

Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

**Шадчин Максим Викторович**

**Геология и условия образования руд  
медно-порфирового месторождения Ак-Суг  
(Северо-восточная Тува)**

1.6.10 – «Геология, поиски и разведка твердых полезных  
ископаемых, минерагения»

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель  
доктор геолого-минералогических наук, профессор  
Макаров Владимир Александрович

Красноярск, 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ АК-СУГСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ, ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ АК-СУГСКОГО РУДНОГО УЗЛА.....	14
1.1. История изучения Ак-Сугского месторождения.....	14
1.2. Положение рудного узла и месторождения в структурах Алтае-Саянской складчатой области .....	18
1.3. Стратиграфия .....	25
1.4. Магматизм .....	27
1.5. Тектоника .....	29
1.6. Характер размещения рудных объектов на площади Ак-Сугского рудного узла и его обрамления.....	31
ГЛАВА 2. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ АК-СУГСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ .....	34
2.1. Характеристика вмещающих пород и рудных тел.....	38
2.1.1. Геологическое строение и рудоносность Ак-Сугского массива .....	38
2.1.2. Геолого-структурный контроль оруденения .....	42
2.1.3. Петрографическая и петрохимическая характеристика интрузивных пород.....	46
2.1.4. Геодинамическая позиция и источник гранитоидов .....	66
2.1.5. Возраст интрузивного магматизма и рудообразования .....	70
2.2. Особенности минерального состава руд, этапы и стадии формирования рудной минерализации .....	83
2.2.1. Состав рудной минерализации месторождения Ак-Суг .....	84
2.2.2. Типы руд месторождения Ак-Суг .....	86
2.2.3. Краткая характеристика основных рудных минералов.....	87
2.2.4. Этапы и стадии минералообразования.....	115
ГЛАВА 3. МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ АК- СУГСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ .....	120
3.1. Геохимическая зональность месторождения Ак-Суг .....	120

3.2. Зональность гидротермально-метасоматических изменений месторождения Ак-Суг .....	126
3.3. Минералогическая зональность месторождения Ак-Суг .....	131
ГЛАВА 4. ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ РУДОНОСНОСТИ ГЛУБОКИХ ГОРИЗОНТОВ И УРОВНЯ ЭРОЗИОННОГО СРЕЗА МЕСТОРОЖДЕНИЯ АК-СУГ .....	138
ГЛАВА 5. РТ-ПАРАМЕТРЫ ФОРМИРОВАНИЯ РУДНЫХ ЗОН .....	149
5.1. Характеристика флюидных включений в кварцевых прожилках .....	149
5.2. Результаты микротермометрических исследований.....	152
5.3. Состав флюида Ак-Сугского месторождения .....	156
5.3.1. Состав фаз в индивидуальных флюидных включениях.....	156
5.3.2. Валовый состав летучих во флюиде.....	157
ГЛАВА 6. ИСТОЧНИКИ РУДОНОСНЫХ ФЛЮИДОВ.....	163
6.1. Изотопный состав серы сульфидных минералов .....	163
6.2. Изотопный состав углерода и кислорода жильного кальцита.....	169
ГЛАВА 7. ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	175
7.1. Образцы.....	175
7.2. Аналитические методы исследования .....	180
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	184
ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ.....	187
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	189
ПРИЛОЖЕНИЕ .....	207

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность исследования**

Мировая экономика долгие годы показывает устойчивый рост спроса на цветные, редкие, рассеянные и благородные металлы. Традиционно высокими темпами растет потребление меди. С увеличением производства электромобилей и развитием альтернативных видов энергетики в ближайшие десятилетия темпы прироста потребления меди будут неуклонно возрастать. По запасам и производству меди Россия традиционно входит в лидирующую группу, занимая 6-7 места. Ведущими месторождениями в России, обеспечивающими основной объем добычи, являются магматические медно-никелевые месторождения Норильского рудного района (разрабатываются ПАО «ГМК «Норильский никель»») и колчеданные месторождения Урала (разрабатываются Уральской горно-металлургической компанией). В России потенциал порфириновых месторождений в экономике горнодобывающей отрасли раскрыт слабо. Из месторождений такого типа (Михеевское и Томинское на Урале) до недавнего времени добывался только 1% меди (от общего количества в РФ), при том, что медно-порфириновые и молибден-медно-порфириновые месторождения являются мировыми лидерами по запасам Cu и Mo (более 65% и 60% соответственно), а также по добыче цветных и сопутствующих благородных металлов (до 75% общемировой Cu, около 50% молибдена до 20% Au, большая часть Re) [Sillitoe, 2010]. Однако наличие попутного золота и рост мировых цен на медь сделали возможным начать в 2012 году отработку уральских медно-порфириновых месторождений (Михеевское, Томинское) и уже в 2020 году в России доля меди, добытой из месторождений такого типа, достигла 23,8% [Якубчук, 2022]. Супергигантские (>10 млн. т Cu), гигантские (3-10 млн. т. Cu) и крупные (<3 млн. т. Cu) порфириновые месторождения составляют основу горнодобывающей отрасли ряда стран, таких как Чили (месторождения El Teniente, Chuquibambilla), США

(Butte, Bingham), Мексика (Cananea), выводя их в ранг стран-лидеров по производству меди [Clark, 1993]. Месторождения порфирирового типа в протяжении последних 40 лет находятся в фокусе внимания всех ведущих горнодобывающих компаний мира. В первую очередь это связано с тем, что они относятся к категории большеобъемных комплексных месторождений, которые обеспечивают стабильный уровень добычи полезных компонентов на протяжении многих лет их разработки.

На протяжении последних 20 лет объем геологоразведочных работ на медно-порфирировые месторождения на территории России и в мире заметно вырос. На сегодняшний день Государственным балансом ГКЗ Роснедра учтено 6 медно-порфирировых месторождений (расположены по убыванию утвержденных запасов): Малмыжское (Хабаровский край), Песчанка (Чукотка), Ак-Сугское (Республика Тыва), Михеевское и Томинское (Челябинская область), а также Иканское (Амурская область). К крупным по запасам Cu, Mo, Au относятся месторождения Песчанка, Малмыжское, Ак-Суг [Звездов, 2022]. Важным фактом является то, что Ак-Сугское медно-порфирировое месторождение – единственный крупный по запасам Cu и Mo объект в Алтае-Саянском регионе с запасами руды – 534,8 млн. т., меди – 3633,3 тыс. т., молибдена – 77,9 тыс. т., золота – 83 т. (Протокол ГКЗ Роснедра №3907 от 31.10.2014 г). По состоянию на 2024 год, значительная часть прогнозно-поисковых работ на медно-порфирировые объекты в РФ проводится в восточных регионах страны (Тува, Забайкалье, Чукотка, Камчатка) в пределах потенциальных рудных районов палеозойских и мезо-кайнозойских вулканоплутонических поясов [Мигачев и др., 2015, 2016; Петров и др., 2019]. Среди названных регионов, Алтае-Саянская складчатая область является одной из наиболее перспективных в России на выявление порфирировых месторождений [Мигачев и др., 2015, Бескин и др., 2016, Sillitoe, 2010].

В настоящее время имеется значительный объем геологической литературы, посвященной месторождениям порфирирового типа, при этом в количественном соотношении доля зарубежных публикаций в разы выше. Последнее имеет во многом объективные причины – большая часть месторождений порфирирового типа

имеет мезо-кайнозойский возраст и располагается в пределах так называемого «тихоокеанского кольца» (Grasberg, Ok Tedi, Cadia, Bingham, Chuquicamata, El Teniente и др.). Ведущими зарубежными авторами по геологии, геохимии и минералогии порфировых и эпитермальных месторождений являются R. Sillitoe, E. Seedorff, J. Richards, D. Cooke, D. Sinclair и др. Среди отечественных исследователей порфировых месторождений значительный вклад в их изучение внесли: А.И. Кривцов, В.С. Звездов, И.Ф. Мигачев, О.В. Минина (ЦНИГРИ); В.С. Попов (ИМГРЭ), В.И. Сотников, В.А. Пономарчук, А.Н. и А.П. Берзины (ИГМ СО РАН) и др.

В пределах Алтае-Саянской складчатой области (АССО) известна серия молибден-порфировых месторождений и рудопроявлений (Сорское, Агаскырское, Ипчульское, Теплый ключ), крупнейшее из которых – Сорское, было выявлено еще в первой половине XX века и успешно разрабатывается в настоящее время. Открытие в Восточно-Саянском регионе в 1952 году Ак-Сугского медно-порфирового месторождения, а также наличие здесь же схожего с ним объекта – месторождения Кызык-Чадр с прогнозными ресурсами по категориям  $P_1+P_2$  в 1,6 млн. т. Cu, 65 тыс. т. Mo и 66 т. Au [Андреев и др., 2019], свидетельствует о существенном потенциале этого региона на выявление медно-порфировых месторождений. Данный факт, помимо высокой значимости для экономики региона, имеет важнейшее научное значение и может являться основанием для оценки (переоценки) потенциала всей Восточно-Саянской металлогенической провинции на данный тип оруденения. Для его раскрытия требуется постановка целенаправленных научных и прогнозно-поисковых работ. В этой связи изучение геологического строения, генезиса и минералого-геохимических особенностей формирования медно-порфирового месторождения Ак-Суг, как крупного объекта-эталона в АССО, имеет важное научное и прикладное значения для построения геолого-генетической и прогнозно-поисковой моделей, а также для выработки критериев поиска и прогноза аналогичных месторождений.

**Объектом исследования** является Ак-Сугское месторождение молибден-медно-порфировой (золотоносной) формации.

**Целью исследования** является установление геологических (геодинамическая позиция и возраст интрузивного магматизма), физико-химических (термодинамические параметры, состав и источник минералообразующего флюида) условий образования рудных зон, а также выявление минералого-геохимических особенностей и зональности Ак-Сугского медно-порфирового месторождения.

**Задачи:**

1. Изучить фондовую и опубликованную литературу по объекту исследования и его аналогам;
2. Установить возраст и геодинамическую обстановку формирования рудолокализирующих пород аксугского комплекса;
3. Изучить вещественный состав и типоморфные особенности рудной минерализации, определить последовательность рудообразования и пространственную локализацию оруденения, приуроченность к зонам метасоматитов;
4. На основе анализа геологических и минералого-геохимических данных выявить этапы формирования порфировой рудно-магматической системы и характер зональности гидротермально-метасоматических изменений;
5. Определить состав минералообразующего флюида и P-T-параметры формирования кварцево-жильных зон с рудной минерализацией;
6. Определить изотопный состав серы сульфидов, углерода и кислорода жильного кальцита для установления наиболее вероятных источников флюида и предполагаемых температур минеральных парагенезисов.

**Фактический материал и личный вклад автора**

В исследовании автором использованы прозрачные (более 200 шт.) и полированные шлифы (более 100 шт.), а также графические и аналитические

материалы результатов разведки Ак-Сугского месторождения (2019 г.), предоставленные сотрудниками компаний ООО «Голевская ГРК» и ООО «Тывамедь» в ходе выполнения работ по теме «Геолого-генетическая модель Ак-Сугского месторождения, как эталонного медно-порфирового объекта Восточно-Саянской металлогенической провинции».

В 2020-2021 гг. при участии автора было отобрано более 100 образцов из керна технологических скважин, охватывающих и учитывающих изменения вмещающих пород и рудной минерализации как по латерали, так и в вертикальном разрезе. Коллекция была использована для изучения газовой-жидких включений в кварце и кварц-карбонатных прожилках, минералогическо-петрохимических и изотопно-геохимических исследований.

Для построения объемной минералогическо-геохимической модели месторождения использованы данные рядового опробования (61752 пробы на 19 элементов), данные анализов 7451 групповых проб на 40 элементов, а также количественного минералогического анализа (500 проб).

Помимо вышеуказанного, автором лично определены цель, задачи и методика исследований, проведен литературный обзор и анализ отечественной и зарубежной опубликованной и фондовой научной литературы по теме исследования и смежным областям, сформулированы защищаемые положения и выводы диссертационной работы. Автором составлены коллекции и реестры для изучения пород и руд различных горизонтов и рудных залежей Ак-Сугского месторождения, изготовлены полированные шлифы и штуфы (более 50 шт.), а также подготовлены мономинеральные фракции (свыше 40 проб) и специализированные препараты (более 30). При участии автора выполнено минераграфическое изучение руд, электронно-микроскопические исследования, термобарогеохимические и часть изотопно-геохимических исследований. Созданы модели геолого-минералогической и метасоматической зональности месторождения, проведен факторный анализ геохимических данных.

В ходе диссертационного исследования обработка геологической информации и аналитических данных выполнена автором с использованием

специализированных программ и пакетов ГИС и ГГИС (Micromine, Leapfrog, Surfer, Grapher, Statistica, OriginPro и др.). Подготовка текста диссертационной работы и графического материала к ней выполнено непосредственно диссертантом.

### **Научная новизна**

Диссертационное исследование содержит актуальные данные о геологическом строении и возрасте становления Аксугского плутона, в том числе, его рудопродуктивных фаз, с которыми генетически связано одноименное медно-порфировое месторождение.

На основании авторских данных U-Pb изотопного датирования, с учетом ранее опубликованных результатов предшественников, дана оценка возрастного диапазона протекания интрузивного магматизма, рудоотложения и метасоматических процессов, охарактеризована геодинамическая позиция месторождения.

Впервые построены объемные модели минералогической, метасоматической и геохимической зональности Ак-Сугского месторождения, дана оценка уровня эрозионного среза рудно-магматической системы.

В работе приведены актуальные данные по вещественному составу руд (выявлено 15 не описанных ранее минеральных видов), уточнена схема стадийности и последовательности минералообразования. Впервые для руд Ак-Сугского месторождения детально охарактеризованы и пространственно локализованы обнаруженные мышьяк-содержащие разновидности самородной меди – альгодонит и  $\alpha$ -домейкит.

Впервые определены изотопные соотношения углерода и кислорода карбонатных прожилков, а также существенно дополнена информация об изотопном составе серы главных рудных минералов – халькопирита и пирита.

Определен состав летучих компонентов в индивидуальных флюидных включениях, изученных методами рамановской спектроскопии и микротермометрии. Впервые проанализирован валовый состав газовой фазы в

кварцевых и карбонатных прожилках методом газовой хромато-масс-спектрометрии.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Совокупность полученной геолого-геохимической информации об Ак-Сугском месторождении, как эталонном медно-порфировом объекте в Восточно-Саянской металлогенической провинции, способствует развитию представлений о генезисе и условиях локализации аналогичных рудных объектов в геологических структурах вышеуказанного региона и Алтае-Саянской складчатой области в целом. Это позволит применить представленные в работе данные для выделения поисковых критериев и признаков рудных объектов аналогичного генетического типа и может положительно повлиять на перспективы выявления новых и переоценке ранее изучавшихся рудопроявлений и месторождений. Актуальные данные о вещественном составе руд, минералого-геохимической зональности и уровне эрозионного среза порфировой системы могут быть использованы в производственной работе в процессе освоения Ак-Сугского месторождения для совершенствования технологии переработки руд и календарного планирования горных работ и управления рудопотоками

### **Основные защищаемые положения**

1. Согласно изотопному U-Pb датированию цирконов вмещающих пород Ак-Сугского месторождения, возраст тел тоналит-порфиров и плагиогранит-порфиров 3 фазы аксугского комплекса, локализующих основную массу Au-Mo-Cu оруденения, составляет  $523 \pm 7$  и  $521 \pm 6$  млн. лет соответственно. Полученные геохронологические данные позволяют скоррелировать возраст рассматриваемых интрузивных тел с одним из этапов островодужного магматизма Восточной Тувы.
2. В составе первичных ореолов Ак-Сугского Au-Mo-Cu-порфирового месторождения, установлено 8 обособленных геохимических ассоциаций, отражающих состав, геохимическую специализацию вмещающих пород и основные минеральные парагенезисы кольцеобразных минерализованных зон

порфировой системы. Метасоматическая зональность проявлена в последовательной смене от периферии к центру зон пропилитизации, кварц-хлорит-серицитовых, кварц-серицит-хлоритовых метасоматитов (с реликтами зон калишпатизации и биотитизации) и окварцевания.

3. Кварцевые жилы рудных зон Ак-Сугского месторождения сформированы гидротермальными растворами углекислотно-водного состава в диапазоне температур 79 – 500 °С, давлений – 0,4 – 122,1 бар и солености от 0,35 до 17,52 мас. % (NaCl-экв.). В составе минералообразующих флюидов преобладают H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub>. Изотопный состав серы ( $\delta^{34}\text{S} = -2,9 - +3,2\text{‰}$ ) главных сульфидных минералов месторождения свидетельствует о гомогенном мантийном источнике рудного вещества. Соотношения стабильных изотопов углерода и кислорода ( $\delta^{13}\text{C} -3,6 - +2,2\text{‰}$ ;  $\delta^{18}\text{O} +10,4 - +21,8\text{‰}$ ) карбонатных указывают на полигенный источник углекислоты и воды, вовлеченных в рудно-метасоматический процесс.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем работы 229 с., диссертация содержит 92 иллюстрации и 37 таблиц. Список литературы состоит из 150 наименований.

*В первой главе* дана оценка состоянию проблемы исследований отечественных медно-порфировых месторождений, приведена краткая история открытия и изучения месторождения Ак-Суг, его положение в региональных структурах и геологическая характеристика рудного поля. *Вторая глава* посвящена описанию геологического строения Ак-Сугской интрузии, в породах которой локализовано изучаемое медно-порфировое месторождение. Приведена характеристика вмещающих пород и рудных тел, гидротермально-метасоматических околорудных изменений, отражены результаты U-Pb датирования интрузивных фаз массива и его геодинамическая позиция. Совокупность представленных данных служит обоснованием первого защищаемого положения. *В третьей главе* приведены данные статистической обработки геохимических и геологических данных по месторождению, на

основании которых составлены и проинтерпретированы схемы минералогеохимической и метасоматической зональности Ак-Сугского месторождения. Изложены результаты изучения вещественного состава руд и стадийности рудообразования. Материалы главы служат обоснованием второго защищаемого положения. *Четвертая глава* посвящена оценке перспектив глубоких горизонтов и уровню эрозионного среза Ак-Сугского месторождения. *Пятая глава* содержит данные о температуре, давлении и составе индивидуальных флюидных включений в кварцевых прожилках рудных зон месторождения. Рассмотрены и проинтерпретированы результаты изучения флюидной составляющей в кварцевых и карбонатных прожилках методом газовой хромато-масс-спектрометрии. На их основе охарактеризованы P-T условия рудообразования и состав рудоносного флюида. *Шестая глава* посвящена результатам изотопно-геохимических исследований. Представлены обобщенные данные изучения изотопного состава серы сульфидных минералов, углерода-кислорода в карбонатных прожилках. На основании вышеизложенного обсуждаются предполагаемые источники минералообразующих флюидов и геохимические особенности формирования месторождения и его вмещающих пород. Материалы пятой и шестой главы использованы при обосновании третьего защищаемого положения. *В седьмой главе* приведено краткое описание применяемых в ходе данного диссертационного исследования образцов и аналитических методов.

### **Апробация работы**

По теме диссертации опубликовано 12 работ, из них 1 монография и 3 статьи в российских рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК. Основные положения работы обсуждались в ходе очного и онлайн участия на российских и международных конференциях: Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (Санкт-Петербург, 2021, 2023), Международная молодежная научно-образовательная конференция ЦНИГРИ «Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов

– от прогноза к добыче» (Москва, 2022, 2023), Международный молодежный научный симпозиум имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2021, 2023), XI Российская молодёжная научно-практическая Школа «Новое в познании процессов рудообразования» (Москва, 2022), VI Всероссийская молодежная научно-практическая школа-конференция «Науки о Земле. Современное состояние» (Геологический полигон «Шира», 2023).

### **Благодарности**

Автор благодарит своего научного руководителя *Владимира Александровича Макарова* за помощь в организации и проведении исследований, подготовке диссертации и постоянное внимание к выполняемой работе.

За содействие в сборе фактического материала, положенного в основу данной работы, автор выражает благодарность сотрудникам ООО «Тывамедь» Ю.В. Глушкову и А.М. Шабалинскому. Автор благодарит сотрудников кафедр ГМиМР и ГМиП ИЦМ СФУ (г. Красноярск), коллег из ЦГИ «Прогноз» за обсуждение результатов исследований, организацию, помощь и интерес к выполняемой работе. За помощь в проведении большого объема различных аналитических исследований и обсуждении полученных результатов автор выражает благодарность сотрудникам лабораторий термобарогеохимии, изотопно-аналитической геохимии и рудообразующих систем ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) и отдела минералогии и изотопной геохимии ФГБУ «ЦНИГРИ».

Глубокую благодарность за поддержку на всех этапах написания работы автор выражает своей семье, родным и близким людям. Всем, кто рядом и безвременно ушедшим.

На начальном этапе выполнение диссертационного исследования осуществлялось при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края, Краевого фонда науки и Акционерного общества «Корпорация развития Енисейской Сибири» в рамках научного проекта № 20-45-242903.

## **ГЛАВА 1. ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ АК-СУГСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ, ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ АК-СУГСКОГО РУДНОГО УЗЛА**

Ниже приведены краткие сведения о геологическом строении Ак-Сугского рудного узла, положении Ак-Сугского месторождения в структурах Алтае-Саянской складчатой области. Отдельное внимание уделено истории изучения рудного поля и освоения месторождения. При подготовке главы использован обширный литературный материал, а также результаты геологических исследований, выполненных автором совместно с В.А. Макаровым, Г.И. Шведовым, С.М. Макеевым, Е.А. Муромцевым, Ю.В. Глушковым и опубликованных в работе [Макаров и др., 2024].

### **1.1. История изучения Ак-Сугского месторождения**

Ак-Сугское медно-порфировое месторождение было открыто Г.В. Махиным и Н.Е. Костиным в 1952 г. при проведении поисков масштаба 1:100 000 экспедицией ВИМСа. Шурфами ими была вскрыта рудная зона мощностью 250 м со средним содержанием меди 0,88 %, что послужило основанием для рекомендации к проведению детальных поисков.

В это же время в регионе также были выявлены рудопроявления меди, свинца, цинка, молибдена и редких земель.

С 1961 г. начато систематическое геологическое изучение территории – проведение геолого-съёмочных и поисковых работ. В 1961–1964 гг. Н.Н. Стамборовским и О.И. Пятовым была проведена геологическая съёмка масштаба 1:200 000. На данном этапе на участке Ак-Суг была выполнена проходка с последующим опробованием двух магистральных канав. По результатам работ

оконтуренная площадь по концентрации меди 0,8 % составила 12 000 м<sup>2</sup> (800 x 150 м). Прогнозные ресурсы были оценены до глубины 100 м и составили 400 тыс. т меди.

В 1965–1967 гг. Н.Н. Стамборовским в районе месторождения была выполнена геологическая съемка масштаба 1:50 000. В результате проведенных работ была составлена кондиционная геологическая карта масштаба 1:50 000, детально разработана схема стратиграфии и магматизма, составлена карта прогноза на медь и молибден.

В 1965 г. М.А. Казанцевым и Е.Ф. Дюбой на месторождении были проведены поисково-оценочные работы с применением бурения и геофизических исследований. Бурением трех скважин до глубины 270 м была прослежена Северная рудная залежь. Методом вызванной поляризации (ВП) была выявлена Южная залежь. По результатам этих работ на месторождении Ак-Суг были подсчитаны запасы меди и молибдена, что позволило оценить месторождение как крупное.

В течение 1966–1981 гг. на месторождении продолжались поисково-оценочные работы, которые неоднократно прерывались и, в некоторой части, дублировались, что в конечном счете отрицательно сказалось на сроках проведения оценки месторождения в целом. В 1966 г. В.И. Забелиным и Б.П. Бордоносовым было пробурено 7 скважин, что позволило проследить рудные залежи на глубину 320 м. В окрестностях месторождения было начато проведение поисков с применением геохимических и геофизических методов исследований.

В 1970–1973 гг. В.И. Забелиным в районе месторождения на площади 100 км<sup>2</sup> проведены поисковые работы с литохимическим опробованием и комплексом геофизических методов (магниторазведка, ЕП, ВП), а также бурением скважин на отдельных участках. В результате выполнения вышеперечисленных работ на западном и южном флангах месторождения были выявлены и частично оконтурены медные руды.

В 1978–1981 гг. на месторождении были продолжены буровые работы с целью оценки флангов и глубоких горизонтов. К 17 скважинам (4 598 пог. м, со

средней глубиной 270 м), пробуренным в 1967–1973 гг., добавились еще 28 (15 412 пог. м, со средней глубиной 550 м). При этом на Северной и Южной залежах оруденение было прослежено до глубин 770 и 649 м соответственно.

Основным результатом оценочных работ на месторождении стало подтверждение его масштабов (крупное месторождение меди и молибдена). По результатам оценочных работ в 1980 г. была проведена геолого-экономическая оценка месторождения, оно было признано промышленным и рекомендовано для проведения предварительной разведки.

В 1982–1985 гг. под руководством В.И. Забелина проводится предварительная разведка месторождения. В соответствии с разработанными институтом СибцветметНИИ проектами кондициями были подсчитаны запасы категорий  $C_1$  и  $C_2$ . Запасы в Государственной комиссии по запасам (ГКЗ) апробацию не проходили. НТС ПГО «Красноярскгеология» по ряду причин было рекомендовано не проводить детальную разведку.

Разведочные работы на месторождении были возобновлены в 2007 г. силами ООО «Голевская ГРК» – владельцем лицензии на данный объект. По результатам проведенных в 2007–2009 гг. геологоразведочных работ на Ак-Сугском месторождении было составлено технико-экономическое обоснование временных разведочных кондиций и произведен подсчет запасов меди, молибдена, золота, серебра и рения.

В 2010–2014 гг. были продолжены разведочные работы. Целью работ являлось выполнение рекомендаций ГКЗ, разработка ТЭО постоянных разведочных кондиций, составление отчета с подсчетом запасов, утверждение параметров кондиций и постановка запасов на Государственный баланс. По результатам проведенных в 2007–2014 гг. геологоразведочных работ составлено технико-экономическое обоснование постоянных разведочных кондиций и произведен подсчет запасов меди, молибдена, золота, серебра и рения медно-порфировых руд Ак-Сугского месторождения по категориям В,  $C_1$  и  $C_2$ . Согласно протоколу ГКЗ Роснедра № 3907 от 31.10.2014 г. на госбалансе находится 534,8 млн т. руды, из которых запасы меди составляют 3 633,3 тыс. т., молибдена

77,9 тыс. т. (по категориям запасов  $B + C_1 + C_2$ ). Запасы золота были оценены по категории  $C_2$  и составили 83 тонны. Усредненные содержания по месторождению:  $Cu - 0,73 \%$ ,  $Mo - 0,017 \%$ ,  $Au - 0,16$  г/т. Оценены прогнозные ресурсы меди, молибдена, золота, серебра, рения глубоких горизонтов месторождения по категории  $P1$ . Для поисков штокверного медно-порфирового оруденения рекомендован восточный, южный и западный фланги месторождения Ак-Суг.

В 2015–2019 гг. было продолжено доизучение Ак-Сугского месторождения. Работы включали в себя бурение, анализ керновых проб на химический и фазовый состав, отбор и металлургические испытания 41 технологической пробы. Основные испытания включали в себя комплекс работ по изучению схем измельчения руды, разработку технологической схемы (на исходной руде), опытно-промышленные испытания на комбинированной пробе (2 000 кг). По результатам выполненных тестов проведено доизучение вещественного состава и технологических свойств руд Ак-Сугского медно-порфирового месторождения. Произведено доизучение зоны окисления месторождения. Уточнена граница распространения окисленных и смешанных руд.

В 2020–2021 гг. коллективом авторов (при участии диссертанта) Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета (ИГДГиГ СФУ) проведена научно-исследовательская работа по теме «Геолого-генетическая модель Ак-Сугского месторождения как эталонного медно-порфирового объекта Восточно-Саянской металлогенической провинции». Целью выполняемых исследований являлось обобщение всех накопленных геологоразведочных данных, изучение геолого-геохимических особенностей месторождения, создание геолого-генетической модели Ак-Сугского месторождения и выработка на ее основе оптимального прогнозно-поискового комплекса для выявления подобных объектов в горно-таежных условиях Алтае-Саянской складчатой области. На основе выполненных исследований оценены геологические и физико-химические условия формирования рудных зон месторождения Ак-Суг, изучена его минералого-геохимическая зональность,

разработаны геолого-генетическая и прогнозно-поисковая модели медно-порфирового оруденения.

## **1.2. Положение рудного узла и месторождения в структурах Алтае-Саянской складчатой области**

Ак-Сугский рудный узел и одноименное месторождение расположены в пределах Алтае-Саянской области Центрально-Азиатского складчатого пояса в юго-западном обрамлении Сибирского кратона (Рис. 1.1).

Эта территория представляет собой сложную аккреционно-коллизийную структуру, смятую в крупные ороклинальные складки и нарушенную поперечными и продольными среднепалеозойско-мезозойскими сдвигами [Добрецов и др., 2007]. Она образовалась в результате венд-раннекембрийской субдукции и позднекембрийско-ордовик-силурийской коллизии Тувино-Монгольского микроконтинента с рядом островных дуг (Хамсаринской, Ожинской, Ондумской, Таннуольской), аккретированных позднее к южной окраине Сибирского кратона [Руднев, 2010]. У других авторов описываемый островодужный структурно-вещественный комплекс фигурирует как Кузнецко-Таннуольская островная дуга [Парфенов и др., 2003; Nokleberg, 2010], Таннуольско-Хамсаринский или Хамсаринский островодужный террейн [Зоненшайн и др., 1990; Монгуш и др., 2011; Yakubchuk et al., 2012]. Образование этой структуры в составе Алтае-Саянской складчатой области в поздневендский-раннепалеозойский период времени сопровождалось широкомасштабным проявлением магматизма в возрастном диапазоне 570–450 млн лет [Руднев и др., 2015]. В результате образовались сопряженные в пространстве и времени интрузии габброидов и гранитоидов, причем последние преобладают и часто представлены крупными батолитоподобными массивами плагиогранитов. Примером такого батолита является Хамсаринский (Кадыр-Осский) батолит площадью 160 км<sup>2</sup>, находящийся непосредственно в районе месторождения Ак-Суг. Развитие интрузивного магматизма происходило на нескольких возрастных

рубежах и в различных геодинамических обстановках: сначала островодужной (570–560, 540–520 млн лет), а затем аккреционно-коллизивной (510–450 млн лет) [Руднев, 2010; Руднев, и др., 2013; Берзина и др., 2019]. При этом немаловажно, что до начала главной эпохи аккреционных процессов эта территория представляла собой активную континентальную окраину, о чем свидетельствуют геохимические и изотопно-геохронологические данные [Монгуш и др., 2011].

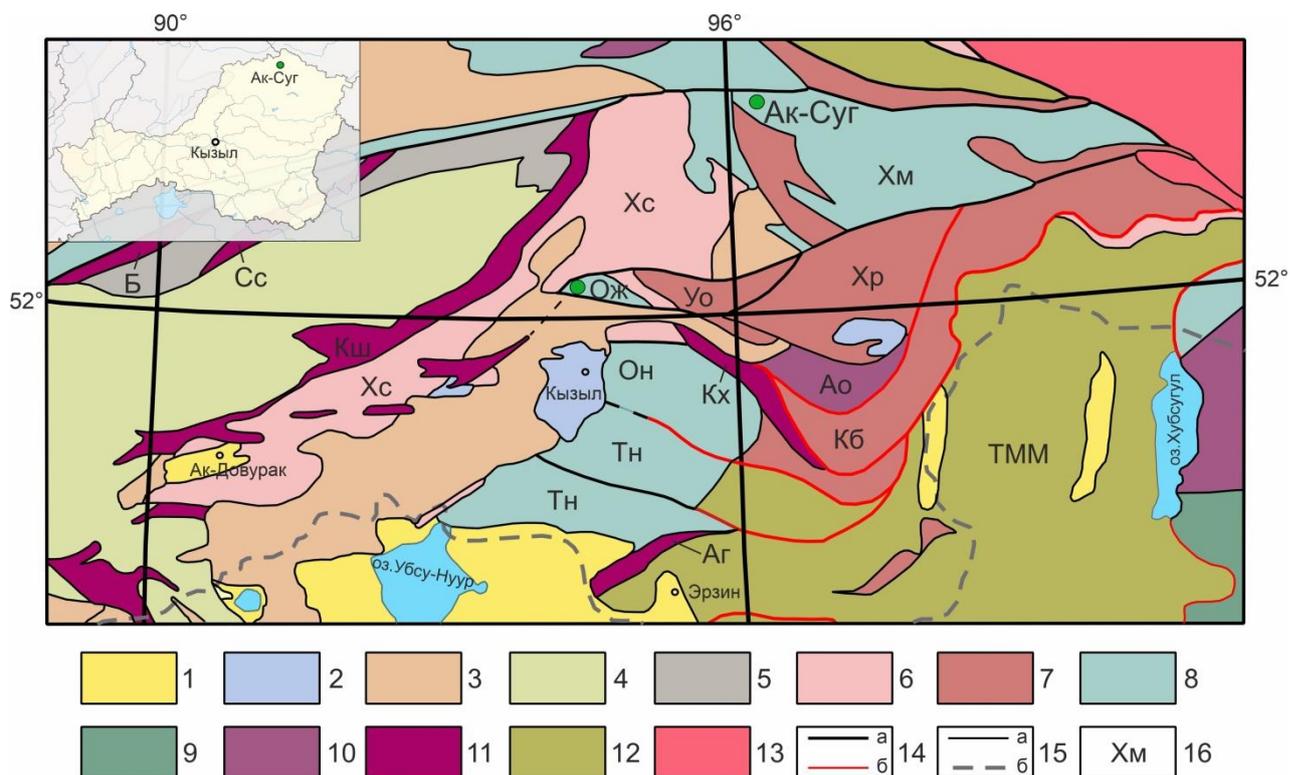


Рисунок 1.1. Геодинамическая схема Тувы и сопредельных территорий.

Составлена по данным [А.А. Монгуш и др., 2013] с добавлениями автора.

1 – рыхлые отложения кайнозойских впадин; 2 – терригенные отложения юрских мульд; 3 – магматические и осадочные ассоциации девонских рифтогенных прогибов; 4 – кембрий-силурийские турбидиты континентальной окраины; 5 – преимущественно турбидитовые аккреционные призмы; 6–10 – структурно-вещественные комплексы венд-раннекембрийской островодужной системы: 6 – преддуговые терригенные, 7 – задуговые вулканогенные и терригенно-вулканогенные, 8 – островодужные осадочно-вулканогенные и вулканоплутонические, 9 – нерасчлененные островодужные, 10 – пред- и задуговые офиолитовые аллохтоны; 11 – метаморфические комплексы; 12 – докембрийские микроконтиненты; 13 – Сибирский кратон; 14 – главные постаккреционные разломы (а) и надвиги (б); 15 – границы: а – структурных зон, б – государственная; 16 – названия структурно-формационных подразделений

Таннуольско-Хамсаринской островодужной системы: преддуговая Саяно-Тувинская группа структурно-формационных зон: Кш – Куртушибинская, Б – Борусская, Сс – Северо-Саянская и Хс – Хемчикско-Сыстыгхемская; островодужная Таннуольско-Хамсаринская группа зон: Тн – Таннуольская подзона, Он – Ондумская подзона; Ож-Ожинская зона; Хм – Хамсаринская зона; задуговая Восточно-Тувинская группа зон: Аг – Агардагская, Кх – Каахемская, Уо – Улугойская, Хр – Харальская, Кб – Карабельдырская, Ао – Агойский метаморфический террейн; ТММ – Тувино-Монгольский микроконтинент.

Ак-Сугское месторождение входит в состав Ак-Сугского рудного узла, который локализован на сопряжении двух крупных тектонических структур Алтае-Саянской складчатой области: Восточно-Тувинской и Кизир-Казырской складчатых систем, естественной границей между которыми является крупный региональный Кандатский разлом (Рис. 1.2, 1.3).

Кизир-Казырская складчатая система представляет собой блок, ограниченный с северо-востока зоной Восточно-Саянского разлома (2) от Дербинского блок-антиклинория (5), а с юга – зоной Кандатского глубинного разлома – от Восточно-Тувинской складчатой системы. Блок имеет в плане треугольную форму, расширяющуюся в северо-западном направлении, от сочленения Восточно-Саянского и Кандатского разломов в бассейне р. Дургомжа. Он прослеживается на запад в бассейн р. Тубы на 400 км, где слагающие его структурно-формационные комплексы (СФК) перекрыты вулканогенными породами Южно-Минусинской котловины [Государственная геологическая карта..., 2008]. В строении Кизир-Казырской складчатой системы (СС) участвуют стратифицированные и нестратифицированные образования раннеархейского (?), рифейского, венд-раннекембрийского, среднепалеозойского и мезозойского возраста.

