	-16,427	0,7161	-0,145
Fe <sup>+2</sup>	-19866	2,311405e-01	1,2909e+01	-3,636	0,7070	-0,151
Fe <sup>+3</sup>	-2586	1,587784e-11	8,8680e-10	-13,799	0,4576	-0,340
FeO*	-50812	9,750913e-13	7,0062e-11	-15,011	0,9187	-0,037
FeOH <sup>+</sup>	-63562	2,186492e-08	1,5931e-06	-10,660	0,9186	-0,037
FeOH <sup>+2</sup>	-55796	1,411993e-11	1,0288e-09	-13,850	0,7070	-0,151
H <sub>2</sub>	6616	8,038442e-11	1,6206e-10	-13,095	1,0001	0,000
H <sub>2</sub> S	-4293	5,686735e-05	1,9383e-03	-7,245	1,0008	0,000
H <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-125621	7,504425e-13	8,5667e-11	-15,125	0,9992	-0,000
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-137990	1,617393e-06	9,8696e-05	-8,791	0,9220	-0,035
HIS <sup>-</sup>	5192	1,970322e-09	6,5171e-08	-11,705	0,9227	-0,035
HS <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-124869	6,545107e-11	7,4056e-09	-13,184	0,9214	-0,036
HSO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-123799	1,505710e-09	1,2208e-07	-11,822	0,9211	-0,036
HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-178339	3,976129e-01	3,8600e+01	-3,401	0,9214	-0,036
N <sub>2</sub>	6726	5,207508e-01	1,4589e+01	-3,283	0,9992	-0,000
NH <sub>3</sub>	-4003	4,411670e-08	7,5139e-07	-10,355	1,0011	0,000
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	-16663	2,712008e-01	4,8924e+00	-3,567	0,9153	-0,038
S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	-122719	5,400066e-10	6,0556e-08	-12,268	0,7141	-0,146
SO <sub>2</sub>	-69600	3,189290e-10	2,0434e-08	-12,496	0,9998	-0,000
SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	-114118	3,745444e-14	2,9990e-12	-16,426	0,7158	-0,145
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	-175914	2,063869e+00	1,9828e+02	-2,685	0,7150	-0,146
OH <sup>-</sup>	-35301	3,683425e-09	6,2650e-08	-11,434	0,9244	-0,034
H <sup>+</sup>	2283	3,791870e+00	3,8223e+00	-2,421	0,9144	-0,039
H <sub>2</sub> O	-56678	5,550580e+04	1,0000e+00	1,744	1,0000	0,000
<b>Газ</b>						
CO <sub>2</sub>	-94263	4,417488e-09	0,05	-8,355	0,9949	-0,002
H <sub>2</sub> S	-7905	6,878739e-12	0,00	-11,162	0,9923	-0,003
H <sub>2</sub>	0	1,546608e-15	0,00	-14,811	1,0000	0,000
N <sub>2</sub>	0	1,510258e-05	99,95	-4,821	0,9998	-0,000
O <sub>2</sub> S	-71749	3,263205e-18	0,00	-17,486	0,9845	-0,007
<b>Твердая фаза</b>						
Марказит FeS <sub>2</sub>	-39890	7,692308e-01	100,00	-0,114	1,0000	0,000

Таблица 5-5

**Результаты моделирования взаимодействия халькопирита (CuFeS<sub>2</sub>) с природными водами (резервуар 1) и ионным раствором (резервуар 2)**

<b>Резервуар - 1</b>					
Температура, °C -	25,00	Давление, бар -	1,00	Масса, кг -	1100,183
Объем мультисистемы, см <sup>3</sup> -	8,5667400	Плотность мультисистемы, г/см <sup>3</sup> -			0,012842
G, кал -	-3147663360	H, кал -	-3792436992	S, кал /K -	1120367,125
U, кал -	-3745232896	Ср. кал -	1022604,81	Ионная сила -	0,0065
En, В -	1,0521	ре -	17,8209	pH -	2,7797

Наименование фазы	Объем, см <sup>3</sup>	Молярное количество	Масса, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание, вес. %
Водный раствор	1003009,43894	5,55131e+04	1000277,8125	9,97277e-01	90,91919
Газ	84664426,83897	3,46237e+03	99825,6562	1,17907e-03	9,07355
<b>Твердая фаза</b>					
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,36196	4,99963e-01	79,8403	2,20579e+02	0,00726

Состав фазы	Функция gT, кал/моль	Молярное количество	Концентрация мг/кг H <sub>2</sub> O	log молярности	Коэф. активности	log коэф. активности
<b>Водный раствор</b>						
CO <sub>2</sub>	-89870	9,766332e-03	4,2984e-01	-5,010	1,0006	0,000
CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	-123949	9,627580e-14	5,7777e-12	-16,016	0,7918	-0,101
Cu <sup>+2</sup>	17913	9,999939e-01	6,3549e+01	-3,000	0,7870	-0,104
CuO	-18418	4,412917e-10	3,5104e-08	-12,355	1,0029	0,001
CuOH <sup>+</sup>	-27855	6,053450e-06	4,8765e-04	-8,218	0,9425	-0,026
Fe <sup>+2</sup>	-19632	1,942426e-10	1,0848e-08	-12,712	0,7871	-0,104
Fe <sup>+3</sup>	-2060	1,681553e-05	9,3914e-04	-7,774	0,5831	-0,234
FeO <sup>+</sup>	-50755	8,629748e-06	6,2005e-04	-8,064	0,9427	-0,026
FeOH <sup>+2</sup>	-55562	4,753909e-05	3,4636e-03	-7,323	0,7871	-0,104
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-137936	2,856716e-06	1,7432e-04	-8,544	0,9443	-0,025
HFeO <sub>2</sub>	-98720	2,130771e-09	1,8934e-07	-11,671	1,0006	0,000
HNO <sub>2</sub>	-9720	3,379553e-10	1,5889e-08	-12,471	1,0002	0,000
HNO <sub>3</sub>	-22350	2,765899e-01	1,7430e+01	-3,558	0,9997	-0,000
HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-178284	2,350137e-01	2,2814e+01	-3,629	0,9440	-0,025
N <sub>2</sub>	6726	5,180026e-01	1,4512e+01	-3,286	0,9996	-0,000
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-8056	5,542982e-09	3,4371e-07	-11,256	0,9438	-0,025
O <sub>2</sub>	6333	2,579424e-01	8,2542e+00	-3,588	0,9995	-0,000
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	-175688	1,764986e+00	1,6956e+02	-2,753	0,7912	-0,102
OH <sup>-</sup>	-35248	6,537516e-09	1,1119e-07	-11,185	0,9455	-0,024
H <sup>+</sup>	2343	1,764841e+00	1,7789e+00	-2,753	0,9407	-0,027
H <sub>2</sub> O	-56678	5,550730e+04	1,0000e+00	1,744	1,0000	0,000
<b>Газ</b>						
CO <sub>2</sub>	-94263	1,011480e+00	0,04	0,005	0,9949	-0,002
N <sub>2</sub>	0	2,754585e+03	77,30	3,440	0,9998	-0,000
NO <sub>2</sub>	12420	4,957993e-07	0,00	-6,305	1,0000	0,000
N <sub>2</sub> O	24767	8,718605e-16	0,00	-15,060	0,9946	-0,002
O <sub>2</sub>	0	7,067714e+02	22,66	2,849	0,9994	-0,000
<b>Твердая фаза</b>						
Гематит						
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-177366	4,999635e-01	100,00	-0,301	1,0000	0,000

<b>Резервуар - 2</b>					
Температура, °C -	25,00	Давление, бар -	1,00	Масса, кг -	1000,461
Объем мультисистемы, см <sup>3</sup> -	1003014,125	Плотность мультисистемы, г/см <sup>3</sup> -			0,997455

Окончание таблицы 5-5

G, кал -	-3146550016	H, кал -	-3792495360	S, кал /K -	928360,688
U, кал -	-3743223040	Sp, кал -	998585,56	Ионная сила -	0,0075
Gh, B -	0,1626	pe -	2,7539	pH -	2,5233

Наименование фазы	Объем, см <sup>3</sup>	Мольное количество	Масса, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание, вес. %
Водный раствор	1003001,30467	5,55137e+04	1000269,1875	9,97276e-01	99,98079
Газ	12,70182	5,19398e-04	0,0146	1,14559e-03	0,00000
<b>Твердая фаза</b>					
Cu <sub>2</sub> S	0,13553	2,06384e-01	32,8476	2,42371e+02	0,00328
Cu <sub>3</sub> FeS <sub>4</sub>	0,00000	3,17447e-01	159,3077	0,00000e+00	0,01592

Состав фазы	Функция gT, кал/моль	Мольное количество	Концентрация мг/кг Н <sub>2</sub> O	log молярности	Кэф, активности	log коэф. активности
<b>Водный раствор</b>						
CO <sub>2</sub>	-89869	9,767301e-03	4,2988e-01	-5,010	1,0013	0,001
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	-124145	4,660059e-14	2,7966e-12	-16,332	0,7180	-0,144
Cu <sup>+</sup>	14243	3,513757e-09	2,2330e-07	-11,454	0,9174	-0,037
Cu <sup>+2</sup>	17709	5,744038e-09	3,6503e-07	-11,241	0,7088	-0,149
CuOH <sup>+</sup>	-27906	1,581520e-14	1,2740e-12	-16,801	0,9188	-0,037
Fe <sup>+2</sup>	-19836	6,826263e-01	3,8125e+01	-3,166	0,7089	-0,149
Fe <sup>+3</sup>	-2519	7,851501e-11	4,3851e-09	-13,105	0,4604	-0,337
FeO <sup>+</sup>	-50805	6,961896e-12	5,0022e-10	-14,157	0,9193	-0,037
FeOH <sup>+</sup>	-63555	7,667507e-08	5,5865e-06	-10,115	0,9192	-0,037
FeOH <sup>+2</sup>	-55766	8,495264e-11	6,1896e-09	-13,071	0,7089	-0,149
H <sub>2</sub>	6616	1,937476e-11	3,9060e-11	-13,713	1,0001	0,000
H <sub>2</sub> S	-4293	1,608013e-07	5,4808e-06	-9,794	1,0008	0,000
H <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-125621	1,771141e-15	2,0218e-13	-17,752	0,9992	-0,000
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-137984	1,825531e-06	1,1140e-04	-8,739	0,9226	-0,035
HS <sup>-</sup>	5193	6,349406e-12	2,1001e-10	-14,197	0,9233	-0,035
HS <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-124868	1,763856e-13	1,9957e-11	-15,754	0,9220	-0,035
HSO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-123798	3,465508e-10	2,8097e-08	-12,460	0,9217	-0,035
HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-178332	3,763525e-01	3,6535e+01	-3,424	0,9220	-0,035
N <sub>2</sub>	6726	6,402292e-01	1,7936e+01	-3,194	0,9992	-0,000
NH <sub>3</sub>	-4003	5,793241e-09	9,8668e-08	-11,237	1,0011	0,000
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	-16662	3,109814e-02	5,6100e-01	-4,507	0,9159	-0,038
S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	-122718	1,659477e-12	1,8609e-10	-14,780	0,7161	-0,145
SO <sub>2</sub>	-69600	6,428477e-11	4,1186e-09	-13,192	0,9998	-0,000
SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	-114116	9,830040e-15	7,8708e-13	-17,007	0,7177	-0,144
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-175886	2,147478e+00	2,0631e+02	-2,668	0,7169	-0,145
OH <sup>-</sup>	-35294	4,163278e-09	7,0811e-08	-11,381	0,9250	-0,034
H <sup>+</sup>	2291	3,274958e+00	3,3012e+00	-2,485	0,9150	-0,039
H <sub>2</sub> O	-56678	5,550655e+04	1,0000e+00	1,744	1,0000	0,000
<b>Газ</b>						
CO <sub>2</sub>	-94263	6,133420e-08	0,02	-7,212	0,9949	-0,002
H <sub>2</sub> S	-7905	6,676007e-13	0,00	-12,175	0,9923	-0,003
H <sub>2</sub>	0	1,281939e-14	0,00	-13,892	1,0000	0,000
O <sub>2</sub> S	-71749	2,261941e-17	0,00	-16,646	0,9845	-0,007
<b>Твердая фаза</b>						
Халькозин Cu <sub>2</sub> S	-20602	2,063836e-01	17,09	-0,685	1,0000	0,000
Борнит Cu <sub>3</sub> FeS <sub>4</sub>	-93898	3,174466e-01	82,91	-0,498	1,0000	0,000

**Результаты моделирования взаимодействия теллуроселенида свинца и висмута  
( $Ag_{0,3}Cu_{0,7}Pb_{0,5}Bi_{0,5}As_{0,5}Sb_{0,48}Te_{0,02}Se_3S_{1,0}$ ) с природными водами (резервуар 1) и  
ионным раствором (резервуар 2)**

Резервуар - 1					
Температура, °С -	25,00	Давление, бар -	1,00	Масса, кг -	1100,652
Объем мультисистемы, см <sup>3</sup> -	8,55744e+07	Плотность мультисистемы, г/см <sup>3</sup> -			0,012862
G, кал -	-3147824128	H, кал -	-3792766976	S, кал /K -	1120216,875
U, кал -	-37455214086	Ср, квл -	1022764,56	Ионная сила -	0,0028
Eh, В -	0,9723	ре -	16,4678	pH -	4,1323

Наименование фазы	Объем, см <sup>3</sup>	Молярное количество	Масса, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание, вес, %
Водный раствор	1003138,25753	5,55125e+04	1000611,6875	9,97481e-01	90,91083
Газ	84571309,43812	3,45856e+03	99704,3516	1,17894e-03	9,05866
<b>Твердая фаза</b>					
Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,29176	2,45479e-01	114,3828	3,92040e+02	0,01039
PbSO <sub>4</sub>	0,53155	4,63852e-01	140,6694	2,64639e+02	0,01278
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00000	2,50000e-01	80,8742	0,00000e+00	0,00735

Состав фазы	Функция gT, кал/моль	Молярное количество	Концентрация мг/кг H <sub>2</sub> O	log молярности	Коэф, активности	log коэф, активности
<b>Водный раствор</b>						
AgCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-109073	1,364933e-13	2,2916e-11	-15,865	0,9613	-0,017
Ag <sup>+</sup>	20782	7,256777e-03	7,8283e-01	-5,139	0,9594	-0,018
AgNO <sub>3</sub>	-5358	2,927432e-01	4,9732e+01	-3,533	1,0003	0,000
AgOH	-19520	9,752260e-11	1,2179e-08	-13,011	1,0003	0,000
AsO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>	-152807	5,541578e-11	7,6988e-09	-13,256	0,6928	-0,159
Bi <sup>+3</sup>	25040	1,148975e-07	2,4013e-05	-9,940	0,6897	-0,161
BiO <sup>+</sup>	-26945	7,671616e-03	1,7261e+00	-5,115	0,9594	-0,018
BiO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	-59344	2,251689e-12	5,4265e-10	-14,647	0,9603	-0,018
BiOH <sup>+2</sup>	-30018	1,011532e-04	2,2861e-02	-6,995	0,8480	-0,072
CO <sub>2</sub>	-89870	9,778429e-03	4,3038e-01	-5,010	1,0003	0,000
CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	-123907	4,550647e-11	2,7310e-09	-13,342	0,8505	-0,070
Cu <sup>+</sup>	14305	1,133059e-14	7,2006e-13	-16,946	0,9596	-0,018
Cu <sup>+2</sup>	17957	6,998987e-01	4,4479e+01	-3,155	0,8481	-0,072
CuO	-18419	1,691830e-07	1,3459e-05	-9,772	1,0014	0,001
CuOH <sup>-</sup>	-27845	1,011016e-04	8,1446e-03	-6,995	0,9599	-0,018
H <sub>2</sub> AsO <sub>4</sub> <sup>+</sup>	-177654	4,922597e-01	6,9381e+01	-3,308	0,9607	-0,017
HSeO <sub>3</sub>	-99470	3,000000e+00	3,8392e+02	-2,523	0,9997	-0,000
H <sub>2</sub> AsO <sub>4</sub>	-180720	6,426855e-03	9,1231e-01	-5,192	0,9999	-0,000
HAsO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	-168506	1,313477e-03	1,8380e-01	-5,882	0,8503	-0,070
HBiO <sub>2</sub>	-76920	1,269630e-03	3,0725e-01	-5,896	1,0003	0,000
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-137926	6,334577e-05	3,8654e-03	-7,198	0,9608	-0,017
HNO <sub>2</sub>	-9720	3,371244e-10	1,5850e-08	-12,472	1,0001	0,000
HNO <sub>3</sub>	-22350	2,752503e-01	1,7345e+01	-3,560	0,9999	-0,000
HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-178274	3,319995e-03	3,2230e-01	-5,479	0,9607	-0,017
HSeO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-105744	1,827662e-12	2,6314e-10	-14,738	0,9605	-0,017
N <sub>2</sub>	6727	5,183925e-01	1,4523e+01	-3,285	0,9998	-0,000
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-8046	1,220258e-07	7,5667e-06	-9,914	0,9606	-0,017
O <sub>2</sub>	6334	2,567869e-01	8,2174e+00	-3,590	0,9998	-0,000
Pb <sup>+2</sup>	-3428	3,586773e-02	7,4323e+00	-4,445	0,8476	-0,072
PbO	-36970	7,258904e-11	1,6203e-08	-13,139	1,0003	0,000

Продолжение таблицы 5-6

PbOH <sup>+</sup>	-51594	2,803321e-04	6,2857e-02	-6,552	0,9600	-0,018
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-175646	5,328281e-01	5,1189e+01	-3,273	0,8502	-0,070
SeO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-103216	3,476843e-10	4,9707e-08	-12,459	0,8500	-0,071
OH <sup>-</sup>	-35238	1,447190e-07	2,4615e-06	-9,839	0,9613	-0,017
H <sup>+</sup>	2355	7,688100e-02	7,7497e-02	-4,114	0,9591	-0,018
H <sub>2</sub> O	-56678	5,550625e+04	1,0000e+00	1,744	1,0000	0,000
<b>Газ</b>						
CO <sub>2</sub>	-94263	1,011407e+00	0,04	0,005	0,9949	-0,002
N <sub>2</sub>	0	2,754439e+03	77,39	3,440	0,9998	-0,000
NO <sub>2</sub>	12420	4,934931e-07	0,00	-6,307	1,0000	0,000
N <sub>2</sub> O	24767	8,700307e-16	0,00	-15,060	0,9946	-0,002
O <sub>2</sub>	0	7,031083e+02	22,57	2,847	0,9994	-0,000
<b>Твердая фаза</b>						
Битумит						
Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-118009	2,454787e-01	34,05	-0,610	1,0000	0,000
Апглезит						
PbSO <sub>4</sub>	-194362	4,638519e-01	41,88	-0,334	1,0000	0,000
Оксид сурьмы Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>						
	-198208	2,500000e-01	24,07	-0,602	1,0000	0,000

**Резервуар - 2**

Температура, °С -	25,00	Давление, бар -	1,00	Масса, кг -	1001,276
Объем мультисистемы, см <sup>3</sup> -		1005276,812	Плотность мультисистемы, г/см <sup>3</sup> -		0,996020
G, кал -	-3146637056	H, кал -	-3792596480	S, кал/К -	928448,625
U, кал -	-37455214086	Ср, кал -	998753,19	Ионная сила -	0,0032
Eh, В -	0,2819	ре -	4,7743	pH -	4,5070

Наименование фазы	Объем, см <sup>3</sup>	Молярное количество	Масса, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание, вес. %
Водный раствор	1003007,34681	5,55104e+04	1000244,3125	9,97245e-01	99,89693
Газ	2266,54600	9,26829e-02	2,5968	1,14571e-03	0,00026
<b>Твердая фаза</b>					
Bi <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0,00000	1,15592e-01	81,6253	0,00000e+00	0,00815
Si <sub>2</sub> O	0,16958	3,02732e-01	43,3183	2,55439e+02	0,00433
Cu <sub>2</sub> O(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0,00000	2,00000e-02	6,0557	0,00000e+00	0,00060
PbSO <sub>4</sub>	0,49127	4,28703e-01	130,0100	2,64639e+02	0,01298
Sb <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0,00000	8,99988e-01	276,7440	0,00000e+00	0,02764
ZnSO <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub>	0,00000	2,00000e-02	5,3909	0,00000e+00	0,00054
Ag <sub>2</sub> Se	0,00000	1,70000e-01	50,0983	0,00000e+00	0,00500
Se	2,16744	5,52238e+00	436,0471	2,01180e+02	0,04355

Состав фазы	Функция gT, кал/моль	Молярное количество	Концентрация мг/кг H <sub>2</sub> O	log молярности	Кэф, активности	log коэф, активности
<b>Водный раствор</b>						
Ag <sup>+</sup>	20766	2,556517e-10	2,7578e-08	-12,592	0,9603	-0,018
AsO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	-81293	2,071455e-07	2,2149e-05	-9,684	0,9622	-0,017
AsO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	-152950	2,377664e-10	3,3032e-08	-12,624	0,6989	-0,156
Bi <sup>3+</sup>	24894	3,879561e-07	8,1079e-05	-9,411	0,6954	-0,158
BiO <sup>+</sup>	-26961	1,226955e-01	2,7605e+01	-3,911	0,9603	-0,018
BiO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	-59360	2,141800e-10	5,1615e-08	-12,669	0,9613	-0,017
BiOH <sup>2+</sup>	-30083	7,218238e-04	1,6313e-01	-6,142	0,8511	-0,070
CO <sub>2</sub>	-89870	9,916055e-03	4,3642e-01	-5,004	1,0003	0,000