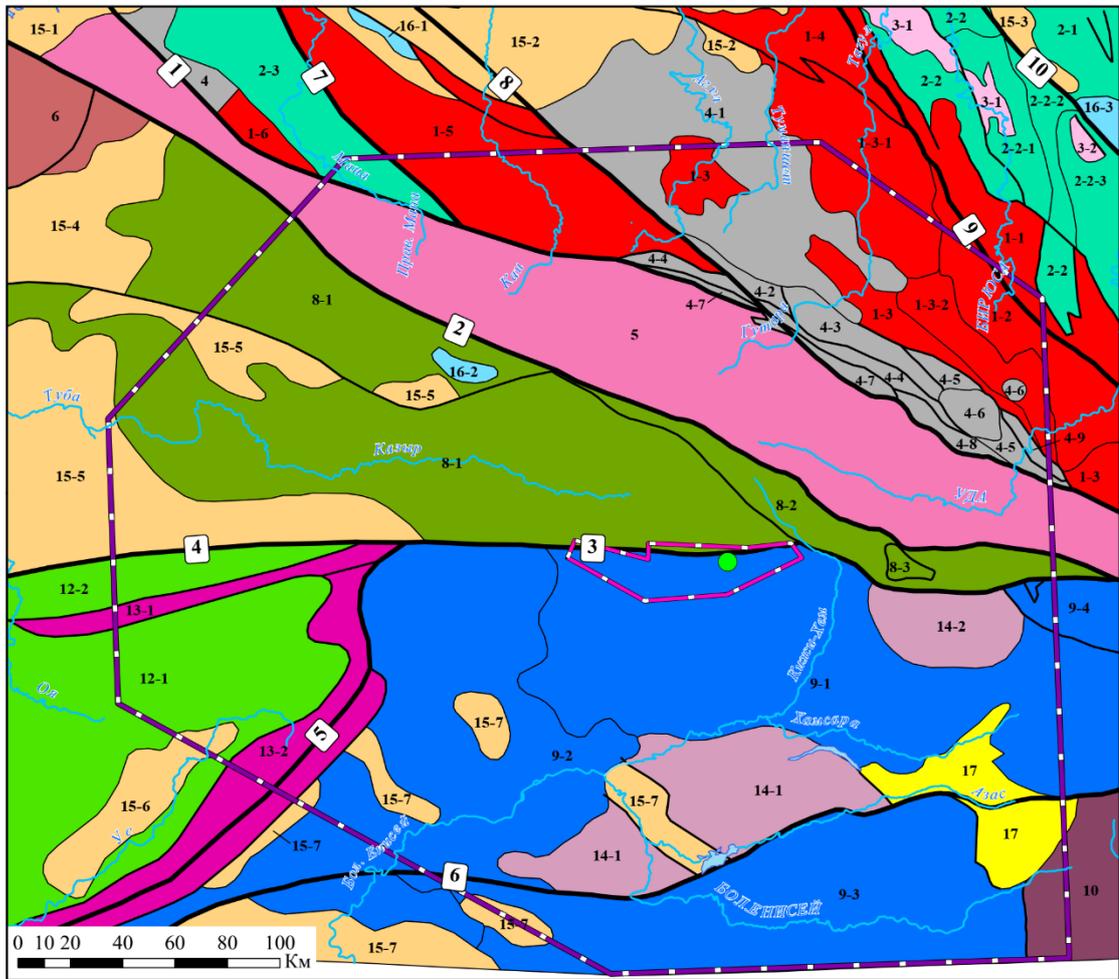


Рисунок 1.2. Схема тектонического районирования восточной части Алтае-Саянской складчатой области и ее сочленения с Сибирской платформой.

Составлена по материалам ГГК-1000 (третье поколение) листов N-46 и N-47 [Государственная геологическая карта..., 2008; Государственная геологическая карта..., 2012]. Условные обозначения представлены на рис. 1.3.

- Сибирская платформа:
-  1. Структуры фундамента Сибирской платформы: 1-1 – Мангатольский выступ; 1-2, 1-3 – Бирюсинская глыба, Ийско-Тагульский выступ, Ийско-Туманшетский прогиб (1-3-1 – Гутаро-Бирюсинский синклинорий, 1-3-2 – Удинский синклинорий); 1-4 – Туманшетский грабен; 1-5 – Канская глыба; 1-6 – Арзыбейская зона
  -  2. Структуры чехла Сибирской платформы: 2-1 – Ангаро-Тасеевская синеклиза; 2-2 – Присяянский краевой перикратонный прогиб (2-2-1 – Бирюсинское горст-подняtie, 2-2-2 – Ерминская грабен-синклиналь, 2-2-3 – Уватско-Марское горст-подняtie); 2-3 – Манский перикратонный прогиб
  -  3. Урикско-Туманшетский внутрикратонный прогиб: 3-1 – Тагул-Бирюсинский горст; 3-2 – Уватское поднятие
  -  4. Структуры ТМА краевого шва Сибирской платформы: 4-1 – Агульская впадина; 4-2 – Негодкинский прогиб; 4-3 – Миричунский грабен; 4-4 – Чатыгойский грабен; 4-5 – Киченский грабен; 4-6 – Нерхинская впадина; 4-7 – Мурхойский грабен; 4-8 – Джуглымская глыба; 4-9 – Хальтинский грабен
- Алтае-Саянская складчатая область:**
-  5. Дербинская СС, Дербинский блок-антиклинорий
  -  6. Кузнецко-Алатауская СС, Белькско-Батеневская зона
  -  8. Кизир-Казырская СС: 8-1 – Сисимо-Казырская зона; 8-2 – Ашкасокская зона; 8-3 – Магдасское поднятие
  -  9. Восточно-Тувинская СС: 9-1 – Хамсаринская зона; 9-2 – Хемчикско-Систигхемская зона; 9-3 – Харальская зона; 9-4 – Утхумская зона
  -  10. Окинско-Харальская СС, Шутхулайская глыба
  -  12. Каледонская Западно-Саянская СС: 12-1 – Центральная Западно-Саянская зона; 12-2 – Северо-Саянская зона
  -  13. Офиолитовые аллахтоны: 13-1 – Северо-Саянский; 13-2 – Куртушубинский
- Наложённые структуры эпох активизации:**
-  14. Структуры ТМА Алтае-Саянской СО: 14-1 – Азасская ВТС; 14-2 – Алымская ВТС
  -  15. Поздне-палеозойские впадины: 15-1 – Северо-Минусинская; 15-2 – Рыбинская; 15-3 – Тымбырская; 15-4 – Сыдо-Ербинская; 15-5 – Южно-Минусинская; 15-6 – Усинская; 15-7 – Тоджинско-Уюкская;
  -  16. Мезозойские угленосные впадины: 16-1 – Саяно-Партизанская; 16-2 – Восточно-Саянская; 16-3 – Иркутская
  -  17. Кайнозойские вулканоглыбовые котловины, Азасский грабен
- Тектонические нарушения**
-  Главные разломы: 1 – Главный Саянский; 2 – Восточно-Саянский; 3 – Кандатский; 4 – Саяно-Минусинский; 5 – Куртушубинский; 6 – Азасский; 7 – Манский; 8 – Ийско-Канский; 9 – Бирюсинский; 10 – Присяянский
  -  Второстепенные разломы
- Объекты исследований:**
-  Контур исследований гравиметрического поля
  -  Контур Ак-Сугского рудного узла
  -  Ак-Сугское месторождение

Сокращения: ВТС – вулканотектоническая структура, СС – складчатая система, СО – складчатая область, ТМА – тектоно-магматическая активизация

Рисунок 1.3. Условные обозначения к схеме тектонического районирования.

Восточно-Тувинская складчатая система представляет собой крупный геоблок, ограниченный с севера от Кизир-Казырской складчатой системы глубинным Кандатским разломом и уходящий на юг за пределы исследуемой области. В субширотном направлении этот геоблок делится на два тектонических блока глубинным Азасским (6) разломом. В составе Восточно-Тувинской

складчатой системы последними региональными исследованиями [Государственная геологическая карта..., 2008; Государственная геологическая карта..., 2012] выделяются 4 структурно-тектонические зоны (Рис. 2, 3): Хамсаринская (9-1), Хемчикско-Систигхемская (9-2), Харальская (9-3), Утхумская (9-4). Ак-Сугский рудный узел локализован в северной части Хамсаринской зоны вдоль линии Кандатского разлома.

Хамсаринская зона (9-1) Восточно-Тувинской складчатой системы характеризуется большим возрастным диапазоном и разнообразием слагающих ее структурно-формационных комплексов, исключительно широким развитием интрузивных образований палеозойского возраста, а также наложенными структурами тектоно-магматической активизации (ТМА) Алтае-Саянской складчатой области – Азасская (14-1) и Алымская (14-2) вулкано-тектонические структуры (ВТС).

К главным разрывным нарушениям исследуемого региона Алтае-Саянской складчатой области относятся глубинные долгоживущие разломы (см. Рис. 1.2, 1.3): Главный Саянский (1), Восточно-Саянский (2), Кандатский (3), Саяно-Минусинский (4), Куртушубинский (5) и Азасский (6). Ак-Сугское месторождение, как и весь Ак-Сугский рудный узел, приурочены к зоне влияния Кандатского разлома.

Кандатский разлом (3) – одна из крупнейших разрывных структур Алтае-Саянской складчатой области. Он тянется в широтном направлении от бассейна Утхума на востоке, который под углом  $35^\circ$  причленяется к зоне Главного Саянского разлома, где изменяет его простирание до субширотного, а падение – до северного – в бассейн р. Казыр. На западе, после сопряжения с Куртушубинским разломом, Кандатский разлом прослеживается под именем Саяно-Минусинский разлом.

Согласно данным, опубликованным в работе [Макаров и др., 2024] «Кандатский разлом, контролирующий размещение рудных объектов Ак-Сугского рудного узла, отделяет структурно-формационные комплексы Дербинской и Кизир-Казырской складчатых систем от комплексов Восточно-

Тувинской складчатой системы. На всем протяжении он сопровождается мощными (до 2–3 км) зонами бластомилонитов и милонитов эпидот-амфиболитовой и зеленосланцевой фаций с выраженным падением тектонической сланцеватости на север под углами 60–75° и может быть классифицирован как взброс [Государственная геологическая карта..., 2012].

Фрагментарно отмечается резкое, ступенеобразное изменение широтного простирания разлома на северо-западное (305–310°), что является, возможно, результатом его смещения по зоне сквозьструктурного разлома северо-западного простирания, фиксирующегося в формационных комплексах Кизир-Казырской складчатой системы и Хамсаринской зоны Восточно-Тувинской складчатой системы. На своем протяжении разлом с северного фаса ограничивает ареалы палеозойского магматизма, характерного для Хамсаринской зоны. Подтверждая вышесказанное, Канадатский разлом отчетливо выражен в характере магнитного поля, фиксируется зонами градиентов поля силы тяжести широтной ориентировки. Разлом хорошо дешифрируется на аэро- и космофотоснимках, выражен геоморфологически спрямленными участками долин. Об активности разлома в рифее свидетельствует приуроченность к нему мелких тел гипербазитов актовракского комплекса, а также значительно бóльшая степень динамометаморфических изменений в формационных комплексах рифейского и раннепротерозойского возраста относительно комплексов палеозойского возраста.

Несомненна активность разлома в палеозое, о чем свидетельствует приуроченность к его южному крылу многочисленных интрузий габброидов хойтоокинского, гранитоидов таннуольского и огнитского комплексов с субширотной ориентировкой их длинных осей. По-видимому, не случайна и приуроченность к разлому Шибитской грабен-синклинали с девонско-карбоновым возрастом слагающих ее отложений. В «структурном узле», на сочленении Канадатского и Главного Саянского разломов (восточнее исследуемой территории), расположены довольно крупные интрузии огнитского комплекса, прорывающие структурно-формационные комплексы Дербинской и Восточно-Тувинской складчатых систем без заметных смещений контуров интрузий. Этот

факт необходимо учитывать в связи с распространенным представлением о значительных амплитудах горизонтальных и вертикальных смещений по зонам Главного Саянского и Кандатского разломов в «послеогнитское» время.

Зона Кандатского разлома контролирует размещение золоторудной, полиметалльно-золоторудной минерализации в формационных комплексах рифейского и раннепалеозойского возраста, молибден-медного (Ак-Сугское месторождение), редкометалльного и редкоземельного оруденения (Арысканское месторождение и др.), связанного с формационными комплексами среднепалеозойского и мезозойского возраста».

### **1.3. Стратиграфия**

Ак-Сугский рудный узел (Рис. 1.4), вмещающий одноименное медно-порфировое месторождение приурочен к нижнепалеозойскому Кандатскому шовному прогибу, развившемуся в зоне сочленения краевых массивов Хамсаринской и Казыр-Кизирской внешних зон раннекаледонских геосинклиналей [Тектоническое районирование и металлогения..., 1984]. По широтной зоне Кандатского разлома приходят в соприкосновение терригенно-карбонатные отложения колпинской и балахтисонской свит, составляющее нижнепалеозойский чехол Казырского краевого массива Казыр-Кизирской зоны, с геосинклинальным комплексом прогиба – терригенно-вулканогенными отложениями хамсаринской свиты. В пределах как Казырского, так и Западно-Хамсаринского массивов широко развиты разновозрастные интрузивные образования преимущественно нижнего и среднего палеозоя.

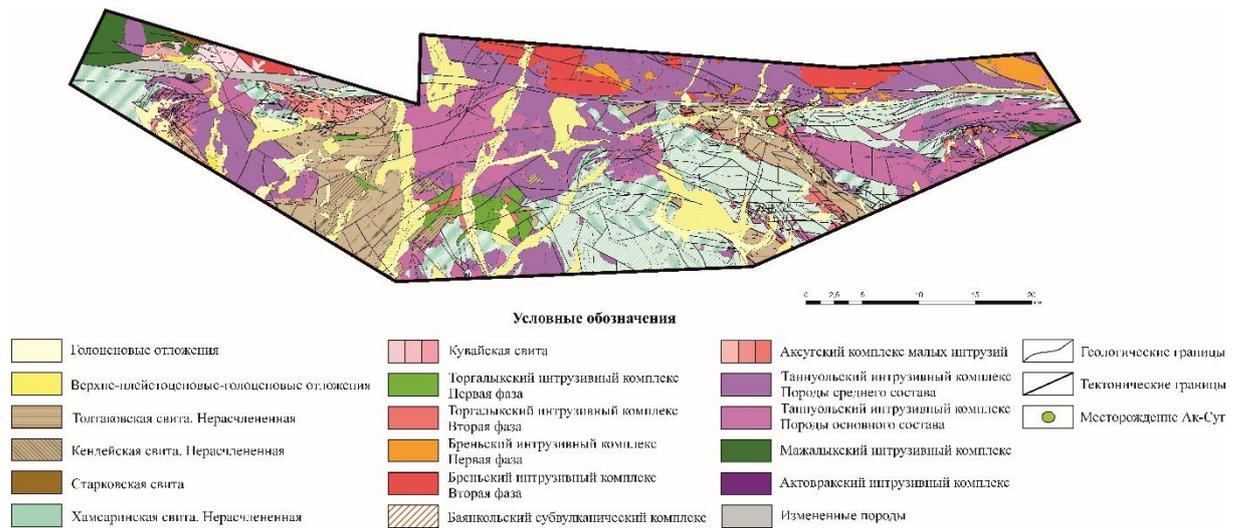


Рисунок 1.4. Геологическая карта Ак-Сугского рудного узла.

Составлена по материалам [Еханин, 1986] с добавлениями автора.

Месторождение Ак-Суг, известные рудопроявления меди и многочисленные проявления медной минерализации располагаются преимущественно в пределах Кандатского прогиба либо у северной границы Западно-Хамсаринского массива (Кара-Хемский и Урансайский блоки), где широким распространением пользуются образования хамсаринской свиты и прорывающие их интрузии нижнепалеозойской габбро-плагиогранитной формации. Вдоль южного борта Кандатского шовного прогиба в герцинскую эпоху образовался ряд наложенных грабенов (Даштыгойский, Кадыройский и др.), выполненных осадочно-вулканогенными отложениями нижнего-среднего девона. В обрамлениях грабенов, а также вдоль разрывных структур субширотного и северо-западного и северо-восточного направлений локализуются массивы и небольшие штоки, как правило, порфировидных гранитоидных интрузий среднего-верхнего палеозоя.

Из стратиграфических образований в пределах рудного узла снизу-вверх выделяются отложения протерозоя, кембрия и девона. Протерозойские отложения представлены охемской свитой ( $PR_{2oh}$ ), по составу подразделяющейся на две подсвиты: нижнюю – преимущественно кристаллических орто- и парасланцев и верхнюю – существенно карбонатную. Кембрийские отложения представлены

балахтисонской ( $C_1bl$ ) и хамсаринской ( $C_1hm$ ) свитами. Отложения балахтисонской свиты представлены ксенолитами и останцами кровли известняков среди диоритов таннуольского комплекса, встречающимися в зоне Кандатского прогиба и получившие развитие в Казыр-Кизирской зоне. По составу свита подразделяется на две подсвиты – нижнюю, сложенную песчанистыми известняками, и верхнюю, представленную мраморами и мраморизованными известняками. Хамсаринская свита ( $C_1hm$ ) подразделяется на три подсвиты, которые хорошо выделяются лишь в восточной и центральной частях рудного узла. Нижняя подсвита состоит из переслаивающихся андезитовых и диабазовых порфиритов с редкими прослоями (1–20 м) лавобрекчий и грубополосчатых туфов. На левобережье р. Ак-Суг в ее верховьях (хр. Озерный), где предполагается крупная вулканическая постройка, преобладают эффузивные породы; к югу и востоку широко распространены лавобрекчии и туфы. В составе средней подсвиты развиты преимущественно андезитовые порфириты плагиоклазовые и плагиоклаз-роговообманковые, лавобрекчии, шаровые лавы, риолиты и метаморфизованные диабазы. Для верхней подсвиты характерны риолит-порфиры, плагиориолит-порфиры, альбитофиры и их туфы, а также мраморизованные известняки.

Отложения девонской системы на изучаемой площади развиты главным образом в наложенных грабенах и отнесены к толтаковской свите ( $D_2tl$ ). По литологическому составу она преимущественно гравелито-песчаниковая туфогенная, с прослоями туфоконгломератов, алевролитов, потоками андезитовых и дацитовых порфиритов и лавобрекчиями. Окраска пород красноцветная. Мощность отложений свиты около 1000 м.

#### **1.4. Магматизм**

Магматические образования, имеющие широкое развитие в районе Ак-Сугского месторождения, сформировались в две главные эпохи – нижнепалеозойскую (кембрий) и средне-верхнепалеозойскую (девон). С

нижнепалеозойской (раннекаледонской) эпохой связано формирование габбро-плагиогранитной формации (аксугский и таннуольский комплексы), с верхнепалеозойской – граносиенит-гранитная и гранитоидная формации (бреньский, торгалыкский комплексы).

Нижнепалеозойские интрузии. Аксугский комплекс ( $\rho\gamma$ ,  $\delta\epsilon a$ ), с которым связана молибденово-медная штокверковая минерализация, выделен и обоснован в 1981 г. [Бухаров и др., 1981]. Он представлен многофазными дифференцированными массивами в виде небольших по размеру штокообразных тел. Размещение их контролируется крупными разломами субширотного (оперяющие разрывы Кандатского разлома) или северо-западных направлений. Для рудоносных массивов аксугского типа характерна завершающая фаза порфировых интрузий, с которыми непосредственно связано оруденение. Отмечается два подтипа интрузий: в первом преобладают породы ранних фаз – диориты, кварцевые диориты, с которыми связывается преимущественно медная минерализация; во втором более развиты граниты и плагиограниты с ведущей ролью молибденовой минерализации. Более подробная характеристика аксугского комплекса будет приведена далее, в главе «Геологическое строение Ак-Сугского месторождения».

Массивы таннуольского комплекса ( $\gamma_3\rho\gamma-q\delta_2\delta v_1 \epsilon_{2-3t}$ ) пользуются широким распространением в пределах Хамсаринской структурной зоны. В формировании массивов выделяется три фазы [Габеев и др., 1980]: первая фаза – габбро-диориты, диориты; вторая – плагиограниты, кварцевые диориты, тоналиты; третья – лейкократовые плагиограниты, адамеллиты.

Средне-верхнепалеозойские интрузии. Бреньский (сютхольский) комплекс ( $\gamma D_{1-2b}$ ) широко развит в пределах Кандатской металлогенической зоны. Интрузии комплекса представлены в основном биотитовыми и биотит-роговообманковыми лейкократовыми гранитами нормального или субщелочного состава, реже граносиенитами и сиенитами. К дайковым образованиям отнесены микрограниты, гранит-порфиры и кварцевые порфиры, встречающиеся как среди интрузивных образований, так и во вмещающих породах. Контакты гранитов обычно резкие,

четкие, крутопадающие. Нижне-среднедевонский возраст интрузий обосновывается тем, что они прорывают нижнедевонские, а местами и нижне-среднедевонские отложения в Восточной Тыве и, в свою очередь, перекрываются верхнедевонскими образованиями.

Торгалыкский комплекс ( $\delta, \gamma \xi D_3 t$ ) достоверно выделяется на правобережье р. Казас в западной части площади в виде небольшого массива и ряда мелких тел. По составу и взаимоотношениям пород комплекса выделяются две фазы. К первой отнесены породы основного и среднего состава: габбро, габбро-диориты, диориты, диорит-порфиры и микродиориты. Это серые, зеленовато-серые, иногда с розоватым оттенком массивные мелко-среднезернистые породы, состоящие из плагиоклаза, пироксена, биотита, реже присутствует кварц, хлорит и калиевый полевой шпат (КПШ). Вторая фаза представлена розовыми, розовато-серыми граносиенитами с массивной, иногда порфировидной текстурой. Породы первой фазы прорываются граносиенитами, в которых спорадически наблюдались ксенолиты диоритов. Позднедевонский возраст становления пород торгалыкского комплекса устанавливается на основании прорывания ими отложений атакшильской свиты среднего девона.

## 1.5. Тектоника

В структурном плане территория Ак-Сугского рудного узла принадлежит, в основном, Западно-Хамсаринскому и отчасти Казырскому краевым массивам, соответственно, Таннуольско-Хамсаринской и Казыр-Кизирской внешним зонам раннекаледонской геосинклинали. Массивы граничат по нижнепалеозойскому Кандатскому шовному прогибу (его контуры близки современной границе развития отложений хамсаринской свиты) и оформились на опущенных и переработанных блоках докембрийской сиалической коры: Ингишский блок – к северу от Кандатского прогиба, Кизи-Хемский – к югу. Наиболее же опущенными и переработанными блоками являются Кара-Хемский и Уран-Сайский. Кандатский рифтоподобный прогиб причленяется на востоке к

структурам ранних рифеид Восточного Саяна. С юга (за пределами площади) Западно-Хамсаринский массив ограничивается зоной Азасского разлома. Как Ингишский, так и Кизи-Хемский блоки осложнены сформировавшимися в герцинскую эпоху межгорными впадинами, выполненными нижне-среднедевонскими образованиями.

Стратифицированные образования принадлежат двум структурным ярусам. К нижнему отнесены сложнодислоцированные эффузивно-осадочные образования верхнего протерозоя и нижнего кембрия (охемская, балахтисонская и хамсаринская свиты). Они слагают ядерную часть и северное крыло Буламбукской антиклинали, ось которой ориентирована в меридиональном направлении. Антиклиналь разбита многочисленными разломами на блоки, в каждом из которых наблюдается сложная складчатость с крутыми углами падения.

Верхний структурный ярус сложен осадочно-вулканогенными образованиями девона. От нижнего этажа он отделен значительным перерывом и залегает на нем с резко выраженным угловым несогласием. Породами верхнего структурного яруса выполнен ряд наложенных синклинальных структур (Даштыгойская грабен-синклиналь и др.). Углы падения пород в ядерных частях и на крыльях складок пологие ( $10-15^\circ$ ), вблизи разломов – более крутые ( $50-70^\circ$ ). Морфология синклинальных структур верхнего яруса определяется ограничивающими их разломами. Обычно они имеют удлиненную форму вдоль тектонических нарушений северо-западного или субширотного направлений. Наиболее крупная из описываемых структур – Даштыгойская грабен-синклиналь прослеживается в меридиональном и северо-западном направлениях более чем на 35 км при ширине 2,5–5 км.

Интенсивно проявленная разрывная тектоника определила сложное блоковое строение района. Главнейшим структурным элементом является Кандатский глубинный разлом, протягивающийся в широтном направлении через всю северную часть площади рудного узла. В современном плане он представляет собой сложно построенную зону сближенных субпараллельных разрывов, между

которыми зажаты узкие блоки милонитизированных пород. Ширина шовной зоны от 1–2 до 5–10 км. В системе разрывов глубинного разлома выделяются составляющие его ветви, такие, как Ак-Суг-Соругская и др.

Разрывы, принадлежащие Кандатской зоне, обычно крутопадающие, сбросового типа, с большой амплитудой вертикального перемещения (не менее 2–3 км). Они являлись магмоподводящими каналами и в большинстве случаев залечены телами интрузий, к которым может быть отнесен Кадыросский массив таннуольского комплекса.

Оперяющими ветвями глубинных разломов являются разрывные нарушения северо-восточного и, преимущественно, северо-западного простирания. К последним относятся Челдезрикский, Кара-Ойский, Кадыр-Осский и др. Все они характеризуются вертикальными или крутыми углами падения с амплитудами перемещения в сотни метров. Разрывы сопровождаются зонами катаклаза, расланцевания, иногда пиритизацией в зонах шириной от нескольких до сотни метров.

Кроме крупных разломов на площади широко распространены оперяющие их или самостоятельные разрывы субмеридионального, широтного, северо-западного и иных направлений. Они обычно малоамплитудные и выражены незначительными по ширине (десятки метров) зонами дробления, карбонатизации и хлоритизации.

Подводя итог анализу тектонических нарушений в пределах Ак-Сугского рудного узла, можно выделить три преобладающих направления их простирания: субширотное, северо-западное, северо-восточное.

### **1.6. Характер размещения рудных объектов на площади Ак-Сугского рудного узла и его обрамления**

На территории Ак-Сугского рудного узла помимо крупного одноименного Au-Mo-Cu порфирового месторождения насчитывается более 100 пунктов минерализации и рудопроявлений различных рудно-формационных типов.

Особенности металлогении Ак-Сугской зоны и закономерности размещения рудных формаций района находятся в тесной связи с формированием фундамента и осадочного чехла региона, в зависимости от этапов геологического развития.

Металлогения Ак-Сугского рудного узла тесно связана с зоной влияния субширотного Кандатского разлома, оперяющих его разрывных нарушений северо-восточного и северо-западного направлений и интрузивными образованиями палеозой-мезозойского возраста (аксугский, бреньский, торгалыкский и др. комплексы) [Шадчин, Макаров, 2023]. Значительная часть малоперспективных рудопроявлений и пунктов минерализации рудного узла представлена магнетитсодержащими скарнами (Поселковое), серно-колчеданными и титаномагнетитовыми рудами (Петровское, Крыжинское и др.), связанных с габбро-плагиогранитной формацией. С гипербазитовыми интрузиями актовракского комплекса связана хромитовая и асбестовая минерализация (Чавашское), с гранитоидным магматизмом, формациями кварцитов и углеродистых сланцев – золото (Кара-Хем) и полиметаллы (Перевальное).

Представляющая практический интерес редкоземельно-редкометалльная минерализация, приуроченная к позднепалеозойским щелочным гранитам, пространственно размещается в районе Кандатской и Дербинской-Сорхойской (Восточно-Саянской) зон разломов. Редкоземельная минерализация здесь приурочена к пегматитовым жилам массивов щелочных пород. В этой же зоне в раннемезозойский этап активизации произошло формирование малых интрузий щелочного состава (окуневский комплекс) с характерной постмагматической альбитизацией и редкоземельной минерализацией (Арысканская и Соругская группы рудопроявлений, Арысканское месторождение).

Значительно шире на площади рудного узла проявлена молибденовая и медная минерализация, также отмечаются проявления вольфрам-оловянного оруденения. К югу от Кандатского разлома преобладают рудопроявления и точки минерализации, где молибденит развит в ассоциации с пиритом среди зон окварцованных, альбитизированных и грейзенизированных пород (Дытойское, Кижихемское, Даш-Хемское, Кадыр-Осское, Казасское и др.). Севернее зоны

Кандатского разлома с повышением кислотности гранитоидов и увеличением их многофазности постепенно усложняется и минеральный состав руд: от вольфрам - молибденового (Северное) через олово-висмут-вольфрам-молибденовый до флюорит-редкометального с молибденом (Радуга, Звериное).

Порфировое и эпитегрмальное [Kuzhuget et al., 2023] оруденение с Au-Mo-Cu, Au-Ag и Mo-Cu минерализацией локализуется в северной части рудного узла вблизи стыка структур Кандатского разлома и Даштыгойского грабена и связано, главным образом, с дифференцированными гранитоидными интрузиями аксугского комплекса (Ак-Суг, Холош, Даштыг, Биче-Кадыр-Ос).

## ГЛАВА 2. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ АК-СУГСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

В геологическом строении Ак-Сугского месторождения принимают участие преимущественно породы одноименного интрузивного массива. На западе и с юга они обрамляются вулканогенно-осадочными отложениями девона (толтаковская свита). По долинам рек Ак-Суг и Даштыг-Ой, протекающим в районе месторождения, а также на выровненных склонах и водоразделах гор широко развиты рыхлые четвертичные отложения (Рис. 2.1-2.3).

Девонские отложения распространены на западе и в южной части Ак-Сугского месторождения. Они представлены красноцветными средне-крупнозернистыми вулканомиктовыми песчаниками с прослоями гравелитов, мелкогалечных конгломератов, потоками и горизонтами порфириров, литокристаллокластических туфов кислого состава. В южной части рудного поля на левобережье р. Даштыг-Ой породы имеют субширотное или запад-северо-западное простирание, крутое падение под углом  $70-85^\circ$  к югу и юго-западу. В западной части простирание пород изменяется к северо-западному до субмеридионального, сохраняя их крутое залегание под углом  $60-85^\circ$  к западу. Иногда наблюдается обратное падение пород под углом  $80^\circ$ , что, по-видимому, вызвано запрокинутым их залеганием вследствие влияния разрывной тектоники. В целом преобладает моноклиналиное залегание слоев с падением их к западу и юго-западу в направлении Ак-Сугского интрузивного массива. В этом же направлении происходит наращивание разреза девонских отложений, общая видимая мощность которых может быть оценена приблизительно в 1 600–1 800 м. Разрывными нарушениями породы девона рассечены на ряд блоков, вблизи границ которых отмечается резкое изменение направлений простирания и падения пород.

Возраст пород толтаковской свиты до настоящего времени является дискуссионным. Сопоставление его с красноцветными толщами в наложенных грабенах других районов Западного Саяна и Восточной Тувы показывает их сходство с породами нижнего-среднего девона Улугойского, Дерзигского грабенов, с девонскими отложениями Центральной Тувы, Минусинских впадин, в частности, с толтаковской свитой Минусинской впадины, по аналогии с которой она и выделяется.

Кайнозойские образования в пределах месторождения и его ближайших окрестностей пользуются широким распространением и представлены современными аллювиальными, делювиальными и позднечетвертичными ледниковыми и водно-ледниковыми отложениями, а также древней корой выветривания.

Древняя кора выветривания лежит в основании разреза кайнозойских отложений и развита в виде реликтов на серицитизированных и окварцованных плагиогранитах в основании склона на левобережье р. Ак-Суг. Ее мощность 0,1–1,4 м. Сверху кора прикрыта ледниковыми отложениями. Она представлена интенсивно обохренными светло-бурыми полусцементированными обломками гравия, гальки, дресвы, песка. В обломках преобладают диориты, кварцевые диориты и плагиогранит-порфиры, предположительно, аксугского комплекса, а также порфириты хамсаринской свиты. В свежих сколах крупных обломков обнаруживаются мелкие вкрапленники пирита и халькопирита. Цементом является ожелезненная супесь, на ее долю приходится около 20–30 % объема породы. Как в цементе, так и на поверхности обломков нередко наблюдаются бурые железистые охры и налеты медной зелени.

Состав коры выветривания свидетельствует о ее формировании в условиях аридного климата. Возраст коры условно считается палеогеновым по аналогии с подобными образованиями в Тувинской котловине и на Алтае.

Ледниковые и водно-ледниковые отложения широко развиты на водоразделах рек Ак-Суг – Чинге-Хем – Даштыг-Ой и в долине р. Ак-Суг ниже месторождения. Они представлены валунами и глыбами различной степени

окатанности, которые сцементированы рыхлым щебнисто-песчаным или суглинистым несортированным материалом.

Современные аллювиальные образования слагают поймы и низкие террасы рек Ак-Суг, Даштыг-Ой и Ингиш. Отложения пойм и террас имеют одинаковый состав и представлены песчано-гравийно-галечниковым материалом с большим количеством валунов. Состав галек разнообразен и в большинстве своем отражает петрографический состав пород района. Максимальная мощность аллювиальных отложений, установленная в долине р. Ак-Суг, составляет 16 м.

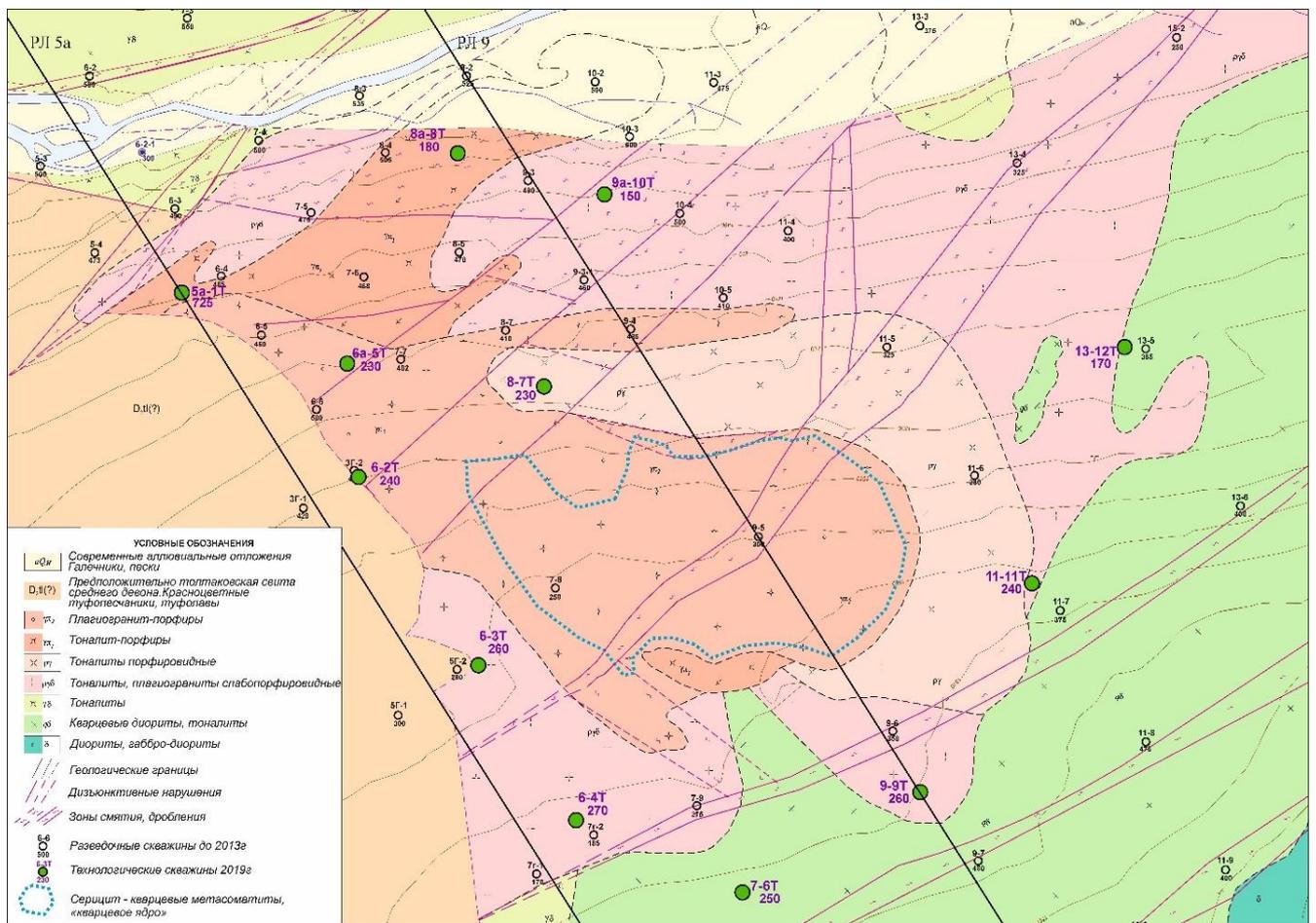


Рисунок 2.1. Геологическая карта месторождения Ак-Суг.

Черными линиями на карте показаны профили геологических разрезов по разведочным линиям 5а и 9 на рис. 2.2, 2.3 соответственно.

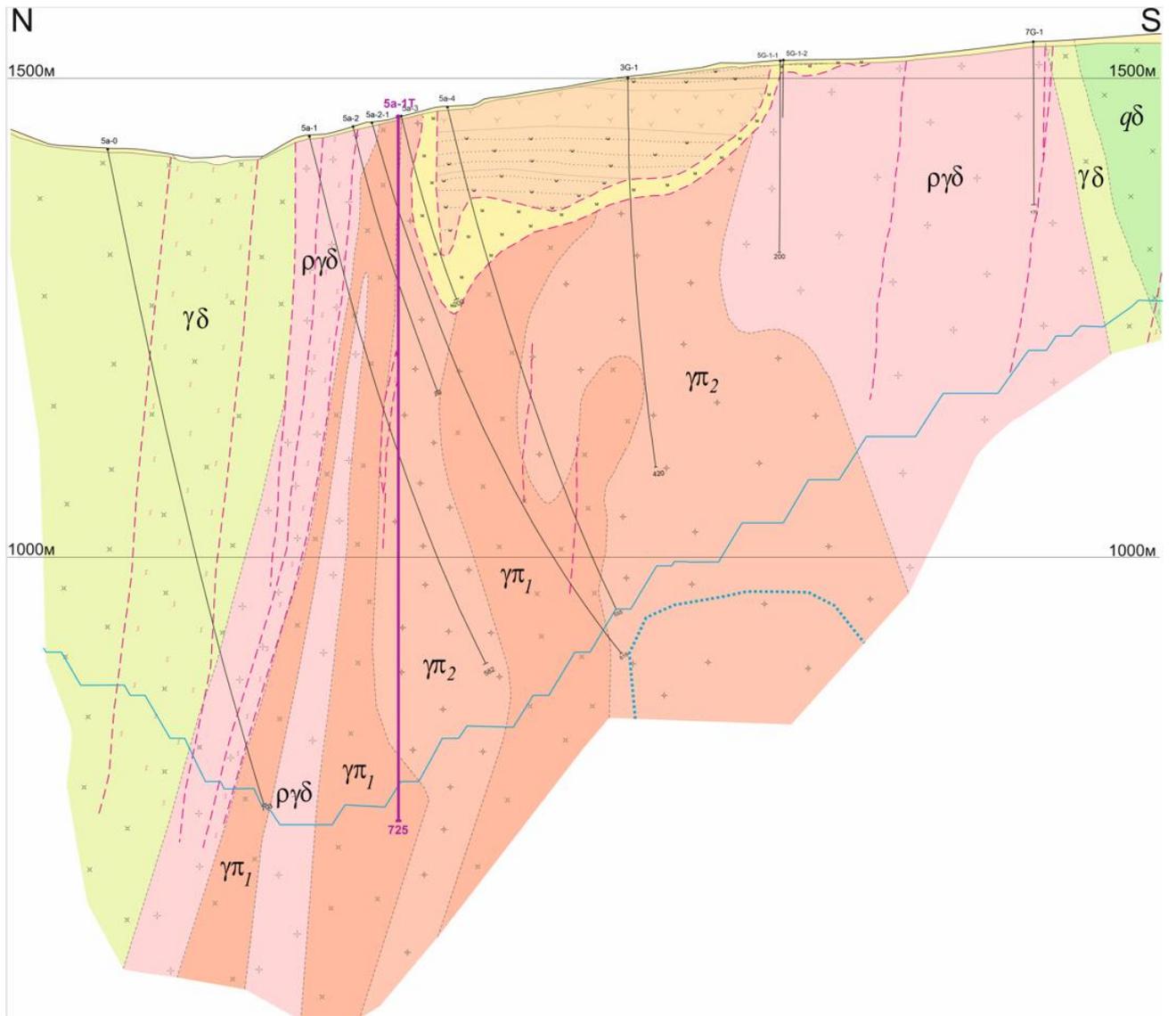


Рисунок 2.2. Геологический разрез месторождения Ак-Суг по разведочной линии 5а.

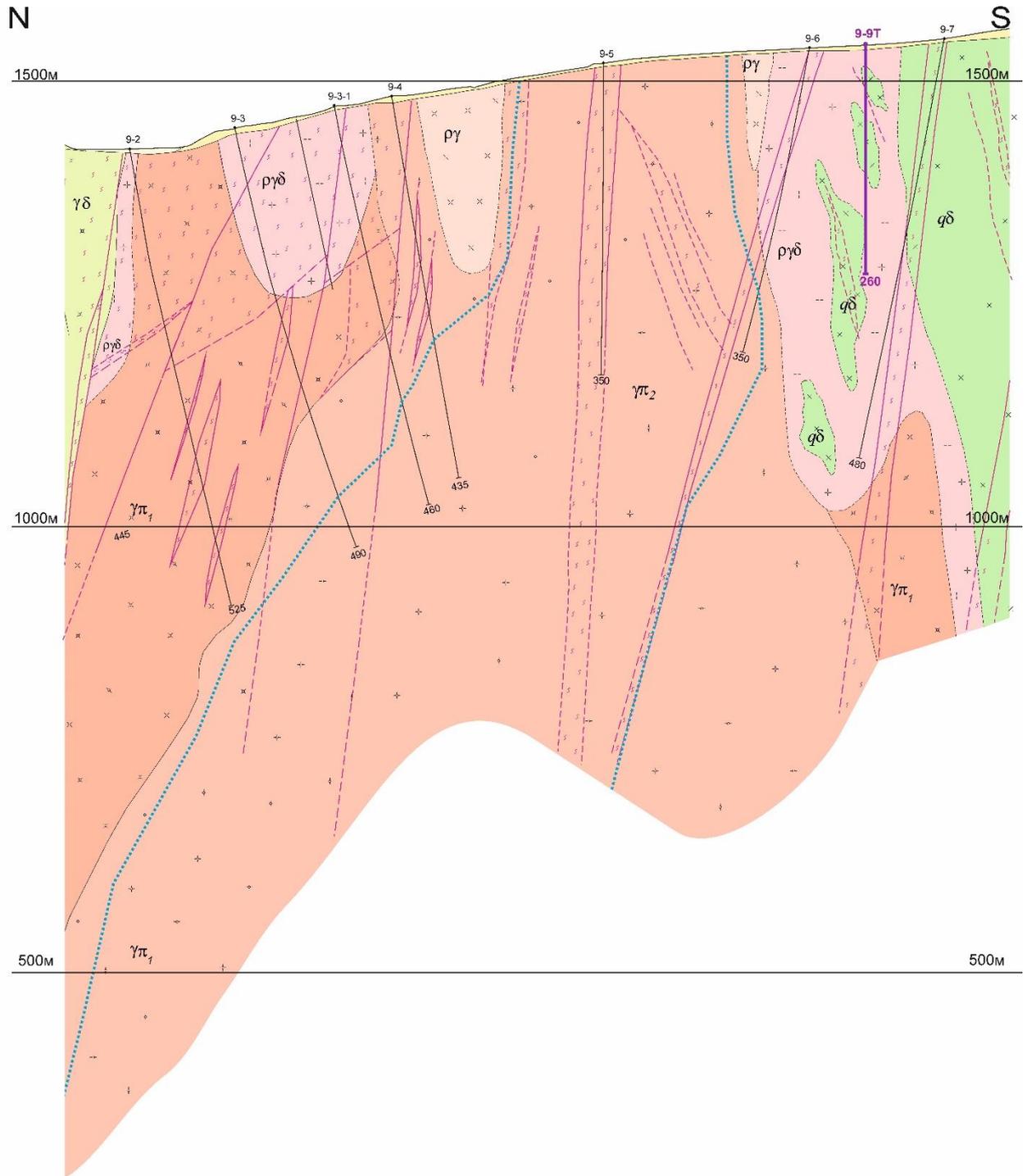


Рисунок 2.3. Геологический разрез месторождения Ак-Суг по разведочной линии 9. Условные обозначения для разрезов (Рис. 2.2, 2.3) приведены на рис. 2.1.

## 2.1. Характеристика вмещающих пород и рудных тел

### 2.1.1. Геологическое строение и рудоносность Ак-Сугского массива

Рудные залежи Ак-Сугского медно-порфирового месторождения находятся в пределах одноименного интрузивного массива, которое на современном эрозионном срезе имеет площадь около 3,5 км<sup>2</sup>. Интрузивное тело имеет клиновидную форму, ориентированную в северо-западном направлении. С севера оно ограничено зоной Кандатского глубинного разлома, на востоке и юго-востоке и юге также по зоне дробления контактирует с эффузивами хамсаринской свиты и гранодиоритами таннуольского комплекса. Западная граница – тектоническая с красноцветными отложениями девона. Интрузия имеет характерное зональное строение (Рис. 2.4), обусловленное последовательным внедрением трех магматических фаз, образующих ряд интрузивных пород от диоритов и габбро по южной периферии массива до тоналит-порфиров и плагиогранит-порфиров в его центральной части [Добрянский и др., 1992; Забелин, 1992; Монгуш А.Д. и др., 2013].

В составе массива выделяется три основные группы пород, соответствующие фазам его формирования. Первая фаза аксугского комплекса преимущественно представлена диоритами, кварцевыми диоритами, ограниченно – тоналитами и габбро; вторая – тоналитами (иногда порфировидными), плагиогранитами; породы третьей фазы, локализованные в самом центре интрузивного массива, представлены двумя магматическими разновидностями порфиров, выделенных на основании их монопородности, структурно-текстурных особенностей и специфических фациальных условий их становления [Петрографический кодекс России, 2008]. Первая разновидность представлена более ранними «мелковкрапленными» тоналит-порфирами (порфиры-I). Вторая, более поздняя, представлена «крупновкрапленными» плагиогранит-порфирами (порфиры-II).



Рисунок 2.4. Геологическая карта месторождения Ак-Суг с проекцией рудных залежей на дневную поверхность.

В таблице приведены геологические запасы и содержания главных рудных компонентов по состоянию на 01.01.2020.

Помимо трех основных фаз аксугского комплекса широкое распространение получили дайковые образования, сопровождающие основные этапы становления Аксугского массива. Их следует разделить на дорудные, синрудные – предшествующие и сопровождающие основные этапы рудообразования месторождения Ак-Суг, а также на пострудные образования, являющиеся более поздними по отношению к продуктивным фазам магматизма. Дорудные и синрудные дайки представлены плагิโอгранит-порфирами, гранитами (в т.ч. аплитовидными), гранодиоритами. Пострудные дайки представлены разнообразными порфиритами: диоритовыми, диабазовыми, андезитовыми.

С порфирами ранней генерации третьей фазы аксутского комплекса связано формирование основной массы Au-Mo-Cu-порфирового оруденения. Поздняя генерация порфиров была значительно менее продуктивной на медную минерализацию и сопровождалась интенсивным окварцеванием, что привело к образованию в центральной части месторождения «кварцевого ядра». Несмотря на это, с внедрением плагиогранит-порфиров третьей фазы аксутского комплекса связано развитие Cu-Mo минерализации, хоть и в подчиненном относительно предшествующей разности порфиров количестве. Являясь стержневым элементом медно-порфировых систем, порфировые тела своей морфологией во многом определяют форму первичных рудных залежей. Это установлено в результате многочисленных исследований [Кривцов и др., 2010; Попов, 1977; Gustafson et al., 1975; Sillitoe et al., 2010, 2020; Lowell et al., 1970], в том числе на месторождениях-гигантах, обрабатываемых карьерами (Chuquicamata, Bingham Canyon, Grasberg, Los Pelambres, Escondida и др.), где имеется возможность визуального наблюдения геологических взаимоотношений на больших вскрытых горными выработками участках.

На месторождении Ак-Суг стержневым элементом строения являются интрузивные образования третьей фазы: ранние – тоналит-порфиры и поздние – плагиогранит-порфиры.

Тело ранних порфиров в пределах Северной рудной залежи с глубиной значительно увеличивается по площади, при этом его неправильная штокообразная форма (300 x 400 м вблизи поверхности) постепенно трансформируется в дайкообразную, вытягиваясь в субширотном направлении. Оно имеет крутое северное падение и, судя по увеличивающемуся сечению его западной части и геофизическим данным, склоняется на запад (см. Рис. 2.1, 2.2). Западная часть тела осложнена дайкообразными апофизами юго-восточного простирания. Кроме того, бурением вскрыто несколько пересечений ранних порфиров вблизи контакта с девонскими красноцветными отложениями, которые в целом образуют тренд юго-восточного направления, согласно простиранию Челдезрикского разлома. В пределах Южной рудной залежи размеры сечения

выходящего на поверхность небольшого штока ранних порфиров (30 x 120 м) с глубиной меняются несущественно, что связано с его субвертикальной неправильной цилиндрической морфологией.

Поздние порфиры занимают центральную часть Аксугского массива, в промежутке между северной и юго-западной ветвями ранних порфиров, разделяя северное дайкообразное и южное штокообразное тела ранних порфиров. На поверхности тело плагиогранит-порфиров имеет овальную форму, вытянутую в субширотном направлении (250 x 650 м), с апофизой (50 x 300 м) того же направления. С глубиной оно становится более монолитным, его размеры несколько увеличиваются, на нижних горизонтах появляются заливообразные участки интродирования ранних порфиров поздними (см. Рис. 2.1, 2.3).

### **2.1.2. Геолого-структурный контроль оруденения**

Основным фактором, определяющим структурную локализацию месторождения Ак-Суг, является его структурное положение в месте сочленения субширотной зоны Аксугского разлома с оперяющим по отношению к нему северо-западным Челдезрикским разломом (Рис. 2.4).

Аксугский разлом является составной частью регионального Кандатского глубинного разлома, разделяющего два крупных структурно-тектонических блока: Кизир-Казырскую и Восточно-Тувинскую складчатые системы. Ширина шовной приразломной зоны, часто проявленной тектонически нарушенными породами, достигает порядка 1 км. Схожую позицию имеет и другое порфировое месторождение в Восточно-Тувинской СС, локализованное в породах полифазного Ожинского плутона – Кызык-Чадрское, что лишний раз подтверждает, что положение вблизи крупного долгоживущего разлома глубокого заложения является одной из главных региональных предпосылок для формирования рудоносной порфировой системы [Гусев и др., 2014; Кривцов и др., 2010; Попов и др., 1988; Sillitoe, 2010; Richards, 2003; Mpodozis et al., 2012].



Рисунок 2.4. Геологическая схема района Ак-Сугского месторождения.

Схема составлена по данным [Pollard et al., 2017] с изменениями автора.

В пределах зоны влияния протяженного крупного разлома становление порфирового комплекса определяется локальными участками растяжения [Sillitoe, 2000], возникающими в местах его осложнения, причиной которых могут являться секущие или оперяющие его структуры, которыми в случае Аксугского массива являются северо-западные разрывные нарушения системы Челдезрикского разлома.

Подчиненное значение структурного контроля оруденения отводится системам тектонических нарушений северо-восточного направления. Данные системы являются более поздними по отношению к превалирующему северо-западному направлению, что сопровождается более низкотемпературными минеральными ассоциациями и наложенной редкоземельной минерализацией [Шадчин, 2021].

Именно взаимодействие двух главных структурных элементов (Аксугского и Челдезрикского разломов) на протяжении всей истории формирования месторождения Ак-Суг определило его геологический облик. В узле их сочленения сформировался Аксугский зональный интрузивный массив, с последней порфировой фазой которого пространственно-парагенетически связано

Au-Mo-Cu-оруденение. В ее составе выделяются два типа порфиров: ранние тоналит-порфиры I и поздние плагиогранит-порфиры II. С порфирами ранней генерации связано формирование основной массы оруденения, поздняя генерация является менее продуктивной. Сходная ситуация отмечается и на ряде других Mo-Cu-порфировых месторождениях, при этом поздняя порфировая фаза нередко образует в центре месторождения участок с низкими или некондиционными содержаниями полезных компонентов [Sillitoe, 2000, 2010; Lowell et al., 1970], который на Ак-Сугском месторождении получил название «кварцевого ядра».

Уже на начальном этапе формирования месторождения ведущая роль Аксугского разлома выражается широтно-вытянутой дайкообразной морфологией главного тела ранних тоналит-порфиров (Рис. 2.5). Крутое северное падение этого тела в дальнейшем, на гидротермальном этапе формирования месторождения, сыграло определяющую роль в локализации наиболее богатого оруденения, которое находится в его висячем эндо- и экзоконтакте. В западной части месторождения, на границе с красноцветными девонскими отложениями, в скважинах также установлено несколько пересечений тоналит-порфиров, которые в комплексе образуют тренд юго-восточного направления, согласно простиранию Челдезрикского разлома. В плане генерализованный контур ранних тоналит-порфиров имеет V-образную форму острием на запад. Поздние плагиогранит-порфиры занимают центральную часть Аксугского массива, в промежутке между северной и юго-западной ветвями ранних порфиров.

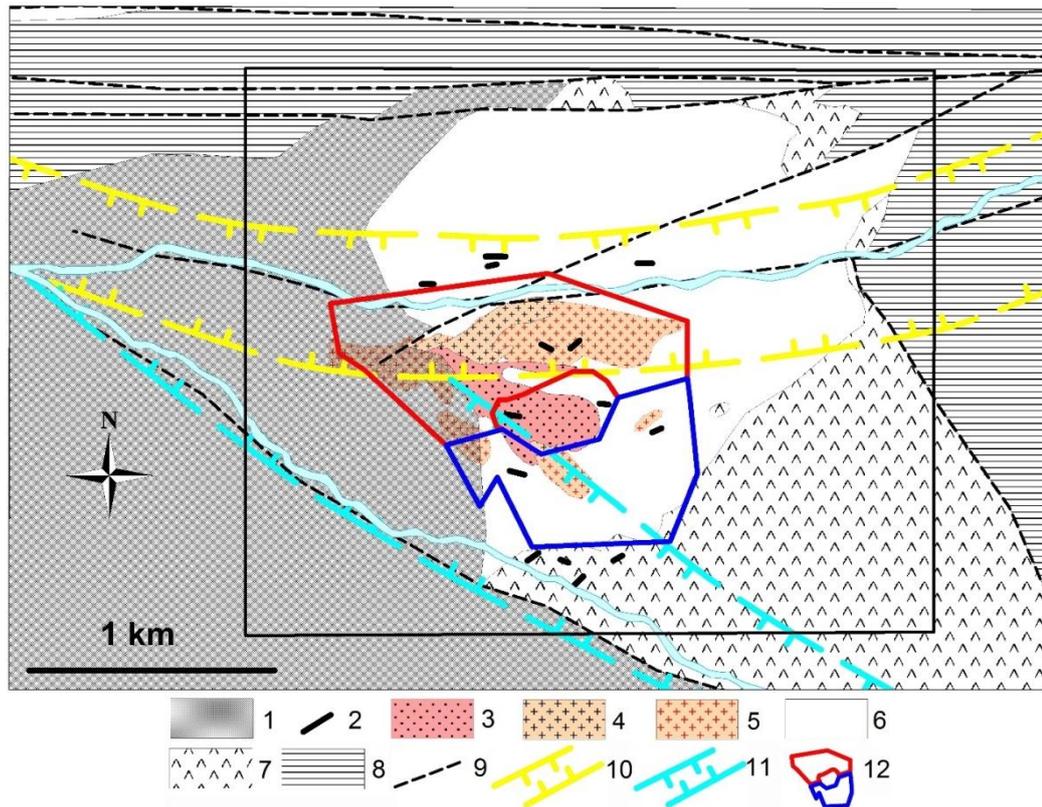


Рисунок 2.5. Структурная схема района Ак-Сугского месторождения.

Условные обозначения: 1 – девонские красноцветные туфогенно-осадочные отложения; 2 – дайки (вне масштаба, без разделения); 3-6 – аксугский комплекс: 3 – плагиогранит-порфиры (порфиры II), 4 и 5 – тоналит-порфиры (порфиры I) 3-й фазы (4 – установленные на поверхности, 5 – по данным бурения); 6 – порфиroidные тоналиты, плагиограниты, диориты, тоналиты, кварцевые диориты 2-й и 1-й фазы объединенные; 7 – габбро-диориты, диориты 1-я фаза; 8 – нижнекембрийские вулканогенно-осадочные отложения хамсаринской свиты; 9 – разломы; 10 – границы главной субширотной рудоконтролирующей тектонической зоны (система Аксугского разлома); 11 – границы зоны оперяющего разлома СЗ направления (система Челдезрикского разлома); 12 – контуры проекции на поверхность границ рудных залежей (красным – Северной, синим – Южной). Черный прямоугольник-контур рис. 2.4.

Аксугский разлом с оперяющими его разрывными нарушениями и широко развитыми зонами трещиноватости являлся главной структурой, контролировавшей не только пространственное положение интрузий второй и третьей фаз аксугского комплекса, но и пути миграции рудоносных флюидов и, в конечном итоге, распределение и локализацию оруденения. Весьма схожая ситуация с ярко проявленной ведущей рудоконтролирующей ролью зоны

крупного разлома наблюдается в ряде районов с крупнейшими порфировыми месторождениями (Oyu Tolgoi, Pebble, Andina-Los Bronces, Cadia). Но особенно наглядно она проявлена на севере Чили, в крупнейшем в мире по концентрации меди кластере Chuquicamata, где зона крупного разлома (West Fault) на протяжении 13 км контролирует положение нескольких месторождений (Chuquicamata, Chuquicamata Norte, Radomiro Tomic, Mina Sur) с суммарными запасами около 84 млн т. меди; рудная залежь самого крупного в этой группе месторождения Chuquicamata имеет ярко выраженную линейную морфологию – при ширине 600–800 м она протягивается более чем на 3 200 м [Ossandon et al., 2001; Rivera et al., 2012].

Зона Аксугского разлома представлена субширотной крутопадающей на север полосой хрупко-пластичных деформаций шириной до 1 000 метров, выраженной интенсивно трещиноватыми, рассланцеванными, местами брекчированными породами, по которой развивается долина р. Ак-Суг (см. Рис. 2.1-2.3). В пределах зоны разлома ориентировка трещин, зон дробления и рассланцевания самая различная, при этом наибольшая их густота (плотность) отмечается в пределах Северной залежи. В южном направлении интенсивность трещиноватости заметно падает, и к югу от «кварцевого ядра» она уже в 2-3 раза меньше. Такая неоднородность, естественно, сказалась и на пространственном распределении продуктов гидротермальной деятельности, выразившемся в минералого-геохимической зональности месторождения Ак-Суг, которая обладает многими типичными для месторождений этого типа чертами, но при этом имеет свою специфику.

### **2.1.3. Петрографическая и петрохимическая характеристика интрузивных пород**

При описании интрузивного магматизма и пород соответствующих фаз Ак-Сугской интрузии, за основу информации о стадийности автором использовались данные [Забелин, 1992] с которой коррелировались петрографические

наблюдения.

Породы первой интрузивной фазы занимают около 70 % площади Аксугского массива и слагают его северную, восточную и юго-восточную части. Тоналиты, кварцевые диориты расположены в северной части массива. Юг массива сложен средне-основными (от габбро до кварцевых диоритов) породами. Более основные разности пород тяготеют к периферии массива.

Габбро среди пород первой фазы распространены незначительно – не более 1–3 % площади всего массива. Они образуют несколько тел овальной формы в поле распространения диоритов. Размеры тел не превышают 100–200 м по длинной оси. Отмечаются ксенолиты габбро в диоритах, иногда наблюдались непосредственные контакты габбро с кварцевыми диоритами. Обычно габбро представлены серо-зелеными массивными равномернозернистыми крупно и среднезернистыми разностями. Их состав: плагиоклаз – 50–60 %, клинопироксен – 40–45 %, биотит – 5–7 %, роговая обманка – 1–3 %, акцессорные – 2 % (апатит, магнетит, сфен), отмечается кварц. Микроструктура габбровая, офитовая.

Среди пород первой фазы около 45 % объема приходится на диориты. Они имеют диоритовую мелко-среднезернистую структуру (плагиоклаз отчетливо идиоморфен по отношению к темноцветам). Состав породы: плагиоклаз 55–70 %, роговая обманка 15–30 %, биотит 1–15 %, кварц до 5 %, акцессорные минералы – магнетит до 7 %, апатит, сфен 1–2 %. Диориты в большинстве своем затронуты метасоматическими изменениями в виде серицитизации, хлоритизации, реже эпидотизации и альбитизации.

Тела кварцевых диоритов имеют северо-восточное и юго-восточное распространение, тяготея к центральной части массива. Представлены они роговообманковой разновидностью (Рис. 2.6). Структура породы призматическизернистая, участками гипидиоморфнозернистая. Текстура однородная. Состав: плагиоклаз 60–70 %, роговая обманка 15–30 %, биотит 5–10 %, кварц 8–12 %, акцессорные минералы (магнетит, апатит, циркон) – 1–2 %. Порода слабо катаклазирована и сечется тонкими (0,05–0,15 мм) безрудными прожилками кварцевого, эпидот-кварцевого, эпидотового и карбонатного состава.

Прожилки карбонатного состава являются наиболее поздними по времени образования по сравнению с остальными. Акцессорные минералы представлены преимущественно апатитом с мелкими (до 0,1 мм) идиоморфными призматическими кристаллами, приуроченными к скоплениям темноцветов. Содержание апатита в шлифе около 0,5%. Спорадически отмечаются единичные зерна циркона и титанита размерами до 0,2 мм.

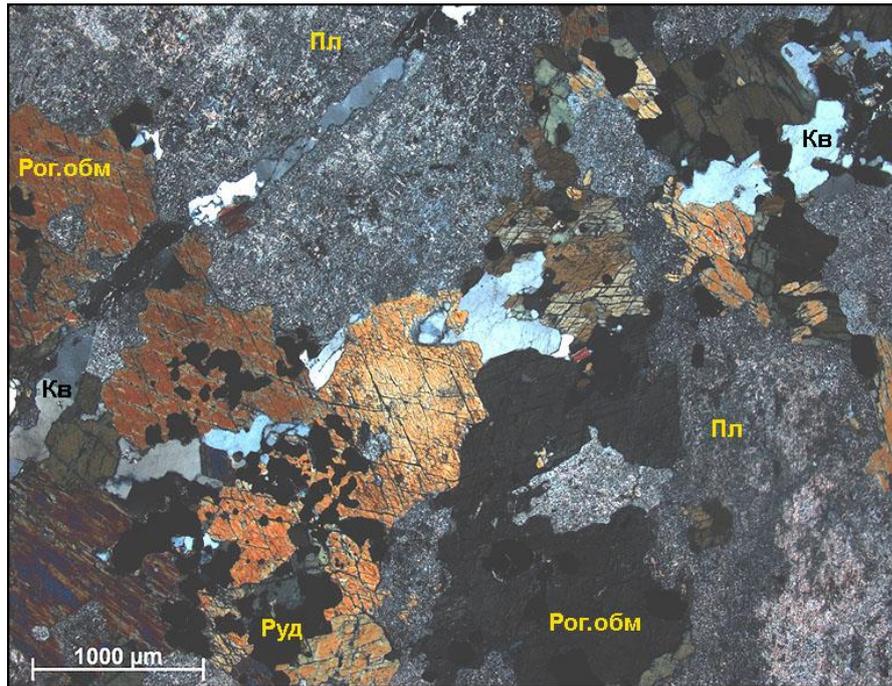


Рисунок 2.6. Кварцевый диорит (обр. 7-11/16,0; ник. +).

Структура гипидиоморфнозернистая – диоритовая. Порода сложена субизометричными и призматическими зернами роговой обманки (Рог.обм) и серицитизированного плагиоклаза (Пл), при подчиненной роли ксеноморфных индивидов кварца (Кв). Встречаются рудные минералы (Руд).

Тоналиты первой фазы (Рис. 2.7) развиты в северной части массива. Породы в большинстве своем катаклазированные и интенсивно метасоматически измененные, что, вероятно, связано с непосредственной близостью к Кандатскому разлому. В более катаклазированных разностях тоналитов отмечается цементирующая масса, сложенная тонкочешуйчатыми агрегатами серицита, образовавшимися по исходным зернам плагиоклаза. Иногда в них отмечаются

скопления ярких чешуек серицито-мусковита. Рудная минерализация представлена слабо, неравномерно, в виде вкрапленных мелких зерен. Метасоматические изменения выразились в интенсивной эпидотизации, незначительном окварцевании и карбонатизации. Структура породы катакластическая, лепидобластовая, текстура от однородной до сланцеватой. Состав: плагиоклаз 60–65 %, кварц 20–25 %, псевдоморфозы по темноцветным минералам 10–15 %, рудные минералы до 5 %, вторичные минералы – серицит, хлорит, эпидот, кальцит.

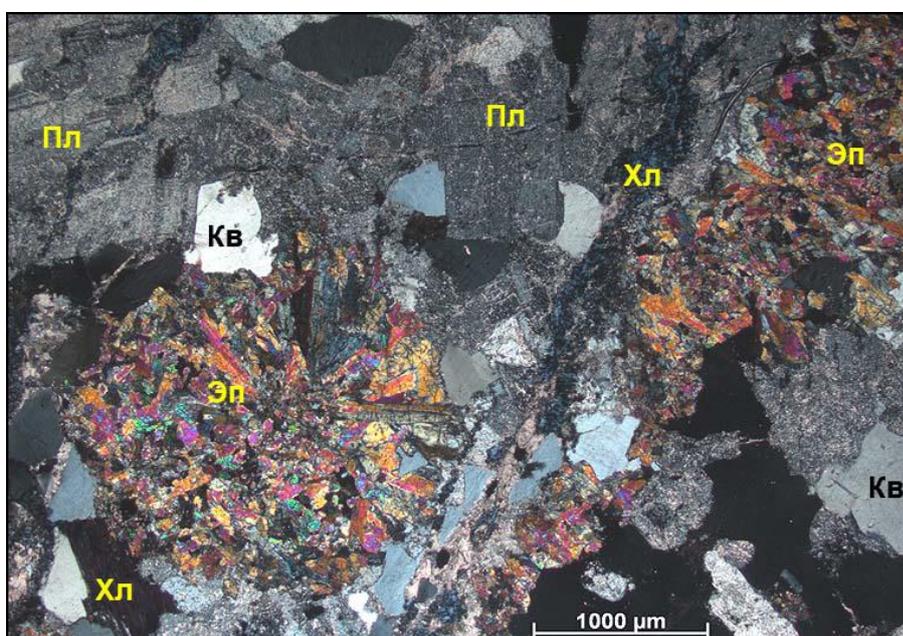


Рисунок 2.7. Метасоматически измененный тоналит (обр. 11-0/198,3; ник. +).

Порода сложена преимущественно таблитчатыми зернами плагиоклаза (Пл) при подчиненной роли ксеноморфного кварца (Кв). Отмечается эпидотизация (Эп) и хлоритизация (Хл) в виде наложенных агрегатов.

Интрузивные породы II и III фазы аксугского комплекса совместно слагают вытянутое в северо-восточном направлении тело в центральной части массива. В северном контакте тело имеет крутое падение на север, в южном контакте – крутое южное. Тело сложено преимущественно порфировидными средне-мелкозернистыми тоналитами и плагиогранитами. В западной части тела отмечается интенсивная милонитизация пород, появляются тонкозернистые разновидности с выраженной сланцеватой текстурой и бластопорфировой

структурой. Общая особенность пород – наличие порфиroidных вкрапленников, а также высокая степень гидротермальных и метаморфических изменений – породы меняются от фации аргиллизитов до серицит-кварцевых метасоматитов и от катаклизитов к милонитам.

Тоналиты второй фазы имеют массивную, иногда порфиroidное строение, структура породы гипидиоморфозернистая, гранитовая (плагиоклаз обладает высоким идиоморфизмом по отношению к темноцветной массе). Минеральный состав их относительно прост и выдержан: плагиоклаз, роговая обманка и биотит, кварц, магнетит, апатит, сфен.

Плагиограниты второй фазы аксугского комплекса имеют массивную текстуру и в основном гипидиоморфнозернистую структуру. Реже встречается бластопорфиroidная структура (Рис. 2.8). Состав: плагиоклаз 55–65 %, кварц 25–30 % и псевдоморфозы хлорита по темноцветным минералам 5–10 %. Плагиоклаз наблюдается в виде слабо вытянутых зерен, в разной степени серицитизированных. Кварц отмечается в двух генерациях. Первая представлена крупными ксеноморфными резорбированными зернами (Рис. 2.9), вторая наблюдается в виде мелких ксеноморфных зерен, заполняющих пространство между крупными зернами плагиоклаза и кварца первой генерации. Темноцветные минералы замещены агрегатом бледно-зеленого хлорита и гематита. Отмечается сфен с размерами зерен до 2 мм.

Плагиограниты второй фазы, тяготеющие к центральной части массива в большинстве своем преобразованы процессами дислокационного метаморфизма и представлены милонитизированными и катаклизированными порфиroidными и слабопорфиroidными разновидностями. Структура породы порфирокластовая, переходящая в милонитовую; структура цементирующей массы катакластовая и лепидобластовая, текстура сланцеватая. В неизмененных участках структура породы порфиroidная, основная масса – аллотриоморфнозернистая, сложена преимущественно зернами кварца субизометричной формы размерами 0,04–0,12 мм. Состав исходной породы: плагиоклаз 60–65 %, кварц 20–30 %, калиевый полевой шпат (КПШ) до 5 %, мусковит – первые проценты.

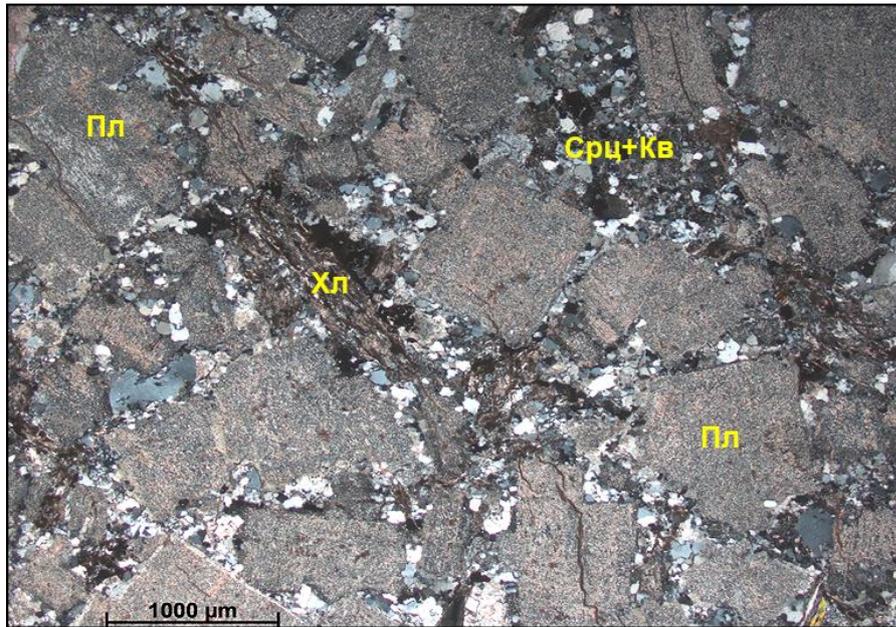


Рисунок 2.8. Метаплагиогранит (обр. 9а-4/102,8; ник. +).

Порода сложена преимущественно порфировидными зернами серицитизированного плагиоклаза (Пл), промежутки между которыми выполнены микрозернистыми агрегатами серицит-кварцевого состава (Срц + Кв). Отмечаются псевдоморфозы хлорита (Хл) по темноцветам.

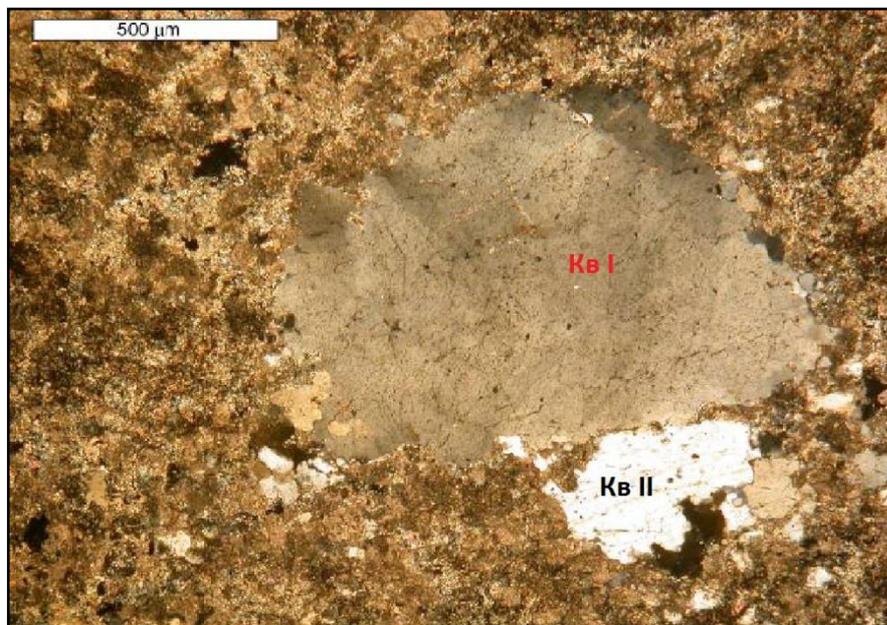


Рисунок 2.9. Окварцованный, серицитизированный и карбонатизированный порфировидный плагиогранит (обр. 7-8/208,1; ник. +).

Резорбированный вкрапленник кварца (Кв I) со следами деформации в прерывистой кайме карбонатов и кварц второй генерации (Кв II). Основная масса серицитизирована и окварцована с бласто-гипидиоморфнозернистой и лепидогранобластовой структурой.

Акцессорные минералы представлены немногочисленными зернами апатита и циркона размерами менее 0,15 мм. Порфиroidные выделения плагиоклаза интенсивно серицитизированы, в зернах просвечивают реликты полисинтетических и простых двойников. Размеры полевых шпатов в среднем составляют от 1,4 до 2,6 мм при максимальном значении до 5,6 мм. Наибольшие метасоматические изменения (серицитизация и карбонатизация) проявлены в центральных частях зерен, по периферии фиксируются тонкие чистые зонки (0,01–0,02 мм) новообразованного альбита. Зерна плагиоклаза редко подвергаются альбитизации полностью. Калиевые полевые шпаты отмечаются в пределах первых процентов и наблюдаются в виде широкотаблитчатых зерен, которые пелитизированы, реже сосюритизированы и карбонатизированы. В зернах с развивающейся карбонатизацией отмечается микроклиноватая решетка. В зонах катаклаза вдоль трещин фиксируется развитие мелкочешуйчатого мусковита с размером чешуек до 0,2 мм. К мусковиту приурочено выделение рудного вещества в виде кристалликов кубической формы размером до 0,03 мм, пятен, сгустков, сыпи. Отдельные ксенобластовые выделения рудных минералов достигают 0,3 мм, вытягиваясь субпараллельно трещиноватости в породе.

К завершающей фазе формирования Аксугского массива отнесено штокообразное сложно построенное тело порфиров в центре массива, с которыми тесно в пространстве и времени связано образование основной части оруденения. Четко обособляется и уверенно диагностируется два типа порфиров, различающихся по составу и структурно-текстурным особенностям.