$\text{CO}_3^{2-}$	-123970	3,053731e-10	1,8326e-08	-12,515	0,8539	-0,069
$\text{Cu}^+$	14289	5,415327e-03	3,4414e-01	-5,266	0,9605	-0,018
$\text{Cu}^{+2}$	17893	7,367894e-01	4,6822e+01	-3,133	0,8512	-0,070
$\text{CuO}$	-18419	9,459049e-07	7,5246e-05	-9,024	1,0015	0,001
$\text{CuOH}^+$	-27861	2,385054e-04	1,9213e-02	-6,622	0,9609	-0,017
$\text{Fe}^{+2}$	-19652	7,076262e-09	3,9521e-07	-11,150	0,8512	-0,070
$\text{FeO}^*$	-50760	8,307267e-14	5,9687e-12	-16,081	0,9610	-0,017
$\text{FeOH}^+$	-63494	9,111636e-14	6,6385e-12	-16,040	0,9609	-0,017
$\text{FeOH}^{+2}$	-55582	8,603067e-15	6,2680e-13	-17,065	0,8512	-0,070
$\text{H}_7\text{AsO}_7^-$	-137973	2,078081e-07	2,5964e-05	-9,682	0,9618	-0,017
$\text{H}_2\text{AsO}_4^-$	-177669	2,862717e-01	4,0348e+01	-3,543	0,9617	-0,017
$\text{HSeO}_3$	-99471	3,076208e-01	3,9367e+01	-3,512	0,9997	-0,000
$\text{H}_3\text{AsO}_4$	-180720	1,493321e-03	2,1198e-01	-5,826	0,9998	-0,000
$\text{HAsO}_2$	-93860	1,020992e-02	1,1020e+00	-4,991	1,0002	0,000
$\text{HAsO}_4^{2-}$	-168569	2,024643e-03	2,8332e-01	-5,694	0,8537	-0,069
$\text{HVO}_2$	-76920	4,815273e-02	1,1653e+01	-4,317	1,0003	0,000
$\text{HCO}_2^-$	-137941	1,609938e-04	9,8238e-03	-6,793	0,9618	-0,017
$\text{PCuO}_2^-$	-57759	6,126722e-15	5,9158e-13	-17,213	0,9624	-0,017
$\text{HFeO}_2$	-98720	1,116486e-15	9,9208e-14	-17,952	1,0003	0,000
$\text{HSO}_4^-$	-178289	1,660542e-03	1,6120e-01	-5,780	0,9617	-0,017
$\text{HSbO}_2$	-95020	2,463739e-05	3,8130e-03	-7,608	1,0006	0,000
$\text{HSeO}_3^-$	-96000	1,476897e-08	1,8900e-06	-10,831	0,9616	-0,017
$\text{N}_2$	6727	6,479076e-01	1,8151e+01	-3,188	0,9998	-0,000
$\text{Pb}^{+2}$	-3493	3,375631e-02	6,9946e+00	-4,472	0,8506	-0,070
$\text{PbO}$	-36970	3,626379e-10	8,0944e-08	-12,441	1,0003	0,000
$\text{PbOH}^+$	-51610	5,903609e-04	1,3237e-01	-6,229	0,9609	-0,017
$\text{SO}_4^{2-}$	-175709	7,059102e-01	6,7815e+01	-3,151	0,8536	-0,069
$\text{SbO}_2^-$	-80042	8,556465e-12	1,3156e-09	-14,068	0,9628	-0,016
$\text{SeO}_2^{2-}$	-86113	2,767416e-11	3,5136e-09	-13,558	0,8536	-0,069
$\text{OH}^-$	-35254	3,625125e-07	6,1657e-06	-9,441	0,9624	-0,017
$\text{H}^+$	2339	3,248781e-02	3,2747e-02	-4,488	0,9599	-0,018
$\text{H}_2\text{O}$	-56678	5,550747e+04	1,0000e+00	1,744	1,0000	0,000
<b>Газ</b>						
$\text{CO}_2$	-94263	2,738113e-05	0,05	-4,563	0,9949	-0,002
$\text{N}_2$	0	9,265550e-02	99,95	-1,033	0,9998	-0,000
<b>Твердая фаза</b>						
Сульфат висмута $\text{Bi}_2(\text{SO}_4)_3$	-527820	1,155919e-01	7,93	-0,937	1,0000	0,000
Куприт $\text{Cu}_2\text{O}$	-34895	3,027316e-01	4,21	-0,519	1,0000	0,000
Гематит $(\text{Fe}_2\text{O}_3)$	-229398	2,000002e-02	0,59	-1,699	1,0000	0,000
Англезит $\text{PbSO}_4$	-194362	4,287031e-01	12,63	-0,368	1,0000	0,000
Сервантит $\text{Sb}_2\text{O}_4$	-190201	8,999877e-01	26,89	-0,046	1,0000	0,000
Бишкит $\text{ZnSO}_4(\text{H}_2\text{O})_6$	-612591	1,999999e-02	0,52	-1,699	1,0000	0,000
Наумнит $\text{Ag}_2\text{Se}$	-10612	1,700000e-01	4,87	-0,770	1,0000	0,000
Селен $\text{Se}$	0	5,522379e+00	42,36	0,742	1,0000	0,000

Таблица 5-7

**Результаты моделирования взаимодействия клаусталита (PbSe)  
с природными водами (резервуар 1) и ионным раствором (резервуар 2)**

<b>Резервуар - 1</b>					
Температура, °C -	25,00	Давление, бар -	1,00	Масса, кг -	1100,286
Объем мультисистемы, см <sup>3</sup> -	8,57160e+07	Плотность мультисистемы, г/см <sup>3</sup> -			0,012836
G, кал -	-3147400704	H, кал -	-3792297984	S, кал /K -	1120279,625
U, кал -	-3745037568	Ср, кал -	1022777,25	Ионная сила -	0,0000
Eh, В -	0,8212	ре -	13,9095	pH -	6,6912

Наименование фазы	Объем, см <sup>3</sup>	Мольное количество	Масса, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание, вес, %
Водный раствор	1003056,71645	5,55099e+04	1000161,9375	9,97114e-01	90,90019
Газ	84712977,85008	3,46435e+03	99888,9453	1,17915e-03	9,07845
<b>Твердая фаза</b>					
PbO <sub>2</sub>	0,58737	9,82595e-01	235,0356	4,00149e+02	0,02136

Состав фазы	Функция g <sup>l</sup> , кал/моль	Мольное количество	Концентрация мг/кг Н <sub>2</sub> O	log молярности	Кэф, активности	log коэф, активности
<b>Водный раствор</b>						
CO <sub>2</sub>	-89870	9,558922e-03	4,2070e-01	-5,020	1,0000	0,000
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	-123821	5,048842e-06	3,0299e-04	-8,297	0,9830	-0,007
HSeO <sub>3</sub>	-99470	9,999868e-01	1,2797e+02	-3,000	1,0000	-0,000
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-137905	2,165606e-02	1,3214e+00	-4,664	0,9957	-0,002
HNO <sub>3</sub>	-9720	3,385421e-10	1,5917e-08	-12,470	1,0000	0,000
HNO <sub>2</sub>	-22350	2,772339e-01	1,7470e+01	-3,557	1,0000	-0,000
HPbO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	-78623	6,101068e-11	1,4656e-08	-13,215	0,9957	-0,002
HSeO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-105723	2,132452e-10	3,0701e-08	-12,671	0,9957	-0,002
N <sub>2</sub>	6727	5,175256e-01	1,4498e+01	-3,286	1,0000	-0,000
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-8025	4,297595e-05	2,6648e-03	-7,367	0,9957	-0,002
O <sub>2</sub>	6334	2,583952e-01	8,2687e+00	-3,588	1,0000	-0,000
Pb <sup>2+</sup>	-3341	4,178498e-03	8,6582e-01	-5,379	0,9830	-0,007
PbO	-36970	1,284891e-06	2,8680e-04	-8,891	1,0000	0,000
PbOH <sup>+</sup>	-51573	1,322489e-02	2,9652e+00	-4,879	0,9957	-0,002
SeO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-103130	1,317214e-05	1,8831e-03	-7,880	0,9830	-0,007
OH <sup>-</sup>	-35217	5,064778e-05	8,6142e-04	-7,295	0,9957	-0,002
H <sup>+</sup>	2377	2,042390e-04	2,0587e-04	-6,690	0,9957	-0,002
H <sub>2</sub> O	-56678	5,550778e+04	1,0000e+00	1,744	1,0000	0,000
<b>Газ</b>						
CO <sub>2</sub>	-94263	9,900290e-01	0,04	-0,004	0,9949	-0,002
N <sub>2</sub>	0	2,754586e+03	77,25	3,440	0,9998	-0,000
NO <sub>2</sub>	12420	4,970653e-07	0,00	-6,304	1,0000	0,000
N <sub>2</sub> O	24767	8,728474e-16	0,00	-15,059	0,9946	-0,002
O <sub>2</sub>	0	7,087788e+02	22,71	2,851	0,9994	-0,000
<b>Твердая фаза</b>						
Платинит						
PbO <sub>2</sub>	-51950	9,825953e-01	100,00	-0,008	1,0000	0,000

<b>Резервуар - 2</b>					
Температура, °C -	25,00	Давление, бар -	1,00	Масса, кг -	1000,448
Объем мультисистемы, см <sup>3</sup> -	1003246,500	Плотность мультисистемы, г/см <sup>3</sup> -			0,997211
G, кал -	-3146268160	H, кал -	-3792197120	S, кал /K -	928293,125
U, кал -	-3742912256	Ср, кал -	998758,25	Ионная сила -	0,0004
Eh, В -	0,0473	ре -	0,8016	pH -	9,6235

Окопчание таблицы 5-7

Наименование фазы	Объем, см <sup>3</sup>	Молярное количество	Масса, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание, вес, %
Водный раствор	1003051,59477	5,55100e+04	1000253,6875	9,97211e-01	99,98056
Газ	194,85093	7,96777e-03	0,2232	1,14551e-03	0,00002
<b>Твердая фаза</b>					
PbCO <sub>3</sub>	0,00000	2,93679e-05	0,0078	0,00000e+00	0,00000
PbO(PbCO <sub>3</sub> )	0,00000	2,49038e-02	12,2130	0,00000e+00	0,00122
PbSe	0,00000	6,36207e-01	182,0569	0,00000e+00	0,01820

Состав фазы	Функция gT, ккал/моль	Молярное количество	Концентрация мг/кг Н <sub>2</sub> O	log молярности	Кэф, активности	log кэф, активности
<b>Водный раствор</b>						
HSeO <sub>3</sub>	-99470	1,237219e+00	1,5833e+02	-2,908	0,9999	-0,000
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-137917	5,179369e-03	3,1604e-01	-5,286	0,9795	-0,009
HPbO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	-78635	1,040108e-03	2,4985e-01	-5,983	0,9795	-0,009
HSeO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-95975	5,355072e-04	6,8530e-02	-6,271	0,9794	-0,009
N <sub>2</sub>	6727	6,481963e-01	1,8159e+01	-3,188	1,0000	-0,000
Pb <sup>+2</sup>	-3391	1,185199e-04	2,4558e-02	-6,926	0,9191	-0,037
PbO	-36970	2,494803e-02	5,5686e+00	-4,603	1,0001	0,000
PbOH <sup>+</sup>	-51585	3,052544e-01	6,8443e+01	-3,515	0,9793	-0,009
SeO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	-86079	1,260393e-01	1,6002e+01	-3,899	0,9198	-0,036
SeO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	-103179	8,774555e-10	1,2544e-07	-12,057	0,9198	-0,036
OH <sup>-</sup>	-35230	4,444838e-02	7,5598e-01	-4,352	0,9796	-0,009
H <sup>+</sup>	2365	2,422567e-07	2,4419e-07	-9,616	0,9790	-0,009
H <sub>2</sub> O	-56678	5,550764e+04	1,0000e+00	1,744	1,0000	0,000
<b>Газ</b>						
CO <sub>2</sub>	-94263	6,202406e-10	0,00	-9,207	0,9949	-0,002
N <sub>2</sub>	0	7,967771e-03	100,00	-2,099	0,9998	-0,000
<b>Твердая фаза</b>						
Церуссит PbCO <sub>3</sub>	-149498	2,936794e-05	0,00	-4,532	1,0000	0,000
Массикот PbO	-195220	2,490377e-02	6,29	-1,604	1,0000	0,000
Клаусталит PbSe	-24307	6,362067e-01	93,71	-0,196	1,0000	0,000

Таблица 5-8

**Результаты моделирования взаимодействия наумангита (Ag<sub>2</sub>Se)  
с природными водами (резервуар 1) и ионным раствором (резервуар 2)**

<b>Резервуар - 1</b>					
Температура, °С -	25,00	Давление, бар -	1,00	Масса, кг -	1100,294
Объем мультисистемы, см <sup>3</sup> -	8,56431e+07	Плотность мультисистемы, г/см <sup>3</sup> -			0,012847
G, кал -	-3147370752	H, кал -	-3792278272	S, кал /К -	1120237,250
U, кал -	-3745016064	Ср, кал -	1022805,75	Ионная сила -	0,0000
Eh, В -	0,8749	pe -	14,8193	pH -	5,7812

Наименование фазы	Объем, см <sup>3</sup>	Мольное количество	Масса, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание, вес, %
Водный раствор	1003129,76779	5,55119e+04	1000496,9375	9,97375e-01	90,92992
Газ	84639958,42915	3,46137e+03	99797,5938	1,17908e-03	9,07008

Состав фазы	Функция gT, кал/моль	Мольное количество	Концентрация мг/кг H <sub>2</sub> O	log молярности	Кэф, активности	log коэф, активности
<b>Водный раствор</b>						
AgCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-109051	3,965739e-11	6,6578e-09	-13,402	0,9981	-0,001
Ag <sup>+</sup>	20806	1,063355e-03	1,1471e-01	-5,973	0,9981	-0,001
AgNO <sub>3</sub>	-5358	1,998937e+00	3,3958e+02	-2,699	1,0000	0,000
AgOH	-19520	6,626631e-10	8,2754e-08	-12,179	1,0000	0,000
CO <sub>2</sub>	-89870	9,747908e-03	4,2902e-01	-5,011	1,0000	0,000
CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	-123815	7,694116e-08	4,6174e-06	-10,114	0,9924	-0,003
HSeO <sub>3</sub>	-99470	9,999998e-01	1,2797e+02	-3,000	1,0000	-0,000
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-137903	2,709315e-03	1,6532e-01	-5,567	0,9981	-0,001
HNO <sub>2</sub>	-9720	3,381088e-10	1,5896e-08	-12,471	1,0000	0,000
HNO <sub>3</sub>	-22350	2,766021e-01	1,7430e+01	-3,558	1,0000	-0,000
HSeO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-105721	2,616125e-11	3,7665e-09	-13,582	0,9981	-0,001
HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-178298	1,465415e+00	1,4227e+02	-2,834	0,9229	-0,035
N <sub>2</sub>	6727	5,177811e-01	1,4505e+01	-3,286	1,0000	-0,000
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-8023	5,261469e-06	3,2625e-04	-8,279	0,9981	-0,001
O <sub>2</sub>	6334	2,578716e-01	8,2519e+00	-3,589	1,0000	-0,000
SeO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	-103124	1,968494e-07	2,8142e-05	-9,706	0,9924	-0,003
OII <sup>-</sup>	-35216	6,214358e-06	1,0569e-04	-8,207	0,9981	-0,001
II <sup>+</sup>	2378	1,657983e-03	1,6712e-03	-5,780	0,9981	-0,001
H <sub>2</sub> O	-56678	5,550780e+04	1,0000e+00	1,744	1,0000	0,000
<b>Газ</b>						
CO <sub>2</sub>	-94263	1,008792e+00	0,04	0,004	0,9949	-0,002
N <sub>2</sub>	0	2,753586e+03	77,29	3,440	0,9998	-0,000
NO <sub>2</sub>	12420	4,957789e-07	0,00	-6,305	1,0000	0,000
N <sub>2</sub> O	24767	8,716710e-16	0,00	-15,060	0,9946	-0,002
O <sub>2</sub>	0	7,067728e+02	22,66	2,849	0,9994	-0,000

<b>Резервуар - 2</b>					
Температура, °С -	25,00	Давление, бар -	1,00	Масса, кг -	1000,792
Объем мультисистемы, см <sup>3</sup> -	1014979,125	Плотность мультисистемы, г/см <sup>3</sup> -			0,986022
G, кал -	-3146303488	H, кал -	-3792249600	S, кал /К -	928461,438
U, кал -	-3742964992	Ср, кал -	998831,06	Ионная сила -	0,0007
Eh, В -	0,5921	pe -	10,0296	pH -	9,2816

## Окончание таблицы 5-8

Наименование фазы	Объем, см <sup>3</sup>	Мольное количество	Масса, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание, вес, %
Водный раствор	1003115,80640	5,55117e+04	1000486,6250	9,97379e-01	99,96953
Газ	11863,31630	4,85110e-01	13,5896	1,14551e-03	0,00136
Твердая фаза					
Ag <sub>2</sub> O	0,00000	1,25731e+00	291,3636	0,00000e+00	0,02911
Ag	0,00001	2,19500e-05	0,0024	4,39220e+02	0,00000

Состав фазы	Функция gT, кал/моль	Мольное количество	Концентрация мг/кг H <sub>2</sub> O	log молярности	Коеф. активности	log коеф. активности
<b>Водный раствор</b>						
AgCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-109067	2,088811e-04	3,5068e-02	-6,680	0,9731	-0,012
Ag(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> <sup>-3</sup>	-234658	7,402462e-11	1,6870e-08	-13,131	0,7785	-0,109
Ag <sup>+</sup>	20789	4,434093e-01	4,7832e+01	-3,353	0,9723	-0,012
AgNO <sub>3</sub>	-5358	1,040883e+00	1,7683e+02	-2,983	1,0001	0,000
AgOH	-3137	1,595750e-06	1,9767e-04	-8,797	0,9730	-0,012
CO <sub>2</sub>	-19520	8,519351e-04	1,0639e-01	-6,070	1,0001	0,000
CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	-89870	1,227068e-05	5,4005e-04	-7,911	1,0001	0,000
HSeO <sub>3</sub>	-123881	1,091195e-03	6,5485e-02	-5,962	0,8952	-0,048
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-137919	1,114478e-02	6,8005e-01	-4,953	0,9729	-0,012
HNO <sub>2</sub>	-9720	5,166912e-14	2,4293e-12	-16,287	1,0000	0,000
HNO <sub>3</sub>	-22350	1,123536e-07	7,0800e-06	-9,949	0,9999	-0,000
HSeO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-95977	4,616009e-13	5,9072e-11	-15,336	0,9728	-0,012
HSeO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-105737	7,879022e-09	1,1344e-06	-11,104	0,9728	-0,012
N <sub>2</sub>	6727	6,500020e-01	1,8210e+01	-3,187	0,9999	-0,000
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-8039	6,944935e-09	4,3064e-07	-11,158	0,9728	-0,012
O <sub>2</sub>	6334	1,813731e-06	5,8040e-05	-8,741	0,9999	-0,000
SeO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	-86085	4,962178e-11	6,3002e-09	-13,304	0,8951	-0,048
SeO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	-103190	2,048012e-01	2,9279e+01	-3,689	0,8950	-0,048
OH <sup>-</sup>	-35232	2,026963e-02	3,4475e-01	-4,693	0,9731	-0,012
H <sup>+</sup>	2362	5,373091e-07	5,4160e-07	-9,270	0,9722	-0,012
H <sub>2</sub> O	-56678	5,550752e+04	1,0000e+00	1,744	1,0000	0,000
<b>Газ</b>						
CO <sub>2</sub>	-94263	1,776041e-07	0,00	-6,751	0,9949	-0,002
N <sub>2</sub>	0	4,851094e-01	100,00	-0,314	0,9998	-0,000
NO <sub>2</sub>	12420	5,465685e-16	0,00	-15,262	1,0000	0,000
O <sub>2</sub>	0	6,883343e-07	0,00	-6,162	0,9994	-0,000
<b>Твердая фаза</b>						
Охисларе						
Ag <sub>2</sub> O	-3682	1,257312e+00	100,00	0,099	1,0000	0,000
Серебро						
Ag	0	2,195003e-05	0,00	-4,659	1,0000	0,000

Таблица 5-9

**Результаты моделирования взаимодействия клокманита ( $\text{Cu}_{0,82}\text{Pb}_{0,02}\text{Se}_{0,94}\text{S}_{0,22}$ ) с природными водами (резервуар 1) и ионным раствором (резервуар 2)**

<b>Резервуар - 1</b>						
Температура, °C -	25,00	Давление, бар -	1,00	Масса, кг -	1100,137	
Объем мультисистемы, $\text{см}^3$ -	8.57243e+07	Плотность мультисистемы, $\text{г}/\text{см}^3$ -	0.012833			
G, кал -	-3147403264	H, кал -	-3792290304	S, кал /K -	1120305.750	
U, кал -	-3745035520	Ср. кал -	1022752.50	Ионная сила -	0.0009	
Ен, В -	0.9172	ре -	15.5350	рН -	5.0658	

Наименование фазы	Объем, $\text{см}^3$	Молярное количество	Масса, г	Плотность, $\text{г}/\text{см}^3$	Содержание, вес. %
Жидкий раствор	1003040,83527	5,55096e+04	1000176,5000	9,97144e-01	90,91378
Газ	84721261,26806	3,46469e+03	99900,0391	1,17916e-03	9,08069
<b>Твердая фаза</b>					
$\text{Cu}(\text{OH})_2$	0,00000	6,23389e-01	60,8183	0,00000e+00	0,00553