Порфиры первого типа (порфиры-I) – более ранние, по составу соответствуют кварц-плагиоклазовым тоналит (гранодиорит) – порфирам (Рис. 2.10). Они слагают тело неправильной формы (500 x 300 м) на западном фланге Аксугского массива в зоне его контакта с вулканогенно-осадочными

отложениями толтаковской свиты. Контакты тела крутые, с преимущественным падением на север. С вмещающими породами этот шток средне-мелкозернистых тоналит-порфиров имеет четкий интрузивный контакт. Для порфиров характерно неоднородное внутреннее строение, обусловленное различным соотношением порфировых выделений и основной массы, вариациями размера фенокристаллов. Структура породы порфировидная с порфировидно-криптоаплитовой, микрогранитовой основной массой. Состав породы представлен плагиоклазом 45–50 %, кварцем 20–25 %, КПШ 10–15 %, роговой обманкой и биотитом – 7–15 %, акцессорные минералы – единичные зерна сфена. Порфировидные вкрапленники представлены плагиоклазом и кварцем и составляют до 70–75 % от объема породы. Вторичные минералы представлены хлоритом, эпидотом, клиноцоизитом, кальцитом, серицитом и соссюритом, альбитом.

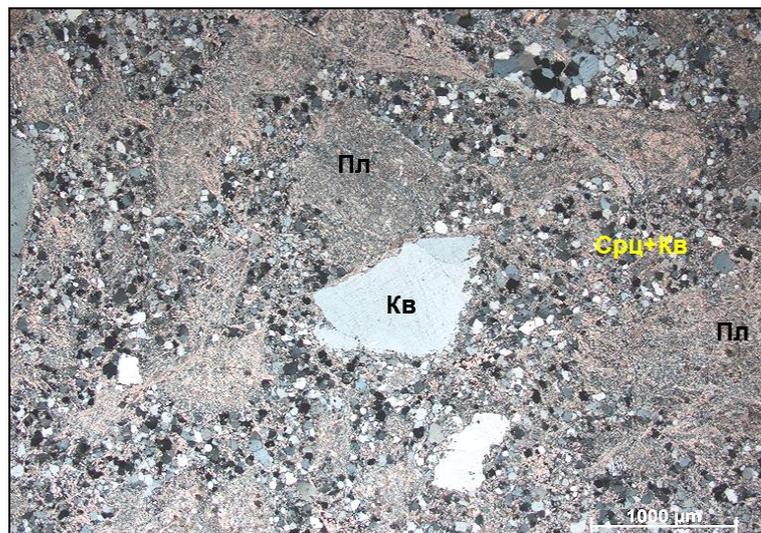


Рисунок 2.10. Катаклазированный тоналит-порфир (обр. 5а-4/165,5; ник. +)

Порфировидные вкрапленники сложены преимущественно плагиоклазом (Пл), замещенным серицитом и реже кварцем (Кв). Основная мелкозернистая масса сложена кварцем и серицитом (Срц + Кв).

Порода интенсивно окварцована и карбонатизирована по трещинам. Вторичный кварц и карбонат в виде мелкозернистого агрегата с размерами зерен от 0,05 до 1 мм выполняют гидротермальные прожилки, мощностью от 0,1 до 2

мм. Кварц и карбонат в составе таких прожилков присутствуют в различных соотношениях даже в пределах одного прожилка. Иногда в составе прожилков отмечается убогая сульфидная минерализация в виде единичных зерен с размерами до 0,2 мм. Также стоит отметить, что порода сечется более поздними безрудными прожилками карбонатного состава мощностью 0,01-0,2 мм.

Порфиры второго типа (порфиры-II) – более поздние, по составу соответствующие плагиогранит-порфирам – монцогранит-порфирам. Породы слагают тело неправильной формы в центральной части Ак-Сугского интрузивного массива. Основная масса породы с хорошо различимыми зернами кварца, КПШ и плагиоклаза размером от 0,2 до 0,3 мм слагает от 40 до 60 % породы. Кварц, составляющий 50–55 % основной массы, совместно с калишпатом (30–40 %) образует аплитовую структуру породы, а в некоторых участках в сочетании со значительным количеством плагиоклаза – гипидиоморфнозернистую. В наименее измененных разностях этих порфиров отчетливо проявлена порфировая структура, обусловленная наличием изометричных фенокристаллов кварца размером от 1 до 3 мм, коротко призматических индивидов и сростков плагиоклаза до 3 мм, а также роговой обманки, нацело замещенной хлоритом и рудным веществом.

Степень изменения обоих порфиров одинакова, но в ранних она более соответствует фации серицит-кварцевых (ангидрит-кварц-серицитовых) метасоматитов (Рис. 2.11), в поздних – кварцевых метасоматитов (окварцевание) и аргиллизитов.

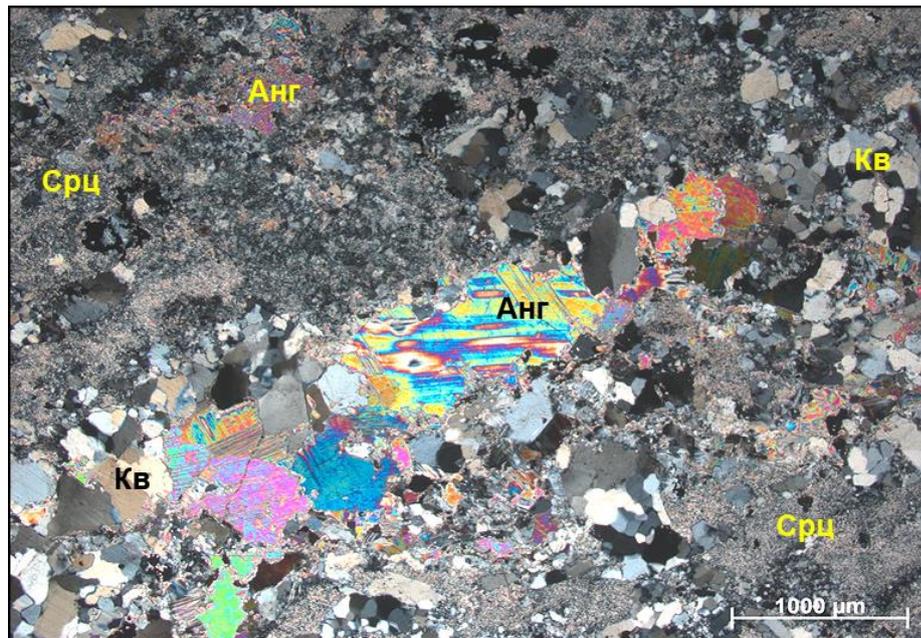


Рисунок 2.11. Ангидрит-кварц-серицитовый (Анг-Кв-Ср) метасоматит по плагиограниту (обр. 9а-2/277,4; ник. +).

Наблюдается секущая жилка, сложенная кварцем и ангидритом.

Акцессорные минералы представлены мелкими (менее 0,1 мм) изометричными и слабо удлинёнными цирконами, единичными мелкими кристаллами призматического апатита (менее 0,1 мм) и рудными минералами (преимущественно гематитом), иногда окруженными каймой лейкоксена, вероятно, возникшего за счет разложения темноцветных минералов. Иногда кристаллы апатита наблюдаются в виде шпирообразных скоплений по 5 - 20 кристаллов. В качестве аксессуара также возможно присутствие турмалина, наблюдаемого в тесной ассоциации с гематитом. Гематит наблюдается в виде мельчайших ксеноморфных выделений, в скрещенных николях, отчетливо просвечивающих красным.

Порода слабо карбонатизирована, вторичный карбонат (иногда в ассоциации с кварцем) слагает прожилки мощностью до 3 мм. Размеры зерен карбоната от 0,1 до 11 мм, содержание около 5 %. Вторичные карбонаты имеют резкую псевдоабсорбцию и слегка буроватую окраску без анализатора. Двойникование зерен не характерно. Также в составе кварц-карбонатных прожилков в незначительном количестве присутствует калиевый полевой шпат.

Кроме охарактеризованных двух разновидностей порфиров, слагающих крупные штоки в Аксугском интрузивном массиве и совокупно образующих 3-ю фазу аксугского комплекса, выявлены многочисленные дайки порфировидных пород. Наиболее часто дайки встречаются в северной части месторождения (в долине р. Ак-Суг), трассируя тем самым зону повышенной проницаемости и трещиноватости Ак-Сугского разлома. Наиболее яркой диагностической особенностью дорудных даек, связанных в той или иной мере с формированием Аксугской интрузивной серии, является обязательное присутствие вкрапленников кварца (независимо от основности пород). Все дайки, обладающие этой особенностью, как правило, в различной степени гидротермально изменены и несут вкрапленную и прожилковую минерализацию.

К пострудным отнесены дайки диоритовых, диабазовых и андезитовых бескварцевых порфиритов, отличающихся, кроме того, и структурными особенностями. Такие дайки в зоне тектонических нарушений бывают гидротермально изменены, но ни визуальными методами, ни в протолочках рудной минерализации не выявлено. Кроме того, аналитическими методами не обнаружено повышения геохимического фона типоморфных элементов.

Далее будут рассмотрены особенности вышеупомянутых интрузивных дайковых тел. Диорит-порфириты отмечаются диоритовой структурой, однородной текстурой (Рис. 2.12). Состав: плагиоклаз 55–60 %, роговая обманка 35–40 %, кварц до 10 %, вторичные минералы представлены серицитом, эпидотом, кальцитом и пелитовым веществом. Зерна плагиоклаза имеют призматическую форму размером от 1,5 до 2 мм, которые в значительной степени сосюритизированы. Минерал замещен агрегатами серицита с примесью эпидота, кальцита и пелитоморфного вещества. Роговая обманка представлена зернами призматической, ромбовидной, редко шестиугольной формы размером от 0,5 до 1 мм. Кварц отмечается в виде ксеноморфных выделений размером от 0,5 до 1 мм. Метасоматические изменения проявлены в виде эпидотизации и незначительной хлоритизации с образованием агрегативных скоплений и небольших прожилков.

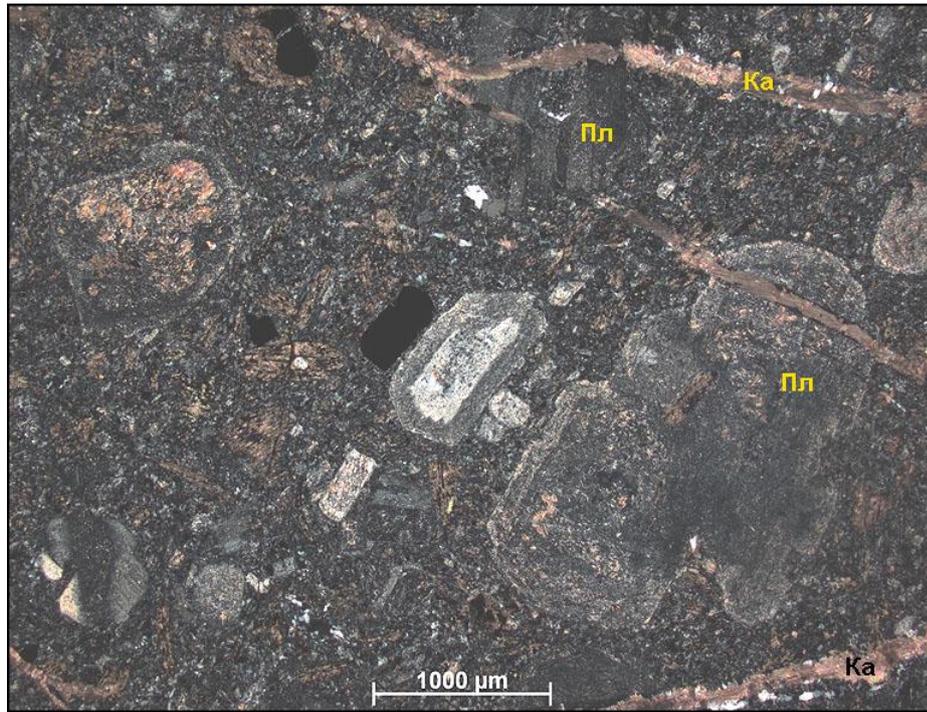


Рисунок 2.12. Диорит-порфирит (обр. 7-10/275,0).

Структура породы порфировая с тонкозернистой основной массой. Вкрапленники представлены зональными зернами серицитизированного плагиоклаза (Пл), в которых просвечивает двойниковая структура. Встречаются черные зерна магнетита. Трещинки, секущие породу, выполнены жилками кальцита (Ка).

Для габбро-долеритов характерна диабазовая структура, однородная текстура (Рис. 2.13). Порода сложена длиннопризматическими зернами плагиоклаза с размерами в длину от 0,5 до 1 мм. Они серицитизированы, альбитизированы и карбонатизированы. В них часто наблюдаются полисинтетические двойники. Интерстиции между зернами плагиоклаза выполнены агрегатами хлорита. Порода равномерно насыщена вкрапленностью многочисленных зерен лейкоксена, часто с сагенитовой решеткой. Форма зерен субизометричная, ромбовидная, трапецевидная, прямоугольная, часто неправильная.

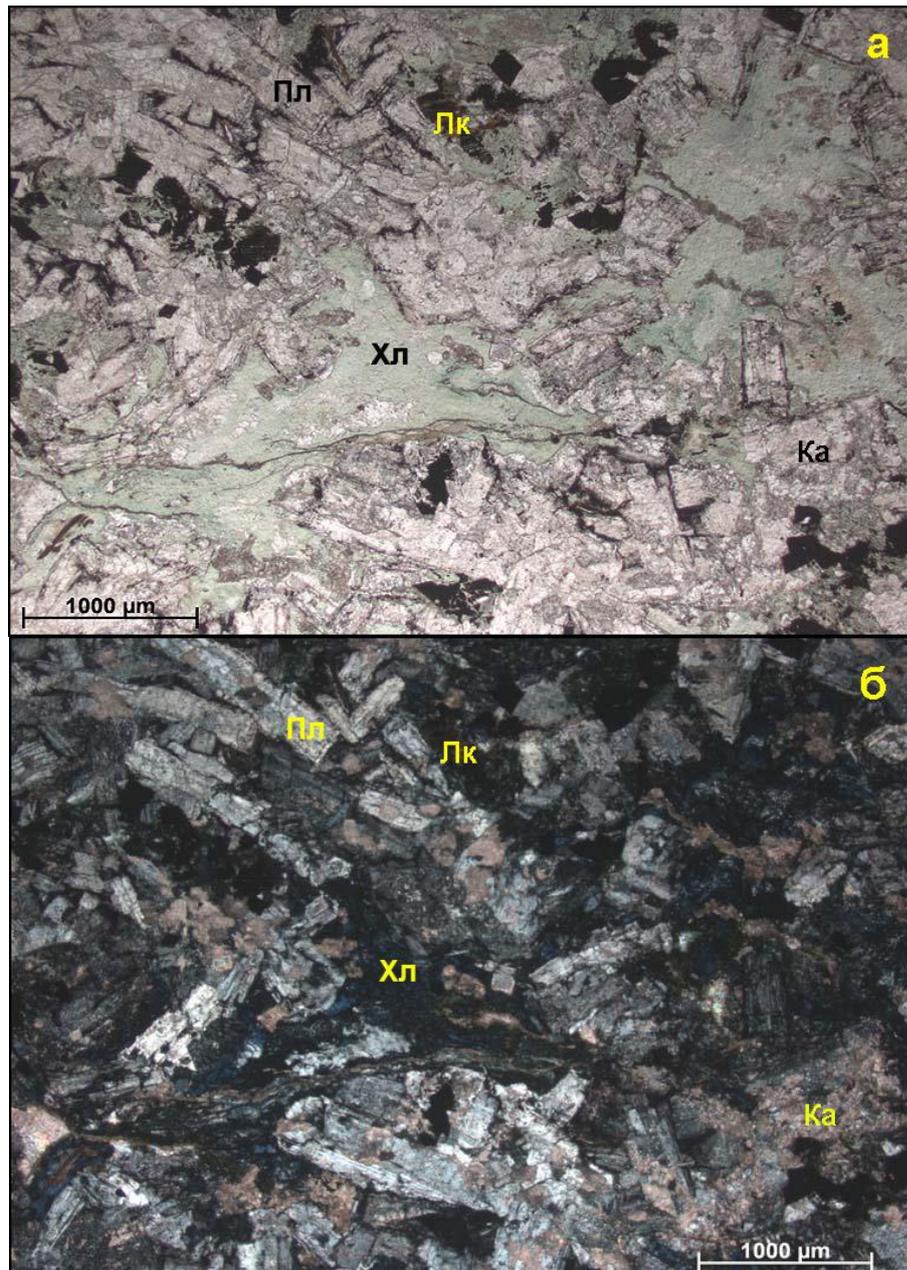


Рисунок 2.13. Габбро-долерит (обр. 11-3-1/141,8; ник.: а П, б +).

Порода сложена преимущественно длиннопризматическими измененными зернами плагиоклаза (Пл), интерстиции между которыми выполнены агрегатами хлорита (Хл) и кальцита (Ка).

Андезиты представлены породами с пилотакситовой основной массой (Рис. 2.14). Состав: порфировые вкрапленники плагиоклаза 15–20 %, основная масса 80–85 %. Порфировые вкрапленники представлены призматическими зернами плагиоклаза размером от 1,5 до 2 мм, которые в разной степени серицитизированы, хорошо видна структура двойникования. Основная масса сложена микролитами плагиоклаза и хлорит-кальцит-эпидотовым агрегатом,

образованным, очевидно, за счет вулканического стекла. Кальцит представлен тонкозернистыми агрегатами с перламутровыми цветами интерференции. Хлорит образует тонкочешуйчатые агрегаты зеленого цвета.

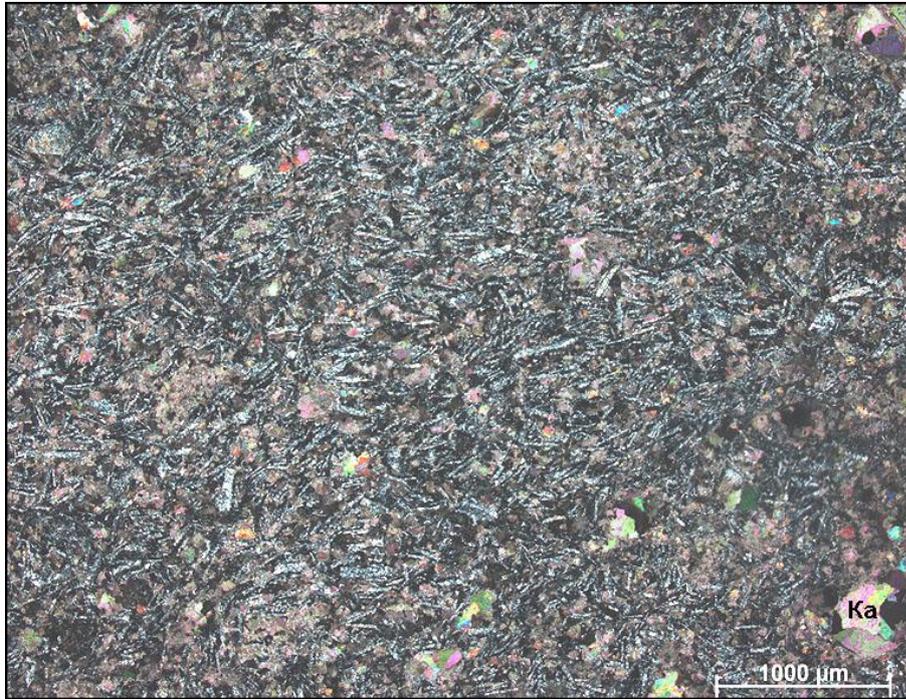


Рисунок 2.14. Метаандезит (обр. 6-4/265,5; ник. +).

Структура основной массы пилотакситовая, обусловленная субпараллельной ориентировкой микролитов сосюритизированного плагиоклаза. Интерстиции между микролитами плагиоклаза выполнены кристаллически зернистым кальцитом (Ka) и хлоритом.

Значимое место в развитии магматизма Ак-Сугского месторождения занимают породы, также относимые к дайковому комплексу, но представляющие собой калиевый микроритм дорудных и синрудных интрузивных тел – гранодиориты, граниты и аплиты. Эти породы слагают мелкие тела и дайки среди пород первой фазы Аксугского интрузивного массива. На месторождении отмечены микродайки гранитов в порфировидных тоналитах. Во всех этих породах постоянно отмечается вкрапленность и прожилки с пирит-халькопиритовой минерализацией и сопутствующие ей гидротермальные изменения.

В целом, породы Аксугской интрузии обладают многими общими чертами:

гипабиссальными условиями формирования, интенсивно проявленным гидротермальным автометаморфизмом, одинаковым минеральным составом пород и набором аксессуаров, единой последовательностью кристаллизации минералов во всех группах. В зависимости от структурных особенностей пород Аксугского интрузивного массива выделяются порфиroidные разновидности пород (с порфиroidными выделениями кварца и плагиоклаза и среднезернистой основной массой) и порфиры (с вкрапленниками, часто оплавленными, кварца, реже – плагиоклаза при значительно более мелкозернистой основной массе).

Петрохимические характеристики вмещающих пород Ак-Сугского месторождения охарактеризованы на основании данных силикатного анализа (Табл. 1), предоставленных диссертанту в ходе совместных работ с ООО «Тывамедь». Исследования пород Ак-Сугского месторождения включали в себя определение содержаний петрогенных элементов и содержания меди в породах. Определение петрохимических особенностей проводилось фотометрическим, титриметрическим, гравиметрическим и атомно-абсорбционным методами в аккредитованной лаборатории АО ЛИЦИМС г. Чита.

На основе данных 265 проведенных анализов для систематики и характеристики магматических пород аксугского интрузивного комплекса были построены следующие виды диаграмм: TAS (Рис. 2.15), Харкера (Рис. 2.16), диаграмма в координатах  $K_2O - SiO_2$  для установления серийной принадлежности пород (Рис. 2.17), а также дискриминационные диаграммы для гранитоидов (Рис. 2.18, 2.19). Для наглядного отображения результатов силикатного анализа, данные по петрогенным оксидам и содержаниям меди в рассматриваемых породах сведены в табличную форму (Табл. 1).

Таблица 1. Содержания породообразующих оксидов и меди (мас. %) во вмещающих породах Ак-Сугского месторождения.

	Габбро (n=7)	Диорит (n=26)	Кварцевы й диорит (n=91)	Тоналит (n=98)	Гранодиор ит (n=13)	Плагиогран ит (n=26)	Гранит (n=4)
SiO <sub>2</sub>	$\frac{43,4 - 51,7}{48,3}$	$\frac{51,6 - 57,9}{55,5}$	$\frac{57,9 - 63,8}{61,7}$	$\frac{63,8 - 68,7}{65,6}$	$\frac{63,9 - 67,6}{66,1}$	$\frac{68,7 - 75,0}{70,1}$	$\frac{68,7 - 76,4}{71,4}$
TiO <sub>2</sub>	$\frac{0,4 - 1,6}{0,8}$	$\frac{0,3 - 1,4}{0,6}$	$\frac{0,2 - 0,7}{0,4}$	$\frac{0,2 - 0,5}{0,3}$	$\frac{0,2 - 0,4}{0,3}$	$\frac{0,2 - 0,4}{0,3}$	$\frac{0,3 - 0,4}{0,3}$
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\frac{13,1 - 18,5}{16,2}$	$\frac{12,7 - 18,7}{16,3}$	$\frac{11,8 - 17,9}{15,8}$	$\frac{13,1 - 17,7}{15,7}$	$\frac{11,7 - 17,3}{15,0}$	$\frac{12,0 - 17,6}{14,6}$	$\frac{12,6 - 17,4}{14,5}$
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ок	$\frac{1,7 - 7,4}{5,1}$	$\frac{1,2 - 11,8}{3,8}$	$\frac{0,5 - 9,5}{2,6}$	$\frac{0,4 - 4,1}{1,5}$	$\frac{0,4 - 0,9}{0,6}$	$\frac{0,3 - 1,7}{0,9}$	$\frac{0,5 - 1,2}{0,8}$
FeO	$\frac{3,3 - 5,8}{4,4}$	$\frac{1,5 - 6,5}{3,4}$	$\frac{0,4 - 5,2}{2,0}$	$\frac{0,3 - 2,6}{1,2}$	$\frac{0,4 - 1,4}{0,9}$	$\frac{0,1 - 2,0}{0,6}$	$\frac{0,4 - 0,9}{0,7}$
MnO	$\frac{0,1 - 0,3}{0,1}$	$\frac{0,1 - 0,2}{0,1}$	$\frac{< 0,1 - 0,2}{< 0,1}$	$\frac{< 0,1 - 0,1}{< 0,1}$	$\frac{< 0,1 - 0,1}{< 0,1}$	$\frac{< 0,1 - 0,1}{< 0,1}$	$\frac{< 0,1 - 0,1}{< 0,1}$
MgO	$\frac{1,6 - 4,9}{4,0}$	$\frac{0,6 - 9,5}{2,7}$	$\frac{0,6 - 2,9}{1,4}$	$\frac{0,3 - 2,2}{1,1}$	$\frac{0,5 - 1,7}{1,0}$	$\frac{0,4 - 1,0}{0,7}$	$\frac{0,4 - 0,8}{0,7}$
CaO	$\frac{6,0 - 8,4}{7,3}$	$\frac{0,6 - 4,6}{4,6}$	$\frac{0,5 - 6,1}{3,6}$	$\frac{1,3 - 5,0}{3,2}$	$\frac{1,7 - 6,2}{3,8}$	$\frac{1,4 - 4,4}{2,4}$	$\frac{0,9 - 4,4}{2,0}$
Na <sub>2</sub> O	$\frac{0,1 - 5,6}{2,9}$	$\frac{0,2 - 6,1}{2,7}$	$\frac{0,2 - 5,8}{2,8}$	$\frac{0,1 - 6,0}{3,1}$	$\frac{0,1 - 4,7}{2,0}$	$\frac{0,1 - 4,2}{2,0}$	$\frac{0,2 - 0,6}{0,3}$
K <sub>2</sub> O	$\frac{0,6 - 4,8}{2,0}$	$\frac{0,6 - 5,0}{2,7}$	$\frac{0,7 - 5,2}{3,1}$	$\frac{1,4 - 5,4}{3,2}$	$\frac{2,0 - 4,7}{3,8}$	$\frac{2,3 - 5,0}{3,8}$	$\frac{3,5 - 4,8}{4,3}$
Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	$\frac{3,5 - 6,2}{4,9}$	$\frac{2,5 - 7,3}{5,4}$	$\frac{3,7 - 7,8}{5,9}$	$\frac{4,3 - 7,7}{6,2}$	$\frac{4,0 - 7,2}{5,8}$	$\frac{4,2 - 8,0}{5,8}$	$\frac{4,1 - 5,0}{4,6}$
Cu, %	$\frac{0,01 - 0,26}{0,12}$	$\frac{0,01 - 6,03}{0,66}$	$\frac{0,01 - 3,33}{0,50}$	$\frac{0,01 - 2,63}{0,37}$	$\frac{0,07 - 1,24}{0,30}$	$\frac{0,07 - 1,27}{0,26}$	$\frac{0,07 - 1,04}{0,53}$

Примечание: в числителе приведены минимальные – максимальные значения по выборке, в знаменателе среднее по выборке. Количество проанализированных образцов (n) указанных разновидностей пород приведено в шапке таблицы.

Одной из отличительных черт, характеризующей интрузивные породы аксугского комплекса является смена преобладающего Na<sub>2</sub>O на K<sub>2</sub>O с увеличением содержания кремнезема и, соответственно, от ранних интрузивных фаз к более поздним. Соотношения Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O, применяемые для оценки щелочной специализации магматических пород, для интрузивов Ак-Сугского месторождения составили: 2,5 для габбро, 1,7 для диоритов, 1,2 для кварцевых диоритов и тоналитов, 0,6 для гранодиоритов и плагиогранитов. Оценка

щелочной специализации по соотношению  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  позволяет отнести породы Аксугского интрузивного массива преимущественно к калиево-натриевому типу щелочности (соотношения  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  для ультраосновных-основных пород варьируются в диапазоне 1 – 4, 0,6 – 3 для средних, 0,3 – 1 для кислых). Некоторым исключением в описываемом случае являются тоналиты, которые, по большей части, имеют натриевый тип щелочности ( $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  для кислых пород  $>1$ ) [Практическая петрология, 2017].

Согласно TAS-диаграмме (Рис. 2.15) породы Ак-Сугского месторождения располагаются преимущественно в полях основных, средних и кислых составов. Фигуративные точки составов пород комплекса образуют непрерывный ряд в диапазоне  $\text{SiO}_2$  в пределах от 43 % до 77 % для пород основного – кислого состава. Среди основных пород большим распространением пользуются габбро, среди средних – диориты, кварцевые диориты, среди кислых – тоналиты, гранодиориты, плагиограниты, граниты.

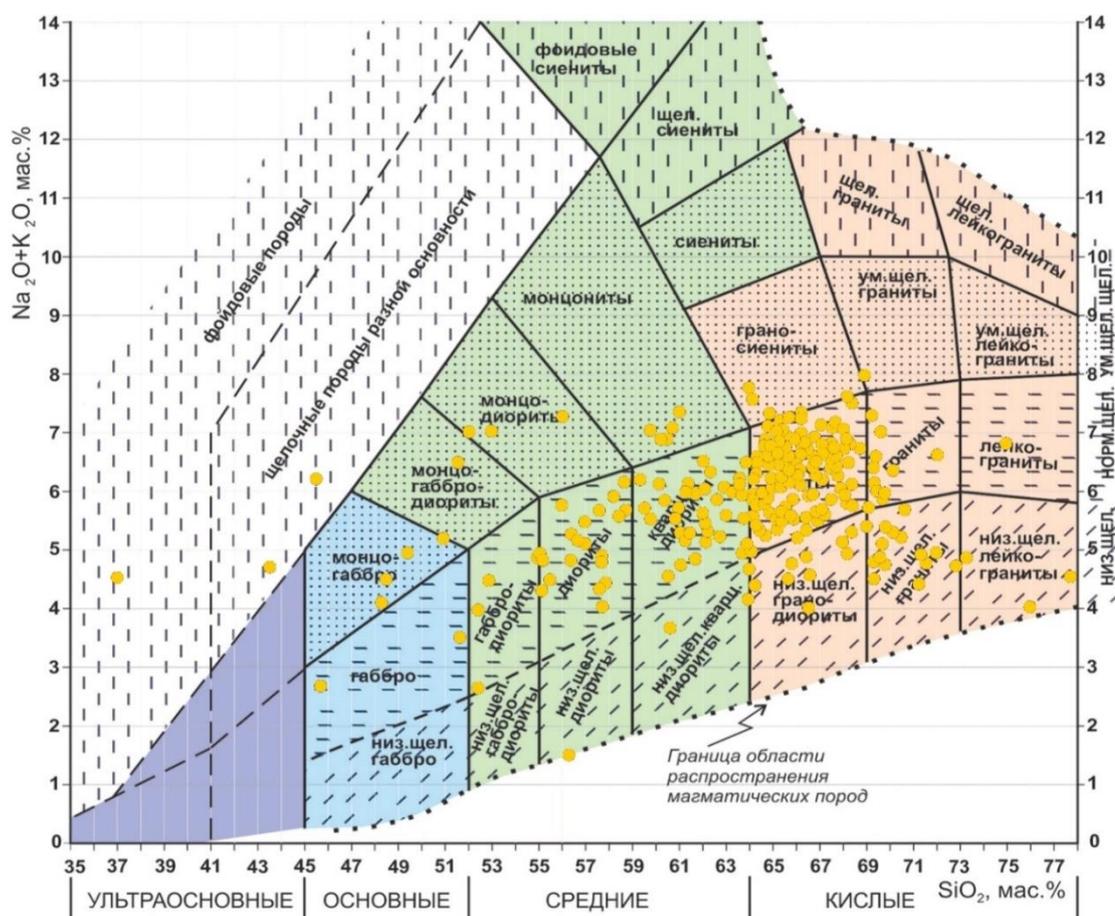


Рисунок 2.15. Классификационное положение пород аксугского интрузивного комплекса на TAS-диаграмме [Петрографический кодекс России, 2008].

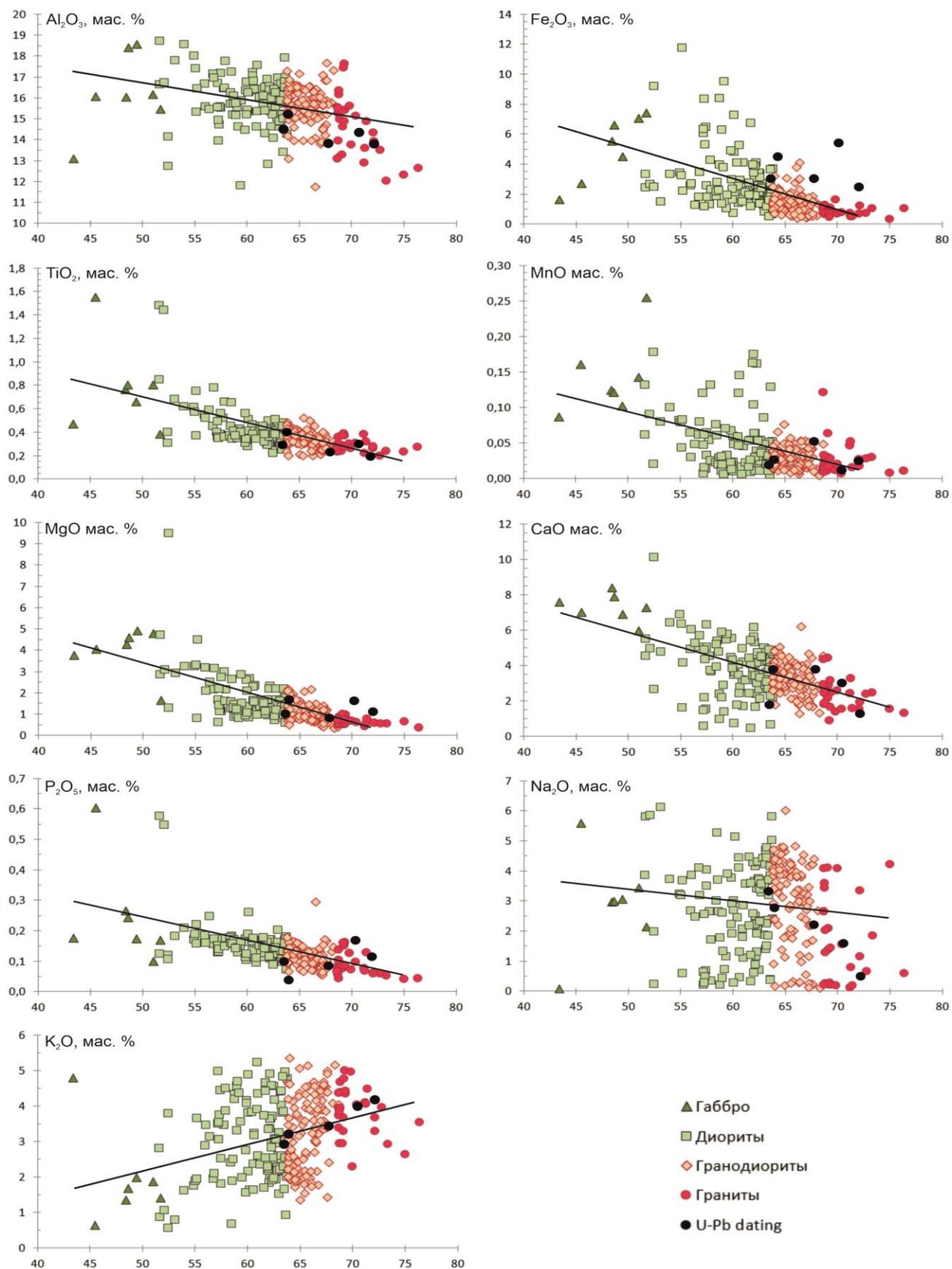


Рисунок 2.16. Диаграмма Харкера для интрузивных пород Ак-Сугского месторождения [Практическая петрология, 2017].

По оси абсцисс отмечены содержания  $\text{SiO}_2$  (мас. %), по оси ординат – содержания петрогенных оксидов (мас. %). Черными линиями показаны линейные тренды направлений изменения содержаний порообразующих оксидов с увеличением содержаний  $\text{SiO}_2$ .

Оценка петрохимических параметров пород Аксугского интрузивного плутона, основанная на распределения главных петрогенных оксидов относительно содержания кремнезема на диаграммах Харкера (см. Рис. 2.16) показала, что содержания всех порообразующих оксидов в породах понижается с повышением содержания  $\text{SiO}_2$ , за исключением  $\text{K}_2\text{O}$ . Увеличение содержаний  $\text{K}$  (в виде его оксида) в кислых породах завершающих фаз аксугского комплекса связано с увеличением доли метасоматически привнесенного калия. В геологическом строении месторождения участки с повышенным содержанием калия в породах отражаются в виде локальных зон высокотемпературных изменений – калишпатизации и биотитизации. По содержанию калия (Рис 2.17.) породы Ак-Сугского массива относятся к умеренно - и высококалиевой известково-щелочной и шощонитовой сериям [Практическая петрология, 2017].

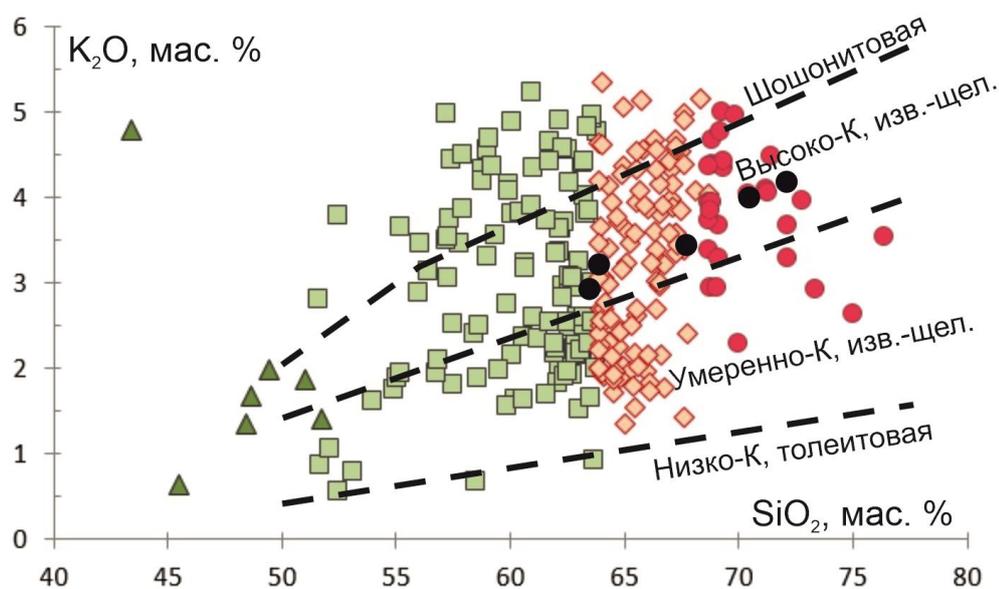


Рисунок 2.17. Диаграмма  $\text{K}_2\text{O}$ – $\text{SiO}_2$  выделения серий магматических пород по содержанию калия. Условные обозначения на рис. .2.16.

Составлена по [Pescerillo et al., 1976; Практическая петрология, 2017].

Тренды изменения содержаний остальных петрогенных оксидов в породах Ак-Сугского месторождения имеют слабый отрицательный наклон и схожи друг с другом. Постепенное изменение химизма пород, выраженное в постепенном снижении содержаний породообразующих оксидов, может свидетельствовать о кристаллизации пород из одного магматического источника, а их разнообразие может быть обусловлено кристаллизационной эволюцией расплава.

Для оценки наличия или отсутствия в породах цветных минералов – пироксенов (эгирина) или амфиболов (арфведсонита, рибекита и др.), содержащих щелочные металлы (в основном натрий) применяется коэффициент агпаитности ( $K_a$ ). При наличии этих минералов  $K_a > 1$ , а если все количество Na и K заключено в полевых шпатах, то  $K_a < 1$  [Практическая петрология, 2017]. В рассматриваемых разностях пород аксугского комплекса коэффициент агпаитности ( $K_a$ ) варьирует от 0,2 до 0,4, что свидетельствует о низкой распространенности щелочнометалльных минералов.

$$K_a = \frac{Na_2O + K_2O}{Al_2O_3}, (1)$$

Обогащенность пород алюминием и, как следствие, отражение относительных количеств цветных и лейкократовых минералов в породах оценивается с применением коэффициента глиноземистости ( $al'$ ). Для габбро усредненный коэффициент глиноземистости равен 1,2, для диоритов 1,8, для кварцевых диоритов 3,0, для тоналитов он составляет 4,6, для гранодиоритов 6,1, для плагиогранитов 7,1. Согласно [Практическая петрология, 2017] горные породы с  $al'$  в диапазоне 1–2 относятся к высокоглиноземистым разностям пород, а со значениями от 2 до 10 к весьма высокоглиноземистым. Также стоит отметить, что на фоне снижения содержаний петрогенных оксидов, в том числе, и оксида алюминия, насыщенность пород алюминием увеличивается с увеличением содержаний кремнезема.

$$al' = \frac{Al_2O_3}{FeO + Fe_2O_3 + MgO}, (2)$$

Другим критерием оценки насыщенности горных пород глиноземом является сравнение содержаний  $Al_2O_3$  относительно суммы щелочей ( $Na_2O + K_2O$ ) и  $CaO$ . Согласно этому критерию, по данным [Практическая петрология, 2017], выделяют агапитовые (пересыщенные щелочами) –  $Na_2O + K_2O > Al_2O_3$ , нормальные (метаглиноземистые) –  $Na_2O + K_2O < Al_2O_3 < CaO + Na_2O + K_2O$  и плюмазитовые (пересыщенные алюминием) –  $Al_2O_3 > CaO + Na_2O + K_2O$  породы. Среднее содержание  $Al_2O_3$ , рассчитанное общей аналитической выборке составило 15,6 мас. %, а усредненная сумма содержаний  $CaO + Na_2O + K_2O$  равна 9,4, что позволяет с уверенностью утверждать, что все выделенные на Ак-Сугском месторождении разновидности пород относятся к плюмазитовым, а исходная магма была пересыщена алюминием.

Содержание оксида титана, как и титансодержащих минералов (титанита, рутила и др.) в породах массива закономерно уменьшается с увеличением содержаний кремнезема. В зависимости от состава и происхождения рассматриваемых пород, разные исследователи магматизма применяют различные пограничные содержания  $TiO_2$  для оценки титаноститости интрузивных пород. Согласно материалам [Воронцов и др., 2010], предлагается следующая классификация для пород основного и среднеосновного составов по содержанию  $TiO_2$ : умеренно-титанистые  $TiO_2 \sim 1,3-2,0$  мас. %, высокотитанистые  $> 2,0$  мас. %. В другом варианте [Ринев, 2007] породы условно разделялись на низкотитанистые с содержанием  $TiO_2 < 1,5$  мас. % и высокотитанистые  $> 1,5$  мас. %. Опираясь на вышеуказанные критерии, можно сделать однозначный вывод, что интрузивные породы месторождения с вариациями средних содержаний  $TiO_2$  от 0,8 до 0,3 мас. % являются низкотитанистыми.

#### **2.1.4. Геодинамическая позиция и источник гранитоидов**

Несмотря на то, что основным фактором определяющим состав и последующую потенциальную рудоносность горных пород, является состав их материнского источника, а не тектоническая обстановка [Туркина, 2014], тем не

менее, геодинамическая позиция и тип вулканоплутонических поясов являются одними из немаловажных аспектов формирования и критерием поиска порфировых месторождений различных рудно-формационных типов [Звездов, 2022].

Ак-Сугский рудный узел и одноименное Au-Mo-Cu-порфировое месторождение, локализованное в породах основоного-кислого состава, относится к территории Хамсаринского (Кадыр-Осского) батолита. В диссертационной работе С.Н. Руднева [Руднев, 2010] приводится информация о гранитоидных ассоциациях Хамсаринской островной дуги на примере одноименного батолита, возраст формирования которого по изотопным данным составил  $532\pm 3$  и  $532\pm 4$  млн. лет, что соответствует раннему кембрию, при этом, информации непосредственно о Ак-Сугском плутоне в опубликованной литературе не приводится. Для решения задачи установления геодинамической позиции Ак-Сугского месторождения, на основании геохимических данных, автором составлен и проанализирован ряд дискриминационных диаграмм (Рис. 2.18, 2.19). В качестве исходных данных для составления диаграмм использованы результаты силикатного анализа горных пород, предоставленные ООО «Тывамедь» (п. 2.1.3 диссертации), а также результаты химического анализа 45 образцов горных пород методом ICP-AES, полученных непосредственно диссертантом. Аналитические работы проводились в аккредитованной лаборатории ООО ЦГИ «Прогноз» по утвержденной методике ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98 на атомно-эмиссионном спектрометре iCAP Pro X DUO с ионизацией в индуктивно связанной плазме.

Согласно дискриминационным диаграммам (Рис. 2.18), построенным по данным силикатного анализа горных пород в координатах  $\text{FeO}^*/(\text{FeO}^*+\text{MgO}) - \text{SiO}_2$  и  $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$  подавляющее число точек соответствуют полям гранитоидов (преимущественно магнезиальных) островных дуг, активных континентальных окраин и гранитоидов обстановок континентальной коллизии. Согласно литературным данным [Frost et al., 2001; White et al., 1983], магнезиальные породы описываемых геодинамических обстановок присущи I и S типам гранитоидов, которые, в свою очередь, могут быть перспективны на обнаружение

различных типов порфирирового оруденения (от Cu- до Mo-порфирирового) [Звездов, 2022; Кривцов и др., 2001].

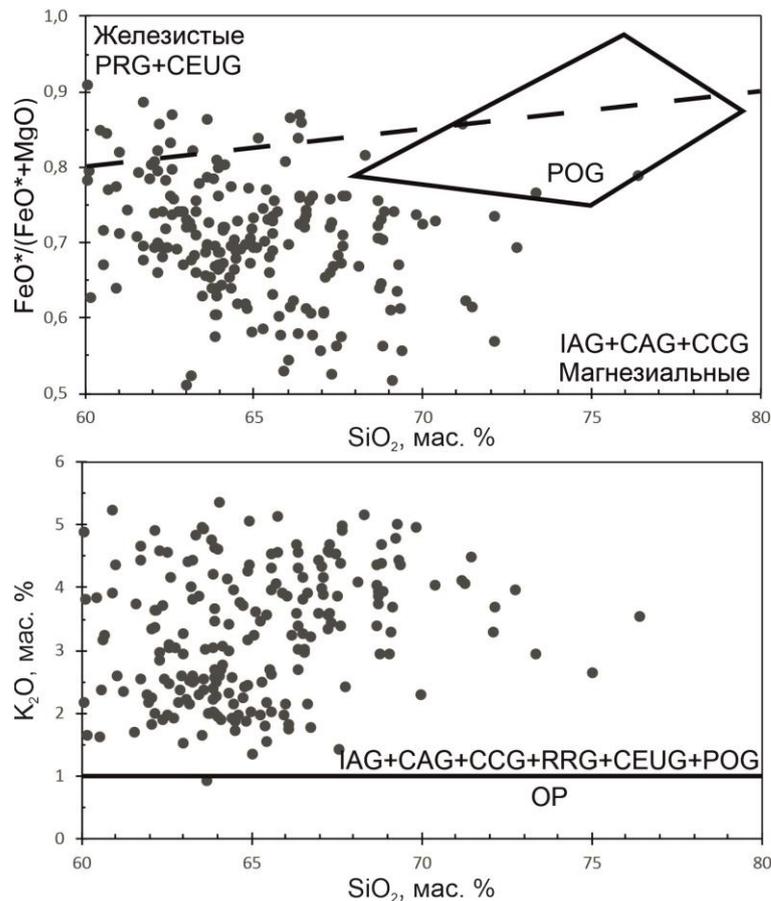


Рисунок 2.18. Дискриминационные диаграммы для гранитоидов аксугского комплекса.

Составлена по [Maniar et al., 1989; Практическая петрология, 2017], поля железистых и магнезиальных гранитоидов по [Frost et al., 2001].

Поля на диаграммах: IAG – гранитоиды островных дуг, CAG – гранитоиды континентальных дуг (на активных континентальных окраинах), CCG – гранитоиды обстановок континентальной коллизии, POG – посторогенные гранитоиды, RRG – гранитоиды, связанные с рифтами, CEUG – гранитоиды континентальных эпиорогенных поднятий, OP – океанические плагиограниты.

Анализируя данные дискриминационных диаграмм (Рис. 2.19), предложенных Дж. Пирсом с соавторами [Pearce et al., 1984], можно сделать вывод, что материнский источник гранитоидов аксугского комплекса был локализован в зонах океанических островных дуг, о чем свидетельствует расположение большинства точек составов интрузивных пород в поле VAG.

Близость некоторых точек к полям составов синколлизиионных (syn-COLG) и внутриплитных (WPG) гранитоидов могут отражать локальные изменения в составе глубинного источника, например, за счет вовлечения в плавление коровых пелитовых субстратов или возможного смешения с мантийными расплавами [Туркина, 2014].

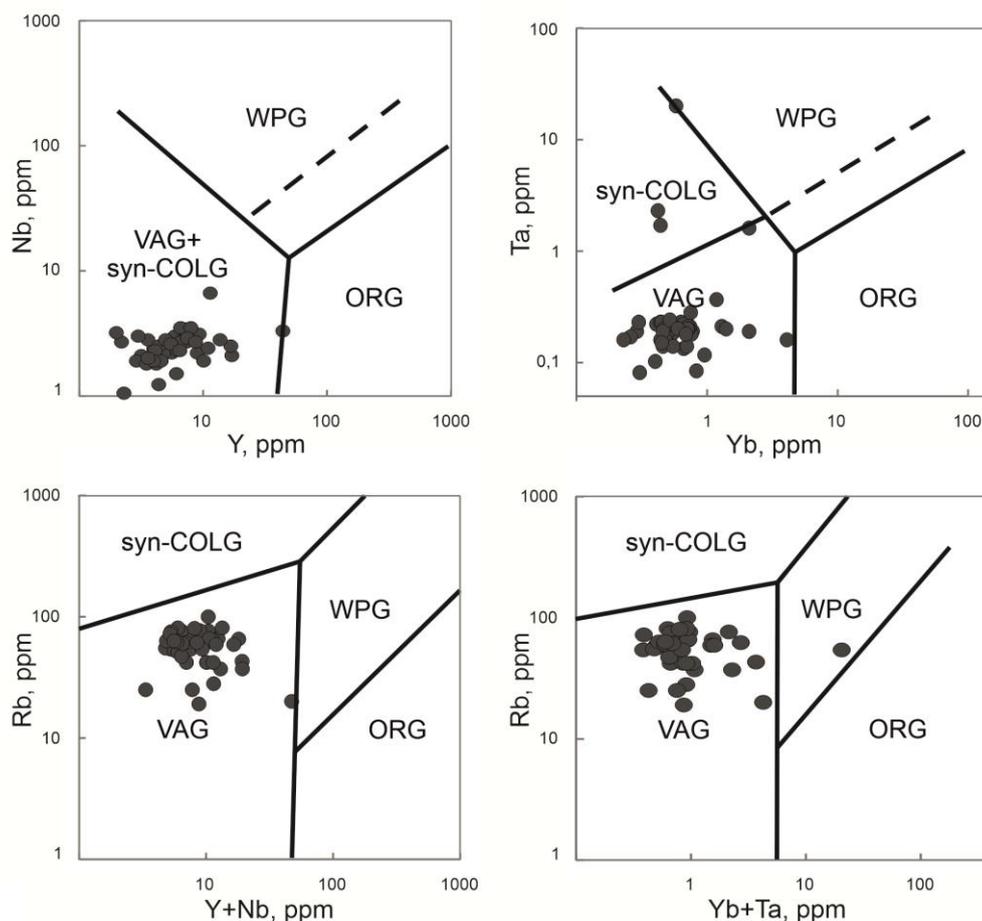


Рисунок 2.19. Дискриминационные диаграммы Пирса для гранитоидов аксутского комплекса. Составлена по [Pearce et al., 1984].

Поля на диаграммах: ORG – граниты океанических хребтов, WPG – внутриплитные граниты, VAG – граниты вулканических дуг, syn-COLG – синколлизиионные граниты. Пунктирная линия на диаграммах Y – Nb и Yb – Ta – граница ORG для аномальных рифтов.

В дополнение к вышесказанному стоит отметить, что, опираясь на состав рассматриваемых пород и индикаторные признаки островодужных ассоциаций [Руднев и др., 2007, 2009], образования аксутского комплекса являются

типичными для осевых частей глубоко эродированных островодужных террейнов, для которых характерны низкотитанистые высокоглиноземистые ультрабазит-базиты и высокоглиноземистые тоналиты-плагиограниты [Руднев и др., 2010].

### **2.1.5. Возраст интрузивного магматизма и рудообразования**

Датирование интрузивных пород, рудной минерализации и метасоматических образований Ак-Сугского месторождения неоднократно проводилось ранее различными научными коллективами и аналитическими методами (Ar-Ar, U-Pb, Re-Os). Возраст интрузивного магматизма, связанного с формированием Аксугского массива и парагенетически связанного с ним оруденения, до настоящего времени остается предметом споров и многочисленных дискуссий. Некоторые исследователи [Государственная геологическая карта..., 2012, 2013, Забелин, 1992; Добрянский и др., 1992; Кужугет и др., 2015] указывают на девонский возраст его формирования, ряд других исследователей [Берзина и др., 2019, 2021; Pollard et al., 2017] придерживаются точки зрения о кембрийском возрасте магматизма и рудообразования. Согласно последним опубликованным данным [Берзина и др., 2021], возраст (определенный U-Pb методом по цирконам) порфировых пород центральной части массива, в которых сосредоточена основная масса Au-Mo-Cu-оруденения, составляет для тоналит-порфиров  $500,4 \pm 5,9$  млн. лет, для плагиогранит-порфиров  $499,2 \pm 6,3$  млн. лет. Хронологические рамки формирования рудной минерализации на Ак-Сугском Au-Mo-Cu-порфирового месторождения оценивались предшественниками с применением Re-Os изотопного датирования по молибдениту и составили  $511 \pm 2$ ,  $516 \pm 2$ ,  $518 \pm 2$  млн. лет по данным [Берзина и др., 2019] и  $517,3 \pm 3$  и  $517,4 \pm 3$  млн. лет согласно данным [Pollard et al., 2017]. Также в опубликованной литературе отмечается, что эндогенная активность на этапе формирования малых интрузий и оруденения, проявлялась в интервале  $\sim 404\text{--}324$  млн. лет, что подтверждается данными Ar-Ar датирования [Сотников и др., 2003; Пономарчук, 2005]. Для получения новых

данных и актуализации накопленной информации диссертантом была поставлена задача проведения изотопно-геохимических исследований.

U-Pb изотопное датирование по цирконам вмещающих пород Ак-Сугского месторождения было проведено для: кварцевых диоритов 1 фазы, плагиогранитов (слабопорфировидных) 2 фазы, тоналит-порфиров и плагиогранит-порфиров 3 фазы. Образцы для изготовления проанализированных препаратов были отобраны из керна технологических скважин в пределах установленных рудных тел и контура подсчета запасов. Степень проявленности метасоматических преобразований и их состав в пределах пород разных фаз значительно варьируется, поэтому во избежание их возможного влияния на химический состав анализируемых цирконов, отбирались наименее измененные образцы.

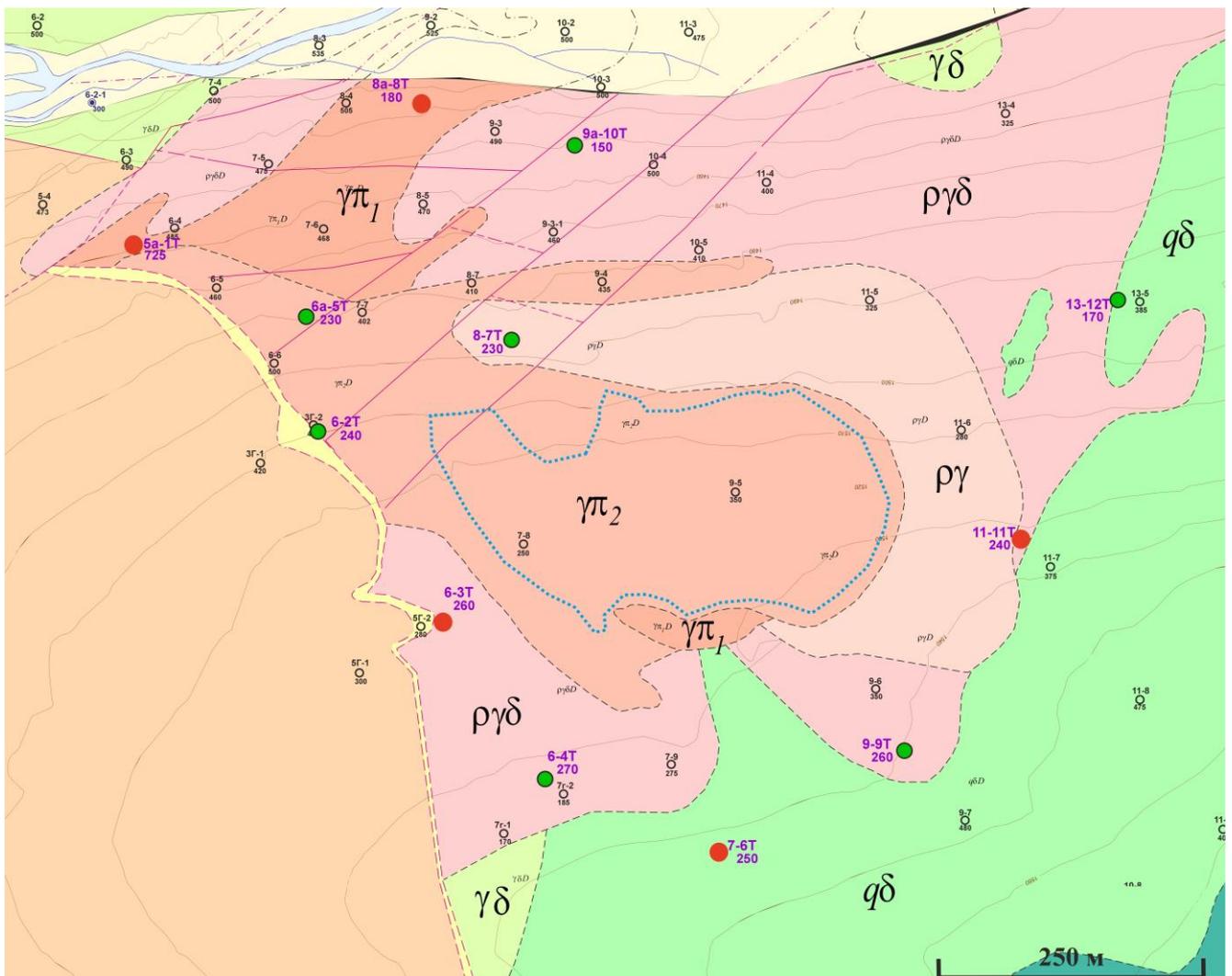


Рисунок 2.20. Геологическая карта месторождения Ак-Суг с точками отбора проб.

Условные обозначения см. рис. 2.1.

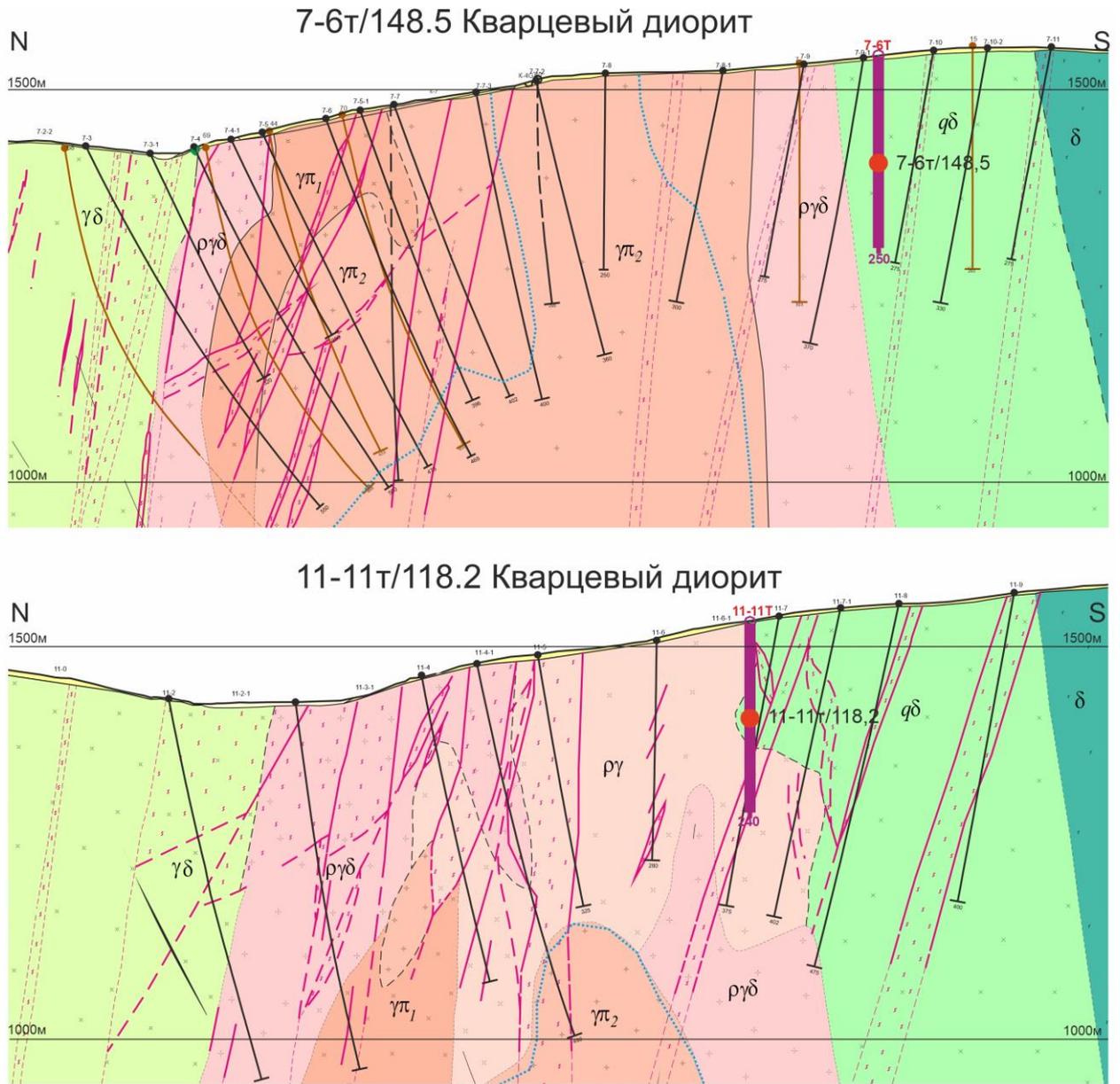


Рисунок 2.21. Фрагменты разрезов к геологической карте месторождения Ак-Суг по разведочным линиям 7 и 11 с точками отбора проб.

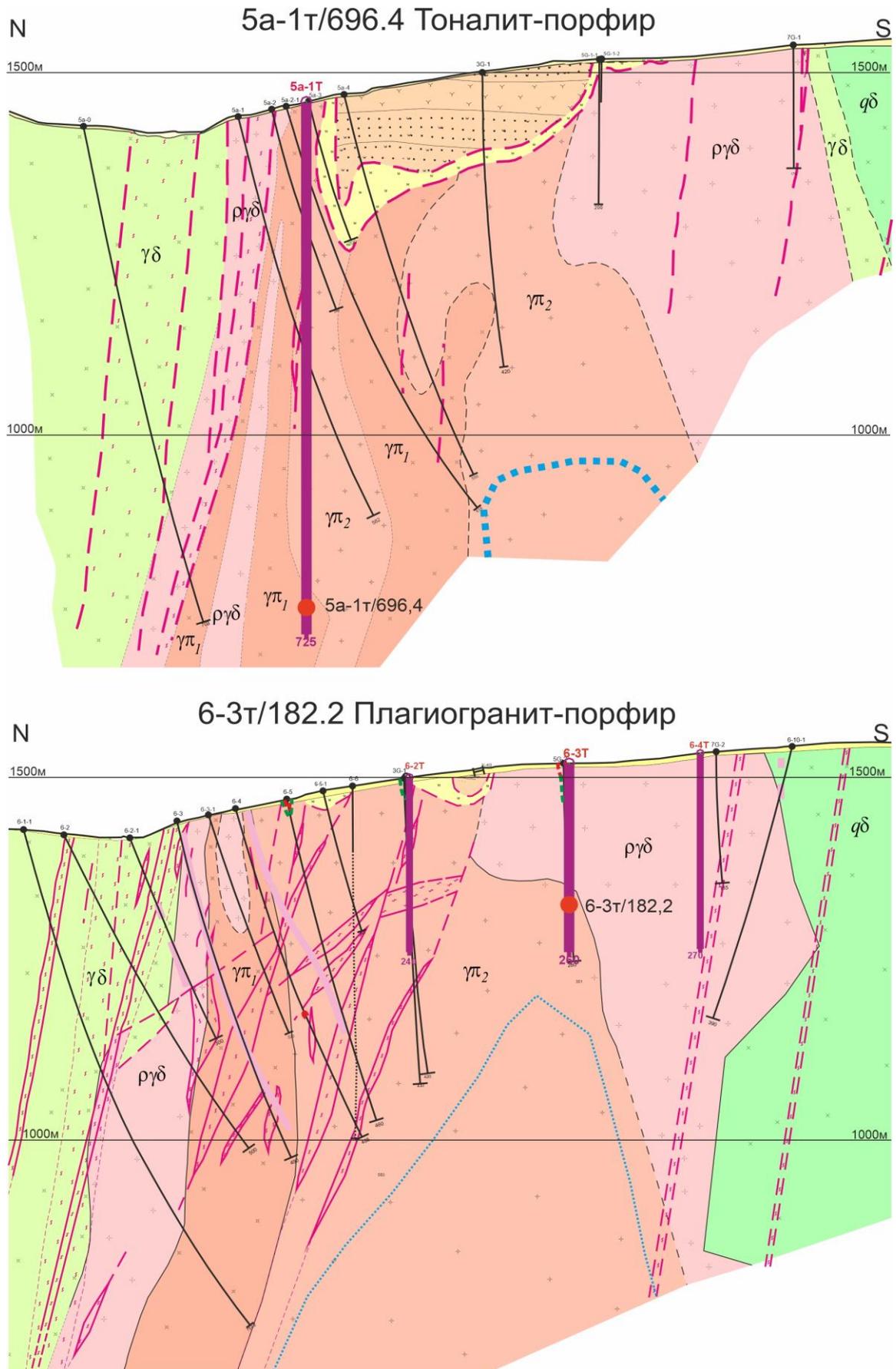


Рисунок 2.22. Фрагменты разрезов к геологической карте месторождения Ак-Суг по разведочным линиям 5а и б с точками отбора проб.

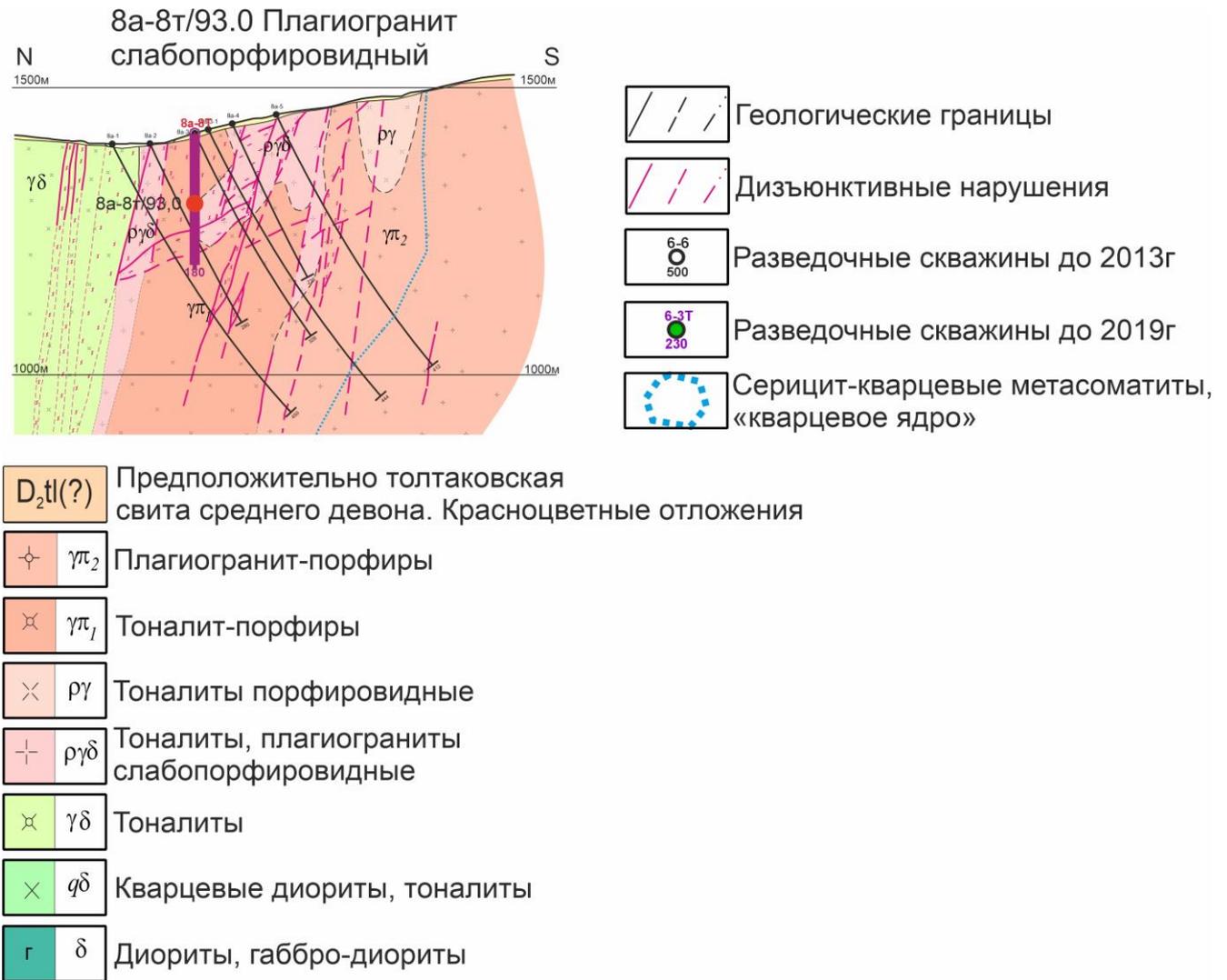


Рисунок 2.23. Фрагмент разреза к геологической карте месторождения Ак-Суг по разведочной линии 8а с точками отбора проб.

Всего было отобрано 5 образцов горных пород, весом более 1 кг, из которых были изготовлены прозрачный и полированный шлифы, протоочки для проведения силикатного и спектрального анализов, остаток пробы был раздроблен для выделения монофракций аксессуарных минералов. Содержание петрогенных оксидов в проанализированных образцах представлено в таблице 2. Названия горных пород, приведенные в таблице 2, даны по результатам петрографических исследований.

Таблица 2. Содержания главных петрогенных оксидов (в мас. %) в образцах пород для U-Pb датирования.

Номер образца	11-11т/118,2	7-6т/148,5	8а-8т/93,0	5а-1т/696,4	6-3т/182,2
Название	Кварцевый диорит-порфирит	Кварцевый диорит	Плагиогранит слабопорфировидный	Тоналит-порфир	Плагиогранит-порфир
SiO <sub>2</sub>	63,5	64,0	70,5	67,8	72,1
TiO <sub>2</sub>	0,3	0,4	0,3	0,2	0,2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,5	15,2	14,3	13,8	13,8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> общ	5,4	4,5	3,0	3,0	2,5
FeO*	2,2	3,2	2,3	2,6	1,4
MnO	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
MgO	1,6	1,7	1,0	0,8	1,1
CaO	3,0	3,7	1,8	3,7	1,3
Na <sub>2</sub> O	1,6	2,8	3,3	2,2	0,5
K <sub>2</sub> O	4,0	3,2	2,9	2,2	4,2
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	5,6	6,0	6,2	5,6	4,7

Цирконы из рассматриваемых интрузивных пород различных фаз аксугского комплекса представлены преимущественно средне-длиннопризматическими прозрачными кристаллами желто-коричневой окраски. в Катодоллюминесцентные (CL) изображения зерен цирконов показывают частую ритмичную зональностью параллельную граням ближе к кайме минерала, что является характерной чертой магматических цирконов (Рис. 2.24, 2.26, 2.28). Также отмечаются крупные обломки или фрагменты кристаллов со слабой неравномерной или практически отсутствующей зональностью. Размеры кристаллов циркона варьируют от 50-70 до 300 мкм со средним размером ядра порядка 30-50 мкм в поперечнике.

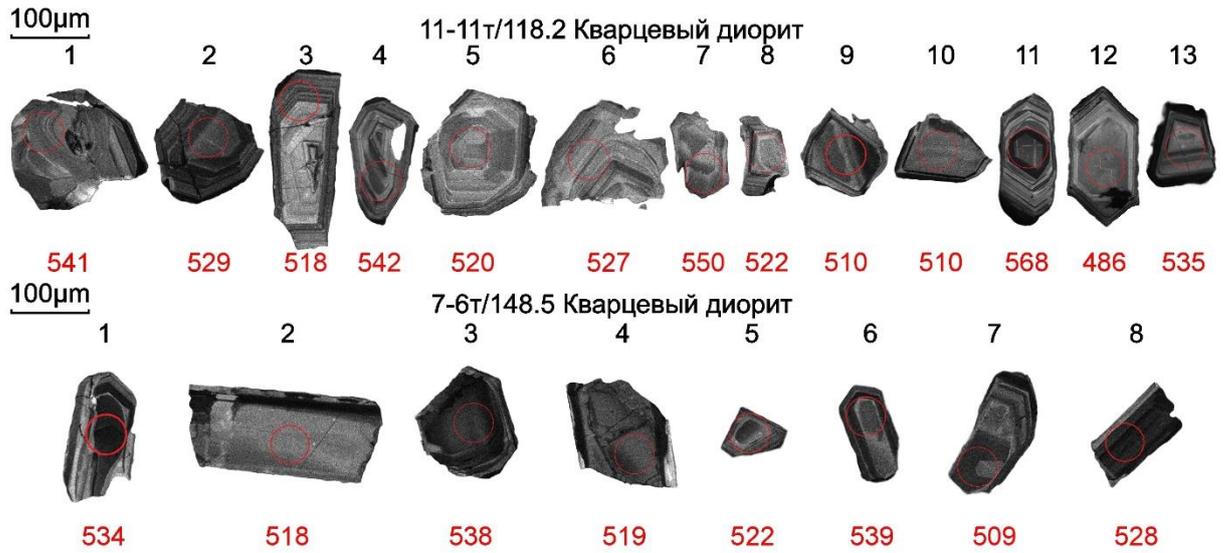


Рисунок 2.24. Катодолуминесцентные (CL) изображения цирконов из кварцевых диоритов.