Состав фазы	Функция $\text{гТ}$ , кал/моль	Молярное количество	Концентрация $\text{мг}/\text{кг H}_2\text{O}$	log молярности	Кэф. активности	log коэф. активности
<b>Водный раствор</b>						
$\text{CO}_2$	-89870	9,756982e-03	4,2942e-01	-5,011	1,0001	0,000
$\text{CO}_3^{2-}$	-123851	3,045462e-09	1,8276e-07	-11,516	0,9338	-0,030
$\text{Ca}^{2+}$	14319	2,925591e-14	1,8592e-12	-16,534	0,9828	-0,008
$\text{Cu}^{+2}$	18014	1,963453e-01	1,2478e+01	-3,707	0,9332	-0,030
$\text{CuO}$	-18420	3,846871e-06	3,0602e-04	-8,415	1,0004	0,000
$\text{CuOH}^+$	-27830	2,615146e-04	2,1067e-02	-6,582	0,9829	-0,007
$\text{HSeO}_3$	-99470	9,400000e-01	1,2029e+02	-3,027	0,9999	-0,000
$\text{HCO}_3^-$	-137912	5,289291e-04	3,2275e-02	-6,277	0,9832	-0,007
$\text{HCuO}_2^+$	-57730	8,314607e-14	8,0284e-12	-16,080	0,9833	-0,007
$\text{HNO}_2$	-9720	3,385988e-10	1,5919e-08	-12,470	1,0000	0,000
$\text{HNO}_3$	-22350	2,769620e-01	1,7453e+01	-3,558	1,0000	-0,000
$\text{HPbO}_2^+$	-78630	3,483142e-15	8,3672e-13	-17,458	0,9832	-0,007
$\text{HSO}_4^-$	-178260	1,711837e-04	1,6618e-02	-6,767	0,9831	-0,007
$\text{HSeO}_4^-$	-105730	4,810608e-12	6,9260e-10	-14,318	0,9831	-0,007
$\text{N}_2$	6727	5,165972e-01	1,4472e+01	-3,287	1,0000	-0,000
$\text{NO}_3^-$	-8032	1,029506e-06	6,3838e-05	-8,987	0,9831	-0,007
$\text{O}_2$	6334	2,581504e-01	8,2609e+00	-3,588	0,9999	-0,000
$\text{Pb}^{+2}$	-3371	1,865706e-02	3,8659e+00	-4,729	0,9330	-0,030
$\text{PbO}$	-36970	3,054322e-09	6,8176e-07	-11,515	1,0001	0,000
$\text{PbOH}^+$	-51580	1,342923e-03	3,0111e-01	-5,872	0,9830	-0,007
$\text{SO}_4^{2-}$	-175590	2,198288e-01	2,1119e+01	-3,658	0,9338	-0,030
$\text{SeO}_4^{2-}$	-103160	7,316870e-09	1,0461e-06	-11,136	0,9337	-0,030
$\text{OH}^-$	-35225	1,212585e-06	2,0624e-05	-8,916	0,9833	-0,007
$\text{H}^+$	2369	8,750929e-03	8,8209e-03	-5,058	0,9827	-0,008
$\text{H}_2\text{O}$	-56678	5,550720e+04	1,0000e+00	1,744	1,0000	0,000
<b>Газ</b>						
$\text{CO}_2$	-94263	1,010963e+00	0,04	0,005	0,9949	-0,002
$\text{N}_2$	0	2,754587e+03	77,24	3,440	0,9998	-0,000
$\text{NO}_2$	12420	4,971937e-07	0,00	-6,303	1,0000	0,000
$\text{N}_2\text{O}$	24767	8,729994e-16	0,00	-15,059	0,9946	-0,002
$\text{O}_2$	0	7,090958e+02	22,71	2,851	0,9994	-0,000
<b>Твердая фаза</b>						
Малахит $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$	-88958	6,233894e-01	100,00	-0,205	1,0000	0,000

<b>Резервуар - 2</b>					
Температура, °С -	25,00	Давление, бар -	1,00	Масса, кг -	1000,314
Объем мультисистемы, см <sup>3</sup> -	100333,000	Плотность мультисистемы, г/см <sup>3</sup> -			0,996991
G, кал -	-3146254848	H, кал -	-3792180224	S, кал /К -	928277,000
U, кал -	-3742897152	Ср, кал -	998731,62	Ионная сила -	0,0017
Вh, В -	0,2769	ре -	4,6906	рН -	4,6933

Наименование фазы	Объем, см <sup>3</sup>	Молярное количество	Масса, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание, вес, %
Водный раствор	1003026,79766	5,55098e+04	1000195,3750	9,97177e-01	99,98814
Газ	305,63637	1,24980e-02	0,3502	1,14565e-03	0,00004
<b>Твердая фаза</b>					
Cu <sub>2</sub> O	0,17506	3,12512e-01	44,7178	2,55439e+02	0,00447
Se	0,36532	9,30802e-01	73,4961	2,01180e+02	0,00735

Состав фазы	Функция gT, кал/моль	Молярное количество	Концентрация мг/кг Н <sub>2</sub> O	log молярности	Коэф. активности	log коэф. активности
<b>Видный раствор</b>						
CO <sub>2</sub>	-89870	1,003832e-02	4,4181e-01	-4,998	1,0003	0,000
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	-123952	6,918656e-10	4,1520e-08	-12,160	0,8436	-0,074
Cu <sup>+</sup>	14294	3,549950e-03	2,2560e-01	-5,450	0,9576	-0,019
Cu <sup>+2</sup>	17911	3,878389e-01	2,4647e+01	-3,411	0,8411	-0,075
CuO	-18419	1,189450e-06	9,4620e-05	-8,925	1,0015	0,001
CuOH <sup>+</sup>	-27856	1,959173e-04	1,5783e-02	-6,708	0,9580	-0,019
HSeO <sub>3</sub>	-99471	9,491982e-01	1,2147e+02	-3,023	0,9997	-0,000
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-137937	2,450909e-04	1,4955e-02	-6,611	0,9589	-0,018
HCuO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-57755	1,157863e-14	1,1180e-12	-16,936	0,9594	-0,018
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-178285	6,999625e-04	6,7950e-02	-6,155	0,9587	-0,018
HSeO <sub>5</sub> <sup>-</sup>	-95995	5,473849e-08	7,0050e-06	-10,262	0,9587	-0,018
N <sub>2</sub>	6727	6,425833e-01	1,8002e+01	-3,192	0,9998	-0,000
Pb <sup>+2</sup>	-3474	3,893598e-02	8,0679e+00	-4,410	0,8405	-0,075
PbO	-36970	9,980141e-10	2,2277e-07	-12,001	1,0003	0,000
PbOH <sup>+</sup>	-51606	1,063987e-03	2,3857e-01	-5,973	0,9581	-0,019
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-175691	4,393000e-01	4,2203e+01	-3,357	0,8433	-0,074
SeO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	-86121	1,592556e-10	2,0220e-08	-12,798	0,8433	-0,074
OH <sup>-</sup>	-35249	5,453448e-07	9,2753e-06	-9,263	0,9595	-0,018
H <sup>+</sup>	2343	2,118603e-02	2,1355e-02	-4,674	0,9570	-0,019
H <sub>2</sub> O	-56678	5,550733e+04	1,0000e+00	1,744	1,0000	0,000
<b>Газ</b>						
CO <sub>2</sub>	-94263	2,499437e-06	0,03	-5,602	0,9949	-0,002
N <sub>2</sub>	0	1,249548e-02	99,97	-1,903	0,9998	-0,000
<b>Твердая фаза</b>						
Курият						
Cu <sub>2</sub> O	-34895	3,125123e-01	37,83	-0,505	1,0000	0,000

Таблица 5-10

**Результаты моделирования взаимодействия алганта (РbТс)  
с природными водами (резервуар 1) и ионным раствором (резервуар 2)**

<b>Резервуар - 1</b>					
Температура, °С -	25,00	Давление, бар -	1,00	Масса, кг -	1100,335
Объем мультисистемы, см <sup>3</sup> -	8,57221e+07	Плотность мультисистемы, г/см <sup>3</sup> -	0,012836		
G, кал -	-3147387392	H, кал -	-3,8e+09	S, кал /К -	1120250,625
U, кал -	-3745027072	Ср, кал -	1022767,94	Ионная сила -	0,0000
En, В -	0,8212	ре -	13,9094	рН -	6,6913

Наименование фазы	Объем, см <sup>3</sup>	Молярное количество	Масса, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание, вес, %
Водный раствор	1003019,55625	5,55094e+04	1000043,0000	9,97032e-01	90,88535
Газ	84719082,17793	3,46460e+03	99896,9375	1,17916e-03	9,07878
<b>Твердая фаза</b>					
PbO <sub>2</sub>	0,58739	9,82627e-01	235,0433	4,00149e+02	0,02136
TeO <sub>2</sub>	0,00000	1,00000e+00	159,5988	0,00000e+00	0,01450

Состав фазы	Функция гГ, кал/моль	Молярное количество	Концентрация мг/кг H <sub>2</sub> O	log молярности	Кэф. активности	log коэф. активности
<b>Водный раствор</b>						
CO <sub>2</sub>	-89870	9,559902e-03	4,2074e-01	-5,020	1,0000	0,000
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	-123820	5,045561e-06	3,0279e-04	-8,297	0,9835	-0,007
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-137904	2,164233e-02	1,3206e+00	-4,665	0,9959	-0,002
HNO <sub>2</sub>	-9720	3,386132e-10	1,5920e-08	-12,470	1,0000	0,000
HNO <sub>3</sub>	-22350	2,773414e-01	1,7477e+01	-3,557	1,0000	-0,000
HPbO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	-78622	6,102071e-11	1,4658e-08	-13,215	0,9959	-0,002
N <sub>2</sub>	6727	5,175275e-01	1,4498e+01	-3,286	1,0000	-0,000
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-8024	4,298217e-05	2,6652e-03	-7,367	0,9959	-0,002
O <sub>2</sub>	6334	2,584840e-01	8,2714e+00	-3,588	1,0000	-0,000
Pb <sup>+2</sup>	-3340	4,170156e-03	8,6408e-01	-5,380	0,9835	-0,007
PbO	-36970	1,283362e-06	2,8645e-04	-8,892	1,0000	0,000
PbOH <sup>+</sup>	-51573	1,320123e-02	2,9599e+00	-4,879	0,9958	-0,002
OH <sup>-</sup>	-35217	5,063944e-05	8,6127e-04	-7,295	0,9959	-0,002
H <sup>+</sup>	2377	2,044968e-04	2,0613e-04	-6,689	0,9958	-0,002
H <sub>2</sub> O	-56678	5,550827e+04	1,0000e+00	1,744	1,0000	0,000
<b>Газ</b>						
CO <sub>2</sub>	-94263	9,900417e-01	0,04	-0,004	0,9949	-0,002
N <sub>2</sub>	0	2,754585e+03	77,24	3,440	0,9998	-0,000
NO <sub>2</sub>	12420	4,972225e-07	0,00	-6,303	1,0000	0,000
N <sub>2</sub> O	24767	8,729697e-16	0,00	-15,059	0,9946	-0,002
O <sub>2</sub>	0	7,090285e+02	22,71	2,851	0,9994	-0,000
<b>Твердая фаза</b>						
Платтнерит PbO <sub>2</sub>	-51950	9,826273e-01	59,56	-0,008	1,0000	0,000
Теллурид TeO <sub>2</sub>	-64603	9,999999e-01	40,44	-0,000	1,0000	0,000

<b>Резервуар - 2</b>					
Температура, °С -	25,00	Давление, бар -	1,00	Масса, кг -	1000,378
Объем мультисистемы, см <sup>3</sup> -	1003306,250	Плотность мультисистемы, г/см <sup>3</sup> -	0,997081		
G, кал -	-3146185984	H, кал -	-3792106752	S, кал /К -	928226,188
U, кал -	-3742820864	Ср, кал -	998737,06	Ионная сила -	0,0002
En, В -	-0,0472	ре -	-0,8001	рН -	10,1909

## Окончание таблицы 5-10

Наименование фазы	Объем, см <sup>3</sup>	Мольное количество	Масса, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание, вес. %
Водный раствор	1003004,14186	5,55093e+04	1000073,0000	9,97078e-01	99,96953
Газ	302,05452	1,23515e-02	0,3460	1,14551e-03	0,00003
<b>Твердая фаза</b>					
PbCO <sub>3</sub>	0,00000	2,43086e-02	11,9211	0,00000e+00	0,00119
PbTe	0,00000	5,96524e-01	199,7161	0,00000e+00	0,01996
TeO <sub>2</sub>	0,00000	4,03476e-01	64,3943	0,00000e+00	0,00644
PbO	0,07280	1,27397e-01	28,4350	3,90565e+02	0,00284

Состав фазы	Функция gT, кал/моль	Мольное количество	Концентрация мг/кг H <sub>2</sub> O	log молярности	Коэф. активности	log коэф. активности
<b>Водный раствор</b>						
CO <sub>2</sub>	-89870	5,640708e-07	2,4825e-05	-9,249	1,0000	0,000
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	-123855	3,040338e-03	1,8245e-01	-5,517	0,9438	-0,025
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-137913	3,857799e-03	2,3540e-01	-5,414	0,9857	-0,006
HPbO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-78631	8,421731e-03	2,0230e+00	-5,075	0,9857	-0,006
N <sub>2</sub>	6727	6,438682e-01	1,8038e+01	-3,191	1,0000	-0,000
Pb <sup>+2</sup>	-3375	1,882272e-05	3,9002e-03	-7,725	0,9434	-0,025
PbO	-36970	5,502582e-02	1,2282e+01	-4,259	1,0000	0,000
PbOH <sup>+</sup>	-51581	1,813684e-01	4,0665e+01	-3,741	0,9856	-0,006
OH <sup>-</sup>	-35226	1,630459e-01	2,7731e+00	-3,788	0,9858	-0,006
H <sup>+</sup>	2368	5,574976e-08	5,6194e-08	-10,254	0,9855	-0,006
H <sub>2</sub> O	-56678	5,550826e+04	1,0000e+00	1,744	1,0000	0,000
<b>Газ</b>						
CO <sub>2</sub>	-94263	1,971707e-10	0,00	-9,705	0,9949	-0,002
N <sub>2</sub>	0	1,235150e-02	100,00	-1,908	0,9998	-0,000
<b>Твердая фаза</b>						
Церуссит PbCO <sub>3</sub>	-195220	2,430858e-02	3,92	-1,614	1,0000	0,000
Алтаит PbTe	-16611	5,965236e-01	65,60	-0,224	1,0000	0,000
Теллурит TeO <sub>2</sub>	-64603	4,034764e-01	21,15	-0,394	1,0000	0,000
Массенкот PbO	-45160	1,273971e-01	9,34	-0,895	1,0000	0,000

Таблица 5-11

Результаты моделирования взаимодействия селеносодержащего теллурида висмута (Bi<sub>2</sub>SeTe<sub>2</sub>) с природными водами (резервуар 1) и ионным раствором (резервуар 2)

Резервуар - 1					
Температура, °С -	25,00	Давление, бар -	1,00	Масса, кг -	1100,752
Объем мультисистемы, см <sup>3</sup> -	8,56552e+07	Плотность мультисистемы, г/см <sup>3</sup> -			0,012851
G, кал -	-3147593728	H, кал -	-3792522752	S, кал/К -	1120207,000
U, кал -	-3745260800	Ср, кал -	1022804,31	Ионная сила -	0,0000
En, В -	0,8801	ре -	14,9062	pH -	5,6942

Наименование фазы	Объем, см <sup>3</sup>	Мольное количество	Масса, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание, вес, %
Водный раствор	1003056,53045	5,55099e+04	1000157,5000	9,97110e-01	90,86129
Газ	84652168,81583	3,46187e+03	99809,5859	1,17906e-03	9,06740
Твердая фаза					
Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,18767	9,99264e-01	465,6151	3,92040e+02	0,04230
TeO <sub>2</sub>	0,00000	2,00000e+00	319,1976	0,00000e+00	0,02900

Состав фазы	Функция гТ, кал/моль	Мольное количество	Концентрация мг/кг H <sub>2</sub> O	log моляльности	Коэф. активности	log коэф. активности
<b>Водный раствор</b>						
Bi <sup>3+</sup>	25251	1,660312e-12	3,4699e-10	-14,780	0,9856	-0,006
BiO <sup>+</sup>	-26921	2,021409e-04	4,5479e-02	-6,694	0,9984	-0,001
BiO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	-59321	7,900159e-11	1,9038e-08	-13,102	0,9984	-0,001
BiOH <sup>2+</sup>	-29924	6,492383e-08	1,4673e-05	-10,188	0,9936	-0,003
CO <sub>2</sub>	-89870	9,754518e-03	4,2931e-01	-5,011	1,0000	0,000
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	-123814	5,166034e-08	3,1002e-06	-10,287	0,9936	-0,003
HSeO <sub>3</sub>	-99470	9,999999e-01	1,2797e+02	-3,000	1,0000	-0,000
HBiO <sub>3</sub>	-76920	1,270619e-03	3,0749e-01	-5,896	1,0000	0,000
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-137903	2,218754e-03	1,3539e-01	-5,654	0,9984	-0,001
HNO <sub>2</sub>	-9720	3,379477e-10	1,5889e-08	-12,471	1,0000	0,000
HNO <sub>3</sub>	-22350	2,763413e-01	1,7414e+01	-3,559	1,0000	-0,000
HSeO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-105721	2,140165e-11	3,0812e-09	-13,670	0,9984	-0,001
N <sub>2</sub>	6727	5,179887e-01	1,4511e+01	-3,286	1,0000	-0,000
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-8023	4,302777e-06	2,6680e-04	-8,366	0,9984	-0,001
O <sub>2</sub>	6334	2,576510e-01	8,2448e+00	-3,589	1,0000	-0,000
SeO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-103123	1,252285e-07	1,7903e-05	-9,902	0,9936	-0,003
OH <sup>-</sup>	-35216	5,087230e-06	8,6524e-05	-8,294	0,9984	-0,001
H <sup>+</sup>	2379	2,026227e-03	2,0424e-03	-5,693	0,9984	-0,001
H <sub>2</sub> O	-56678	5,550779e+04	1,0000e+00	1,744	1,0000	0,000
<b>Газ</b>						
CO <sub>2</sub>	-94263	1,009276e+00	0,04	0,004	0,9949	-0,002
N <sub>2</sub>	0	2,754586e+03	77,31	3,440	0,9998	-0,000
NO <sub>2</sub>	12420	4,955150e-07	0,00	-6,305	1,0000	0,000
N <sub>2</sub> O	24767	8,716155e-16	0,00	-15,060	0,9946	-0,002
O <sub>2</sub>	0	7,062720e+02	22,64	2,849	0,9994	-0,000
<b>Твердая фаза</b>						
Бисмит						
Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-118009	9,992636e-01	59,33	-0,000	1,0000	0,000
Теллурит						
TeO <sub>2</sub>	-64603	2,000000e+00	40,67	0,301	1,0000	0,000

Резервуар - 2					
Температура, °С -	25,00	Давление, бар -	1,00	Масса, кг -	1000,910
Объем мультисистемы, см <sup>3</sup> -	1003301,812	Плотность мультисистемы, г/см <sup>3</sup> -			0,997616
G, кал -	-3146269440	H, кал -	-3792205312	S, кал/К -	928277,125
U, кал -	-3742919168	Ср, кал -	998789,75	Ионная сила -	0,0000
Vh, В -	0,1913	ре -	3,2394	pH -	5,6940

Наименование фазы	Объем, см <sup>3</sup>	Мольное количество	Масса, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание, вес, %
Водный раствор	1003007,30988	5,55091e+04	1000019,5625	9,97021e-01	99,91107
Газ	291,69436	1,19279e-02	0,3342	1,14565e-03	0,00003
Твердая фаза					
Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,18855	1,00000e+00	465,9583	3,92040e+02	0,04655
Te	0,80897	1,65305e+00	210,9287	2,60737e+02	0,02107
TeO <sub>2</sub>	0,00000	3,46954e-01	55,3734	0,00000e+00	0,00553
selen	0,78304	1,99510e+00	157,5328	2,01180e+02	0,01574

Состав фазы	Функция gT, кал/моль	Мольное количество	Концентрация мг/кг H <sub>2</sub> O	log молярности	Коэф. активности	log коэф. активности
Водный раствор						
Bi <sup>+3</sup>	25242	1,679637e-12	3,5102e-10	-14,775	0,9845	-0,007
BiO <sup>+</sup>	-26922	2,022481e-04	4,5503e-02	-6,694	0,9983	-0,001
BiO <sub>2</sub> <sup>+</sup>	-59322	7,924853e-11	1,9098e-08	-13,101	0,9983	-0,001
BiOH <sup>+</sup> 2	-29928	6,522624e-08	1,4741e-05	-10,186	0,9931	-0,003
CO <sub>2</sub>	-89870	9,747638e-03	4,2900e-01	-5,011	1,0000	0,000
CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	-123819	5,211828e-08	3,1277e-06	-10,283	0,9931	-0,003
HSeO <sub>3</sub>	-99470	4,903253e-03	6,2747e-01	-5,310	1,0000	-0,000
HBiO <sub>2</sub>	-76920	1,269936e-03	3,0732e-01	-5,896	1,0000	0,000
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-137904	2,223158e-03	1,3565e-01	-5,653	0,9983	-0,001
HSeO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-95962	7,578372e-09	9,6980e-07	-11,120	0,9983	-0,001
N <sub>2</sub>	6727	6,442361e-01	1,8048e+01	-3,191	1,0000	-0,000
SeO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	-86024	1,947809e-10	2,4730e-08	-12,710	0,9931	-0,003
OH <sup>-</sup>	-35217	5,100178e-06	8,6743e-05	-8,292	0,9983	-0,001
H <sup>+</sup>	2378	2,025992e-03	2,0421e-03	-5,693	0,9983	-0,001
H <sub>2</sub> O	-56678	5,550843e+04	1,0000e+00	1,744	1,0000	0,000
Газ						
CO <sub>2</sub>	-94263	2,476396e-06	0,03	-5,606	0,9949	-0,002
N <sub>2</sub>	0	1,192539e-02	99,97	-1,924	0,9998	-0,000
Твердая фаза						
Бисмит Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-118009	1,000000e+00	52,37	0,000	1,0000	0,000
Теллур Te	0	1,653046e+00	23,71	0,218	1,0000	0,000
Теллурид TeO <sub>2</sub>	-64603	3,469539e-01	6,22	-0,460	1,0000	0,000
Селен Se	0	1,995097e+00	17,70	0,300	1,0000	0,000