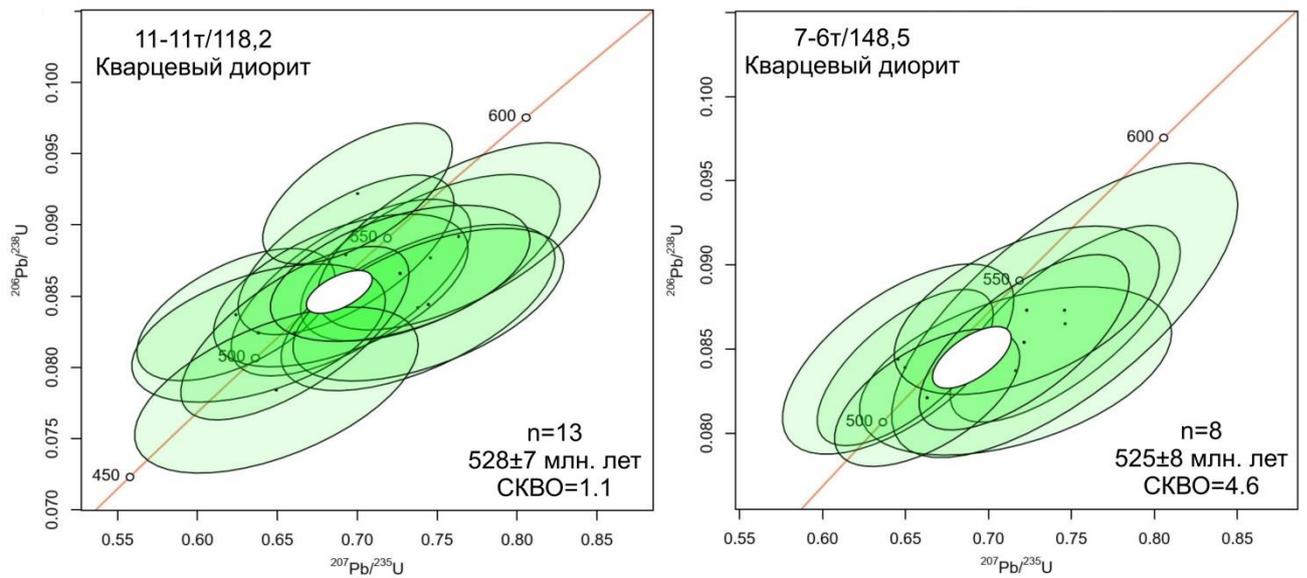


Рисунок 2.25. Диаграммы U-Pb датирования (LA-ICP-MS) цирконов из кварцевых диоритов месторождения Ак-Суг.

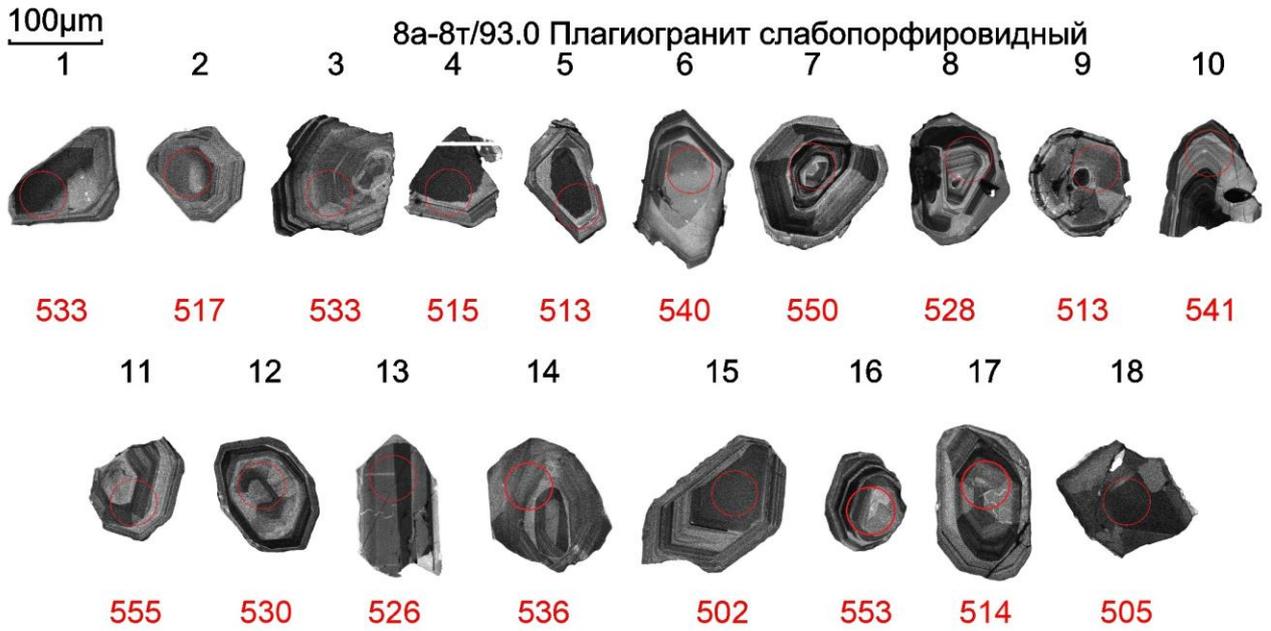


Рисунок 2.26. Катодолюминесцентные (CL) изображения цирконов из плаггиогранита (слабопорфировидного).

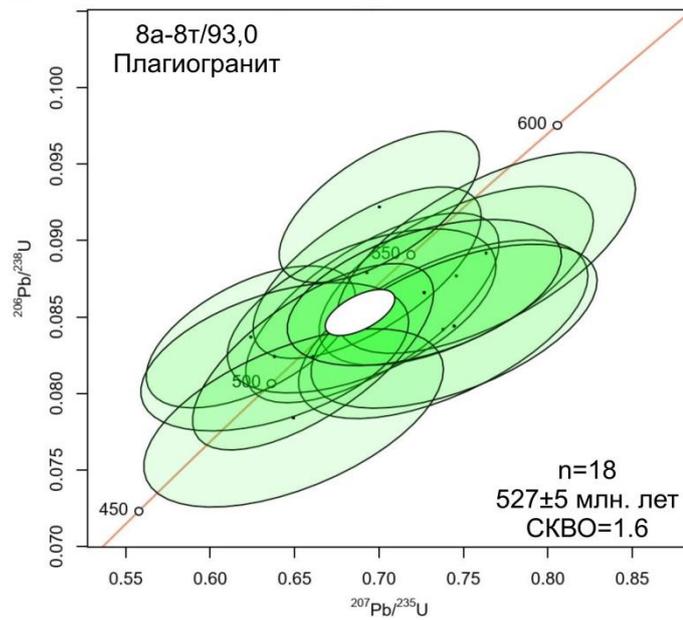


Рисунок 2.27. Диаграммы U-Pb датирования (LA-ICP-MS) цирконов из плаггиогранита (слабопорфировидного) месторождения Ак-Суг.

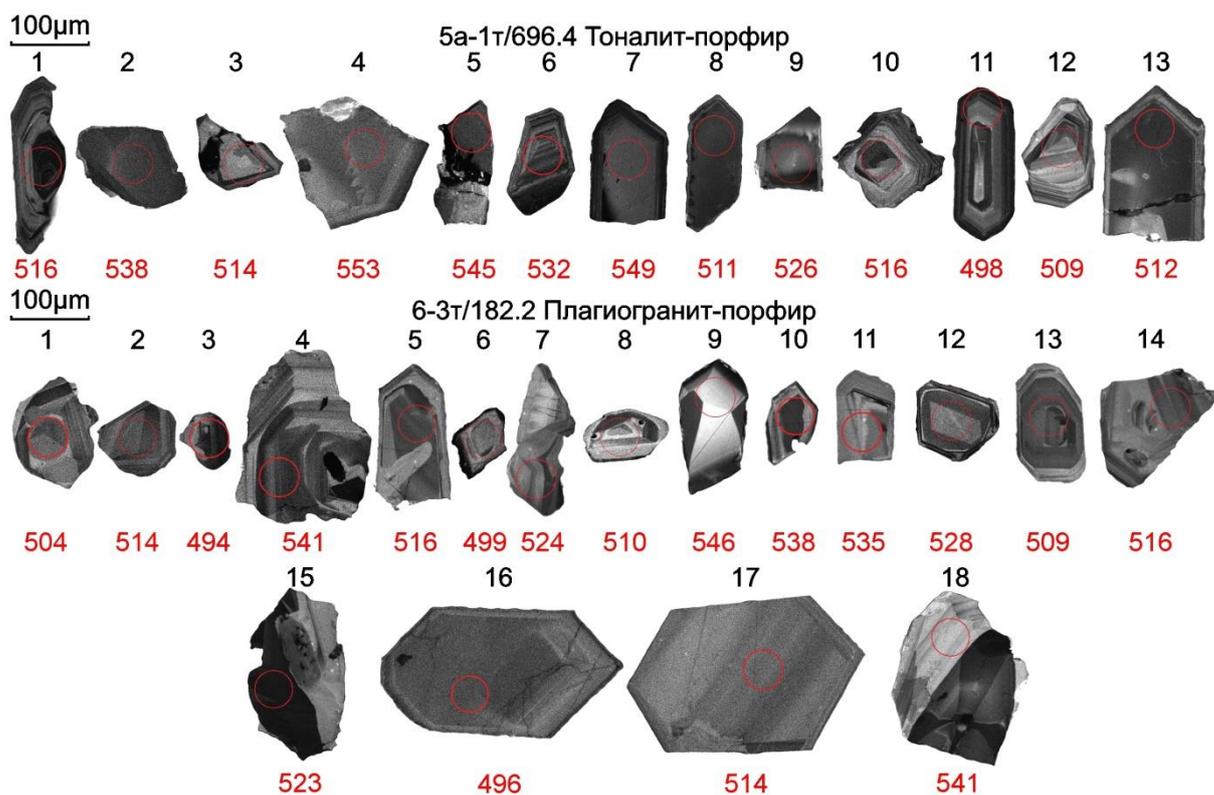


Рисунок 2.28. Катодоллюминесцентные (CL) изображения цирконов порфировых фаз месторождения Ак-Суг.

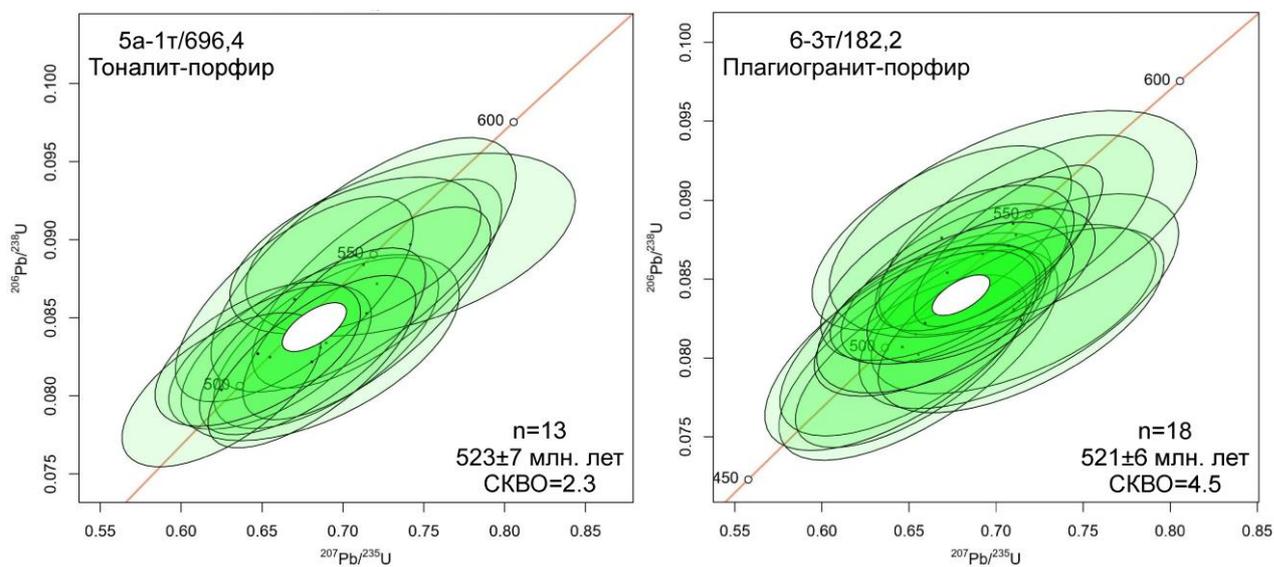


Рисунок 2.29. Диаграммы U-Pb датирования (LA-ICP-MS) цирконов порфировых фаз месторождения Ак-Суг.

Таблица 3. Результаты U-Pb (LA-ICP-MS) изотопного датирования цирконов из кварцевого диорита (11-11т/118,2).

№ точки	Pb, ppm	U, ppm	Th, ppm	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ±, %	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ ±, %	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ±, %	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ Age ±	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ Age ±	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ Age ±	Rho
1	3	52	11	0,21	0,0617 7,0	0,7457 8,9	0,0877 5,5	590 151	558 50	541 29	0,6
2	4	74	17	0,23	0,0590 6,5	0,6960 8,8	0,0856 5,9	500 142	526 46	529 31	0,7
3	3	56	13	0,23	0,0541 6,7	0,6241 8,1	0,0837 4,5	350 151	493 40	518 23	0,6
4	3	55	15	0,26	0,0572 6,0	0,6929 8,0	0,0879 5,2	450 133	528 42	542 28	0,7
5	3	39	10	0,25	0,0636 7,6	0,7380 9,5	0,0842 5,7	640 161	549 52	520 29	0,6
6	2	34	8	0,23	0,0586 7,9	0,6897 9,4	0,0854 5,1	500 173	529 50	527 27	0,5
7	2	35	9	0,25	0,0621 7,3	0,7634 9,5	0,0892 6,0	630 156	576 55	550 33	0,6
8	2	32	8	0,26	0,0640 7,7	0,7444 9,3	0,0844 5,2	650 163	554 52	522 27	0,6
9	2	38	6	0,15	0,0562 9,0	0,6382 10,2	0,0824 4,8	370 199	495 50	510 25	0,5
10	5	74	24	0,22	0,0582 6,4	0,6609 8,8	0,0824 6,0	480 141	509 45	510 31	0,7
11	6	76	23	0,28	0,0551 5,4	0,7001 6,9	0,0922 4,4	400 120	544 38	568 25	0,6
12	2	34	9	0,24	0,0601 9,4	0,6494 11,2	0,0784 6,1	490 203	499 56	486 30	0,5
13	2	33	7	0,22	0,0609 7,9	0,7268 9,1	0,0866 4,5	550 171	557 51	535 24	0,5

Таблица 4. Результаты U-Pb (LA-ICP-MS) изотопного датирования цирконов из кварцевого диорита (7-6т/148,5).

№ точки	Pb, ppm	U, ppm	Th, ppm	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ±, %	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ ±, %	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ±, %	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ Age ±	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ Age ±	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ Age ±	Rho
1	9	99	37	0,39	0,0626 5,2	0,7463 7,6	0,0865 5,5	650 111	558 42	534 30	0,7
2	1	22	5	0,23	0,0621 9,6	0,7163 10,7	0,0837 4,9	560 204	540 58	518 25	0,5
3	4	57	13	0,20	0,0620 8,0	0,7460 11,4	0,0873 8,2	610 170	553 63	538 44	0,7
4	3	75	15	0,20	0,0562 4,9	0,6498 6,7	0,0839 4,5	420 109	509 34	519 23	0,7
5	3	54	12	0,22	0,0555 6,9	0,6456 8,8	0,0844 5,5	370 154	500 44	522 29	0,6
6	2	36	10	0,27	0,0601 7,7	0,7231 9,0	0,0873 4,7	520 167	545 49	539 25	0,5

7	4	60	17	0,28	0,0586	5,6	0,6631	6,9	0,0821	4,1	500	121	519	36	509	21	0,6
8	5	98	23	0,23	0,0613	5,2	0,7215	7,2	0,0854	5,0	600	111	534	38	528	26	0,7

Таблица 5. Результаты U-Pb (LA-ICP-MS) изотопного датирования цирконов из слабопорфировидного плаггиогранита (8а-8т/93,0).

№ точки	Pb, ppm	U, ppm	Th, ppm	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ±, %	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ ±, %	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ±, %	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ Age ±	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ Age ±	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ Age ±	Rho						
1	3	49	14	0,29	0,0550	7,9	0,6534	9,3	0,0862	5,0	380	176	509	47	533	27	0,5
2	3	58	15	0,24	0,0603	6,2	0,6948	7,4	0,0836	4,0	590	134	538	40	517	20	0,5
3	2	48	12	0,26	0,0615	7,5	0,7315	9,5	0,0863	5,8	600	162	545	52	533	31	0,6
4	5	71	26	0,36	0,0580	6,5	0,6659	8,3	0,0833	5,3	470	141	512	43	515	27	0,6
5	5	84	29	0,35	0,0581	5,1	0,6638	7,1	0,0829	4,9	490	111	513	36	513	25	0,7
6	5	64	26	0,32	0,0563	5,8	0,6789	7,3	0,0875	4,5	440	128	526	38	540	24	0,6
7	5	66	23	0,35	0,0578	6,3	0,7034	7,6	0,0883	4,3	460	138	541	41	550	24	0,6
8	4	63	17	0,28	0,0552	7,3	0,6497	8,3	0,0854	3,9	380	163	508	42	528	20	0,5
9	5	65	22	0,34	0,0599	5,6	0,6844	7,4	0,0829	4,8	570	121	531	39	513	25	0,7
10	7	84	37	0,37	0,0595	6,8	0,7183	8,1	0,0876	4,3	590	148	546	44	541	23	0,5
11	2	41	10	0,25	0,0598	12,4	0,7417	13,3	0,0900	4,8	420	269	542	72	555	26	0,4
12	4	51	15	0,32	0,0668	10,4	0,7899	12,0	0,0858	6,1	680	216	570	68	530	32	0,5
13	3	47	11	0,25	0,0638	11,2	0,7483	12,4	0,0851	5,4	610	237	552	69	526	29	0,4
14	2	35	8	0,23	0,0661	10,0	0,7907	11,4	0,0868	5,4	660	210	573	65	536	29	0,5
15	6	74	21	0,29	0,0585	9,5	0,6539	10,6	0,0811	4,8	440	206	512	54	502	24	0,4
16	4	66	17	0,26	0,0559	7,8	0,6903	9,2	0,0896	4,9	370	172	526	48	553	27	0,5
17	3	60	13	0,21	0,0597	7,3	0,6837	9,0	0,0831	5,3	590	158	520	47	514	27	0,6
18	19	256	87	0,33	0,0579	4,1	0,6511	5,5	0,0816	3,7	497	90	509	28	505	18	0,7

Таблица 6. Результаты U-Pb (LA-ICP-MS) изотопного датирования цирконов из тоналит-порфира (5а-1т/696,4).

№ точки	Pb, ppm	U, ppm	Th, ppm	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ±, %	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ ±, %	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ±, %	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ Age ±	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ Age ±	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ Age ±	Rho
1	11	156	42	0,27	0,0600 6,2	0,6896 8,2	0,0834 5,4	540 135	523 43	516 28	0,7
2	9	112	36	0,33	0,0600 6,1	0,7211 8,7	0,0872 6,3	550 132	541 47	538 34	0,7
3	2	33	7	0,23	0,0599 8,4	0,6860 10,2	0,0831 5,9	530 182	526 54	514 30	0,6
4	2	32	7	0,23	0,0600 9,9	0,7417 11,2	0,0897 5,3	510 214	558 63	553 29	0,5
5	2	36	8	0,22	0,0585 7,8	0,7127 10,8	0,0884 7,5	470 169	528 57	545 41	0,7
6	5	71	21	0,30	0,0564 6,5	0,6700 9,0	0,0862 6,2	410 143	509 46	532 33	0,7
7	3	53	11	0,20	0,0577 7,7	0,7077 9,0	0,0890 4,6	440 169	538 48	549 25	0,5
8	2	41	10	0,25	0,0576 6,3	0,6549 7,8	0,0825 4,6	460 139	506 40	511 23	0,6
9	4	53	15	0,29	0,0608 5,8	0,7148 8,8	0,0853 6,5	600 126	544 48	526 34	0,7
10	4	76	19	0,25	0,0592 6,0	0,6813 8,4	0,0835 5,9	520 130	513 43	516 30	0,7
11	4	74	17	0,23	0,0564 6,3	0,6249 8,0	0,0804 5,0	420 139	485 39	498 25	0,6
12	4	65	14	0,20	0,0601 5,4	0,6809 7,7	0,0822 5,5	580 117	526 41	509 28	0,7
13	5	58	22	0,36	0,0568 6,6	0,6474 8,0	0,0827 4,6	420 146	499 40	512 23	0,6

Таблица 7. Результаты U-Pb (LA-ICP-MS) изотопного датирования цирконов из плагиогранит-порфира (6-3т/182,2).

№ точки	Pb, ppm	U, ppm	Th, ppm	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ±, %	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ ±, %	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ±, %	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ Age ±	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ Age ±	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ Age ±	Rho
1	2	48	8	0,18	0,0582 7,3	0,6537 9,7	0,0815 6,5	460 159	503 49	504 33	0,7
2	2	41	8	0,20	0,0620 7,8	0,7101 9,4	0,0831 5,3	590 167	533 50	514 27	0,6
3	6	84	28	0,33	0,0592 6,2	0,6511 8,3	0,0798 5,6	550 134	516 43	494 28	0,7
4	2	58	10	0,17	0,0554 7,3	0,6688 9,1	0,0876 5,5	390 163	514 47	541 30	0,6
5	2	35	10	0,28	0,0619 8,1	0,7132 10,5	0,0836 6,7	620 174	542 57	516 34	0,6
6	2	44	9	0,20	0,0581 7,5	0,6462 10,0	0,0807 6,6	480 164	497 50	499 33	0,7
7	2	46	9	0,18	0,0579 6,1	0,6759 7,9	0,0847 4,9	470 134	528 41	524 26	0,6
8	2	42	9	0,22	0,0629 7,4	0,7143 9,4	0,0824 5,8	620 157	538 51	510 30	0,6
9	1	15	3	0,18	0,0582 10,2	0,7099 12,2	0,0885 6,6	420 223	531 65	546 36	0,5
10	9	115	39	0,31	0,0589 4,0	0,7070 6,3	0,0871 4,8	535 88	540 34	538 26	0,8
11	2	49	9	0,17	0,0580 5,6	0,6922 7,3	0,0866 4,6	480 123	523 38	535 25	0,6
12	2	41	7	0,18	0,0571 7,1	0,6720 8,8	0,0854 5,3	450 156	518 46	528 28	0,6
13	3	63	13	0,21	0,0582 6,4	0,6593 7,9	0,0822 4,6	480 141	506 40	509 23	0,6
14	2	31	7	0,22	0,0580 6,6	0,6667 7,6	0,0834 3,7	510 145	518 39	516 19	0,5
15	9	110	37	0,33	0,0593 6,2	0,6914 7,7	0,0846 4,7	520 134	528 41	523 25	0,6
16	4	49	16	0,33	0,0593 7,3	0,6554 10,0	0,0802 6,8	510 159	500 50	496 34	0,7
17	1	34	5	0,15	0,0585 7,2	0,6708 9,0	0,0832 5,3	470 158	514 46	514 27	0,6
18	5	58	21	0,24	0,0588 6,9	0,7115 9,1	0,0878 5,9	490 150	533 48	541 32	0,7

Конкордантный возраст цирконов из образцов кварцевых диоритов 1 фазы аксугского комплекса с периферии месторождения составляет  $525 \pm 8$  и  $528 \pm 7$  млн. лет. Возраста единичных зерен (Таблица 3,4) в описываемом случае варьируют в диапазоне от 486 до 568 млн. лет. Возраст внедрения слабопорфировидных плагиогранитов 2 фазы аксугского комплекса составил  $527 \pm 5$  млн. лет. Возраст единичных зерен (Таблица 5) цирконов из данного образца изменяется от 502 до 555 млн. лет. Возраст интрузивных пород 3 фазы определен по обеим описанным разностям горных пород – тоналит-порфирам и плагиогранит-порфирам. Средний возраст цирконов из тоналит-порфиров составляет  $523 \pm 7$  млн. лет. Возраст единичных зерен (Таблица 6) варьирует в диапазоне от 498 до 553 млн. лет. Возраст внедрения тел плагиогранит-порфиров оценивается  $521 \pm 6$  млн. лет с единичными возрастами (Таблица 7) цирконов пробы от 494 до 546 млн. лет.

Согласно приведенным результатам U-Pb изотопного датирования цирконов вмещающих интрузивных пород Ак-Сугского месторождения, возрастной диапазон становления массива оценивается в 528-521 млн. лет, что соответствует раннему кембрию. Опираясь на опубликованные данные [Руднев, 2010], островодужный интрузивный магматизм Восточной Тывы был представлен двумя стадиями с хронологическими рамками 570–560 и 540–520 млн. лет. Более молодые интрузивные образования (540–520 млн. лет) в районе месторождения представлены ультрабазит-базитовыми и гранитоидными ассоциациями Хамсаринского батолита с возрастами  $532 \pm 3$  и  $523 \pm 4$  млн. лет, которые, в свою очередь, коррелируют с образованиями аксугского комплекса габбро-диорит-гранодиорит-гранитного состава. В результате проведенных изотопно-геохронологических и геохимических исследований подтверждается приуроченность времени формирования вмещающих пород Ак-Сугского месторождения (528-521 млн. лет) и одноименного магматического комплекса к одному из этапов островодужного интрузивного магматизма Восточной Тывы.

## **2.2. Особенности минерального состава руд, этапы и стадии формирования рудной минерализации**

### 2.2.1. Состав рудной минерализации месторождения Ак-Суг

Согласно актуальным авторским обобщениям и исследованиям [Шадчин и др., 2024], «перечень обнаруженных рудных минералов в настоящее время включает в себя более 60 минеральных видов (Табл. 8). Главные рудообразующие минералы представлены как первичными и вторичными разновидностями (минералы окисленных руд). К первичным относятся самородные металлы (золото, серебро, медь, теллур, висмут), сульфиды (пирит, халькопирит, борнит, молибденит, галенит, сфалерит), сульфосоли (энаргит), к вторичным – самородная медь, оксиды (делафоссит, куприт, тенорит), карбонаты (малахит, азурит), ферримолибдит [Шведов и др., 2021]. К второстепенным рудообразующим минералам отнесены такие как акантит, кобальтин и марказит, к оксидам относятся гематит, ильменит, касситерит и магнетит. Сульфосоли представлены айкинитом, тетрадимитом и блеклыми рудами (теннантитом, тетраэдритом). Среди теллуридов описаны гессит и калаверит, среди вольфрамов и селенидов – ферберит и клаусталит, соответственно. Из редких минералов охарактеризованы многочисленные сульфиды, оксиды, вольфраматы, фосфаты, сульфосоли, селениды и арсениды [Берзина и др., 2001, 2007; Кривцов, 1983; Кривцов и др., 1985, 1985; Кужугет и др., 2015, 2019; Монгуш и др., 2013; Шведов и др., 2021]. Породообразующие и акцессорные минералы представлены кварцем, полевыми шпатами, карбонатами (кальцитом, доломитом, анкеритом), слюдами (биотитом, мусковитом-серицитом, хлоритом), сульфатами (баритом, целестином, ангидритом), эпидотом, амфиболами, цирконом, монацитом, апатитом и рутилом».

Таблица 8. Перечень минералов, выявленных на месторождении Ак-Суг.

Рудообразующие минералы		Второстепенные	Редкие минералы	Породообразующие минералы
Главные				
Первичные	Окисленные			
<b>Самородные металлы:</b> Висмут* Золото Медь Серебро* Теллур  <b>Интерметаллиды</b> : Электрум  <b>Простые сульфиды:</b> Галенит Молибденит Пирит Пирротин Сфалерит  <b>Сложные сульфиды:</b> Борнит Халькопирит  <b>Сульфосоли:</b> Энаргит	<b>Самородные металлы:</b> Медь  <b>Оксиды:</b> Делафоссит Куприт Тенорит  <b>Карбонаты:</b> Азурит Малахит  <b>Молибдаты:</b> Ферримолибдит  <b>Простые сульфиды:</b> Халькозин  <b>Сложные сульфиды:</b> Ковеллин	<b>Оксиды:</b> Гематит Ильменит Касситерит Магнетит  <b>Вольфраматы:</b> Ферберит  <b>Простые сульфиды:</b> Акантит Кобальтин Марказит  <b>Сульфосоли:</b> Айкинит Блеклые руды Теннантит Тетрадимит Тетраэдрит  <b>Теллуриды:</b> Гессит Калаверит  <b>Селениды:</b> Клаусталит	<b>Оксиды:</b> Браннерит*  <b>Вольфраматы:</b> Шеелит*  <b>Фосфаты:</b> У-ксенотим* Се-флоренсит*  <b>Сульфосоли:</b> Виттихенит* Вольтманнит* Михараит*  <b>Сложные сульфиды:</b> Карролит* Маккинстриит* Штроемейерит*  <b>Теллуриды:</b> Алтаит Креннерит Меренскиит Мутманнит Петцит Сильванит Сопчеит Теллуровисмутит Темагамит? Цумоит Штютцит Эмпрессит  <b>Селениды:</b> Берцелианит* Богдановичит* Кавацулит Науманнит  <b>Арсениды:</b> Альгодонит* Домейкит* Коутекит* Арсенопалладинит	<b>Сульфаты:</b> Ангидрит Барит Целестин  <b>Карбонаты:</b> Анкерит Доломит Кальцит Сидерит  <b>Оксиды:</b> Рутил  <b>Фосфаты:</b> Апатит Монацит Фторапатит  <b>Силикаты:</b> Амфиболы Бiotит Мусковит Полевые шпаты Серицит Хлорит Циркон Эпидот

Примечание. \* – Минералы, выявленные на месторождении при участии автора [Шведов и др., 2021; Шадчин и др., 2024]

### 2.2.2. Типы руд месторождения Ак-Суг

Природные типы руд на месторождении выделены по данным минералогического картирования и представлены: пирит-халькопиритовыми и халькопирит-пиритовыми, пирит-борнит-халькопиритовыми, теннантит-(пирит)-халькопиритовыми, халькопирит-(халькозиновыми) и самородномедными разновидностями (Рис. 2.30). Наиболее распространенными являются халькопирит-пиритовые и пирит-борнит-халькопиритовые типы. Халькопирит-пиритовые руды наиболее распространены в пределах Южной залежи, а также в восточной и северной частях Северной залежи. Пирит-борнит-халькопиритовые руды имеют широкое развитие в пределах Северной залежи. Теннантит-(пирит)-халькопиритовый тип руд характерен для глубоких горизонтов центральной и западной частей Северной залежи. Халькопирит-халькозиновые руды встречаются в северо-западной части Северной залежи. Самородномедный тип руд распространен в западной части месторождения, вдоль контакта с вулканогенно-осадочными породами девона. Кроме того, самородномедный тип ограниченно распространен в породах девона и имеет, очевидно, гипергенное происхождение. Молибденовые руды в самостоятельный тип не выделяются и оконтуриваются во вмещающих породах по природному «бортовому» содержанию  $Mo > 0,003\%$ .

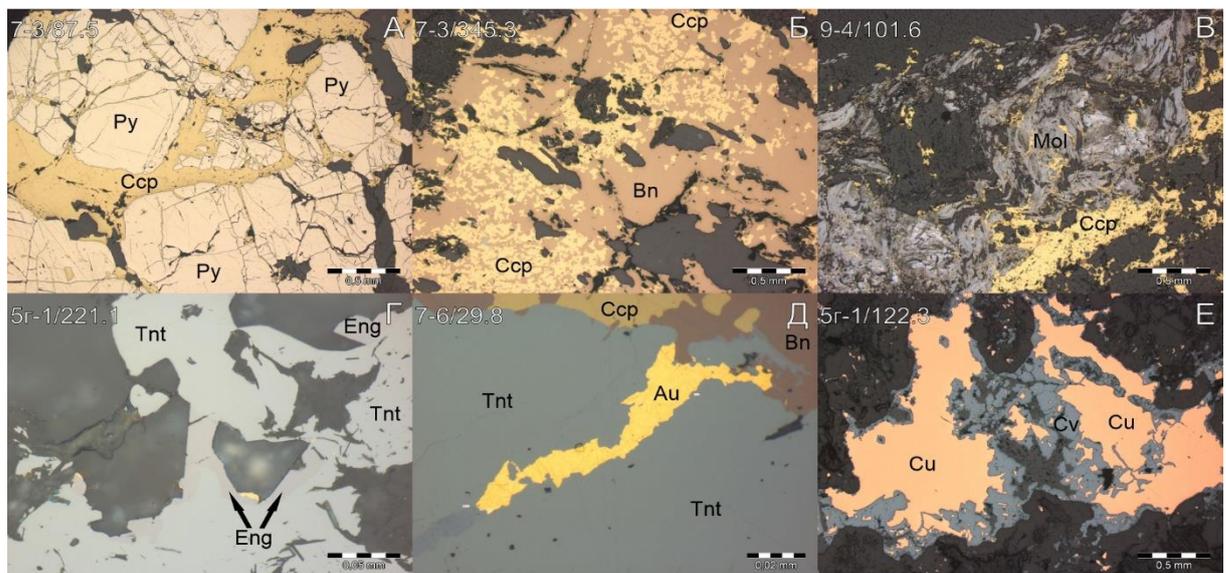


Рисунок 2.30. Минеральные ассоциации и типы руд месторождения Ак-Суг.

А – пирит-халькопиритовые; Б – борнит-халькопиритовые; В – халькопирит-молибденитовая ассоциация; Г – блеклорудно-халькопиритовая с энаргитом; Д – блеклорудно-халькопиритовая с борнитом и самородным золотом; Е – самородномедные с ковеллином.

### 2.2.3. Краткая характеристика основных рудных минералов

В данном параграфе использованы аббревиатуры минеральных видов согласно [Warr, 2021].

Халькопирит  $\text{CuFeS}_2$  – ведущий промышленный и рудный минерал Ак-Сугского Au-Mo-Cu-порфирового месторождения. Распространен во всех рудных залежах и отмечается в ассоциации с пиритом, борнитом, блеклыми рудами и другими минералами (Рис. 2.31). В составе халькопиритовых агрегатов и сростков кроме пирита и борнита часто отмечаются мелкие включения блеклой руды, гематита, галенита, айкинита, виттихенита, самородного золота, редко – алтаита и некоторых других рудных минералов. Химический состав халькопирита соответствует теоретическому (Табл. 9).

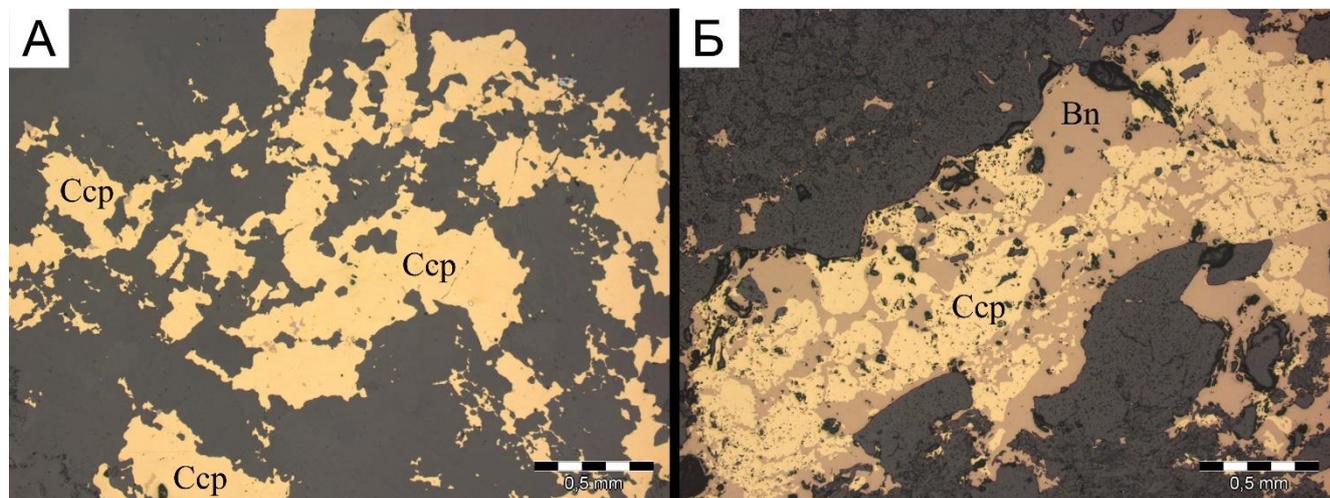


Рисунок 2.31. Халькопирит месторождения Ак-Суг.

А – халькопиритовая (Ccp) руда. Обр. 5г-2/74,9; Б – сростания борнита (Bn) и халькопирита (Ccp) Обр. 7-5/88,3.

Таблица 9. Химический состав халькопирита месторождения Ак-Суг.

№ аншлифа	№ анализа	Содержание элементов, мас.%			Сумма
		S	Fe	Cu	
7Г-1/27,4	23	36,26	30,53	32,67	99,45
7-3/87,5	4	34,67	30,37	35,09	100,13
7-5/54,3	24	35,73	30,37	35,42	101,54
10-5/275,0	7	35,82	30,78	34,76	101,36
	26	34,80	30,31	34,00	99,12
11-7/154,1	23	34,32	30,09	34,29	98,69
	27	34,46	30,02	34,11	98,59
11-9/268,0	43	35,60	31,10	32,81	99,51
	59	35,93	28,69	35,18	99,81

Пирит  $\text{FeS}_2$  также является одним из самых распространенных рудных минералов. Он является главным сульфидным минералом в верхней части разреза, а в нижней отмечается спорадически в виде ксеноморфных включений в других сульфидах. Минерал представлен многочисленными, практически всегда раздробленными метазернами сцементированными халькопирит-борнитовыми массами с участием блеклой руды, галенита, айкинита, виттихенита и некоторых других минералов (Рис. 2.32а). В составе пирита часто отмечаются округлые включения более раннего пирротина, реликты не до конца замещенных магнетита и гематита (Рис. 2.32б). Состав минерала (Табл. 10) стехиометричен, однако, в ходе изучения вещественного состава руд пропилитовой зоны месторождения, был обнаружен зональный пирит с примесями кобальта и меди (Рис. 2.33, Табл. 11).