Таблица 5-12

**Результаты моделирования взаимодействия селенистого теллура (Te<sub>3</sub>Se<sub>4</sub>) с природными водами (резервуар 1) и ионным раствором (резервуар 2)**

<b>Резервуар - 1</b>					
Температура, °С -	25,00	Давление, бар -	1,00	Масса, кг -	1100,571
Объем мультисистемы, см <sup>3</sup> -	1003290,938	Плотность мультисистемы, г/см <sup>3</sup> -			0,997801
G, кал -	-3146481152	H, кал -	-3792446208	S, кал /К -	928453,562
U, кал -	-3743161344	Ср, кал -	998874,06	Ионная сила -	0,0000
Ен, В -	0,2252	ре -	14,9269	рН -	5,6733

Наименование фазы	Объем, см <sup>3</sup>	Мольное количество	Масса, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание, вес. %
Водный раствор	1003167,96998	5,55114e+04	1000513,9375	9,97354e-01	90,90863
Газ	84597214,13687	3,45962e+03	99737,6484	1,17897e-03	9,06236
Твердая фаза					
TeO <sub>2</sub>	0,00000	2,00000e+00	319,1976	0,00000e+00	0,02900

Состав фазы	Функция gT, кал/моль	Мольное количество	Концентрация мг/кг H <sub>2</sub> O	log молярности	Коэф. активности	log коэф. активности
<b>Водный раствор</b>						
CO <sub>2</sub>	-89870	9,766177e-03	4,2984e-01	-5,010	1,0000	0,000
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	-123815	4,307841e-08	2,5853e-06	-10,366	0,9933	-0,003
HSeO <sub>3</sub>	-99470	4,000000e+00	5,1190e+02	-2,398	1,0000	-0,000
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-137903	2,115475e-03	1,2909e-01	-5,675	0,9983	-0,001
HNO <sub>2</sub>	-9720	3,373780e-10	1,5862e-08	-12,472	1,0000	0,000
HNO <sub>3</sub>	-22350	2,755478e-01	1,7364e+01	-3,560	1,0000	-0,000
HSeO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-105721	8,153814e-11	1,1739e-08	-13,089	0,9983	-0,001
N <sub>2</sub>	6727	5,182498e-01	1,4519e+01	-3,285	1,0000	-0,000
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-8023	4,090725e-06	2,5366e-04	-8,388	0,9983	-0,001
O <sub>2</sub>	6334	2,570023e-01	8,2243e+00	-3,590	1,0000	-0,000
SeO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-103124	4,798300e-07	6,8600e-05	-9,319	0,9933	-0,003
OH <sup>-</sup>	-35216	4,849675e-06	8,2486e-05	-8,314	0,9983	-0,001
H <sup>+</sup>	2379	2,125461e-03	2,1425e-03	-5,673	0,9983	-0,001
H <sub>2</sub> O	-56678	5,550630e+04	1,0000e+00	1,744	1,0000	0,000
<b>Газ</b>						
CO <sub>2</sub>	-94263	1,009367e+00	0,04	0,004	0,9949	-0,002
N <sub>2</sub>	0	2,754586e+03	77,37	3,440	0,9998	-0,000
NO <sub>2</sub>	12420	4,940684e-07	0,00	-6,306	1,0000	0,000
N <sub>2</sub> O	24767	8,705098e-16	0,00	-15,060	0,9946	-0,002
O <sub>2</sub>	0	7,040237e+02	22,59	2,848	0,9994	-0,000
<b>Твердая фаза</b>						
Теллурид						
TeO <sub>2</sub>	-64603	2,000000e+00	100,00	0,301	1,0000	0,000

<b>Резервуар - 2</b>					
Температура, °С -	25,00	Давление, бар -	1,00	Масса, кг -	1100,571
Объем мультисистемы, см <sup>3</sup> -	8,56004e+07	Плотность мультисистемы, г/см <sup>3</sup> -			0,012857
G, кал -	-3147704832	H, кал -	-3792647168	S, кал /К -	1120225,500
U, кал -	-3745385216	Ср, кал -	1022840,81	Ионная сила -	0,0460
Ен, В -	0,8813	ре -	3,8143	рН -	5,6730

Окончание таблицы 5-12

Наименование фазы	Объем, см <sup>3</sup>	Молярное количество	Масса, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание, вес, %
Водный раствор	1003114,34060	5,55105e+04	1000361,4375	9,97256e-01	99,92772
Газ	174,64160	7,14139e-03	0,2001	1,14570e-03	0,00002
<b>Твердая фаза</b>					
TeO <sub>2</sub>	0,00000	2,00000e+00	319,1976	0,00000e+00	0,03189
Se	2,00906	5,11885e+00	404,1841	2,01180e+02	0,04037

Состав фазы	Функция gT, кал/моль	Молярное количество	Концентрация мг/кг H <sub>2</sub> O	log молярности	Коэф. активности	log коэф. активности
<b>Водный раствор</b>						
CO <sub>2</sub>	-89870	9,756608e-03	4,2941e-01	-5,011	1,0000	0,000
CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	-123819	4,654515e-08	2,7933e-06	-10,332	0,9933	-0,003
HSeO <sub>3</sub>	-99470	2,881153e+00	3,6871e+02	-2,540	1,0000	-0,000
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-137904	2,123033e-03	1,2955e-01	-5,673	0,9983	-0,001
HSeO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-95962	1,169403e-06	1,4965e-04	-8,932	0,9983	-0,001
N <sub>2</sub>	6727	6,488863e-01	1,8178e+01	-3,188	1,0000	-0,000
SeO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	-86024	2,866979e-08	3,6401e-06	-10,543	0,9933	-0,003
OH <sup>-</sup>	-35217	4,850025e-06	8,2490e-05	-8,314	0,9983	-0,001
H <sup>+</sup>	2378	2,129203e-03	2,1462e-03	-5,672	0,9983	-0,001
H <sub>2</sub> O	-56678	5,550699e+04	1,0000e+00	1,744	1,0000	0,000
<b>Газ</b>						
CO <sub>2</sub>	-94263	2,007756e-06	0,04	-5,697	0,9949	-0,002
N <sub>2</sub>	0	7,139381e-03	99,96	-2,146	0,9998	-0,000
<b>Твердая фаза</b>						
Теллурид TeO <sub>2</sub>	-64603	2,000000e+00	44,13	0,301	1,0000	0,000
Селен Se	0	5,118846e+00	55,87	0,709	1,0000	0,000

Таблица 5-13

**Результаты моделирования взаимодействия Bi – содержащего теннантита  
(Cu<sub>11,1</sub>Ag<sub>0,1</sub>Zn<sub>0,2</sub>Fe<sub>0,3</sub>Pb<sub>0,3</sub>As<sub>2,2</sub>Sb<sub>1,5</sub>Bi<sub>0,3</sub>S<sub>13</sub>) с природными водами (резервуар 1) и  
ионным раствором (резервуар 2)**

Резервуар - 1					
Температура, ° C -	25,00	Давление, бар -	1,00	Масса, кг -	1101,635
Объем мультисистемы, см <sup>3</sup> -	8,50261e+07	Плотность мультисистемы, г/ см <sup>3</sup> -			0,012836
G, кал -	-149844480	H, кал -	-3793628416	S, кал /K -	1124224,625
U, кал -	-3747895296	Ср, кал -	1021830,56	Ионная сила -	0,0460
Eh, В -	1,0551	ре -	17,8705	pH -	2,7271

Наименование фазы	Объем, см <sup>3</sup>	Мольное количество	Масса, г	Плотность, г/ см <sup>3</sup>	Содержание, вес, %
Водный раствор	1002928,54534	5,55314e+04	1002132,1250	9,99206e-01	90,96772
Газ	84023125,97675	3,43613e+03	98986,2891	1,17808e-03	8,98540
Твердая фаза					
Bi <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0,00000	1,50000e-01	105,9223	0,00000e+00	0,00962
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,10856	1,49945e-01	23,9450	2,20579e+02	0,00217
PbSO <sub>4</sub>	0,34078	2,97375e-01	90,1830	2,64639e+02	0,00819
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00000	7,50000e-01	242,6227	0,00000e+00	0,02202
ZnSO <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub>	0,00000	2,00000e-01	53,9091	0,00000e+00	0,00489

Состав фазы	Функция gT, кал/моль	Мольное количество	Концентрация мг/кг H <sub>2</sub> O	log молярности	Коэф, активности	log коэф, активности
<b>Водный раствор</b>						
AgCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-109094	1,170126e-15	1,9646e-13	-17,932	0,9286	-0,032
Ag <sup>+</sup>	20752	4,062000e-02	4,3822e+00	-4,391	0,9120	-0,040
AgNO <sub>3</sub>	-5357	5,937994e-02	1,0088e+01	-4,226	1,0024	0,001
AgOH	-19519	2,035871e-11	2,5426e-09	-13,691	1,0026	0,001
AsO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>	-153049	4,200494e-13	5,8360e-11	-15,377	0,4600	-0,337
Bi <sup>+3</sup>	24775	8,982516e-09	1,8774e-06	-11,047	0,4412	-0,355
BiO <sup>+</sup>	-26975	6,215392e-07	1,3985e-04	-9,206	0,9118	-0,040
BiOH <sup>+2</sup>	-30134	2,408387e-07	5,4434e-05	-9,618	0,6967	-0,157
CO <sub>2</sub>	-89869	9,814889e-03	4,3201e-01	-5,008	1,0027	0,001
CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	-124009	8,406276e-14	5,0452e-12	-16,075	0,7159	-0,145
Cu <sup>+</sup>	14276	6,141255e-15	3,9030e-13	-17,212	0,9135	-0,039
Cu <sup>+2</sup>	17841	1,109994e+01	7,0545e+02	-1,955	0,6972	-0,157
CuO	-18413	3,368383e-09	2,6797e-07	-11,473	1,0129	0,006
CuOH <sup>+</sup>	-27872	5,432576e-05	4,3767e-03	-7,265	0,9164	-0,038
Fe <sup>+2</sup>	-19704	2,815926e-10	1,5728e-08	-12,550	0,6975	-0,156
Fe <sup>+3</sup>	-2223	3,191587e-05	1,7826e-03	-7,496	0,4431	-0,354
FeO <sup>+</sup>	-50771	1,000807e-05	7,1914e-04	-8,000	0,9173	-0,037
FeOH <sup>+2</sup>	-55634	6,868610e-05	5,0047e-03	-7,163	0,6976	-0,156
H <sub>2</sub> AsO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-177677	1,667296e+00	2,3501e+02	-2,778	0,9233	-0,035
H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub>	-180721	5,325033e-01	7,5595e+01	-3,274	0,9986	-0,001
HAsO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	-168609	2,001475e-04	2,8010e-02	-6,699	0,7142	-0,146
HBiO <sub>2</sub>	-76919	3,842088e-09	9,2985e-07	-11,415	1,0026	0,001
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-137949	2,605390e-06	1,5899e-04	-8,584	0,9241	-0,034
HFeO <sub>2</sub>	-98719	2,125117e-09	1,8885e-07	-11,673	1,0026	0,001
HNO <sub>2</sub>	-9720	3,311793e-10	1,5572e-08	-12,480	1,0009	0,000
HNO <sub>3</sub>	-22351	2,673969e-01	1,6852e+01	-3,573	0,9989	-0,000
HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-178298	1,465415e+00	1,4227e+02	-2,834	0,9229	-0,035
N <sub>2</sub>	6726	5,223500e-01	1,4635e+01	-3,282	0,9983	-0,001

Продолжение таблицы 5-13

NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-8070	4,853999e-09	3,0101e-07	-11,314	0,9220	-0,035
O <sub>2</sub>	6332	2,505805e-01	8,0193e+00	-3,601	0,9977	-0,001
Pb <sup>+2</sup>	-3547	2,624451e-03	5,4386e-01	-5,581	0,6934	-0,159
PbCl	-36969	6,707287e-15	1,4973e-12	-17,173	1,0026	0,001
PbOH <sup>+</sup>	-51622	6,910999e-07	1,5497e-04	-9,160	0,9171	-0,038
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	-175750	1,058721e+01	1,0172e+03	-1,975	0,7135	-0,147
OH <sup>-</sup>	-35259	5,886708e-09	1,0013e-07	-11,230	0,9290	-0,032
H <sup>+</sup>	2323	2,061476e+00	2,0781e+00	-2,686	0,9087	-0,042
H <sub>2</sub> O	-56678	5,550287e+04	1,0000e+00	1,744	1,0000	0,000
<b>Газ</b>						
CO <sub>2</sub>	-94263	1,011431e+00	0,04	0,005	0,9949	-0,002
N <sub>2</sub>	0	2,754555e+03	77,95	3,440	0,9998	-0,000
NO <sub>2</sub>	12420	4,792331e-07	0,00	-6,319	1,0000	0,000
N <sub>2</sub> O	24767	8,587952e-16	0,00	-15,066	0,9946	-0,002
O <sub>2</sub>	0	6,805660e+02	22,00	2,833	0,9994	-0,000
<b>Твердая фаза</b>						
Сульфат висмута Bi <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	-527820	1,499995e-01	20,50	-0,824	1,0000	0,000
Гематит Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-177366	1,499446e-01	4,64	-0,824	1,0000	0,000
Англезит PbSO <sub>4</sub>	-194362	2,973748e-01	17,46	-0,527	1,0000	0,000
Оксид сурьмы Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-198208	7,499999e-01	46,97	-0,125	1,0000	0,000
Бианкиг ZnSO <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub>	-612591	1,999999e-01	10,44	-0,699	1,0000	0,000

**Резервар - 2**

Температура, °C -	25,00	Давление, бар -	1,00	Масса, кг -	1003,767
Объем мультисистемы, см <sup>3</sup> -	1003979,562	Плотность мультисистемы, г/см <sup>3</sup> -	0,999789		
G, кал -	-3148721920	H, кал -	-3794564608	S, кал/К -	930275,688
U, кал -	-3745617664	Ср, кал -	998246,75	Ионная сила -	0,0292
Eh, В -	0,2925	pe -	4,9551	pH -	1,7792

Наименование фазы	Объем, см <sup>3</sup>	Мольное количество	Масса, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание, вес, %
Водный раствор	1003111,76967	5,55297e+04	1001545,3750	9,98438e-01	99,77864
Газ	860,31150	3,51796e-02	0,9857	1,14571e-03	0,00010
<b>Твердая фаза</b>					
Bi <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0,00000	1,50000e-01	105,9228	0,00000e+00	0,01055
Cu <sub>2</sub> S	7,10215	1,08154e+01	1721,3552	2,42371e+02	0,17149
PbSO <sub>4</sub>	0,33526	2,92560e-01	88,7229	2,64639e+02	0,00884
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00000	7,45970e-01	229,3839	0,00000e+00	0,02285
ZnSO <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub>	0,00000	2,00000e-01	53,9091	0,00000e+00	0,00537
Ag	0,04912	1,99996e-01	21,5732	4,39220e+02	0,00215

Состав фазы	Функция g <sup>T</sup> , кал/моль	Мольное количество	Концентрация м/кг H <sub>2</sub> O	log молярности	Коэф. активности	log коэф. активности
<b>Водный раствор</b>						
Ag <sup>+</sup>	20675	3,499955e-06	3,7766e-04	-8,456	0,8778	-0,057
AsO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	-81334	1,918535e-07	2,0520e-05	-9,717	0,8972	-0,047
Bi <sup>+3</sup>	24088	9,824152e-08	2,0537e-05	-10,008	0,3138	-0,503

Окончание таблицы 5-13

BiO <sup>+</sup>	-27053	3,755307e-08	8,4515e-06	-10,425	0,8774	-0,057
BiOHl <sup>+2</sup>	-30438	1,718779e-07	3,8855e-05	-9,765	0,5993	-0,222
CO <sub>2</sub>	-89866	9,806705e-03	4,3174e-01	-5,008	1,0037	0,002
CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	-124290	2,085141e-15	1,2517e-13	-17,681	0,6221	-0,206
Cu <sup>+</sup>	14200	1,762162e-03	1,1202e-01	-5,754	0,8797	-0,056
Cu <sup>+2</sup>	17538	5,674660e-01	3,6072e+01	-3,246	0,5999	-0,222
CuO	-18402	1,561958e-12	1,2429e-10	-14,806	1,0177	0,008
CuOH <sup>+</sup>	-27945	2,336873e-07	1,8831e-05	-9,631	0,8836	-0,054
Fe <sup>+2</sup>	-20006	3,001106e-01	1,6766e+01	-3,523	0,6003	-0,222
Fe <sup>+3</sup>	-2906	7,899117e-09	4,4129e-07	-11,102	0,3156	-0,501
FeO <sup>+</sup>	-50844	1,354256e-11	9,7331e-10	-13,868	0,8848	-0,053
FeOH <sup>+</sup>	-63594	5,038232e-09	3,6718e-07	-11,298	0,8845	-0,053
FeOH <sup>+2</sup>	-55936	1,106300e-12	8,0600e-08	-11,956	0,6003	-0,222
H <sub>2</sub>	6616	2,204823e-14	4,4461e-14	-16,656	1,0002	0,000
H <sub>2</sub> AsO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-138017	1,931533e-07	2,4140e-05	-9,714	0,8931	-0,049
H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-177745	2,580777e-06	3,6384e-04	-8,588	0,8927	-0,049
H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub>	-180722	5,943433e-06	8,4391e-04	-8,226	0,9981	-0,001
HAsO <sub>2</sub>	-93859	4,399991e+00	4,7504e+02	-2,356	1,0019	0,001
HAsO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	-168892	5,537470e-11	7,7510e-09	-13,257	0,6202	-0,208
HBiO <sub>2</sub>	-76917	2,514966e-11	6,0879e-09	-13,599	1,0035	0,002
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-138015	3,625454e-07	2,2129e-05	-9,440	0,8938	-0,049
H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-123818	5,955554e-12	4,8299e-10	-14,225	0,8913	-0,050
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-178365	5,801709e+00	5,6337e+02	-2,236	0,8922	-0,050
HSbO <sub>2</sub>	-95016	8,060280e-03	1,2478e+00	-5,094	1,0072	0,003
N <sub>3</sub>	6724	6,505660e-01	1,8231e+01	-3,187	0,9977	-0,001
NH <sub>3</sub>	-4001	2,236758e-13	3,8106e-12	-15,650	1,0031	0,001
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	-16689	6,743649e-06	1,2169e-04	-8,171	0,8756	-0,058
Pb <sup>+2</sup>	-3855	1,006448e-02	2,0861e+00	-4,997	0,5954	-0,225
PbOH <sup>+</sup>	-51694	2,210634e-07	4,9581e-05	-9,655	0,8845	-0,053
SO <sub>2</sub>	-69601	5,733786e-12	3,6746e-10	-14,241	0,9995	-0,000
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	-176033	7,492970e+00	7,2004e+02	-2,125	0,6193	-0,208
SbO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-80080	6,005882e-12	9,2371e-10	-14,221	0,9039	-0,044
OH <sup>-</sup>	-35321	8,107240e-10	1,3793e-08	-12,091	0,9003	-0,046
H <sup>+</sup>	2243	1,903060e+01	1,9188e+01	-1,720	0,8733	-0,059
H <sub>2</sub> O	-56678	5,549142e+04	1,0000e+00	1,744	1,0000	0,000
Газ						
CO <sub>2</sub>	-94263	1,042232e-05	0,05	-4,982	0,9949	-0,002
H <sub>2</sub>	0	9,890537e-16	0,00	-15,005	1,0000	0,000
N <sub>2</sub>	0	3,516916e-02	99,95	-1,454	0,9998	-0,000
O <sub>2</sub> S	-71749	1,367225e-16	0,00	-15,864	0,9845	-0,007
Твердая фаза						
Сульфат висмута Bi <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	-527820	1,500003e-01	4,77	-0,824	1,0000	0,000
Халькозин Cu <sub>2</sub> S	-20602	1,081539e+01	77,51	1,034	1,0000	0,000
Анлизит PbSO <sub>4</sub>	-194362	2,925604e-01	3,99	-0,534	1,0000	0,000
Сервангит Sb <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	-190201	7,459699e-01	10,33	-0,127	1,0000	0,000
Бианкит ZnSO <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub>	-612591	2,000000e-01	2,43	-0,699	1,0000	0,000
Серебро Ag	0	1,999965e-01	0,97	-0,699	1,0000	0,000

**Результаты моделирования взаимодействия Se-содержащего теннантита  
(Cu<sub>10,38</sub>Ag<sub>0,15</sub>Zn<sub>0,87</sub>Pb<sub>0,01</sub>Sb<sub>0,50</sub>As<sub>3,49</sub>S<sub>13,42</sub>Se<sub>0,17</sub>) с природными водами (резервуар 1) и  
ионным раствором (резервуар 2)**

Резервуар - 1					
Температура, °С -	25,00	Давление, бар -	1,00	Масса, кг -	1101,501
Объем мультисистемы, см <sup>3</sup> -	8,50112e+07	Плотность мультисистемы, г/см <sup>3</sup> -			0,012957
G, кал -	-3149949184	H, кал -	-3793903104	S, кал/К -	1123801,750
U, кал -	-3748040704	Ср, кал -	1021793,06	Ионная сила -	0,0451
Eh, В -	1,0711	ре -	18,1422	pH -	2,4553

Наименование фазы	Объем, см <sup>3</sup>	Молярное количество	Масса, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание, вес, %
Водный раствор	1002906,21730	5,55273e+04	1002216,2500	9,99312e-01	90,98644
Газ	84008269,64038	3,43553e+03	98966,8516	1,17806e-03	8,98473
Твердая фаза					
PbSO <sub>4</sub>	0,00813	7,09620e-03	2,1520	2,64639e+02	0,00020
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00000	2,50000e-01	80,8742	0,00000e+00	0,00734
ZnSO <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub>	0,00000	8,70000e-01	234,5044	0,00000e+00	0,02129

Состав фазы	Функция gT, кал/моль	Молярное количество	Концентрация мг/кг H <sub>2</sub> O	log молярности	Коэф. активности	log коэф. активности
<b>Водный раствор</b>						
Ag <sup>+</sup>	20749	8,445085e-02	9,1119e+00	-4,073	0,9067	-0,043
AgNO <sub>3</sub>	-5357	6,554915e-02	1,1138e+01	-4,183	1,0026	0,001
AgOH	-19519	2,249066e-11	2,8093e-09	-13,648	1,0028	0,001
AsO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>	-153078	1,648173e-13	2,2902e-11	-15,783	0,4380	-0,359
CO <sub>2</sub>	-89869	9,812611e-03	4,3196e-01	-5,008	1,0029	0,001
CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	-124021	2,454530e-14	1,4733e-12	-16,610	0,7011	-0,154
Cu <sup>+</sup>	14273	3,018830e-15	1,9188e-13	-17,520	0,9082	-0,042
Cu <sup>+2</sup>	17827	1,037997e+01	6,5978e+02	-1,984	0,6813	-0,167
CuO	-18412	8,791996e-10	6,9954e-08	-12,056	1,0139	0,006
CuOH <sup>+</sup>	-27875	2,668461e-05	2,1501e-03	-7,574	0,9113	-0,040
H <sub>2</sub> AsO <sub>4</sub> <sup>+</sup>	-177680	2,188821e+00	3,0856e+02	-2,660	0,9187	-0,037
HSeO <sub>3</sub>	-99472	1,700000e-01	2,1760e+01	-3,769	0,9972	-0,001
H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub>	-180721	1,301036e+00	1,8472e+02	-2,886	0,9985	-0,001
HAsO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	-168622	1,428167e-04	1,9989e-02	-6,845	0,6993	-0,155
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-137952	1,399892e-06	8,5439e-05	-8,854	0,9196	-0,036
HNO <sub>2</sub>	-9720	3,309349e-10	1,5562e-08	-12,480	1,0010	0,000
HNO <sub>3</sub>	-22351	2,671510e-01	1,6838e+01	-3,573	0,9988	-0,001
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-178300	2,545690e+00	2,4718e+02	-2,594	0,9183	-0,037
HSeO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-105771	2,259309e-15	3,2535e-13	-17,646	0,9172	-0,038
N <sub>2</sub>	6726	5,224184e-01	1,4639e+01	-3,282	0,9982	-0,001
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-8073	2,606161e-09	1,6164e-07	-11,584	0,9173	-0,037
O <sub>2</sub>	6332	2,504043e-01	8,0147e+00	-3,601	0,9975	-0,001
Pb <sup>+2</sup>	-3561	2,903378e-03	6,0174e-01	-5,537	0,6773	-0,169
PbO	-36969	2,070962e-15	4,6236e-13	-17,684	1,0028	0,001
Pb(OH) <sup>+</sup>	-51625	4,013775e-07	9,0015e-05	-9,396	0,9121	-0,040
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	-175762	9,997214e+00	9,6062e+02	-2,000	0,6986	-0,156
SeO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	-103333	1,051986e-14	1,5043e-12	-16,978	0,6973	-0,157
OH <sup>-</sup>	-35261	3,161087e-09	5,3776e-08	-11,500	0,9249	-0,034
H <sup>+</sup>	2319	3,878994e+00	3,9108e+00	-2,411	0,9030	-0,044

Продолжение таблицы 5-14

H <sub>2</sub> O	-56678	5,549564e+04	1,0000e+00	1,744	1,0000	0,000
<b>Газ</b>						
CO <sub>2</sub>	-94263	1,011435e+00	0,04	0,005	0,9949	-0,002
N <sub>2</sub>	0	2,754553e+03	77,97	3,440	0,9998	-0,000
NO <sub>2</sub>	12420	4,788494e-07	0,00	-6,320	1,0000	0,000
N <sub>2</sub> O	24767	8,584886e-16	0,00	-15,066	0,9946	-0,002
O <sub>2</sub>	0	6,799613e+02	21,99	2,832	0,9994	-0,000
<b>Твердая фаза</b>						
Англезит PbSO <sub>4</sub>	-194362	7,096205e-03	0,68	-2,149	1,0000	0,000
Оксид сурьмы Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-198208	2,500000e-01	25,47	-0,602	1,0000	0,000
Бианкит ZnSO <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub>	-612591	8,700000e-01	73,85	-0,060	1,0000	0,000

**Резервуар - 2**

Температура, °С -	25,00	Давление, бар -	1,00	Масса, кг -	1003,717
Объем мультисистемы, см <sup>3</sup> -	1003893,938	Плотность мультисистемы, г/см <sup>3</sup> -	0,999824		
G, кал -	-3148737536	H, кал -	-3794615040	S, кал /К -	930111,375
U, кал -	-3745620224	Ср, кал -	998055,56	Ионная сила -	0,0305
Eh, В -	0,2406	ре -	4,0758	pH -	1,7103

Наименование фазы	Объем, см <sup>3</sup>	Мольное количество	Масса, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание, вес. %
Водный раствор	1003033,94514	5,55246e+04	1001687,0625	9,98657e-01	99,79774
Газ	853,21350	3,48893e-02	0,9775	1,14571e-03	0,00010
<b>Твердая фаза</b>					
As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	0,00000	9,36652e-03	2,0042	0,00000e+00	0,00020
As <sub>2</sub> Se <sub>3</sub>	0,00000	6,33333e-02	24,4925	0,00000e+00	0,00244
Cu <sub>2</sub> S	6,81624	1,03800e+01	1652,0590	2,42371e+02	0,16459
PbSO <sub>4</sub>	0,00252	2,19513e-03	0,6657	2,64639e+02	0,00007
ZnSO <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub>	0,00000	8,70000e-01	234,5044	0,00000e+00	0,02336
Ag <sub>2</sub> Se	0,00000	1,50000e-01	44,2044	0,00000e+00	0,00440
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00000	1,22044e-01	71,1513	0,00000e+00	0,00709

Состав фазы	Функция gT, кал/моль	Мольное количество	Концентрация мг/кг H <sub>2</sub> O	log молярности	Коеф. активности	log коеф. активности
<b>Водный раствор</b>						
Ag <sup>+</sup>	20665	2,399651e-10	2,5899e-08	-12,620	0,8688	-0,061
AsO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	-81338	2,576747e-07	2,7566e-05	-9,589	0,8913	-0,050
CO <sub>2</sub>	-89866	9,803354e-03	4,3168e-01	-5,008	1,0043	0,002
CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	-124322	1,623677e-15	9,7488e-14	-17,789	0,6017	-0,221
Cu <sup>+</sup>	14191	2,961044e-07	1,8826e-05	-9,528	0,8710	-0,060
Cu <sup>+2</sup>	17501	1,319487e-05	8,3894e-04	-7,879	0,5767	-0,239
CuOH <sup>+</sup>	-27954	4,446430e-12	3,5837e-10	-14,352	0,8754	-0,058
H <sub>2</sub>	6616	1,714729e-12	3,4586e-12	-14,766	1,0003	0,000
H <sub>2</sub> AsO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-138021	2,595924e-07	3,2450e-05	-9,585	0,8865	-0,052
H <sub>2</sub> AsO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-177752	4,478718e-08	6,3155e-06	-10,349	0,8860	-0,053
H <sub>2</sub> S	-4292	1,046884e-09	3,5699e-08	-11,980	1,0026	0,001
H <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-125622	1,225130e-15	1,3992e-13	-17,912	0,9974	-0,001
H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub>	-180723	1,186929e-07	1,6857e-05	-9,925	0,9978	-0,001
HAsO <sub>2</sub>	-93859	6,834600e+00	7,3805e+02	-2,165	1,0023	0,001

Окончание таблицы 5-14

$\text{HAsO}_4^{-2}$	-168925	8,612877e-13	1,2058e-10	-15,065	0,5994	-0,222
$\text{HCO}_3^-$	-138022	3,152194e-07	1,9244e-05	-9,501	0,8873	-0,052
$\text{HS}^-$	5171	6,890750e-15	2,2803e-13	-17,161	0,8894	-0,051
$\text{HS}_2\text{O}_3^-$	-124892	2,030890e-14	2,2990e-12	-16,692	0,8853	-0,053
$\text{HSO}_3^-$	-123823	5,413292e-10	4,3911e-08	-12,266	0,8845	-0,053
$\text{HSO}_4^-$	-178373	6,809433e+00	6,6136e+02	-2,167	0,8854	-0,053
$\text{HSbO}_2$	-95015	1,182315e-02	1,8307e+00	-4,927	1,0085	0,004
$\text{N}_2$	6724	6,511641e-01	1,8251e+01	-3,186	0,9973	-0,001
$\text{NH}_3$	-4001	1,534144e-10	2,6141e-09	-12,814	1,0037	0,002
$\text{NH}_4^+$	-16695	5,450744e-03	9,8376e-02	-5,263	0,8662	-0,062
$\text{Pb}^{-2}$	-3893	1,070844e-02	2,2200e+00	-4,970	0,5716	-0,243
$\text{PbOH}^+$	-51703	1,920812e-07	4,3089e-05	-9,716	0,8765	-0,057
$\text{S}_2\text{O}_3^{-2}$	-122826	3,527865e-14	3,9579e-12	-16,452	0,5962	-0,225
$\text{SO}_3$	-69601	6,024264e-10	3,8615e-08	-12,220	0,9995	-0,000
$\text{SO}_3^{-2}$	-114222	2,818622e-15	2,2579e-13	-17,550	0,6007	-0,221
$\text{SO}_4^{-2}$	-176066	7,882550e+00	7,5764e+02	-2,103	0,5985	-0,223
$\text{SbO}_2^-$	-80083	7,612602e-12	1,1711e-09	-14,118	0,8990	-0,046
$\text{OH}^-$	-35327	7,031192e-10	1,1965e-08	-12,153	0,8948	-0,048
$\text{H}^+$	2232	2,254764e+01	2,2739e+01	-1,647	0,8636	-0,064
$\text{H}_2\text{O}$	-56678	5,547988e+04	1,0000e+00	1,744	1,0000	0,000
<b>Газ</b>						
$\text{CO}_2$	-94263	1,033744e-05	0,05	-4,986	0,9949	-0,002
$\text{H}_2\text{S}$	-7905	2,931318e-13	0,00	-12,533	0,9923	-0,003
$\text{H}_2$	0	7,631349e-14	0,00	-13,117	1,0000	0,000
$\text{N}_2$	0	3,487900e-02	99,95	-1,457	0,9998	-0,000
$\text{O}_2\text{S}$	-71749	1,424992e-14	0,00	-13,846	0,9845	-0,007
<b>Твердая фаза</b>						
Реальгар						
$\text{As}_2\text{S}_3$	-33604	9,366516e-03	0,10	-2,028	1,0000	0,000
$\text{As}_2\text{Se}_3$	-24283	6,333333e-02	1,21	-1,198	1,0000	0,000
Халькозин						
$\text{Cu}_2\text{S}$	-20602	1,037999e+01	81,42	1,016	1,0000	0,000
Англезит						
$\text{PbSO}_4$	-194362	2,195129e-03	0,03	-2,659	1,0000	0,000
Бианкит						
$\text{ZnSO}_4(\text{H}_2\text{O})_6$	-612591	8,700000e-01	11,56	-0,060	1,0000	0,000
Науманит						
$\text{As}_2\text{Se}$	-10612	1,500000e-01	2,18	-0,824	1,0000	0,000
Senarmntite						
$\text{Sb}_4\text{O}_6$	-303107	1,220442e-01	3,51	-0,913	1,0000	0,000

Таблица 5-15

**Результаты моделирования взаимодействия Se-содержащего тетраэдрита  
( $\text{Cu}_{10,94}\text{Zn}_{0,29}\text{Fe}_{0,21}\text{Sb}_{2,44}\text{As}_{1,40}\text{S}_{13,12}\text{Se}_{0,60}$ ) с природными водами (резервуар 1) и ионным  
раствором (резервуар 2)**

Резервуар - 1					
Температура, °C -	25,00	Давление, бар -	1,00	Масса, кг -	1101,596
Объем мультисистемы, $\text{см}^3$ -	8,50139e+07	Плотность мультисистемы, $\text{г}/\text{см}^3$ -			0,012958
G, кал -	-3149876736	H, кал -	-3793791488	S, кал /K -	1123835,000
U, кал -	-3747940864	Ср, кал -	1021821,00	Ионная сила -	0,0465
Eh, В -	1,0626	ре -	17,9982	pH -	2,5993

Наименование фазы	Объем, $\text{см}^3$	Мольное количество	Масса, г	Плотность, $\text{г}/\text{см}^3$	Содержание, вес, %
Водный раствор	1002940,57275	5,55319e+04	1002135,9375	9,99198e-01	90,97131
Газ	84010941,54713	3,43563e+03	98970,2188	1,17806e-03	8,98426
Твердая фаза					
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,07594	1,04887e-01	16,7496	2,20579e+02	0,00152
$\text{Sb}_2\text{O}_3$	0,00000	1,22000e+00	394,6664	0,00000e+00	0,03583
$\text{ZnSO}_4(\text{H}_2\text{O})_6$	0,00000	2,90000e-01	78,1681	0,00000e+00	0,00710

Состав фазы	Функция gT, кал/моль	Мольное количество	Концентрация $\text{мг}/\text{кг H}_2\text{O}$	log молярности	Коэф. активности	log коэф. активности
<b>Водный раствор</b>						
$\text{AsO}_4^{3-}$	-153096	1,474407e-13	2,0485e-11	-15,831	0,4253	-0,371
$\text{CO}_2$	-89868	9,811631e-03	4,3187e-01	-5,008	1,0031	0,001
$\text{CO}_3^{2-}$	-124028	4,824318e-14	2,8954e-12	-16,317	0,6927	-0,159
$\text{Cu}^+$	14270	4,386056e-15	2,7876e-13	-17,358	0,9049	-0,043
$\text{Cu}^{2+}$	17819	1,093996e+01	6,9529e+02	-1,961	0,6716	-0,173
$\text{CuO}$	-18411	1,771625e-09	1,4094e-07	-11,752	1,0150	0,006
$\text{CuOH}^+$	-27877	3,876957e-05	3,1235e-03	-7,411	0,9083	-0,042
$\text{Fe}^{+2}$	-19726	5,265695e-10	2,9411e-08	-12,278	0,6720	-0,173
$\text{Fe}^{+3}$	-2273	8,398022e-05	4,6907e-03	-7,076	0,4071	-0,390
$\text{FeO}^+$	-50777	1,354913e-05	9,7359e-04	-7,868	0,9094	-0,041
$\text{FeOH}^{+2}$	-55656	1,284319e-04	9,3581e-03	-6,891	0,6720	-0,173
$\text{H}_2\text{AsO}_4^-$	-177682	9,820624e-01	1,3843e+02	-3,008	0,9163	-0,038
$\text{HSeO}_3$	-99472	6,000000e-01	7,6790e+01	-3,222	0,9970	-0,001
$\text{H}_3\text{AsO}_4$	-180721	4,178474e-01	5,9319e+01	-3,379	0,9984	-0,001
$\text{HAsO}_4^{2-}$	-168629	9,013610e-05	1,2614e-02	-7,045	0,6908	-0,161
$\text{HCO}_3^-$	-137953	1,956066e-06	1,1937e-04	-8,709	0,9172	-0,038
$\text{HFeO}_2$	-98719	2,124121e-09	1,8876e-07	-11,673	1,0030	0,001
$\text{HNO}_2$	-9720	3,309830e-10	1,5563e-08	-12,480	1,0011	0,000
$\text{HNO}_3$	-22351	2,672475e-01	1,6842e+01	-3,573	0,9987	-0,001
$\text{HSO}_4^-$	-178302	1,966462e+00	1,9091e+02	-2,706	0,9158	-0,038
$\text{HSeO}_4^-$	-105773	1,114055e-14	1,6041e-12	-16,953	0,9146	-0,039
$\text{N}_2$	6726	5,225628e-01	1,4641e+01	-3,282	0,9981	-0,001
$\text{NO}_3^-$	-8075	3,642661e-09	2,2589e-07	-11,439	0,9147	-0,039
$\text{O}_2$	6332	2,505121e-01	8,0172e+00	-3,601	0,9973	-0,001
$\text{SO}_4^{2-}$	-175769	1,086354e+01	1,0437e+03	-1,964	0,6900	-0,161
$\text{SeO}_4^{2-}$	-103341	7,298235e-14	1,0435e-11	-16,137	0,6886	-0,162
$\text{OH}^-$	-35262	4,415102e-09	7,5100e-08	-11,355	0,9229	-0,035
$\text{H}^+$	2317	2,795300e+00	2,8179e+00	-2,554	0,8994	-0,046
$\text{H}_2\text{O}$	-56678	5,550227e+04	1,0000e+00	1,744	1,0000	0,000

<b>Газ</b>						
CO <sub>2</sub>	-94263	1,011435e+00	0,04	0,005	0,9949	-0,002
N <sub>2</sub>	0	2,754585e+03	77,97	3,440	0,9998	-0,000
NO <sub>2</sub>	12420	4,788987e-07	0,00	-6,320	1,0000	0,000
N <sub>2</sub> O	24767	8,585335e-16	0,00	-15,066	0,9946	-0,002
O <sub>2</sub>	0	6,800380e+02	21,99	2,833	0,9994	-0,000
<b>Твердая фаза</b>						
Гематит Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-177366	1,04887006e-01	3,42	-0,979	1,0000	0,000
Оксид сурьмы Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-198208	1,220000e+00	80,61	0,086	1,0000	0,000
Биапкит ZnSO <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub>	-612591	2,900000e-01	15,97	-0,538	1,0000	0,000

**Резервуар - 2**

Температура, °С -	25,00	Давление, бар -	1,00	Масса, кг -	1003,732
Объем мультисистемы, см <sup>3</sup> -	1003367,812	Плотность мультисистемы, г/см <sup>3</sup> -			1,000363
G, кал -	-3148749824	H, кал -	-3794602496	S, кал/К -	930261,750
U, кал -	-3745656320	Ср, кал -	998177,75	Ионная сила -	0,0318
En, В -	0,2930	ре -	4,9621	pH -	1,7239

Наименование фазы	Объем, см <sup>3</sup>	Мольное количество	Масса, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание, вес. %
Водный раствор	1003077,38580	5,55300e+04	1001475,2500	9,98403e-01	99,77518
Газ	282,88434	1,15676e-02	0,3241	1,14571e-03	0,00003
<b>Твердая фаза</b>					
Cu <sub>2</sub> S	7,05341	1,07412e+01	1709,5424	2,42371e+02	0,17032
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00000	1,21553e+00	373,7729	0,00000e+00	0,03724
ZnSO <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub>	0,00000	2,90000e-01	78,1681	0,00000e+00	0,00779
Se	0,47098	1,20000e+00	94,7520	2,01180e+02	0,00944

Состав фазы	Функция gT, кал/моль	Мольное количество	Концентрация мг/кг H <sub>2</sub> O	log молярности	Коэф. активности	log коэф. активности
<b>Водный раствор</b>						
AsO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	-81338	1,088592e-07	1,1644e-05	-9,963	0,8922	-0,050
CO <sub>2</sub>	-89866	9,811736e-03	4,3197e-01	-5,008	1,0042	0,002
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	-124319	1,723344e-15	1,0346e-13	-17,763	0,6051	-0,218
Cu <sup>+</sup>	14192	1,160611e-03	7,3780e-02	-5,935	0,8725	-0,059
Cu <sup>+2</sup>	17505	3,965074e-01	2,5206e+01	-3,402	0,5806	-0,236
CuO	-18400	8,069886e-13	6,4216e-11	-15,093	1,0202	0,009
CuOH <sup>+</sup>	-27953	1,385181e-07	1,1162e-05	-9,858	0,8768	-0,057
Fe <sup>+3</sup>	-20040	2,102211e-01	1,1745e+01	-3,677	0,5810	-0,236
Fe <sup>+3</sup>	-2982	6,044259e-09	3,3768e-07	-11,218	0,2931	-0,533
FeO <sup>+</sup>	-50852	7,250858e-12	5,2114e-10	-14,139	0,8782	-0,056
FeOH <sup>+</sup>	-63602	2,994394e-09	2,1824e-07	-11,524	0,8779	-0,057
FeOH <sup>+2</sup>	-55970	6,978990e-10	5,0864e-08	-12,156	0,5810	-0,236
H2	6616	2,716154e-14	5,4775e-14	-16,566	1,0003	0,000
H <sub>2</sub> AsO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-138021	1,096610e-07	1,3706e-05	-9,960	0,8876	-0,052
H <sub>2</sub> AsO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-177751	1,195084e-06	1,6849e-04	-8,922	0,8871	-0,052
HSeO <sub>3</sub>	-99474	4,701881e-14	6,0191e-12	-16,328	0,9960	-0,002
H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub>	-180723	3,070934e-06	4,3606e-04	-8,513	0,9978	-0,001