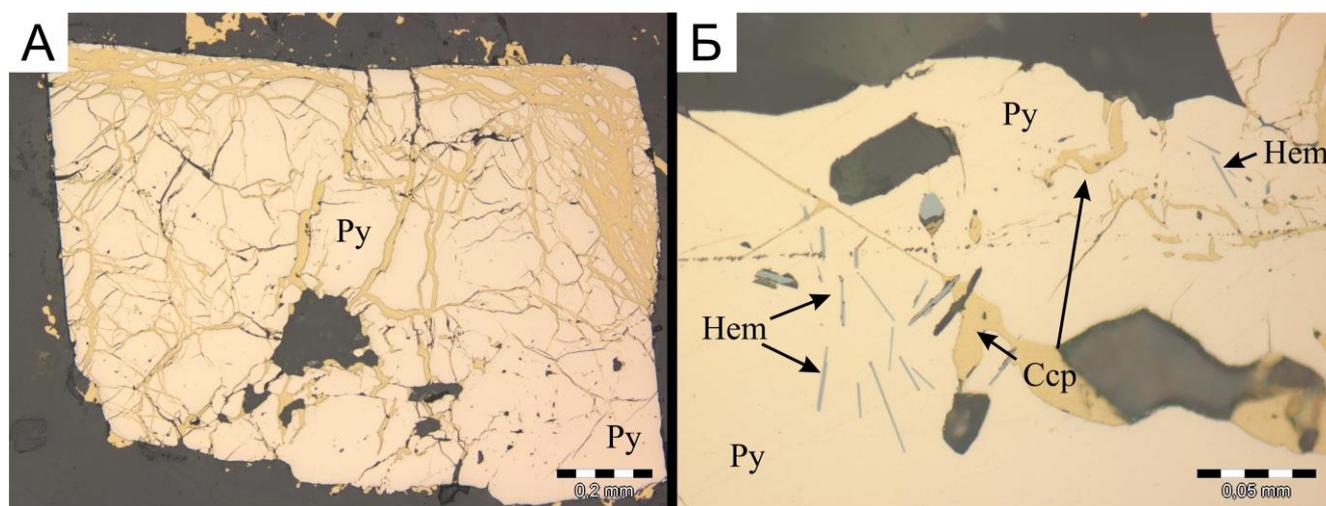


Рисунок 2.32. Пирит месторождения Ак-Суг.

А – идиоморфный катаклазированный кристалл пирита (P<sub>y</sub>) залечивается халькопиритом (Ccp).  
Обр. 10-5/275,0; Б – пластинки гематита (Hem) и реликты халькопирита (Ccp) в пирите (P<sub>y</sub>).  
Обр. 7-3/121,1.

Таблица 10. Химический состав пирита месторождения Ак-Суг.

№ аншлифа	№ анализа	Содержание элементов, мас. %		Сумма
		S	Fe	
7г-1/27,4	24	55,70	45,15	100,85
7-3/87,5	3	52,26	46,68	98,95
	8	53,61	47,08	100,69
10-5/275,0	6	54,21	46,80	101,01
	29	53,51	46,54	100,05
11-9/268,0	34	54,43	46,32	100,75
	92	54,13	46,43	100,56
	101	54,61	45,75	100,37

Согласно опубликованной информации «Количество Cu-Co-содержащего пирита в полированных шлифах в зоне пиритового ореола месторождения достигает первых процентов. Содержание Cu в нем составляет 3,77–5,19 мас. %, Co – 1,26–1,65 мас. % (Табл. 11). Этот пирит имеет неравномерную окраску, а зоны с повышенным содержанием Cu в нем отчетливо выделяются розоватым цветом (Рис. 2.33). Кристаллы часто идиоморфные, их размеры достигают 35–45 мкм. Кристаллы Cu-Co-содержащего пирита не срastaются с другими рудными минералами и состоят из двух генераций: ранней в центральных частях кристаллов и поздней с Cu и Co по краям. Между ними отмечаются узкие участки розового цвета, содержащие повышенные концентрации Cu. В кристалле (Рис. 2.33) отмечается некоторая зависимость между содержаниями Cu и Co: в зонах пирита без Cu, содержание Co составляет 0,38–0,39 мас. %, а на участках с более высоким содержанием Cu содержание Co возрастает до 1,26–1,65 мас. %» [Шадчин и др., 2024].

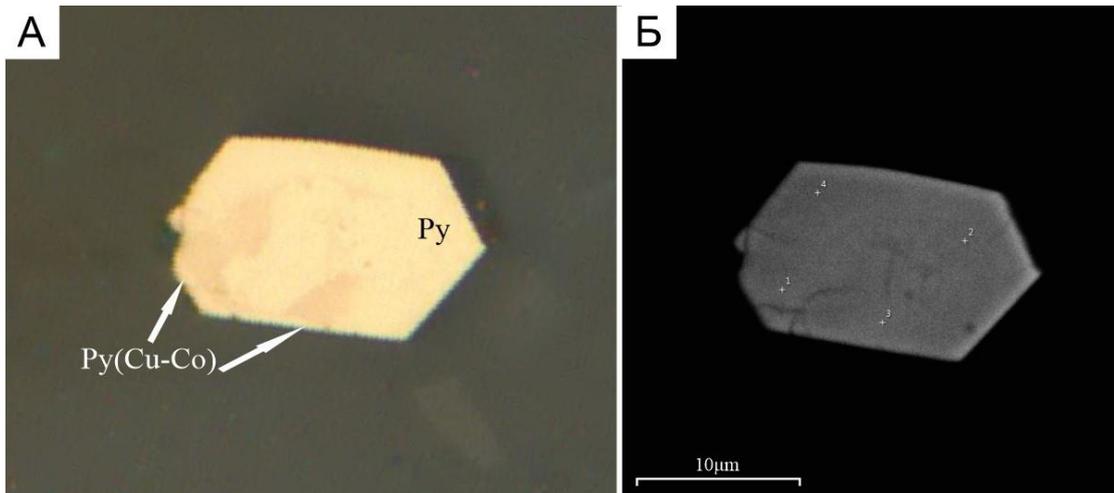


Рисунок 2.33. Кристалл медь–кобальтсодержащего пирита месторождения Ак-Суг.

А – отраженный свет; Б – обратно-рассеянные электроны. Обр. 13-3/316,5. Номера анализов соответствуют указанным в табл. 11.

Таблица 11. Химический состав кристалла медь–кобальтсодержащего пирита.

№ аншлифа	№ анализа	Содержание элементов, мас. %				Сумма
		S	Fe	Cu	Co	
13-3/316,5	1	55,58	39,73	3,77	1,65	100,73
	2	56,02	44,42	-	0,39	100,84
	3	55,38	38,94	5,19	1,26	100,78
	4	56,14	44,47	0,00	0,38	100,98

Борнит  $Cu_5FeS_4$  также является одним из главных рудных минералов Ак-Сугского месторождения. Он широко распространен практически во всех типах руд, ассоциируя с халькопиритом, пиритом, халькозином, молибденитом, реже – блеклой рудой, энаргитом, галенитом, самородным золотом (Рис. 2.34, Табл. 12). Наибольшие скопления борнита сконцентрированы в пределах Северной рудной залежи в пределах тел тоналит-порфиров. Состав борнита стехиометричен.

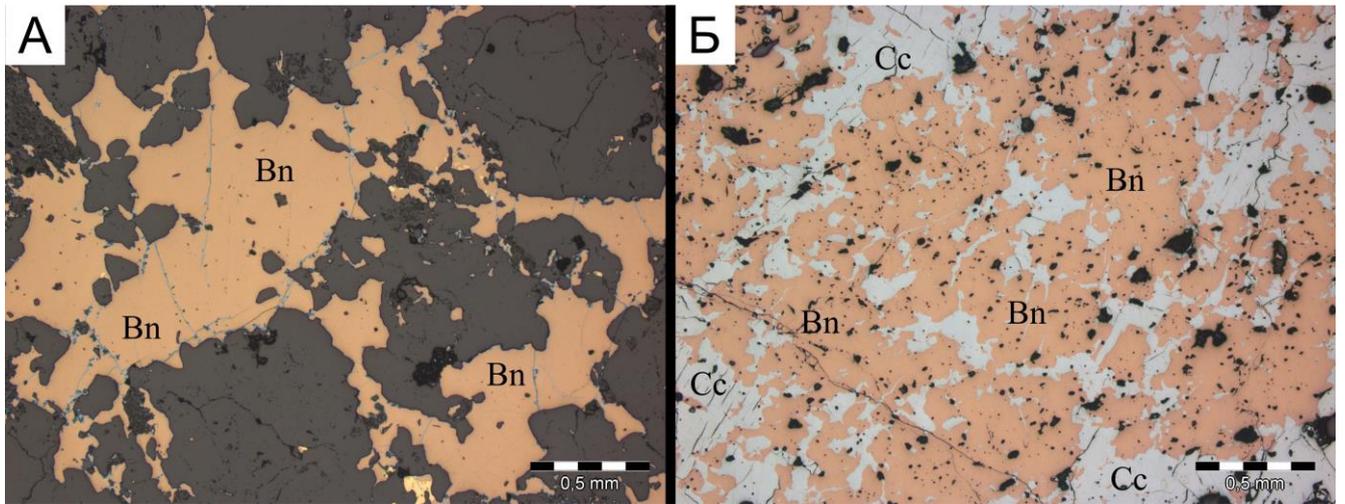


Рисунок 2.34. Борнит месторождения Ак-Суг.

А – борнит (Bn) с тонкими каймами вторичных минералов. Обр. К7/265,7; Б – сростки борнита (Bn) и халькозина (Cc) Обр. 5Г-2/225,0.

Таблица 12. Химический состав борнита месторождения Ак-Суг.

№ аншлифа	№ анализа	Содержание элементов, мас.%			Сумма
		S	Fe	Cu	
5Г-1/290,3	3	26,35	11,07	63,22	100,63
5Г-2/225,0	25	27,01	10,90	61,58	99,49
	36	27,16	10,15	61,81	99,12
7-4/237,8	4	27,43	12,24	59,57	99,24

Молибденит  $\text{MoS}_2$  также имеет ведущее промышленное значение. Согласно опубликованным данным [Макаров и др., 2024] «минерал образует вкрапленность в виде мелких лейст, изогнутых пластинок и их агрегатов, нарастающих на более ранние сульфиды меди и железа (Рис. 2.35). На месторождении Ак-Суг молибденит представлен двумя разновозрастными генерациями. Первая, наиболее ранняя, представлена мелкочешуйчатой разновидностью и связывается с ранним этапом формирования тоналит-порфиров 3-й фазы аксугского комплекса (Рис. 2.35а). Нахождение в рудах данной разновидности минерала достаточно ограниченное и связано преимущественно с медной минерализацией. Вторая генерация молибденита более крупночешуйчатая, сопряженная с внедрением плагиогранит-порфиров в центральной части интрузии. Выделения минерала представляют собой «сухие» мономинеральные прожилки, пересекающие более

ранние халькопиритовые руды (Рис. 2.35б). Помимо различий в облике минералов, генерации отчетливо различаются между собой по содержанию рения. Содержания в молибдените-I изменяются в диапазоне 400–650 г/т, в молибдените-II 100-400 г/т [по Pollard et al., 2017]». Химический состав молибденита соответствует теоретическому (Табл. 13).

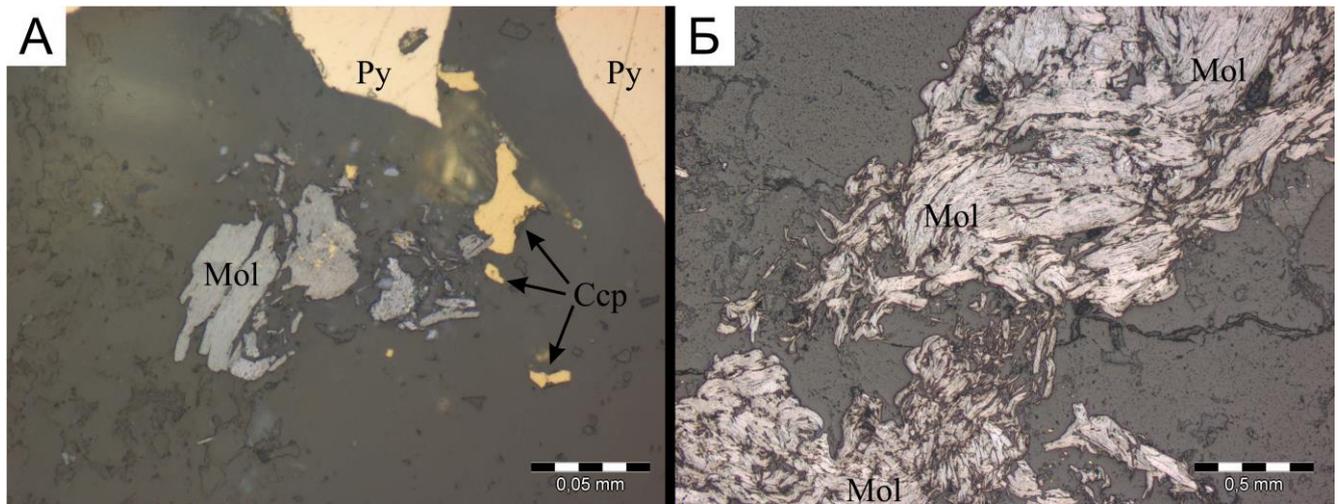


Рисунок 2.35. Молибденит месторождения Ак-Суг.

А – мелкочешуйчатый молибденит (Mol) в ассоциации с халькопиритом (Ccp) и борнитом (Bn). Обр. 7-5/69,5; Б – крупночешуйчатый молибденит. Обр. 7-5/236,0.

Таблица 13. Химический состав молибденита месторождения Ак-Суг.

№ аншлифа	№ анализа	Содержание элементов, мас.%		Сумма
		S	Mo	
6-1/973,1	57	39,18	60,93	100,11
	58	39,83	59,39	99,22
7-5/435,0	6	39,41	60,10	99,52
	7	39,21	61,14	100,35

Минералы группы блеклых руд имеют значительное распространение в рудах Северной залежи в виде ксеноморфных агрегатов и небольших зерен. Для них характерно тесное срастание с борнитом или халькопиритом, по которым они развиваются (Рис. 2.36а). Достаточно часто в составе блеклой руды отмечаются включения халькопирита, галенита и самородного золота (Рис. 2.36б).

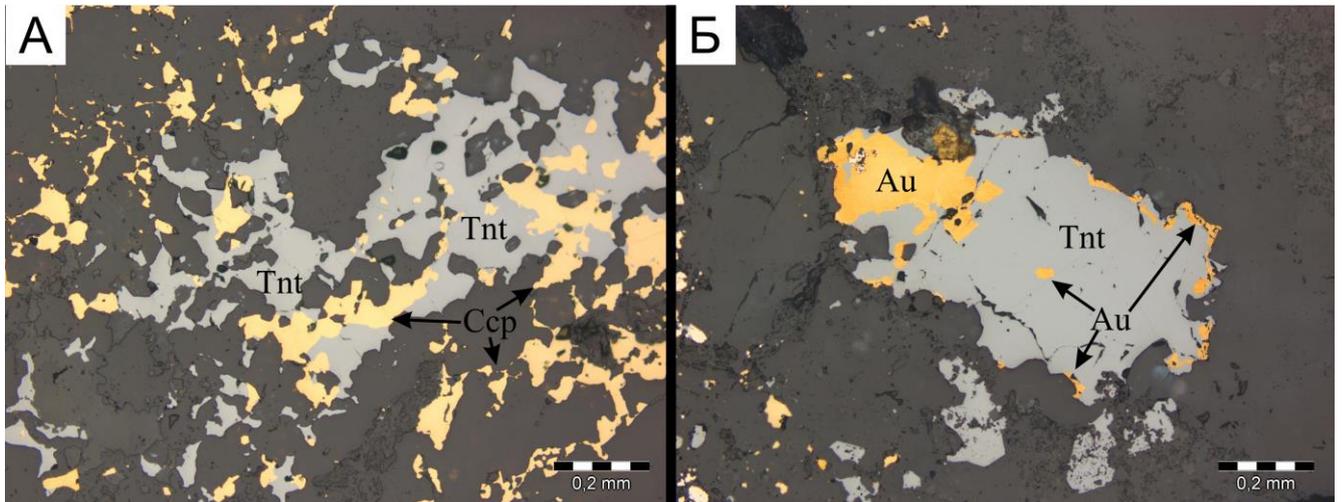


Рисунок 2.36. Блеклые руды месторождения Ак-Суг.

А – теннантит (Tnt) в ассоциации с халькопиритом (Ccp). Обр. 13-3/336,0; Б – теннантит (Tnt) с включениями и каймами самородного золота (Au). Обр. 7-5/54,3.

Согласно монографии [Макаров и др., 2024], «блеклая руда на Ак-Сугском месторождении представлена в основном теннантитом, т.е. ее мышьяковистой разновидностью. Исследованиями работников Тувинского института комплексного освоения природных ресурсов СО РАН выявлено, что блеклые руды месторождения относятся к промежуточным членам ряда теннантит-тетраэдрит, в которых максимальное содержание сурьмы достигает 11,34 мас. % (поздняя генерация) [Кужугет и др., 2018]. При этом отмечается постепенное замещение теннантита тетраэдритом, что в целом характерно для большинства плутоногенных месторождений [Спиридонов и др., 2008; Справочник-определитель..., 1988]. В составе отдельных зерен минералов блеклых руд третьей генерации этими авторами отмечается присутствие висмута в количестве до 1,47 мас. %. Известно, что теннантиты распространены на месторождениях, богатых медью, а тетраэдриты – на полиметаллических и свинцово-серебряных месторождениях [Мозгова, 1985]. Сурьмянистые блеклые руды по сравнению с мышьяковистыми к тому же указывают на более щелочные условия минералообразования [Минералогические индикаторы..., 1987]». Также диссертантом подтверждается преобладание на месторождении теннантита с незначительным количеством сурьмы (до 4,26 мас. %), однако, в отдельных

сростках отмечаются типичные, причем зональные, тетраэдриты, которые по краям замещаются теннантитами (Рис. 2.37, Табл. 14). Такой тип эволюции блеклых руд (снижение сурьмянистости от ранних к поздним генерациям) характерен для некоторых глубоко залегающих плутогенных месторождений золота [Спиридонов и др., 2008; Филимонов, 2009]. Кроме этого, на глубоких горизонтах месторождения обнаружены теллурсодержащие блеклые руды (Табл. 14).

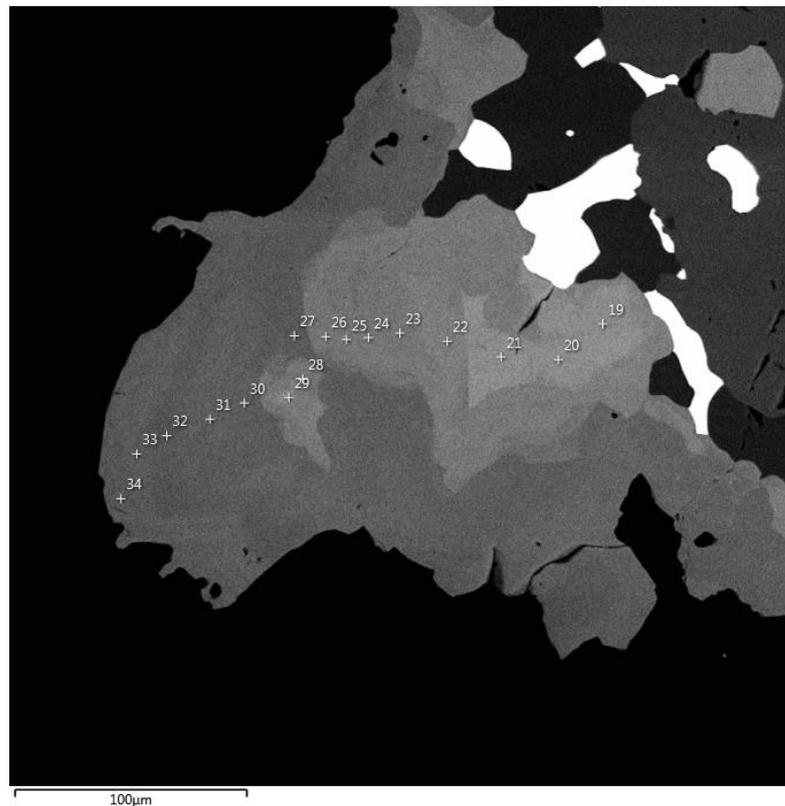


Рисунок 2.37. Замещение тетраэдрита теннантитом.

Обратно-рассеянные электроны. Обр. Зг-1/342,0. Номера анализов соответствуют указанным в табл.14.

Таблица 14. Химический состав блеклых руд месторождения Ак-Суг.

№ аншлифа	№ ан-за	Содержание элементов, мас. %									Сумма
		S	Fe	Cu	Zn	As	Sb	Ag	Bi	Te	
3Г-1/282,0	5	26,73	0,34	43,63	8,75	20,93	0,28	0,25	-	-	100,91
	17	25,28	4,15	48,50	5,78	14,56	-	0,73	-	-	99,00
3Г-1/306,7	5	26,48	-	41,32	8,15	16,35	6,32	-	-	-	98,52
	7	26,82	-	41,10	6,04	19,30	3,76	-	-	-	99,02
3Г-1/342,0	19	23,85	-	38,40	7,63	3,62	23,86	0,52	1,55	-	99,43
	20	23,65	-	39,22	8,07	3,04	24,26	0,47	1,58	-	100,29
	33	25,73	-	42,18	8,39	15,07	8,14	-	-	-	99,50
	34	27,71	0,32	41,32	8,11	15,21	7,98	-	-	-	100,65
6-1/973,1	6	26,97	1,76	41,29	0,76	12,20	-	-	7,87	6,60	97,40
	12	24,92	2,27	38,69	0,77	13,47	-	-	11,87	8,68	100,67
	16	27,30	1,31	41,95	0,89	11,17	-	0,38	5,30	10,33	98,63
	20	26,95	1,58	40,39	-	11,72	-	0,34	8,84	6,89	96,70
	38	25,29	2,34	43,07	1,82	12,91	-	-	8,42	5,82	99,68
	39	26,05	1,76	45,45	1,51	13,92	-	-	4,43	9,07	102,19
7-5/54,3	20	27,76	1,10	45,69	4,28	17,91	4,11	-	-	-	100,85
	25	27,50	2,37	42,84	4,69	18,96	4,26	-	-	-	100,63
7-6/29,0	10	28,28	3,61	51,82	-	15,51	0,89	-	-	-	101,21
	13	25,75	2,67	51,05	-	19,58	0,91	-	-	-	99,95
11-7/240,0	16	29,43	3,85	42,15	5,37	17,50	-	-	3,56	-	101,86
	21	30,34	9,99	39,36	4,26	14,45	-	0,46	2,78	-	101,65
11-9/162,2	3	28,56	2,91	41,90	4,54	21,31	-	-	-	-	99,22
11-9/268,0	44	29,90	7,42	42,42	-	18,12	-	0,34	-	-	98,19
	50	29,45	8,11	42,77	-	19,54	-	0,48	-	-	100,35

В работе [Макаров и др., 2024] также отмечается «многие зерна блеклой руды содержат незначительную примесь серебра, от 0,15 мас. % до 0,73 мас. %. Причем эти содержания характерны как для теннантита, так и для тетраэдрита, и для висмут- и теллурсодержащей блеклой руды (Табл. 14). Кроме этого, была обнаружена блеклая руда с высокими содержаниями висмута: от 1,56 мас. % до 16,88 мас. % (Рис. 2.38, Табл. 15). Причем устанавливается, что висмутсодержащий теннантит развивается за счет замещения обычного теннантита, с образованием маломощных кайм по нему. По данным [Справочник-определитель..., 1988], висмутсодержащие блеклые руды распространены в гидротермальных месторождениях висмута, в вулканогенных колчеданно-полиметаллических месторождениях и в вулканогенных месторождениях золота».

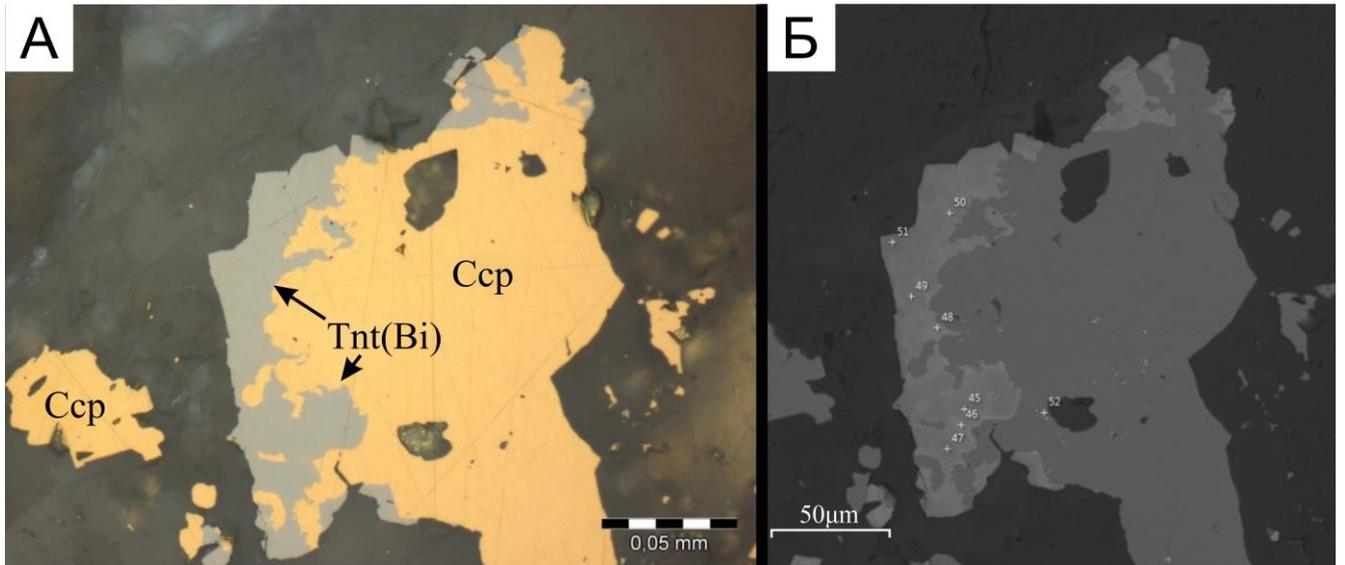


Рисунок 2.38. Висмутсодержащий теннантит.

А – каймы висмутсодержащего теннантита (Tnt (Bi)) обрастают халькопирит (Ccp) (отраженный свет); Б – обратно-рассеянные электроны. Обр. 10-5/275,0. Номера анализов соответствуют указанным в табл. 15.

Таблица 15. Химический состав висмутсодержащей блеклой руды.

№ аншлифа	№ ан-за	Содержание элементов, мас. %							Сумма
		S	Fe	Cu	Zn	As	Sb	Bi	
10-5/275,0	45	29,62	0,89	42,19	8,15	17,58	0,34	2,88	101,64
	46	26,81	0,86	38,36	7,56	10,31	0,57	16,88	101,37
	47	29,46	0,78	41,97	8,39	17,20	0,60	3,37	101,76
	48	27,45	1,18	38,55	7,08	10,57	1,07	15,20	101,76
	49	29,56	0,81	41,97	7,49	16,60	0,47	4,41	101,31
	50	28,36	1,16	41,07	7,49	13,77	0,70	9,41	101,96

На Ак-Сугском месторождении также широко распространен энаргит  $Cu_3AsS_4$ . Он часто встречается в ассоциации с халькопиритом и борнитом по периферии теннантитовых агрегатов, замещая последний (Рис. 2.39). Минерал имеет состав, близкий к теоретическому (Табл. 16), а небольшие примеси железа являются для данного минерала обычными [Справочник-определитель..., 1988] и могут объясняться составами исходных блеклых руд, по которым развивается энаргит.

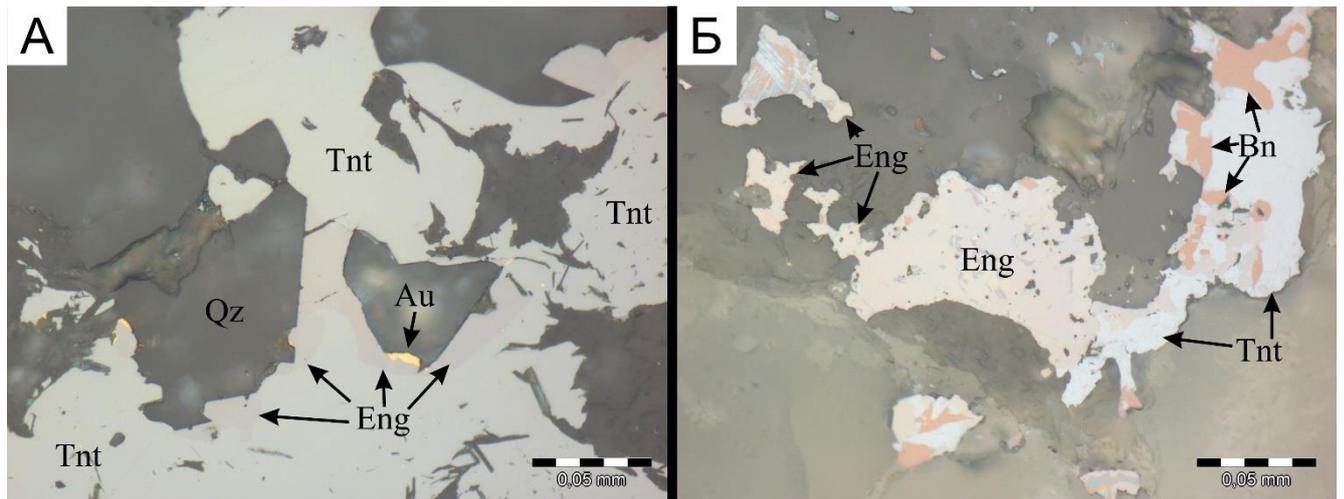


Рисунок 2.39. Энаргит месторождения Ак-Суг.

А – каймы энаргита по теннантиту, Обр. 5г-1/221,1; Б – энаргит обрастает и замещает теннантит, Обр. 5г-1/290,3.

Таблица 16. Химический состав энаргита месторождения Ак-Суг.

№ аншлифа	№ анализа	Содержание элементов, мас. %				Сумма
		S	Fe	Cu	As	
5г-1/290,3	1	33,18	-	48,61	18,03	99,82
	2	31,82	1,33	46,81	18,19	98,15
5г-1/221,1	6	33,3	-	46,91	18,65	98,85
	9	33,39	-	46,69	18,45	98,54
	10	32,90	-	47,02	18,94	98,86
6-5/65,0	5	29,28	3,64	48,76	18,49	100,16

Самородная медь имеет значительное распространение на Ак-Сугском месторождении и, согласно опубликованным исследованиям, имеет не только гипергенное, но и гипогенное происхождение [Шведов и др., 2021]. Согласно геологическим данным, самородная медь была неоднократно обнаружена на глубинах от 32,0 м до 386,0 м, преимущественно в западной и северо-западной частях месторождения в приконтактной зоне с вулканогенно-осадочными отложениями толтаковской свиты. Чаще всего самородная медь имеет беспримесный состав и отмечается в агрегативных сростках с рутилом, цирконом и фторапатитом (Рис. 2.40, Табл. 17). В ходе углубленных исследований самородномедной минерализации на Ак-Сугском месторождении были обнаружены зерна и агрегаты самородной меди с примесью мышьяка от

2,35 мас. % до 4,5 мас. %, замещающиеся арсенидами меди – альгодонитом и  $\alpha$ -домейкином. Установлено, что данная разновидность самородной меди (содержащая в своем составе значительные количества мышьяка) имеет гипогенный генезис. [Шведов и др., 2021]. В описываемых случаях, самородная медь размещается в тонких (2–4 мм) кварц-карбонатных (с кальцитом и анкеритом) прожилках и находится в тесном сростании с многочисленными зернами и кристаллами фтор-апатита и барита (Рис. 2.41, Табл. 17, 18). Интересно, что в сростании с мышьяксодержащей самородной медью обнаружены субмикроскопические зерна самородного серебра, что является характерной чертой для крупных месторождений самородной меди [Уайт, 1972]. Известно, что гипогенная самородная медь ассоциирует с халькозином, арсенидами меди, карбонатами. Медь гипергенного происхождения находится в ассоциации с купритом, гидроксидами железа и карбонатами меди. Формирование самородномедной минерализации вместо сульфидной медьсодержащей, согласно [Минералы, 1960], может быть связано как с восстановительной обстановкой минералообразования, так и с окисленным состоянием флюида. Присутствие в рудах Ак-Сугского месторождения гипогенных сульфидов с пониженным содержанием железа относительно халькопирита (борнит) или полного отсутствия (халькозин, ковеллин) в ассоциации с магнетитом и гематитом свидетельствует в пользу последнего варианта.

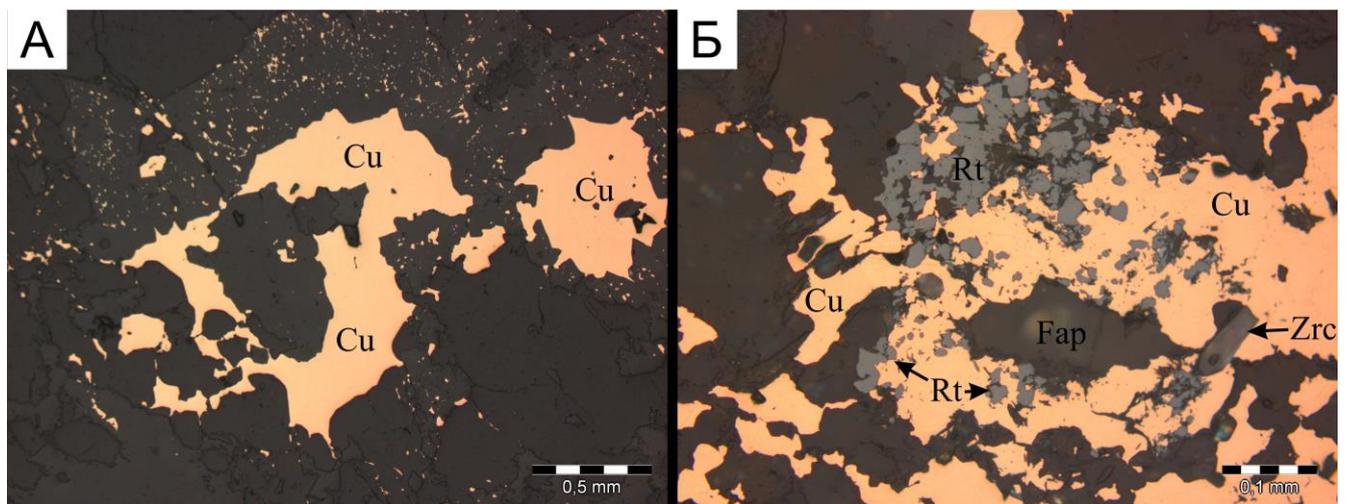


Рисунок 2.40. Самородная медь месторождения Ак-Суг.

А – крупные агрегаты самородной меди (Cu) Обр. 5-4/263,1; Б – самородная медь (Cu) в сростании с цирконом (Zrc) F-апатитом (Fap) и рутилом (Rt) Обр. 5-4/154,0.

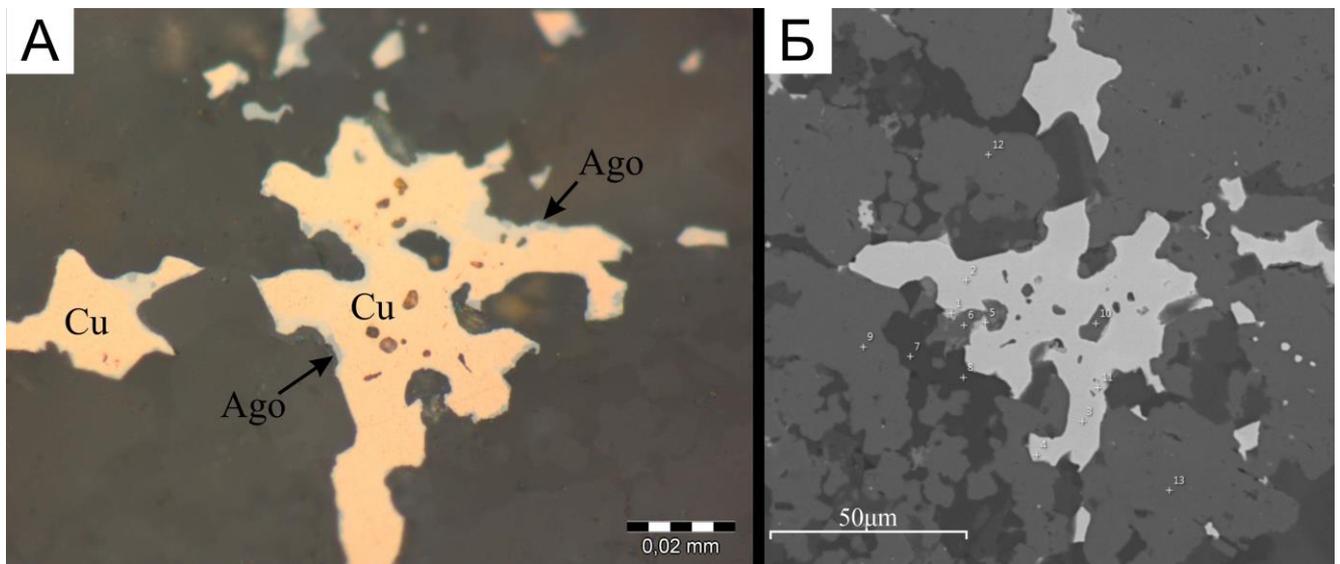


Рисунок 2.41. Зерна и агрегаты мышьяксодержащей самородной меди.