## Окончание таблицы 5-15

$\text{HAsO}_4^{2-}$	-93859	2,799995e+00	3,0231e+02	-2,553	1,0022	0,001
$\text{HCO}_3^-$	-168922	2,362926e-11	3,3076e-09	-13,626	0,6029	-0,220
$\text{HSO}_3^-$	-123822	8,572250e-12	6,9523e-10	-14,067	0,8856	-0,053
$\text{HSO}_4^-$	-178372	6,810118e+00	6,6132e+02	-2,167	0,8865	-0,052
$\text{HSbO}_2$	-95015	8,938135e-03	1,3838e+00	-5,049	1,0082	0,004
$\text{N}_2$	6724	6,445408e-01	1,8063e+01	-3,191	0,9974	-0,001
$\text{NH}_3$	-4001	3,042668e-13	5,1838e-12	-15,517	1,0036	0,002
$\text{NH}_4^+$	-16694	1,044999e-05	1,8857e-04	-7,981	0,8678	-0,062
$\text{SO}_2$	-69601	9,252515e-12	5,9298e-10	-14,034	0,9995	-0,000
$\text{SO}_4^{2-}$	-176063	8,108716e+00	7,7924e+02	-2,091	0,6019	-0,220
$\text{SbO}_2^-$	-80082	5,935200e-12	9,1287e-10	-14,226	0,8998	-0,046
$\text{OH}^-$	-35262	4,415102e-09	7,5100e-08	-11,355	0,9229	-0,035
$\text{H}^+$	2317	2,795300e+00	2,8179e+00	-2,554	0,8994	-0,046
$\text{H}_2\text{O}$	-56678	5,550227e+04	1,0000e+00	1,744	1,0000	0,000
<b>Газ</b>						
$\text{CO}_2$	-94263	3,467331e-06	0,05	-5,460	0,9949	-0,002
$\text{H}_2$	0	4,006857e-16	0,00	-15,397	1,0000	0,000
$\text{N}_2$	0	1,156415e-02	99,95	-1,937	0,9998	-0,000
$\text{O}_2\text{S}$	-71749	7,254738e-17	0,00	-16,139	0,9845	-0,007
<b>Твердая фаза</b>						
Халькозин $\text{Cu}_2\text{S}$	-20602	1,074117e+01	75,77	1,031	1,0000	0,000
Сервантит $\text{Sb}_2\text{O}_4$	-190201	1,215531e+00	16,57	0,085	1,0000	0,000
Бианкит $\text{ZnSO}_4(\text{H}_2\text{O})_6$	-612591	2,900000e-01	3,46	-0,538	1,0000	0,000
Селен $\text{Se}$	0	1,200000e+00	4,20	0,079	1,0000	0,000

**Результаты моделирования взаимодействия Bi-содержащего тетраэдрита  
(Cu<sub>1,1</sub>Ag<sub>0,1</sub>Zn<sub>0,2</sub>Fe<sub>0,3</sub>Pb<sub>0,3</sub>As<sub>1,58</sub>Sb<sub>2,2</sub>Bi<sub>0,3</sub>S<sub>13</sub>) с природными водами (резервуар 1) и  
ионным раствором (резервуар 2)**

<b>Резервуар - 1</b>					
Температура, °С -	25,00	Давление, бар -	1,00	Масса, кг -	1101,668
Объем мультисистемы, см <sup>3</sup> -	8,50259e+07	Плотность мультисистемы, г/см <sup>3</sup> -			0,012957
G, кал -	-3149841920	H, кал -	-3793608960	S, кал /K -	1124278,500
U, кал -	-3747896320	Ср, кал -	1021841,44	Ионная сила -	0,0459
Eh, В -	1,0511	ре -	17,8026	pH -	2,7949

Наименование фазы	Объем, см <sup>3</sup>	Мольное количество	Масса, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание, вес, %
Водный раствор	1002917,69788	5,55315e+04	1002051,8125	9,99137e-01	90,95772
Газ	84022966,32579	3,43613e+03	98986,0859	1,17808e-03	8,98511
<b>Твердая фаза</b>					
Bi <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0,00000	1,49999e-01	105,9222	0,00000e+00	0,00961
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,10857	1,49961e-01	23,9476	2,20579e+02	0,00217
PbSO <sub>4</sub>	0,34087	2,97457e-01	90,2078	2,64639e+02	0,00819
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00000	1,10000e+00	355,8467	0,00000e+00	0,03230
ZnSO <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub>	0,00000	2,00000e-01	53,9091	0,00000e+00	0,00489

Состав фазы	Функция гГ, кал/моль	Мольное количество	Концентрация мг/кг H <sub>2</sub> O	лог молярности	Коэф. активности	лог коэф. активности
<b>Водный раствор</b>						
AgCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-109093	1,452850e-15	2,4393e-13	-17,838	0,9297	-0,032
Ag <sup>+</sup>	20753	3,686189e-02	3,9767e+00	-4,433	0,9138	-0,039
AgNO <sub>3</sub>	-5357	6,313810e-02	1,0727e+01	-4,200	1,0023	0,001
AgOH	-19519	2,164753e-11	2,7035e-09	-13,665	1,0024	0,001
AsO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>	-153040	3,999606e-13	5,5568e-11	-15,398	0,4671	-0,331
Bi <sup>+3</sup>	24785	8,521881e-09	1,7811e-06	-11,069	0,4489	-0,348
BiO <sup>+</sup>	-26974	8,182504e-07	1,8411e-04	-9,087	0,9136	-0,039
BiOH <sup>+2</sup>	-30130	2,696334e-07	6,0940e-05	-9,569	0,7020	-0,154
CO <sub>2</sub>	-89869	9,816519e-03	4,3207e-01	-5,008	1,0026	0,001
CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	-124005	1,141924e-13	6,8533e-12	-15,942	0,7204	-0,142
Cu <sup>+</sup>	14277	7,220707e-15	4,5890e-13	-17,141	0,9152	-0,038
Cu <sup>+2</sup>	17846	1,109994e+01	7,0543e+02	-1,955	0,7025	-0,153
CuO	-18413	4,641990e-09	3,6929e-07	-11,333	1,0123	0,005
CuOH <sup>+</sup>	-27871	6,389603e-05	5,1476e-03	-7,194	0,9180	-0,037
Fe <sup>+2</sup>	-19699	2,044677e-10	1,1420e-08	-12,689	0,7028	-0,153
Fe <sup>+3</sup>	-2212	1,952245e-05	1,0960e-03	-7,707	0,4507	-0,346
FeO <sup>+</sup>	-50770	8,545178e-06	6,1401e-04	-8,068	0,9189	-0,037
FeOH <sup>+2</sup>	-55629	4,986165e-05	3,6330e-03	-7,302	0,7028	-0,153
H <sub>2</sub> AsO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-177676	1,177691e+00	1,6600e+02	-2,929	0,9246	-0,034
H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub>	-180721	3,221447e-01	4,5731e+01	-3,492	0,9987	-0,001
HAsO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	-168605	1,644459e-04	2,3013e-02	-6,784	0,7188	-0,143
HBiO <sub>3</sub>	-76919	5,927736e-09	1,4346e-06	-11,227	1,0024	0,001
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-137948	3,042118e-06	1,8564e-04	-8,517	0,9254	-0,034
HFeO <sub>2</sub>	-98719	2,125471e-09	1,8888e-07	-11,672	1,0024	0,001
HNO <sub>2</sub>	-9720	3,312082e-10	1,5573e-08	-12,480	1,0009	0,000
HNO <sub>3</sub>	-22351	2,673931e-01	1,6851e+01	-3,573	0,9989	-0,000
HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-178297	1,281701e+00	1,2443e+02	-2,892	0,9242	-0,034
N <sub>2</sub>	6726	5,223280e-01	1,4634e+01	-3,282	0,9984	-0,001

Продолжение таблицы 5-16

NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-8069	5,666982e-09	3,5142e-07	-11,247	0,9233	-0,035
O <sub>2</sub>	6332	2,505608e-01	8,0185e+00	-3,601	0,9978	-0,001
Pb <sup>+2</sup>	-3543	2,542474e-03	5,2686e-01	-5,595	0,6988	-0,156
PbO	-36969	8,955992e-15	1,9992e-12	-17,048	1,0024	0,001
PbOH <sup>+</sup>	-51621	7,876980e-07	1,7663e-04	-9,104	0,9187	-0,037
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	-175746	1,077084e+01	1,0348e+03	-1,968	0,7182	-0,144
OH <sup>-</sup>	-35258	6,875215e-09	1,1694e-07	-11,163	0,9300	-0,032
H <sup>+</sup>	2324	1,759358e+00	1,7735e+00	-2,755	0,9106	-0,041
H <sub>2</sub> O	-56678	5,550392e+04	1,0000e+00	1,744	1,0000	0,000
<b>Газ</b>						
CO <sub>2</sub>	-94263	1,011429e+00	0,04	0,005	0,9949	-0,002
N <sub>2</sub>	0	2,754554e+03	77,95	3,440	0,9998	-0,000
NO <sub>2</sub>	12420	4,792302e-07	0,00	-6,319	1,0000	0,000
N <sub>2</sub> O	24767	8,587925e-16	0,00	-15,066	0,9946	-0,002
O <sub>2</sub>	0	6,805614e+02	22,00	2,833	0,9994	-0,000
<b>Твердая фаза</b>						
Сульфат висмута Bi <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	-527820	1,499995e-01	16,82	-0,824	1,0000	0,000
Гематит Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-177366	1,499610e-01	3,80	-0,824	1,0000	0,000
Англезит PbSO <sub>4</sub>	-194362	2,974567e-01	14,32	-0,527	1,0000	0,000
Оксид сурьмы Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-198208	1,100000e+00	56,50	0,041	1,0000	0,000
Бланкит ZnSO <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub>	-612591	2,000000e-01	8,56	-0,699	1,0000	0,000

**Резервуар - 2**

Температура, °С -	25,00	Давление, бар -	1,00	Масса, кг -	1003,767
Объем мультисистемы, см <sup>3</sup> -	1003979,562	Плотность мультисистемы, г/см <sup>3</sup> -	0,999789		
G, кал -	-3148721920	H, кал -	-3794564608	S, кал/К -	930275,688
U, кал -	-3745617664	Ср, кал -	998246,75	Ионная сила -	0,0292
En, В -	0,2925	ре -	4,9551	pH -	1,7792

Наименование фазы	Объем, см <sup>3</sup>	Мольное количество	Масса, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание, вес, %
Водный раствор	1003111,76967	5,55297e+04	1001545,3750	9,98438e-01	99,77864
Газ	860,31150	3,51796e-02	0,9857	1,14571e-03	0,00010
<b>Твердая фаза</b>					
Bi <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0,00000	1,50000e-01	105,9228	0,00000e+00	0,01055
Cu <sub>2</sub> S	7,10215	1,08154e+01	1721,3552	2,42371e+02	0,17149
PbSO <sub>4</sub>	0,33526	2,92560e-01	88,7229	2,64639e+02	0,00884
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00000	7,45970e-01	229,3839	0,00000e+00	0,02285
ZnSO <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub>	0,00000	2,00000e-01	53,9091	0,00000e+00	0,00537
Ag	0,04912	1,99996e-01	21,5732	4,39220e+02	0,00215

Состав фазы	Функция gT, кал/моль	Мольное количество	Концентрация мг/кг H <sub>2</sub> O	log молярности	Коэф, активности	log коэф, активности
<b>Водный раствор</b>						
Ag <sup>+</sup>	20675	3,499955e-06	3,7766e-04	-8,456	0,8778	-0,057
AsO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-81334	1,918535e-07	2,0520e-05	-9,717	0,8972	-0,047
Bi <sup>+3</sup>	24088	9,824152e-08	2,0537e-05	-10,008	0,3138	-0,503

BiO <sup>+</sup>	-27053	3,755307e-08	8,4515e-06	-10,425	0,8774	-0,057
BiOH <sup>2+</sup>	-30438	1,718779e-07	3,8855e-05	-9,765	0,5993	-0,222
CO <sub>2</sub>	-89866	9,806705e-03	4,3174e-01	-5,008	1,0037	0,002
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	-124290	2,085141e-15	1,2517e-13	-17,681	0,6221	-0,206
Cu <sup>+</sup>	14200	1,762162e-03	1,1202e-01	-5,754	0,8797	-0,056
Cu <sup>2+</sup>	17538	5,674660e-01	3,6072e+01	-3,246	0,5999	-0,222
CuO	-18402	1,561958e-12	1,2429e-10	-14,806	1,0177	0,008
CuOH <sup>+</sup>	-27945	2,336873e-07	1,8831e-05	-9,631	0,8836	-0,054
Fe <sup>2+</sup>	-20006	3,001106e-01	1,6766e+01	-3,523	0,6003	-0,222
Fe <sup>3+</sup>	-2906	7,899117e-09	4,4129e-07	-11,102	0,3156	-0,501
FeO <sup>+</sup>	-50844	1,354256e-11	9,7331e-10	-13,868	0,8848	-0,053
FeOH <sup>+</sup>	-63594	5,038232e-09	3,6718e-07	-11,298	0,8845	-0,053
FeOH <sup>2+</sup>	-55936	1,106300e-12	8,0600e-08	-11,956	0,6003	-0,222
H <sub>2</sub>	6616	2,204823e-14	4,4461e-14	-16,656	1,0002	0,000
H <sub>2</sub> AsO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-138017	1,931533e-07	2,4140e-05	-9,714	0,8931	-0,049
H <sub>2</sub> AsO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-177745	2,580777e-06	3,6384e-04	-8,588	0,8927	-0,049
H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub>	-180722	5,943433e-06	8,4391e-04	-8,226	0,9981	-0,001
HAsO <sub>2</sub>	-93859	4,399991e+00	4,7504e+02	-2,356	1,0019	0,001
HAsO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-168892	5,537470e-11	7,7510e-09	-13,257	0,6202	-0,208
HBiO <sub>2</sub>	-76917	2,514966e-11	6,0879e-09	-13,599	1,0035	0,002
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-138015	3,625454e-07	2,2129e-05	-9,440	0,8938	-0,049
HSO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-123818	5,955554e-12	4,8299e-10	-14,225	0,8913	-0,050
HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-178365	5,801709e+00	5,6337e+02	-2,236	0,8922	-0,050
HSbO <sub>2</sub>	-95016	8,060280e-03	1,2478e+00	-5,094	1,0072	0,003
N <sub>2</sub>	6724	6,505660e-01	1,8231e+01	-3,187	0,9977	-0,001
NH <sub>3</sub>	-4001	2,236758e-13	3,8106e-12	-15,650	1,0031	0,001
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	-16689	6,743649e-06	1,2169e-04	-8,171	0,8756	-0,058
Pb <sup>2+</sup>	-3855	1,006448e-02	2,0861e+00	-4,997	0,5954	-0,225
PbOH <sup>+</sup>	-51694	2,210634e-07	4,9581e-05	-9,655	0,8845	-0,053
SO <sub>2</sub>	-69601	5,733786e-12	3,6746e-10	-14,241	0,9995	-0,000
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-176033	7,492970e+00	7,2004e+02	-2,125	0,6193	-0,208
SbO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-80080	6,005882e-12	9,2371e-10	-14,221	0,9039	-0,044
OH <sup>-</sup>	-35321	8,107240e-10	1,3793e-08	-12,091	0,9003	-0,046
H <sup>+</sup>	2243	1,903060e+01	1,9188e+01	-1,720	0,8733	-0,059
H <sub>2</sub> O	-56678	5,549142e+04	1,0000e+00	1,744	1,0000	0,000
<b>Газ</b>						
CO <sub>2</sub>	-94263	1,042232e-05	0,05	-4,982	0,9949	-0,002
N <sub>2</sub>	0	3,516916e-02	99,95	-1,454	0,9998	-0,000
O <sub>2</sub> S	-71749	1,367225e-16	0,00	-15,864	0,9845	-0,007
<b>Твердая фаза</b>						
Сульфат висмута Bi <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	-527820	1,500003e-01	4,77	-0,824	1,0000	0,000
Халькозин Cu <sub>2</sub> S	-20602	1,081539e+01	77,51	1,034	1,0000	0,000
Англезит PbSO <sub>4</sub>	-194362	2,925604e-01	3,99	-0,534	1,0000	0,000
Сервантит Sb <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	-190201	7,459699e-01	10,33	-0,127	1,0000	0,000
Биалкит ZnSO <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub>	-612591	2,000000e-01	2,43	-0,699	1,0000	0,000
Серебро Ag	0	1,999965e-01	0,97	-0,699	1,0000	0,000

Таблица 5-17

**Результаты моделирования взаимодействия англезита (PbSO<sub>4</sub>)  
с природными водами (резервуар 1) и ионным раствором (резервуар 2)**

Резервуар - 1					
Температура, °C -	25,00	Давление, бар -	1,00	Масса, кг -	1100,303
Объем мультисистемы, см <sup>3</sup> -	8,57713e+07	Плотность мультисистемы, г/см <sup>3</sup> -			0,012828
G, кал -	-3147467264	H, кал -	-3792360960	S, кал /K -	1120368,375
U, кал -	-3745104640	Ср, кал -	1022764,81	Ионная сила -	0,0005
Eh, В -	0,9178	ре -	15,5460	pH -	5,0549

Наименование фазы	Объем, см <sup>3</sup>	Мольное количество	Масса, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание, вес, %
Водный раствор	1003019,19310	5,55096e+04	1000076,1250	9,97066e-01	90,89098
Газ	84768234,74686	3,46661e+03	99961,5391	1,17923e-03	9,08491
<b>Твердая фаза</b>					
PbSO <sub>4</sub>	1,00293	8,75192e-01	265,4139	2,64639e+02	0,02412

Состав фазы	Функция гТ, кал/моль	Мольное количество	Концентрация мг/кг H <sub>2</sub> O	лог молярности	Коэф. активности	лог коэф. активности
<b>Водный раствор</b>						
CO <sub>2</sub>	-89870	9,755801e-03	4,2936e-01	-5,011	1,0000	0,000
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	-123827	2,781331e-09	1,6691e-07	-11,556	0,9723	-0,012
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-137906	5,115676e-04	3,1215e-02	-6,291	0,9930	-0,003
HNO <sub>2</sub>	-9720	3,390758e-10	1,5942e-08	-12,470	1,0000	0,000
HNO <sub>3</sub>	-22350	2,780271e-01	1,7520e+01	-3,556	1,0000	-0,000
HPbO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	-78624	2,086337e-14	5,0117e-12	-16,681	0,9930	-0,003
HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-178254	1,028372e-04	9,9829e-03	-6,988	0,9930	-0,003
N <sub>2</sub>	6727	5,172148e-01	1,4489e+01	-3,286	1,0000	-0,000
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-8026	9,977997e-07	6,1870e-05	-9,001	0,9930	-0,003
O <sub>2</sub>	6334	2,590565e-01	8,2898e+00	-3,587	1,0000	-0,000
Pb <sup>+2</sup>	-3347	1,163518e-01	2,4109e+01	-3,934	0,9721	-0,012
PbO	-36970	1,883813e-08	4,2048e-06	-10,725	1,0000	0,000
PbOH <sup>+</sup>	-51574	8,455991e-03	1,8960e+00	-5,073	0,9930	-0,003
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-175566	1,247050e-01	1,1980e+01	-3,904	0,9723	-0,012
OH <sup>-</sup>	-35219	1,172563e-06	1,9943e-05	-8,931	0,9931	-0,003
H <sup>+</sup>	2375	8,866954e-03	8,9376e-03	-5,052	0,9929	-0,003
H <sub>2</sub> O	-56678	5,550829e+04	1,0000e+00	1,744	1,0000	0,000
<b>Газ</b>						
CO <sub>2</sub>	-94263	1,010982e+00	0,04	0,005	0,9949	-0,002
N <sub>2</sub>	0	2,754585e+03	77,19	3,440	0,9998	-0,000
NO <sub>2</sub>	12420	4,986141e-07	0,00	-6,302	1,0000	0,000
N <sub>2</sub> O	24767	8,739403e-16	0,00	-15,059	0,9946	-0,002
O <sub>2</sub>	0	7,110185e+02	22,76	2,852	0,9994	-0,000
<b>Твердая фаза</b>						
Англезит PbSO <sub>4</sub>	-194362	8,751922e-01	100,00	-0,058	1,0000	0,000

Резервуар - 2					
Температура, °С -	25,00	Давление, бар -	1,00	Масса, кг -	1000,076
Объем мультисистемы, см <sup>3</sup> -	1003298,000	Плотность мультисистемы, г/см <sup>3</sup> -			0,996789
G, кал -	-3146153984	H, кал -	-3792069888	S, кал/К -	928229,312
U, кал -	-3742785536	Ср, кал -	998737,12	Ионная сила -	0,0005
Вh, В -	0,9171	рс -	15,5332	pH -	5,0644

Наименование фазы	Объём, см <sup>3</sup>	Мольное количество	Масса, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание, всс. %
Водный раствор	1003018,87069	5,55096e+04	1000075,9375	9,97066e-01	99,99997
Газ	279,09430	1,14136e-02	0,3293	1,17998e-03	0,00003
Твердая фаза					
PbSO <sub>4</sub>	0,00000	1,24143e-07	0,0000	2,64639e+02	0,00000

Состав фазы	Функция gT, кал/моль	Мольное количество	Концентрация мг/кг H <sub>2</sub> O	log молярности	Коэф. активности	log коэф. активности
<b>Водный раствор</b>						
CO <sub>2</sub>	-89870	9,731008e-03	4,2827e-01	-5,012	1,0001	0,000
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	-123865	3,139123e-09	1,8838e-07	-11,503	0,9406	-0,027
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-137916	5,337363e-04	3,2568e-02	-6,273	0,9849	-0,007
HNO <sub>2</sub>	-9720	3,365682e-10	1,5824e-08	-12,473	1,0000	0,000
HNO <sub>3</sub>	-22350	2,758051e-01	1,7380e+01	-3,559	1,0000	-0,000
HPbO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	-78634	2,174767e-14	5,2241e-12	-16,663	0,9849	-0,007
HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-178264	9,546335e-05	9,2671e-03	-7,020	0,9849	-0,007
N <sub>2</sub>	6727	5,093139e-01	1,4268e+01	-3,293	1,0000	-0,000
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-8036	1,038084e-06	6,4368e-05	-8,984	0,9849	-0,007
O <sub>2</sub>	6334	2,594402e-01	8,3020e+00	-3,586	1,0000	-0,000
Pb <sup>+2</sup>	-3386	1,169284e-01	2,4228e+01	-3,932	0,9400	-0,027
PbO	-36970	1,887080e-08	4,2121e-06	-10,724	1,0001	0,000
PbOH <sup>+</sup>	-51584	8,322113e-03	1,8659e+00	-5,080	0,9848	-0,007
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-175604	1,251551e-01	1,2023e+01	-3,903	0,9406	-0,027
OH <sup>-</sup>	-35228	1,226219e-06	2,0855e-05	-8,911	0,9850	-0,007
H <sup>+</sup>	2366	8,762731e-03	8,8326e-03	-5,057	0,9846	-0,007
H <sub>2</sub> O	-56678	5,550829e+04	1,0000e+00	1,744	1,0000	0,000
<b>Газ</b>						
CO <sub>2</sub>	-94263	2,822158e-06	0,04	-5,549	0,9949	-0,002
N <sub>2</sub>	0	9,015690e-03	76,69	-2,045	0,9998	-0,000
NO <sub>2</sub>	12420	1,629281e-12	0,00	-11,788	1,0000	0,000
O <sub>2</sub>	0	2,395129e-03	23,27	-2,621	0,9994	-0,000
<b>Твердая фаза</b>						
Англезит PbSO <sub>4</sub>	-194362	1,241435e-07	100,00	-6,906	1,0000	0,000

Таблица 5-18

**Результаты моделирования взаимодействия сульфата висмута ( $\text{Bi}_2(\text{SO}_4)_3$ )  
с природными водами (резервуар 1) и нонным раствором (резервуар 2)**

Резервуар - 1					
Температура, °C -	25,00	Давление, бар -	1,00	Масса, кг -	1100,706
Объем мультисистемы, $\text{см}^3$ -	8,57713e+07	Плотность мультисистемы, $\text{г}/\text{см}^3$ -			0,012833
G, кал -	-3147800832	H, кал -	-3792750848	S, кал/К -	1120403,250
U, кал -	-3745492224	Ср, кал -	1022805,62	Ионная сила -	0,0004
$E_h$ , В -	1,0003	ре -	16,9432	pH -	3,6578

Наименование фазы	Объем, $\text{см}^3$	Мольное количество	Масса, г	Плотность, $\text{г}/\text{см}^3$	Содержание, вес, %
Водный раствор	1003019,33460	5,55096e+04	1000053,8750	9,97043e-01	90,85567
Газ	84768245,93244	3,46662e+03	99961,5625	1,17923e-03	9,08159
<b>Твердая фаза</b>					
$\text{Bi}_2(\text{SO}_4)_3$	0,00000	9,58491e-01	676,8392	0,00000e+00	0,06149
$\text{Bi}_2\text{O}_3$	0,03489	2,93517e-02	13,6767	3,92040e+02	0,00124

Состав фазы	Функция gT, кал/моль	Мольное количество	Концентрация мг/кг $\text{H}_2\text{O}$	log молярности	Коэф. активности	log коэф. активности
<b>Водный раствор</b>						
$\text{Bi}^{3+}$	25180	2,378484e-06	4,9707e-04	-8,624	0,8743	-0,058
$\text{BiO}^+$	-26929	2,223559e-02	5,0027e+00	-4,653	0,9852	-0,006
$\text{BiO}_2^-$	-59329	7,368755e-13	1,7758e-10	-15,133	0,9853	-0,006
$\text{BiOH}^{2+}$	-29956	8,043287e-04	1,8177e-01	-6,095	0,9421	-0,026
$\text{CO}_2$	-89870	9,757813e-03	4,2945e-01	-5,011	1,0000	0,000
$\text{CO}_3^{2-}$	-123846	4,610157e-12	2,7666e-10	-14,336	0,9425	-0,026
$\text{HBiO}_2$	-76920	1,272181e-03	3,0786e-01	-5,895	1,0000	0,000
$\text{HCO}_3^-$	-137911	2,068565e-05	1,2622e-03	-7,684	0,9854	-0,006
$\text{HNO}_2$	-9720	3,390712e-10	1,5941e-08	-12,470	1,0000	0,000
$\text{HNO}_3$	-22350	2,780283e-01	1,7520e+01	-3,556	1,0000	-0,000
$\text{HSO}_4^-$	-178259	2,453051e-03	2,3813e-01	-5,610	0,9854	-0,006
$\text{N}_2$	6727	5,172407e-01	1,4490e+01	-3,286	1,0000	-0,000
$\text{NO}_3^-$	-8031	4,030668e-08	2,4993e-06	-10,395	0,9853	-0,006
$\text{O}_2$	6334	2,590592e-01	8,2899e+00	-3,587	1,0000	-0,000
$\text{SO}_4^{2-}$	-175585	1,220738e-01	1,1727e+01	-3,913	0,9424	-0,026
$\text{OH}^-$	-35224	4,736227e-08	8,0553e-07	-10,325	0,9855	-0,006
$\text{H}^+$	2371	2,227700e-01	2,2455e-01	-3,652	0,9851	-0,007
$\text{H}_2\text{O}$	-56678	5,550818e+04	1,0000e+00	1,744	1,0000	0,000
<b>Газ</b>						
$\text{CO}_2$	-94263	1,011471e+00	0,04	0,005	0,9949	-0,002
$\text{N}_2$	0	2,754585e+03	77,19	3,440	0,9998	-0,000
$\text{NO}_2$	12420	4,983823e-07	0,00	-6,302	1,0000	0,000
$\text{N}_2\text{O}$	24767	8,739403e-16	0,00	-15,059	0,9946	-0,002
$\text{O}_2$	0	7,110185e+02	22,76	2,852	0,9994	-0,000
<b>Твердая фаза</b>						
Сульфат висмута $\text{Bi}_2(\text{SO}_4)_3$	-527820	9,584911e-01	98,02	-0,018	1,0000	0,000
Бисмит $\text{Bi}_2\text{O}_3$	-118009	2,935170e-02	1,98	-1,532	1,0000	0,000

Резервуар - 2					
Температура, °С -	25,00	Давление, бар -	1,00	Масса, кг -	1000,760
Объем мультисистемы, см <sup>3</sup> -	1003307,938	Плотность мультисистемы, г/см <sup>3</sup> -			0,997460
G, кал -	-3146675712	H, кал -	-3792672256	S, кал /К -	928299,500
U, кал -	-3743386624	Ср, кал -	998801,06	Ионная сила -	0,0004
En, В -	1,0003	pe -	16,9435	pH -	3,6511

Наименование фазы	Объем, см <sup>3</sup>	Мольное количество	Масса, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание, вес, %
Водный раствор	1003019,02287	5,55096e+04	1000054,5000	9,97044e-01	99,92950
Газ	288,91791	1,18154e-02	0,3407	1,17914e-03	0,00003
Твердая фаза					
Ві <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0,00000	9,98652e-01	705,1987	0,00000e+00	0,07047

Состав фазы	Функция gT, кал/моль	Мольное количество	Концентрация мг/кг Н <sub>2</sub> O	log молярности	Коэф, активности	log коэф, активности
<b>Водный раствор</b>						
Ві <sup>+3</sup>	25065	3,167169e-06	6,6190e-04	-8,499	0,8238	-0,084
ВіO <sup>+</sup>	-26942	2,467460e-02	5,5515e+00	-4,608	0,9787	-0,009
ВіO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	-59341	8,147393e-13	1,9634e-10	-15,089	0,9789	-0,009
ВіOH <sup>+2</sup>	-30007	9,570441e-04	2,1629e-01	-6,019	0,9175	-0,037
CO <sub>2</sub>	-89870	9,754116e-03	4,2929e-01	-5,011	1,0001	0,000
CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	-123896	5,012704e-12	3,0082e-10	-14,300	0,9182	-0,037
НВіO <sub>2</sub>	-76920	1,376268e-03	3,3305e-01	-5,861	1,0001	0,000
НСO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-137923	2,110382e-05	1,2877e-03	-7,676	0,9790	-0,009
НNO <sub>2</sub>	-9720	3,364748e-10	1,5819e-08	-12,473	1,0000	0,000
НNO <sub>3</sub>	-22350	2,759659e-01	1,7390e+01	-3,559	1,0000	-0,000
НСO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-178271	2,375226e-03	2,3057e-01	-5,624	0,9790	-0,009
N <sub>2</sub>	6727	5,088773e-01	1,4256e+01	-3,293	1,0000	-0,000
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-8043	4,086021e-08	2,5336e-06	-10,389	0,9789	-0,009
O <sub>2</sub>	6334	2,592198e-01	8,2950e+00	-3,586	0,9999	-0,000
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	-175635	1,261965e-01	1,2123e+01	-3,899	0,9181	-0,037
OH <sup>-</sup>	-35236	4,836507e-08	8,2259e-07	-10,315	0,9791	-0,009
H <sup>+</sup>	2358	2,281912e-01	2,3001e-01	-3,642	0,9786	-0,009
H <sub>2</sub> O	-56678	5,550818e+04	1,0000e+00	1,744	1,0000	0,000
<b>Газ</b>						
CO <sub>2</sub>	-94263	3,279432e-06	0,04	-5,484	0,9949	-0,002
N <sub>2</sub>	0	9,394603e-03	77,25	-2,027	0,9998	-0,000
NO <sub>2</sub>	12420	1,686187e-12	0,00	-11,773	1,0000	0,000
O <sub>2</sub>	0	2,417473e-03	22,71	-2,617	0,9994	-0,000
<b>Твердая фаза</b>						
Сульфат висмута Ві <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	-527820	9,986517e-01	100,00	-0,001	1,0000	0,000

Таблица 5-19

**Результаты моделирования взаимодействия бианкита ( $ZnSO_4(H_2O)_6$ )  
с природными водами (резервуар 1) и ионным раствором (резервуар 2)**

<b>Резервуар - 1</b>					
Температура, °С -	25,00	Давление, бар -	1,00	Масса, кг -	1100,269
Объем мультисистемы, см <sup>3</sup> -	8,57712e+07	Плотность мультисистемы, г/см <sup>3</sup> -			0,012828
G, кал -	-3147885056	H, кал -	-3792880128	S, кал /К -	1120412,375
U, кал -	-3745620480	Ср, кал -	1022843,31	Ионная сила -	0,0000
Eh, В -	0,8813	pe -	14,9272	pH -	5,6738

Наименование фазы	Объем, см <sup>3</sup>	Мольное количество	Масса, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание, вес, %
Водный раствор	1003019,40493	5,55094e+04	1000038,3750	9,97028e-01	90,89032
Газ	84768199,08344	3,46661e+03	99961,4688	1,17923e-03	9,08518
<b>Твердая фаза</b>					
ZnSO <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub>	0,00000	1,00000e+00	269,5453	0,00000e+00	0,02450

Состав фазы	Функция gT, кал/моль	Мольное количество	Концентрация мг/кг H <sub>2</sub> O	log молярности	Коэф. активности	log коэф. активности
<b>Водный раствор</b>						
CO <sub>2</sub>	-89870	9,733705e-03	4,2839e-01	-5,012	1,0000	0,000
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	-123812	4,657942e-08	2,7953e-06	-10,332	0,9976	-0,001
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-137902	2,101226e-03	1,2821e-01	-5,678	0,9994	-0,000
HNO <sub>2</sub>	-9720	3,390807e-10	1,5942e-08	-12,470	1,0000	0,000
HNO <sub>3</sub>	-22350	2,779992e-01	1,7518e+01	-3,556	1,0000	-0,000
HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-178250	4,530478e-13	4,3979e-11	-15,344	0,9994	-0,000
N <sub>2</sub>	6727	5,171952e-01	1,4489e+01	-3,286	1,0000	-0,000
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-8022	4,090624e-06	2,5365e-04	-8,388	0,9994	-0,000
O <sub>2</sub>	6334	2,590178e-01	8,2885e+00	-3,587	1,0000	-0,000
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-175551	2,245857e-09	2,1575e-07	-11,649	0,9976	-0,001
OH <sup>-</sup>	-35215	4,815876e-06	8,1908e-05	-8,317	0,9994	-0,000
H <sup>+</sup>	2379	2,110230e-03	2,1271e-03	-5,676	0,9994	-0,000
H <sub>2</sub> O	-56678	5,550829e+04	1,0000e+00	1,744	1,0000	0,000
<b>Газ</b>						
CO <sub>2</sub>	-94263	1,009414e+00	0,04	0,004	0,9949	-0,002
N <sub>2</sub>	0	2,754585e+03	77,20	3,440	0,9998	-0,000
NO <sub>2</sub>	12420	4,984023e-07	0,00	-6,302	1,0000	0,000
N <sub>2</sub> O	24767	8,739405e-16	0,00	-15,059	0,9946	-0,002
O <sub>2</sub>	0	7,110186e+02	22,76	2,852	0,9994	-0,000
<b>Твердая фаза</b>						
Бианкит ZnSO <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub>	-612591	1,000000e+00	100,00	-0,000	1,0000	0,000

<b>Резервуар - 2</b>					
Температура, °С -	25,00	Давление, бар -	1,00	Масса, кг -	1000,308
Объем мультисистемы, см <sup>3</sup> -	1003311,312	Плотность мультисистемы, г/см <sup>3</sup> -			0,012828
G, кал -	0,997007	H, кал -	-3792780032	S, кал /К -	928309,438
U, кал -	-3743493888	Ср, кал -	998837,44	Ионная сила -	0,0000
Eh, В -	0,8813	pe -	14,9268	pH -	5,6740

## Окончание таблицы 5-19

Наименование фазы	Объем, см <sup>3</sup>	Мольное количество	Масса, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание, вес, %
Водный раствор	1003019,06280	5,55094e+04	1000038,0000	9,97028e-01	99,97301
Газ	292,24906	1,19516e-02	0,3446	1,17921e-03	0,00003
<b>Твердая фаза</b>					
ZnSO <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub>	0,00000	1,00000e+00	269,5453	0,00000e+00	0,02695

Состав фазы	Функция g <sup>Г</sup> , кал/моль	Мольное количество	Концентрация мг/кг H <sub>2</sub> O	log молярности	Коэф. активности	log коэф. активности
<b>Водный раствор</b>						
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	-123815	4,699164e-08	2,8200e-06	-10,328	0,9956	-0,002
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-137903	2,111644e-03	1,2885e-01	-5,675	0,9989	-0,000
HNO <sub>3</sub>	-9720	3,364449e-10	1,5818e-08	-12,473	1,0000	0,000
HNO <sub>2</sub>	-22350	2,759092e-01	1,7386e+01	-3,559	1,0000	-0,000
HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-178251	1,124314e-12	1,0914e-10	-14,949	0,9989	-0,000
N <sub>2</sub>	6727	5,087389e-01	1,4252e+01	-3,293	1,0000	-0,000
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-8023	4,102389e-06	2,5438e-04	-8,387	0,9989	-0,000
O <sub>2</sub>	6334	2,591825e-01	8,2938e+00	-3,586	1,0000	-0,000
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-175554	5,598064e-09	5,3779e-07	-11,252	0,9956	-0,002
OH <sup>-</sup>	-35216	4,858282e-06	8,2629e-05	-8,314	0,9989	-0,000
H <sup>+</sup>	2379	2,120710e-03	2,1376e-03	-5,674	0,9989	-0,000
H <sub>2</sub> O	-56678	5,550830e+04	1,0000e+00	1,744	1,0000	0,000
<b>Газ</b>						
CO <sub>2</sub>	-94263	3,531085e-06	0,05	-5,452	0,9949	-0,002
N <sub>2</sub>	0	9,498333e-03	77,21	-2,022	0,9998	-0,000
NO <sub>2</sub>	12420	1,705368e-12	0,00	-11,768	1,0000	0,000
O <sub>2</sub>	0	2,449722e-03	22,75	-2,611	0,9994	-0,000
<b>Твердая фаза</b>						
Биалкит ZnSO <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub>	-612591	1,000000e+00	100,00	-0,000	1,0000	0,000

Таблица 5-20

**Результаты моделирования взаимодействия основных рудных минералов  
Прасоловского месторождения с водой, приведенной в равновесие с атмосферой**

Резервуар - 1					
Температура, °С -	25,00	Давление, бар -	1,00	Масса, кг -	1111,282
Объем мультисистемы, см <sup>3</sup> -	8,18193e+07	Плотность мультисистемы, г/см <sup>3</sup> -			0,013582
G, кал -	-3162162688	H, кал -	-3798251520	S, кал/К -	1151929,875
U, кал -	-3762269440	Sr, кал -	1019534,12	Ионная сила -	0,1846
En, B -	1,0560	pe -	17,8858	pH -	2,6939

Наименование фазы	Объем, см <sup>3</sup>	Молярное количество	Масса, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание, вес, %
Водный раствор	1002702,31554	5,55852e+04	1009551,1875	1,00683e+00	90,84563
Газ	80816636,86755	3,30496e+03	94791,3984	1,17292e-03	8,52991
<b>Твердая фаза</b>					
V <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0,00000	2,98650e+00	2108,9194	0,00000e+00	0,18977
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,03885	1,43493e+00	229,1476	2,20579e+02	0,02062
PbSO <sub>4</sub>	6,92079	6,03934e+00	1831,5107	2,64639e+02	0,16481
Sb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,00000	4,22000e+00	1365,1573	0,00000e+00	0,12285
ZnSO <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub>	0,00000	4,68000e+00	1261,4719	0,00000e+00	0,11352
AgCl	0,61454	9,99457e-01	143,2428	2,33090e+02	0,01289

Состав фазы	Функция гГ, кал/моль	Молярное количество	Концентрация мг/кг H <sub>2</sub> O	log молярности	Коэф. активности	log коэф. активности
<b>Водный раствор</b>						
AgCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-109080	2,997949e-14	5,0367e-12	-16,523	0,9498	-0,022
Ag <sup>+</sup>	20748	1,206891e+00	1,3028e+02	-2,918	0,9059	-0,043
AgCl	-15066	3,546299e-04	5,0864e-02	-6,450	1,0067	0,003
AgCl <sup>2-</sup>	-49226	6,373944e-09	1,1404e-06	-11,195	0,9261	-0,033
AgNO <sub>3</sub>	-5354	1,323298e+00	2,2496e+02	-2,878	1,0064	0,003
AgOH	-19516	5,525793e-10	6,9056e-08	-12,257	1,0067	0,003
AsO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	-153035	1,391186e-12	1,9341e-10	-14,856	0,4711	-0,327
Br <sup>1-</sup>	24749	1,152684e-09	2,4107e-07	-11,938	0,4221	-0,375
BrO <sup>+</sup>	-26979	6,575321e-08	1,4804e-05	-10,182	0,9052	-0,043
BiOH <sup>2+</sup>	-30144	2,778729e-08	6,2844e-06	-10,556	0,6858	-0,164
CO <sub>2</sub>	-89866	1,013441e-02	4,4635e-01	-4,994	1,0071	0,003
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	-123992	7,239876e-14	4,3479e-12	-16,140	0,7365	-0,133
Cd <sup>2+</sup>	-16404	9,999876e-03	1,1250e+00	-5,000	0,6850	-0,164
CdCl <sup>-</sup>	-50301	1,154086e-07	1,7078e-05	-9,937	0,9140	-0,039
CdCl <sub>2</sub>	-82467	7,178706e-14	1,3170e-11	-16,144	1,0064	0,003
CdOH <sup>+</sup>	-59172	3,131052e-10	4,0552e-08	-12,504	0,9158	-0,038
Cl <sup>-</sup>	-29034	1,741304e-04	6,1781e-03	-6,759	0,9427	-0,026
Cu <sup>+</sup>	14274	2,453078e-14	1,5600e-12	-16,610	0,9097	-0,041
Cu <sup>2+</sup>	17832	4,640978e+01	2,9514e+03	-1,333	0,6871	-0,163
CuCl <sup>+</sup>	-13921	1,440200e-05	1,4269e-03	-7,841	0,9175	-0,037
CuCl <sub>2</sub>	-43758	1,756012e-13	2,3628e-11	-15,755	1,0064	0,003
CuO	-18400	1,161304e-08	9,2447e-07	-10,935	1,0341	0,015
CuOH <sup>+</sup>	-27871	2,064815e-04	1,6645e-02	-6,685	0,9173	-0,037
Fe <sup>2+</sup>	-19712	3,483321e-10	1,9468e-08	-12,458	0,6879	-0,162
Fe <sup>3+</sup>	-2245	4,188308e-05	2,3408e-03	-7,378	0,4269	-0,370
FeCl <sup>2+</sup>	-35354	1,285955e-10	1,1750e-08	-12,890	0,6942	-0,158
FeO <sup>+</sup>	-50770	1,077544e-05	7,7477e-04	-7,967	0,9197	-0,036
FeOH <sup>2+</sup>	-55642	8,129563e-05	5,9272e-03	-7,090	0,6879	-0,162

Продолжение таблицы 5-20

$H_2AsO_4^-$	-177670	6,522975e+00	9,2002e+02	-2,185	0,9355	-0,029
$HSeO_2$	-99474	8,390000e+00	1,0745e+03	-2,076	0,9933	-0,003
$H_2AsO_4^-$	-180722	2,286309e+00	3,2477e+02	-2,641	0,9963	-0,002
$HAsO_4^{2-}$	-168594	7,165645e-04	1,0034e-01	-6,144	0,7320	-0,136
$PbO_2$	-76916	3,706611e-10	8,9763e-08	-12,431	1,0067	0,003
$HCO_3^-$	-137940	2,460045e-06	1,5022e-04	-8,609	0,9377	-0,028
$HCl$	-28040	6,595815e-08	2,4067e-06	-10,180	0,9834	-0,007
$HFeO_2$	-98716	2,109927e-09	1,8762e-07	-11,675	1,0067	0,003
$HNO_2$	-9719	2,949813e-10	1,3879e-08	-12,530	1,0025	0,001
$HNO_3$	-22352	2,190565e-01	1,3814e+01	-3,659	0,9970	-0,001
$HSO_4^-$	-178290	6,306562e+00	6,1265e+02	-2,200	0,9345	-0,029
$HSeO_4^-$	-105762	1,809810e-13	2,6075e-11	-15,742	0,9317	-0,031
$N_2$	6724	5,432150e-01	1,5229e+01	-3,265	0,9956	-0,002
$NO_3^-$	-8064	3,632226e-09	2,2539e-07	-11,439	0,9320	-0,031
$O_2$	6330	2,108680e-01	6,7527e+00	-3,676	0,9940	-0,003
$Pb^{+2}$	-3561	6,640252e-04	1,3769e-01	-6,177	0,6772	-0,169
$PbCl^+$	-36732	2,256187e-09	5,4789e-07	-11,646	0,9009	-0,045
$PbCl_2$	-68816	1,222034e-15	3,4011e-13	-17,913	1,0064	0,003
$PbO$	-36966	1,408669e-15	3,1465e-13	-17,851	1,0067	0,003
$PbOH^+$	-51620	1,573388e-07	3,5303e-05	-9,803	0,9192	-0,037
$SO_4^{2-}$	-175736	4,173460e+01	4,0122e+03	-1,379	0,7301	-0,137
$SeO_4^{2-}$	-103309	1,420535e-12	2,0323e-10	-14,847	0,7268	-0,139
$OH^-$	-35245	5,300478e-09	9,0216e-08	-11,275	0,9507	-0,022
$H^+$	2315	2,252053e+00	2,2717e+00	-2,647	0,8971	-0,047
$H_2O$	-56678	5,546782e+04	1,0000e+00	1,744	1,0000	0,000
<b>Газ</b>						
$CO_2$	-94263	1,011112e+00	0,05	0,005	0,9949	-0,002
$N_2$	0	2,753927e+03	81,39	3,440	0,9998	-0,000
$NO_2$	12420	3,948742e-07	0,00	-6,404	1,0000	0,000
$N_2O$	24767	7,870410e-16	0,00	-15,104	0,9946	-0,002
$O_2$	0	5,500215e+02	18,57	2,740	0,9994	-0,000
<b>Твердая фаза</b>						
Сульфат висмута $Bi_2(SO_4)_3$	-527820	2,986500e+00	30,39	0,475	1,0000	0,000
Гематит $Fe_2O_3$	-177366	1,434933e+00	3,30	0,157	1,0000	0,000
Аплезит $PbSO_4$	-194362	6,039336e+00	26,39	0,781	1,0000	0,000
Оксид сурьмы $Sb_2O_5$	-198208	4,220000e+00	19,67	0,625	1,0000	0,000
Бланкит $ZnSO_4(H_2O)_6$	-612591	4,680000e+00	18,18	0,670	1,0000	0,000
Хлораргентит $AgCl$	-26244	9,994566e-01	2,06	-0,000	1,0000	0,000

**Резервуар - 2**

Температура, °C -	25,00	Давление, бар -	1,00	Масса, кг -	1020,834
Объем мультисистемы, см <sup>3</sup> -	1019079,438	Плотность мультисистемы, г/см <sup>3</sup> -	1,001721		
G, кал -	-3158386176	H, кал -	-3804171264	S, кал/К -	937200,438
U, кал -	-3756454400	Ср, кал -	998014,56	Ионная сила -	0,0867
En, В -	0,3039	pe -	5,1471	pH -	1,3016

Продолжение таблицы 5-20

Наименование фазы	Объем, см <sup>3</sup>	Мольное количество	Масса, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание, вес. %
Водный раствор	1002913,82416	5,55380e+04	1004512,5625	1,00159e+00	98,40121
Газ	16126,87193	6,59455e-01	18,4768	1,14571e-03	0,00181
Твердая фаза					
As <sub>2</sub> Se <sub>3</sub>	0,00000	3,42663e+00	1325,1584	0,00000e+00	0,12981
Bi <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0,00000	2,98650e+00	2108,9194	0,00000e+00	0,20659
Cu <sub>2</sub> S	30,45593	4,63793e+01	7381,6323	2,42371e+02	0,72310
PbSO <sub>4</sub>	6,91431	6,03369e+00	1829,7971	2,64639e+02	0,17925
Sb <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0,00000	6,86317e-07	0,0002	0,00000e+00	0,00000
ZnSO <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub>	0,00000	4,68000e+00	1261,4719	0,00000e+00	0,12357
As <sub>2</sub> Se	0,00000	3,03027e+00	893,0090	0,00000e+00	0,08748
Se	1,36185	3,46983e+00	273,9777	2,01180e+02	0,02684
Sb <sub>4</sub> O <sub>6</sub>	0,00000	2,10709e+00	1228,4242	0,00000e+00	0,12034

Состав фазы	Функция гГ, кал/моль	Мольное количество	Концентрация мг/кг Н <sub>2</sub> O	log молярности	Коеф. активности	log коэф. активности
<b>Водный раствор</b>						
Ag <sup>+</sup>	20634	7,502128e-10	8,10668e-08	-12,124	0,8253	-0,083
AgCl	-15061	8,972524e-10	1,2882e-07	-12,046	1,0097	0,004
AgCl <sup>2-</sup>	-49320	9,521663e-11	1,7052e-08	-13,021	0,8519	-0,070
AgCl <sub>2</sub> <sup>-</sup>	-80933	1,158741e-13	2,4867e-11	-15,935	0,5053	-0,296
AsO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-81348	1,624655e-07	1,7402e-05	-9,788	0,8764	-0,057
Bi <sup>3+</sup>	23748	6,680381e-08	1,3985e-05	-10,174	0,1847	-0,734
BiO <sup>+</sup>	-27094	1,742415e-09	3,9270e-07	-11,758	0,8243	-0,084
BiOH <sup>2+</sup>	-30583	2,827842e-08	6,4019e-06	-10,548	0,4762	-0,322
CO <sub>2</sub>	-89860	9,936660e-03	4,3809e-01	-5,002	1,0102	0,004
Cd <sup>2+</sup>	-16845	1,936598e-02	2,1808e+00	-4,712	0,4754	-0,323
CdCl <sup>+</sup>	-50407	6,323801e-04	9,3672e-02	-6,198	0,8359	-0,078
CdCl <sub>2</sub>	-82462	1,624594e-06	2,9834e-04	-8,788	1,0092	0,004
CdCl <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-113670	9,984761e-10	2,1882e-07	-12,000	0,8756	-0,058
CdCl <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-144085	1,610991e-13	4,1028e-11	-15,792	0,5226	-0,282
CdOH <sup>+</sup>	-59277	1,552677e-11	2,0130e-09	-13,808	0,8382	-0,077
Cl <sup>-</sup>	-29114	9,916124e-01	3,5218e+01	-3,003	0,8738	-0,059
Cu <sup>+</sup>	14163	1,020092e-04	6,4938e-03	-6,991	0,8302	-0,081
Cu <sup>2+</sup>	17394	6,127598e-02	3,9008e+00	-4,212	0,4775	-0,321
CuCl <sup>+</sup>	-14024	5,375257e-05	5,3309e-03	-7,269	0,8405	-0,075
CuCl	-20219	1,330665e-05	1,3197e-03	-7,875	1,0092	0,004
CuCl <sub>2</sub>	-43753	2,722221e-09	3,6666e-07	-11,564	1,0092	0,004
CuCl <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-55744	1,194417e-05	1,6088e-03	-7,922	0,8649	-0,063
CuCl <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-73031	6,438237e-14	1,0958e-11	-16,190	0,8843	-0,053
CuCl <sub>5</sub> <sup>2-</sup>	-87978	4,154954e-08	7,0720e-06	-10,381	0,5136	-0,289
CuO	-18372	1,422682e-14	1,1337e-12	-16,846	1,0493	0,021
CuOH <sup>+</sup>	-27975	6,986042e-09	5,6375e-07	-11,155	0,8403	-0,076
Fe <sup>2+</sup>	-20149	2,869443e+00	1,6053e+02	-2,541	0,4783	-0,320
Fe <sup>3+</sup>	-3236	1,611633e-07	9,0165e-06	-9,792	0,1877	-0,727
FeCl <sup>+</sup>	-50802	6,906397e-04	6,3167e-02	-6,160	0,8428	-0,074
FeCl <sup>2+</sup>	-35784	9,510130e-10	8,6981e-08	-12,021	0,4846	-0,315
FeCl <sub>2</sub>	-71095	4,241426e-15	5,3857e-13	-17,372	1,0092	0,004
FeO <sup>+</sup>	-50871	1,875103e-11	1,3496e-09	-13,726	0,8435	-0,074
FeOH <sup>+</sup>	-63622	1,332383e-08	9,7242e-07	-10,875	0,8428	-0,074
FeOH <sup>2+</sup>	-56079	5,532033e-09	4,0375e-07	-11,256	0,4783	-0,320

Окончание таблицы 5-20

H <sub>2</sub>	6616	8,001434e-14	1,6159e-13	-16,096	1,0006	0,000
H <sub>2</sub> AsO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-138036	1,646333e-07	2,0605e-05	-9,783	0,8653	-0,063
H <sub>2</sub> AsO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-177756	5,951262e-07	8,4023e-05	-9,225	0,8643	-0,063
H <sub>2</sub> S	-4290	6,220552e-14	2,1238e-12	-16,205	1,0061	0,003
HSeO <sub>3</sub>	-99480	3,136836e-15	4,0212e-13	-17,503	0,9904	-0,004
H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub>	-180726	4,014074e-06	5,7078e-04	-8,396	0,9948	-0,002
HAsO <sub>2</sub>	-93857	1,076673e+01	1,1641e+03	-1,967	1,0053	0,002
HAsO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	-168979	4,883434e-12	6,8454e-10	-14,311	0,5229	-0,282
HBiO <sub>2</sub>	-76911	3,617157e-13	8,7686e-11	-15,441	1,0097	0,004
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-138025	1,268690e-07	7,7549e-06	-9,896	0,8672	-0,062
HCl	-28054	7,446674e-03	2,7199e-01	-5,127	0,9763	-0,010
H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-123839	1,262919e-10	1,0257e-08	-12,898	0,8607	-0,065
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-178377	3,324161e+01	3,2325e+03	-1,478	0,8630	-0,064
HSbO <sub>2</sub>	-95009	1,165032e-02	1,8062e+00	-4,933	1,0199	0,009
N <sub>2</sub>	6724	5,432150e-01	1,5229e+01	-3,265	0,9956	-0,002
NH <sub>3</sub>	6720	6,550630e-01	1,8383e+01	-3,183	0,9937	-0,003
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	-3998	1,543526e-12	2,6334e-11	-14,811	1,0086	0,004
Pb <sup>+2</sup>	-16728	1,485819e-04	2,6849e-03	-6,827	0,8197	-0,086
PbCl <sup>+</sup>	-4012	6,912154e-03	1,4347e+00	-5,160	0,4677	-0,330
PbCl <sub>2</sub>	-36851	6,665971e-05	1,6204e-02	-7,175	0,8188	-0,087
PbCl <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-99870	6,978994e-11	2,1922e-08	-13,155	0,8441	-0,074
PbCl <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	-131211	5,364897e-14	1,8757e-11	-16,270	0,4972	-0,304
PbOH <sup>+</sup>	-51722	4,096652e-08	9,2013e-06	-10,387	0,8428	-0,074
SO <sub>2</sub>	-69601	3,495259e-10	2,2432e-08	-12,456	0,9988	-0,001
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	-176122	1,646709e+01	1,5847e+03	-1,783	0,5209	-0,283
SbO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	-80086	2,990678e-12	4,6063e-10	-14,523	0,8944	-0,048
OH <sup>-</sup>	-35318	2,702295e-10	4,6040e-09	-12,567	0,8846	-0,053
H <sup>+</sup>	2193	6,125174e+01	6,1848e+01	-1,212	0,8139	-0,089
H <sub>2</sub> O	-56678	5,541164e+04	1,0000e+00	1,744	1,0000	0,000
<b>Газ</b>						
CO <sub>2</sub>	-94263	2,000801e-04	0,05	-3,699	0,9949	-0,002
H <sub>2</sub> S	-7905	3,312652e-16	0,00	-15,480	0,9923	-0,003
H <sub>2</sub>	0	6,751395e-14	0,00	-13,171	1,0000	0,000
N <sub>2</sub>	0	6,592549e-01	99,95	-0,181	0,9998	-0,000
O <sub>2</sub> S	-71749	1,565828e-13	0,00	-12,805	0,9845	-0,007
<b>Твердая фаза</b>						
As <sub>2</sub> Se <sub>3</sub>	-24283	3,426633e+00	8,13	0,535	1,0000	0,000
Сульфат висмута Bi <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	-527820	2,986500e+00	12,94	0,475	1,0000	0,000
Халькозин Cu <sub>2</sub> S	-20602	4,637927e+01	45,28	1,666	1,0000	0,000
Англезит PbSO <sub>4</sub>	-194362	6,033685e+00	11,22	0,781	1,0000	0,000
Sb <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	-190201	6,863171e-07	0,00	-6,163	1,0000	0,000
Биазит ZnSO <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub>	-612591	4,680000e+00	7,74	0,670	1,0000	0,000
Науманит As <sub>2</sub> Se	-10612	3,030272e+00	5,48	0,481	1,0000	0,000
Селен Se	0	3,469829e+00	1,68	0,540	1,0000	0,000
Серваннит Sb <sub>4</sub> O <sub>6</sub>	-303107	2,107087e+00	7,54	0,324	1,0000	0,000

Таблица 5-21

**Предельно-допустимые концентрации некоторых токсичных металлов для  
рыбохозяйственных водоемов и концентрация этих металлов в дренажных  
водах по результатам компьютерного моделирования**

Токсичные металлы	ПДК*, мг/литр	Концентрация в дренажных водах по данным моделирования, мг/литр
Соединения свинца в пересчете на Pb <sup>+2</sup>	0,001	1,36
Соединения железа в пересчете на Fe <sup>+2</sup>	0,5	160,51
Соединения кадмия в пересчете на Cd <sup>+2</sup>	0,005	2,18
Соединения меди в пересчете на Cu <sup>+2</sup>	0,01	2951,41
Соединения висмута в пересчете на Bi <sup>+2</sup>	0,5	5,04
Соединения селена в пересчете на Se <sup>+6</sup>	0,001	666,246
Соединения мышьяка в пересчете на As <sup>+3</sup>	0,05	815,75
Соединения серебра в пересчете на Ag <sup>+</sup>	0,05	130,28
Соединения сурьмы в пересчете на Sb <sup>3+</sup>	0,05	1,41
Сульфаты в пересчете на SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	100	4012,23

\* - значения предельно допустимых концентраций для рыбохозяйственных водоемов заимствованные из: Емлин, 1991; Предельно-допустимые..., 1975.

Таблица 5-22

**Межплоскостные расстояния аплезита  
Прасоловского месторождения и эталонного (по: Михеев, 1957)**

P-55		P-55		P-15		ПС-90-35		hkl	Михеев, 1957	
l	d/n	l	d/n	l	d/n	l	d/n		l	d/n
7	4,24	5	4,24	5	4,24	3	4,25	110	7	4,26
4	3,79	2	3,79	2	3,72	2	3,80	111	4	3,80
1	3,61	2	3,601	1	3,64	1	3,61	012	2	3,61
3	3,48	5	3,501	1	3,51	1	3,48	020	2	3,47
-	-	10	3,339	10	3,34	10	3,34	102	7	3,33
4	3,21	3	3,209	3	3,28	3	3,21	021	8	3,21
10	3,00	1	3,001	5	3,00	3	3,00	112	10	3,00
2	2,75	2	2,755	1	2,73	1	2,76	121	7	2,75
2	2,69	2	2,69	-	-	-	-	022,200	7	2,68
1	2,61	1	2,607	-	-	1	2,61	-	-	-
-	-	-	-	-	-	1	2,45	-	-	-
1	2,40	1	2,398	1	2,38	1	2,40	122	4	2,40
-	-	1	2,275	-	-	-	-	202	4	2,27
1	2,19	1	2,186	-	-	-	-	-	-	-
3	2,14	4	2,142	1	2,15	1	2,16	212	5	2,16
4	2,06	3	2,061	1	2,05	2	2,06	221;131	10	2,06
2	2,02	2	2,027	1	2,02	2	2,03	014;032	8	2,02
2	1,968	1	1,966	-	-	-	-	104	6	1,97
-	-	1	1,907	-	-	-	-	114	2	1,90
-	-	1	1,873	-	-	-	-	213	2	1,87
1	1,791	1	1,786	-	-	-	-	033	5	1,78
-	-	2	1,752	-	-	-	-	040	3	1,73

**Межплоскостные расстояния теллурида  
Прасоловского месторождения и эталонного (по: Михеев, 1957)**

P-15		Михеев, 1957	
I	d/n	I	d/n
2	6,03	10	6,8
3	4,05	2	4,25
5	3,71	2	3,88
7	3,28	7	3,23
10	3,01	8	3,09
3	2,80	9	2,82
3	2,73	-	-
2	2,29	6	2,29
3	2,05	2	2,07
3	2,02	-	-
1	1,929	2	1,93
1	1,882	5	1,83
2	1,785	4	1,78
1	1,755	7	1,73

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение</b>	стр. 5
<b>Глава 1. Краткая геологическая характеристика Северо-Кунаширского района и структурная позиция Прасоловского месторождения</b>	стр. 8
1.1. Стратифицированные образования Северо-Кунаширского района	стр. 8
1.2. Субвулканические, дайковые и интрузивные образования	стр. 13
1.3. Некоторые геохимические особенности рудовмещающих пород Прасоловского рудного поля	стр. 15
1.4. Основные тектонические элементы Северного Кунашира и структурная позиция Прасоловского рудного поля	стр. 17
<b>Глава 2. Особенности строения и состава Au-Ag-содержащих рудных тел Прасоловского месторождения</b>	стр. 24
2.1. Основные рудоносные зоны Прасоловского вулканотектонического поднятия	стр. 24
2.2. Основные рудоносные зоны Северянковской вулканотектонической депрессии	стр. 31
<b>Глава 3. Минеральный и вещественный состав руд Прасоловского месторождения</b>	стр. 35
3.1. Минеральные типы руд	стр. 35
3.2. Краткая характеристика минеральных фаз	стр. 38
3.2.1. Самородные элементы и интерметаллиды	стр. 41
3.2.2. Сульфиды	стр. 44
3.2.2.1. Минералы системы Cu-Fe-S	стр. 44
3.2.2.2. Минералы системы Fe-Zn-S	стр. 53
3.2.2.3. Минералы системы Ag-S	стр. 56
3.2.2.4. Минералы системы Cu-In-S	стр. 58
3.2.2.5. Минералы системы Pb-S-Se	стр. 59
3.2.3. Селениды	стр. 63
3.2.4. Теллуриды	стр. 67
3.2.4.1. Теллуриды Au и Ag	стр. 67
3.2.4.2. Теллуриды Pb	стр. 77
3.2.4.3. Селенсодержащие теллуриды	стр. 78
3.2.4.4. Медно-золото-серебряные сульфотеллуриды	стр. 80
3.2.5. Галогениды	стр. 82
3.2.6. Сульфосоли	стр. 82
<b>Глава 4. Особенности химического состава блеклых руд Прасоловского месторождения и последовательность их образования</b>	стр. 89

4.1. Вариации химического состава блеклых руд и их минеральные виды	стр. 90
4. 2. Порядок кристаллизации блеклых руд	стр. 104
4. 3. Неоднородность химического состава блеклых руд	стр. 106
<b>Глава 5. Возможные экологические последствия при отработке Прасоловского месторождения</b>	стр. 112
5.1. Краткая характеристика экологической токсичности некоторых металлов	стр. 112
5.2. Физико-химические преобразования руд в условиях гипергенеза	стр. 120
5.2.1. Растворение гипогенных минералов	стр. 120
5.2.2. Окисление гипогенных минералов	стр. 122
5.2.2.1. Гидрогеохимическая модель окисления гипогенных минералов	стр. 122
5.2.2.2. Электрохимическая модель окисления гипогенных минералов	стр. 125
5.2.2.3. Биогенное окисление гипогенных минералов	стр. 126
5.2.3. Компьютерное моделирование физико-химического преобразования рудных минералов Прасоловского месторождения в условиях гипергенеза	стр. 127
5.2.4. Примеры загрязнения окружающей среды токсичными элементами некоторыми предприятиями горно-добывающей промышленности	стр. 136
<b>Заключение</b>	стр. 141
<b>Литература</b>	стр. 144
<b>Приложение 1</b>	стр. 153
<b>Приложение 2</b>	стр. 161