А – самородная медь (Cu) с альгодонитом (Ago) (отраженный свет); Б – обратно-рассеянные электроны. Обр. 5-4/263,1. Номера анализов соответствуют указанным в табл. 17.

Таблица 17. Химический состав мышьяк-содержащей самородной меди.

№ аншлифа	№ ан-за	Содержание элементов, мас. %			Сумма
		Fe	Cu	As	
5-4/263,1	2	-	97,51	2,55	100,07
	3	-	97,63	2,35	99,98
	14	-	96,56	2,48	99,04
	18	-	97,04	4,31	101,35
	19	-	98,00	2,87	100,87
	20	-	97,63	3,87	101,50
	26	0,88	94,02	4,40	99,29

Альгодонит  $Cu_6As$  и  $\alpha$ -Домейкит  $Cu_3As$  относятся к малораспространенным редким минералам месторождения Ак-Суг. Данные минералы выделены и диагностированы в вышеописанных ассоциациях, как фазы, обрастающие по краям и замещающие агрегаты мышьяксодержащей самородной меди (Рис. 2.42, Табл. 18).

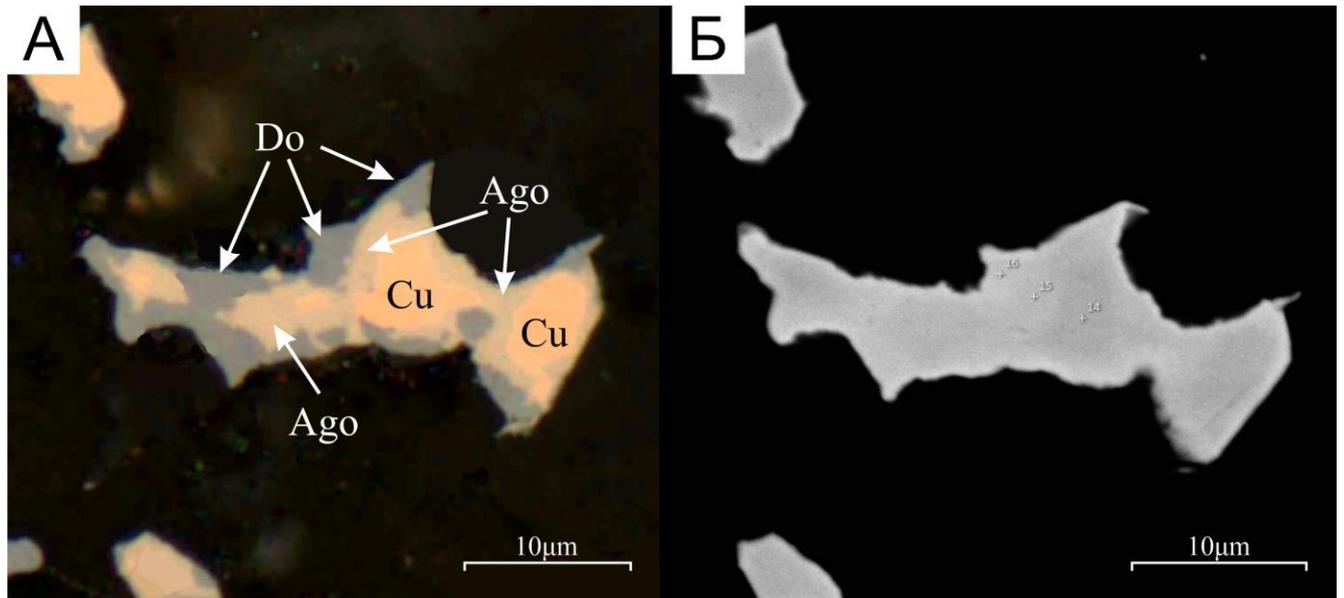


Рисунок 2.42. Замещение самородной меди альгодонитом и  $\alpha$ -домейкитом.

А – самородная медь (Cu) с альгодонитом (Ago) и домейкитом (Do) (отраженный свет); Б – Обратнo-рассеянные электроны. Анш. 5-4/263,1. Номера анализов соответствуют указанным в табл. 18.

Коутекит  $\text{Cu}_5\text{As}_2$  является еще более редким минералом, обнаруженным в ассоциации с мышьяковистой самородной медью и замещающими ее соединениями мышьяка и меди. Минерал образует самостоятельные мелкие зерна [Макаров и др., 2024] (Рис. 2.43, Табл. 18).

Таблица 18. Химический состав арсенидов меди.

№ аншлифа	№ ан-за	Содержание элементов, мас. %			Сумма	Кристаллохимическая формула	Минерал
		Fe	Cu	As			
5-4/263,1	14	-	96,56	2,48	99,04	$\text{Cu}_{6,01}\text{As}_{0,99}$	As-сам. медь
	15	0,49	81,20	19,08	100,78	$(\text{Cu}_{5,80}\text{Fe}_{0,04})_{5,84}\text{As}_{1,16}$	Альгодонит
	16	0,54	69,63	31,12	101,30	$(\text{Cu}_{2,88}\text{Fe}_{0,03})_{2,91}\text{As}_{1,09}$	Домейкит
	26	-	69,72	31,24	100,96	$\text{Cu}_{5,07}\text{As}_{1,93}$	Коутекит
	44	-	67,33	33,68	101,01	$\text{Cu}_{4,91}\text{As}_{2,09}$	
	49	-	69,03	32,58	101,61	$\text{Cu}_{5,00}\text{As}_{2,00}$	

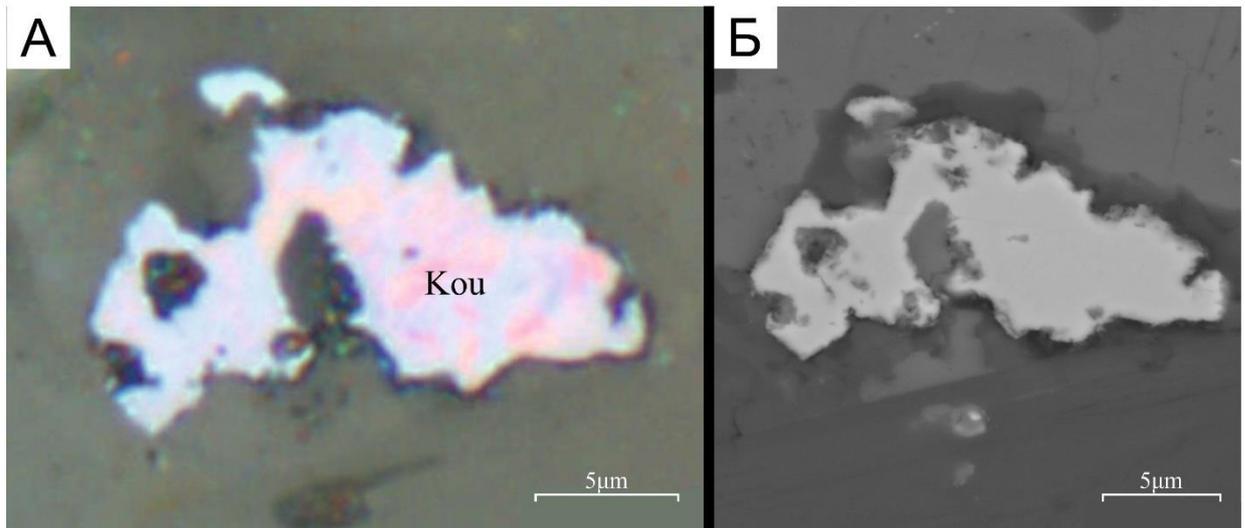


Рисунок 2.43. Коутекит месторождения Ак-Суг

А – зерно коутекита (Kou) (отраженный свет); Б – обратно-рассеянные электроны. Анш. 5-4/263,1.

Самородное золото содержится на месторождении в промышленных масштабах и является одним из экономически значимых металлов на Ак-Суге. Согласно опубликованным данным [Кужугет и др., 2015] самородное золото представлено тремя-четырьмя генерациями с широкими вариациями составов: от электрума ( $\text{Au} = 33,04\text{--}69,61$ ;  $\text{Ag} = 29,81\text{--}66,20$ ;  $\text{Te} = 0,00\text{--}0,76$  мас. %) до весьма высокопробного золота ( $\text{Au} = 95,86$ ;  $\text{Ag} = 4,08$  мас. %). Основная часть обнаруженных и описанных при участии диссертанта зерен самородного золота относится к золоту средней и низкой пробности ( $\text{Ag} = 9,34\text{--}25,45$  мас. %;  $\text{Au} = 85,00\text{--}74,35$  мас. %) (Табл. 19). Реже отмечаются зерна золота весьма высокой пробности ( $\text{Ag} = 2,45\text{--}2,77$  мас. %;  $\text{Au} = 95,92\text{--}97,83$  мас. %) и электрума ( $\text{Ag} = 33,55\text{--}40,79$  мас. %;  $\text{Au} = 59,20\text{--}66,45$  мас. %). Весьма высокопробное золото обнаружено в составе кварца среди агрегатов халькопирит-борнит-халькозинового состава с участием пирита и молибденита. Золото средней и низкой пробы обычно тесно срачивается с халькопиритом, борнитом, теннантитом. Электрум может размещаться в кварце, а также находиться в тесном срастании с гесситом, халькопиритом, висмутсодержащим теннантитом, виттихенитом (Рис. 2.44, 2.45, Табл. 19).

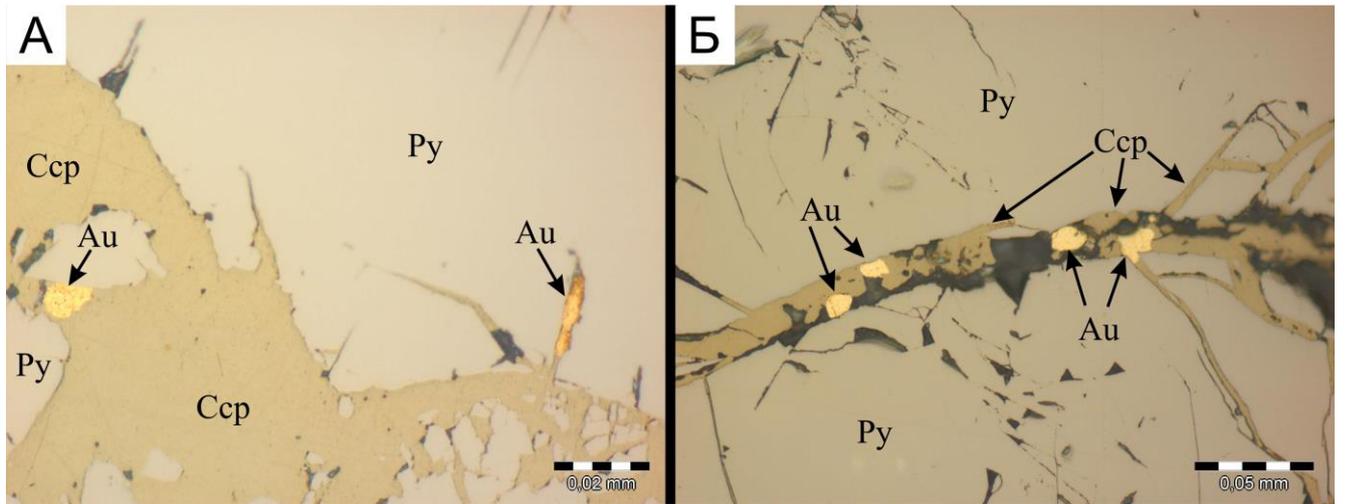


Рисунок 2.44. Золото-сульфидная ассоциация месторождения Ак-Суг.

А – самородное золото (Au) в халькопирите (Ccp) и пирите. Обр. 7-3/87,5; Б – золото (Au) в халькопиритовом (Ccp) прожилке среди пирита (Py). Обр. 11-7/154,1.

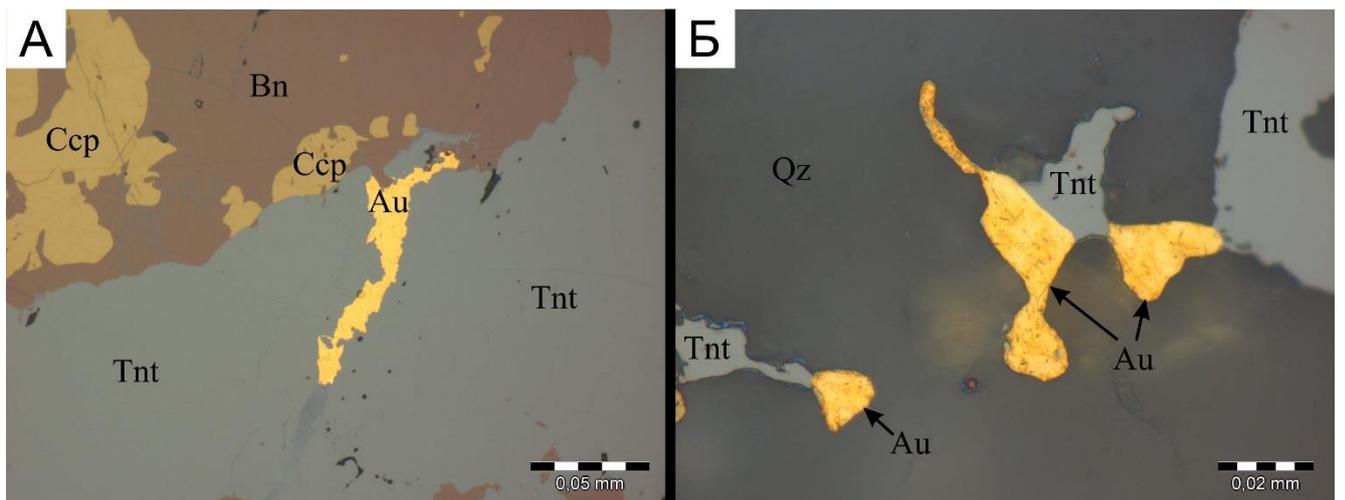


Рисунок 2.45. Золото-блеклорудная ассоциация месторождения Ак-Суг.

А – золото-борнит-теннантитовые сростки. Обр. 7-6/29,8.; Б – сростки самородного золота (Au) с теннантитом (Tnt) в кварцевом (Qz) прожилке. Обр. 7-5/54,3.

Значительный интерес представляют процессы замещения электрума его ртутистой разновидностью (Рис. 2.46, Табл. 19). Образование прожилков ртутистого электрума обусловлено низкой фугитивностью серы [Справочник-определитель..., 1988]. Данный факт на месторождении Ак-Суг многократно подтверждается значительным распространением селенидов и теллуридов цветных и благородных металлов.

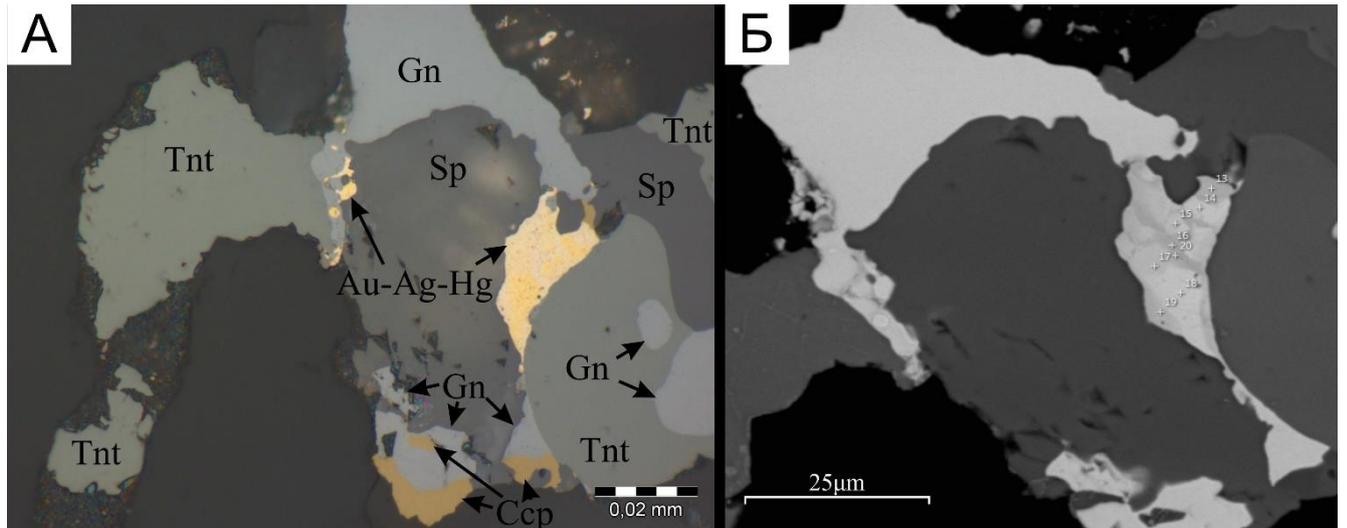


Рисунок 2.46. Замещение электрума ртутистым электрумом.

А – золото-серебряный ртутьсодержащий сплав (Au-Ag-Hg) в ассоциации с галенитом (Gn), сфалеритом (Sp) и теннантитом (Tnt) (отраженный свет); Б – обратно-рассеянные электроны. Обр. 3г-1/306,7. Номера анализов соответствуют указанным в табл. 19.

Таблица 19. Химический состав Au-Ag-сплавов месторождения Ак-Суг.

№ аншлифа	№ ан-за	Содержание элементов, мас. %				Сумма	Минерал
		Cu	Ag	Au	Hg		
6-5/65,6	6	-	5,71	94,29	-	100,00	Золото
7-3/87,5	2	-	13,59	85,91	-	99,59	Золото
	5	-	13,25	86,51	-	99,76	Золото
7-4/237,8	1	1,19	10,25	89,32	-	100,78	Золото
7-5/54,3	1	-	11,38	90,11	-	101,49	Золото
	3	-	11,40	88,42	-	99,82	Золото
11-9/268,0	18	-	37,81	62,64	-	100,44	Электрум
	37	-	33,55	66,46	-	100,00	Электрум
	39	-	39,05	60,95	-	100,00	Электрум
	48	-	40,79	59,21	-	100,00	Электрум
3г-1/306,7	13	-	59,63	38,84	1,83	100,3	Hg-электрум
	14	-	24,90	76,08	-	100,98	Электрум
	15	-	37,17	65,11	-	102,28	Электрум
	16	-	67,94	29,23	5,37	102,54	Hg-электрум
	17	-	41,48	59,06	-	100,53	Электрум
	18	-	23,51	76,94	-	100,46	Электрум
	19	-	50,75	51,23	-	101,97	Электрум

Наряду с самородным золотом и самородной медью в рудах Ак-Сугского месторождения обнаружено самородное серебро (Рис. 2.47). Наиболее часто оно

отмечается в составе ксеноморфных зерен или маломощных кварцевых прожилков в ассоциации с блеклыми рудами и сульфидами – галенитом, сфалеритом, халькопиритом и другими минералами. Проанализированные зерна самородного серебра имеют беспримесный состав (Табл. 20).

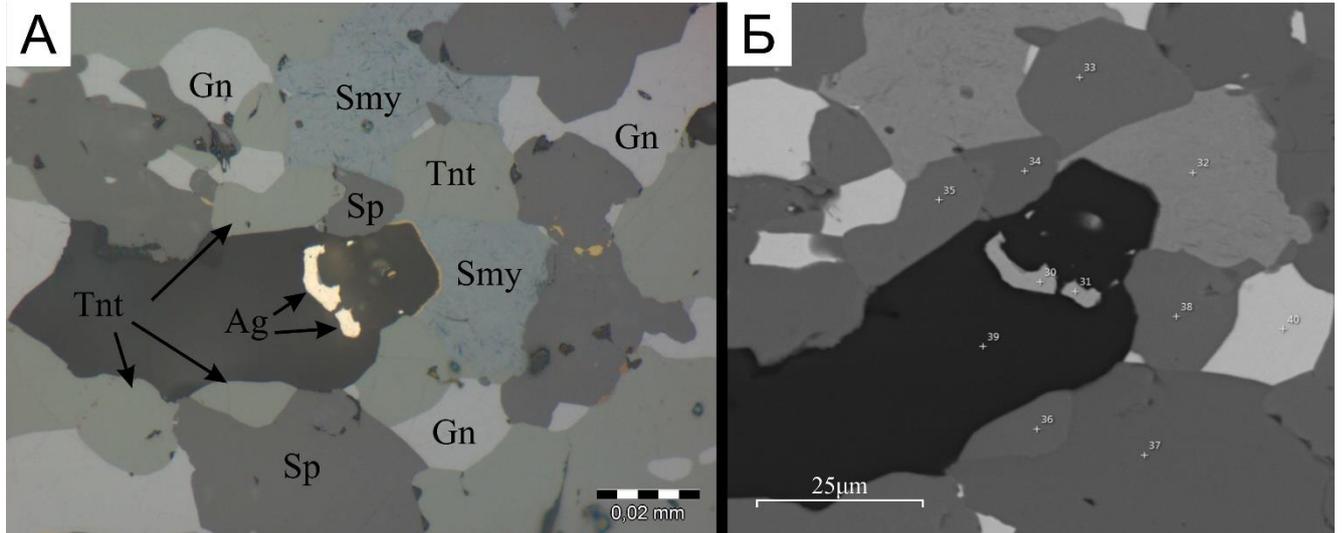


Рисунок 2.47. Самородное серебро месторождения Ак-Суг.

А – мелкие зерна самородного серебра в ассоциации с галенитом (Gn), сфалеритом (Sp), теннантитом (Tnt) и штрмейеритом (Smy) (отраженный свет); Б – обратно-рассеянные электроны. Обр. 3г-1/292,0. Номера анализов соответствуют указанным в табл. 20.

Таблица 20. Химический состав самородного серебра и ассоциирующих с ним минералов.

№ аншлифа	№ ан-за	Содержание элементов, мас. %						Сумма	Минерал
		S	Cu	Zn	As	Ag	Sb		
3г-1/292,0	30	-	-	-	-	100,38	-	100,38	Сам. серебро
	31	-	-	-	-	99,91	-	99,91	Сам. серебро
	32	15,46	31,84	-	-	52,82	-	100,12	Штрмейерит
	33	26,38	42,74	9,24	20,49	0,66	0,46	99,97	Теннантит
	34	32,69	1,21	65,33	-	-	-	99,23	Сфалерит
	35	26,54	43,57	8,81	20,87	0,46	0,22	100,47	Теннантит
	36	26,53	42,01	10,69	20,24	-	-	99,47	Теннантит
	37	32,82	-	66,25	-	-	-	99,08	Сфалерит
	38	26,41	42,49	9,58	20,53	0,62	-	99,64	Теннантит

Халькозин  $Cu_2S$  – один из наиболее распространенных второстепенных минералов Ак-Сугского месторождения. Представлен двумя различными модификациями: гипогенный ромбический халькозин с хорошо выраженными

пластинчатыми двойниками, ассоциирующий с борнитом (см. Рис. 2.34, 2.48а), и гипергенный халькозин, ограниченно распространенный в зоне окисления и ассоциирующий с гипергенным ковеллином (Рис. 2.48б), а также с окислами и гидроокислами железа. Чаще всего, халькозин имеет беспримесный состав и хорошую стехиометрию, однако, в некоторых образцах, в ассоциации с мышьяковистой самородной медью и соединениями меди и мышьяка, халькозин содержит достаточно высокие содержания селена (Табл. 21).

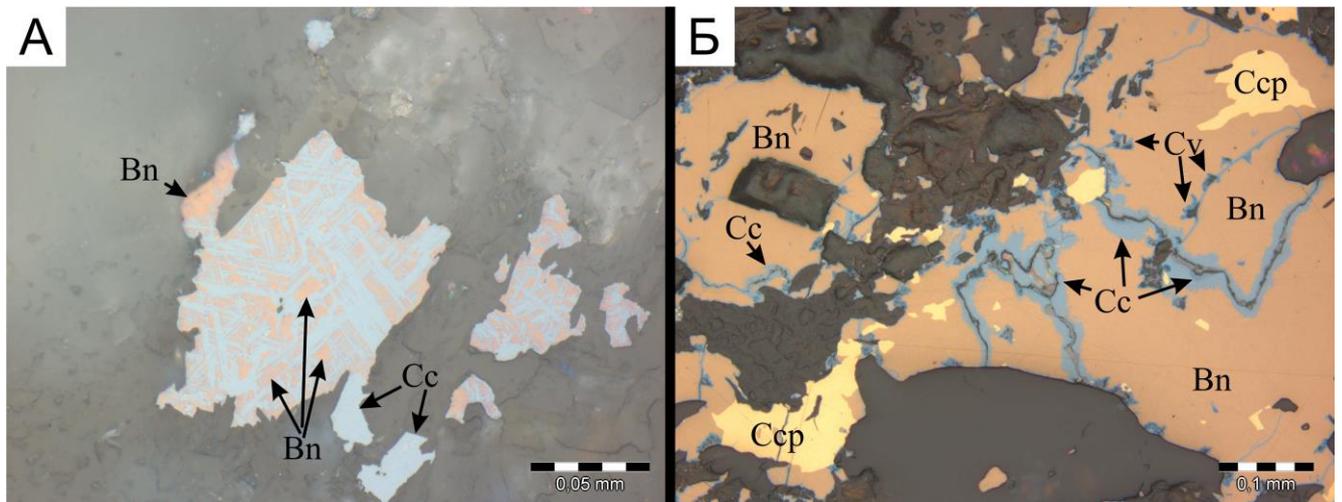


Рисунок 2.48. Халькозин месторождения Ак-Суг.

А – пластинчатый гипогенный халькозин (Cc) замещает борнит (Bn). Обр. 7-4/166,0; Б – гипергенный халькозин (Cc) в ассоциации с ковеллином (Cv), борнитом (Bn) и халькопиритом (Ccp). Обр. К-7/265,5.

Таблица 21. Химический состав халькозина месторождения Ак-Суг.

№ аншлифа	№ ан-за	Содержание элементов, мас. %			Сумма
		S	Cu	Se	
5-4/263,1	1	20,49	78,46	-	99,40
	18	12,94	70,54	14,55	98,03
	19	13,90	70,91	14,72	99,53

Ковеллин  $CuS$  наряду с халькозином чаще всего отмечается в зоне окисления Ак-Сугского месторождения на его верхних горизонтах и в образцах с полотно разведочных канав. Ковеллин развивается преимущественно по среди

борнит-халькопиритовых агрегатов и по границам трещин медьсодержащих минералов (Рис. 2.49).

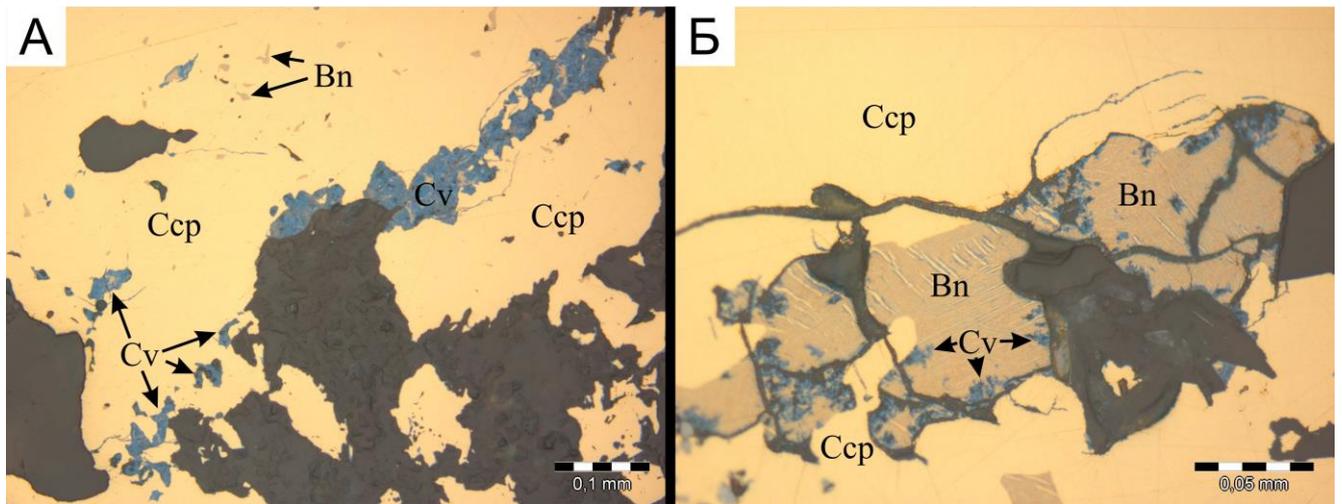


Рисунок 2.49. Ковеллин месторождения Ак-Суг.

А – образование ковеллина (Cv) по трещине в халькопирите (Ccp); Б – развитие ковеллина (Cv) по внешней границе борнита (Bn) Обр. К-7/169,0.

Пирротин  $Fe_nS_{n+1}$  в рудах Ак-Сугского месторождения самостоятельных выделений не образует. Он встречается исключительно в составе пиритовых метаобразований в виде не до конца замещенных реликтовых зерен, распространенных в самых ранних стадиях минералообразования (Рис. 2.50).

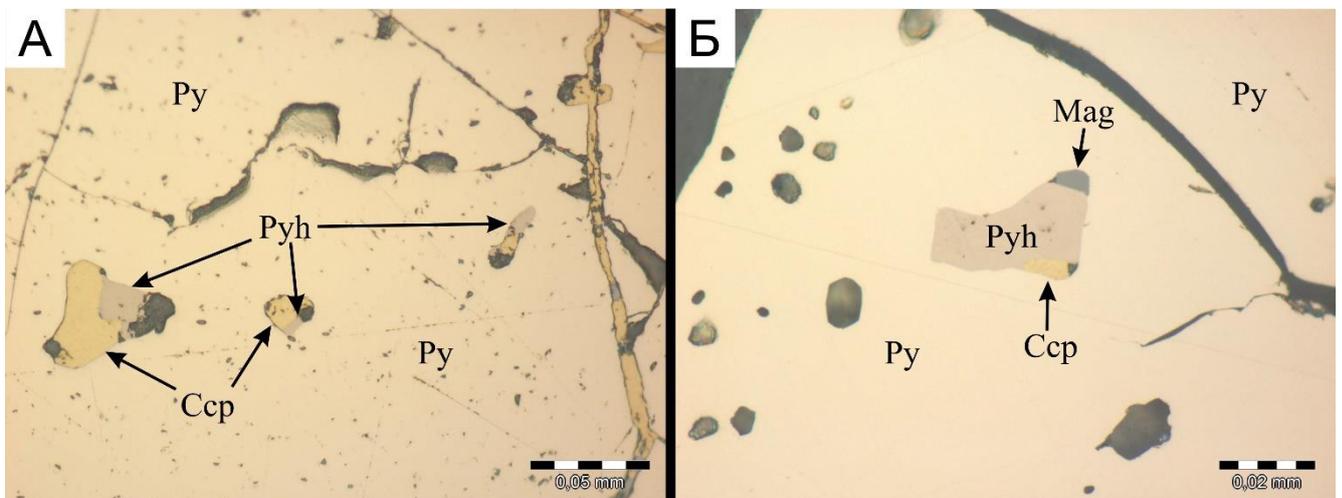


Рисунок 2.50. Пирротин месторождения Ак-Суг.

А – включения пирротина (Pyh) и халькопирита (Ccp) в пирите (Py). Обр. 7-3/185,0; Б – пирротин-халькопирит- магнетитовый (Pyh-Ccp-Mag) реликт в пирите. Обр. 13-3/39,8

Сфалерит ZnS наряду с пирротинном относится к второстепенным минералам месторождения Ак-Суг. Согласно опубликованным данным [Кужугет и др., 2019], на месторождении выделено две генерации сфалерита, ранняя из которых содержит в своем составе до 0,25 мас. % железа. Однако, исследованиями вещественного состава руд при участии диссертанта установлено, что «сфалерит месторождения является в основном кадмийсодержащим, безжелезистым и ассоциирует с кварцем и марганецсодержащим кальцитом» (Рис. 2.51, Табл. 22) [Макаров и др., 2024].

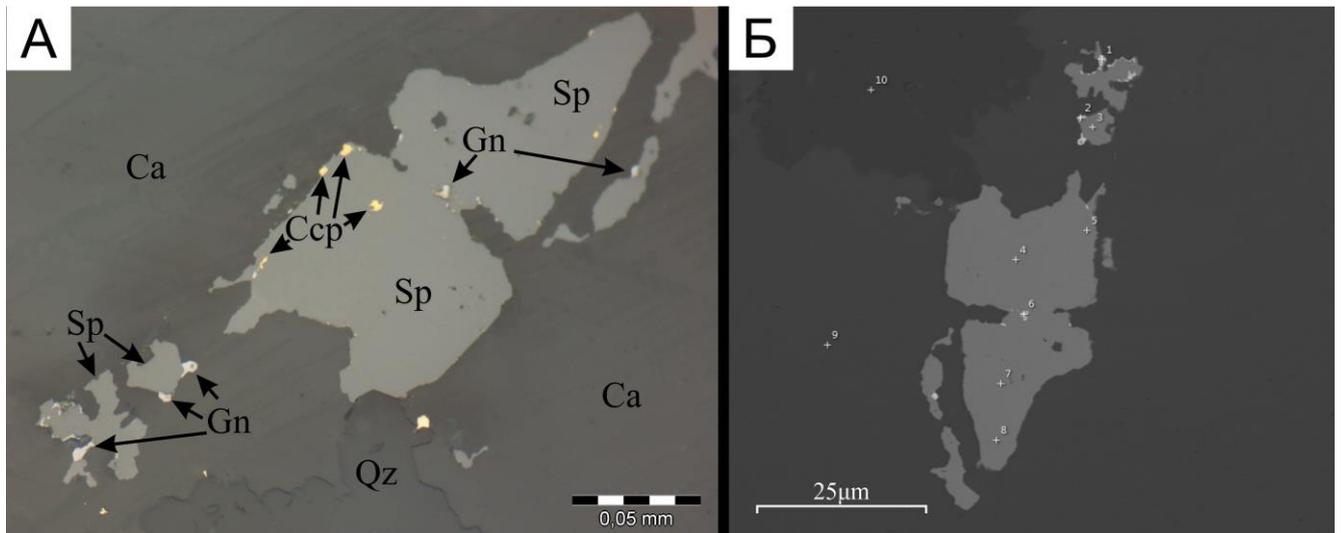


Рисунок 2.51. Кадмийсодержащий сфалерит в кварц-карбонатном прожилке.

А – зерно сфалерита (Sp) с мелкими минеральными включениями галенита (Gn) и халькопирита (Ccp) (отраженный свет); Б – обратно-рассеянные электроны. Обр. 7Г-1/27,4. Номера анализов соответствуют указанным в табл.22.

Таблица 22. Химический состав сфалерита месторождения Ак-Суг.

№ аншлифа	№ ан-за	Содержание элементов, мас. %			Сумма
		S	Zn	Cd	
7Г-1/27,4	3	34,75	63,74	1,86	100,34
	4	34,62	62,90	1,99	99,50
	5	34,77	64,12	2,45	101,34
	7	33,98	64,77	2,35	101,10
	8	33,95	63,10	2,07	99,12
3Г-1/292,0	3	32,57	65,63	-	98,19

	10	34,93	65,42	-	100,36
3Г-1/306,7	3	33,30	65,38	-	98,68
	6	33,30	65,73	0,56	99,60
5Г-2/225,0	33	32,90	65,31	1,06	99,27
	34	31,91	64,78	1,45	98,14
	35	34,27	53,82	1,98	100,06

Также, согласно данным монографии [Ак-Сугское месторождение..., 2024], автор отмечает, что «содержание кадмия в проанализированных зернах сфалерита независимо от глубины меняется незначительно, от 1,86–2,45 мас. % (скважина 7Г-1, интервал 27,4 м) до 1,06–1,98 мас. % (скважина 5Г-2, интервал 225,0 м). В последнем случае сфалерит находится в сростании с борнитом и халькозином. Известно, что маложелезистые или безжелезистые сфалериты являются низкотемпературными образованиями (150–250 °С) [Справочник-определитель..., 1988]. В целом необходимо отметить общие для Алтае-Саянской складчатой области более высокие содержания кадмия в сфалеритах руд медно-молибден-порфириковых объектов по сравнению с месторождениями Кавказа (0,38 мас. %), Средней Азии (0,19 мас. %) и Казахстана (0,25 мас. %) [Шведов, 2003]».

Другим минералом полиметаллической ассоциации верхних горизонтов Ак-Сугского месторождения является галенит PbS. В рудах месторождения отмечается как беспримесный галенит, так и его селенсодержащая разновидность, являющаяся промежуточным членом изоморфного ряда галенит – клаусталит (PbS – PbSe). Согласно опубликованной информации «содержание селена в галенитах месторождения варьирует от полного отсутствия (скважина 5Г-2, интервал 225 м; скважина 7Г-1, интервал 27,4 м; скважина 6-5, интервал 65,6 м; скважина 7-3, глубина 121 м) до содержащего серу клаусталита (скважина 11-9, интервал 268 м). Причем с глубиной содержание селена в галените отчетливо увеличивается. Многочисленными исследованиями установлено, что образованию собственных минералов селена способствуют высокий окислительный потенциал и низкая температура минералообразующей среды. Работами Балицкого и соавторов [Балицкий и др., 1968] доказано, что активность селена в растворе повышается при повышении Eh. Для селенидов характерна ассоциация с

гематитом, баритом и карбонатами. Ассоциация селенидов, высокоселенистых висмутовых сульфосолей с баритом также указывает на повышенные значения фугитивности кислорода [Бортников и др., 1987]. Авторские данные хорошо подтверждают эти условия. Селенсодержащий галенит месторождения Ак-Суг находится в ассоциации с кварцем, баритом, халькопиритом, золотосодержащим теннантитом» (Рис. 2.52, Табл. 23) [Макаров и др., 2024].

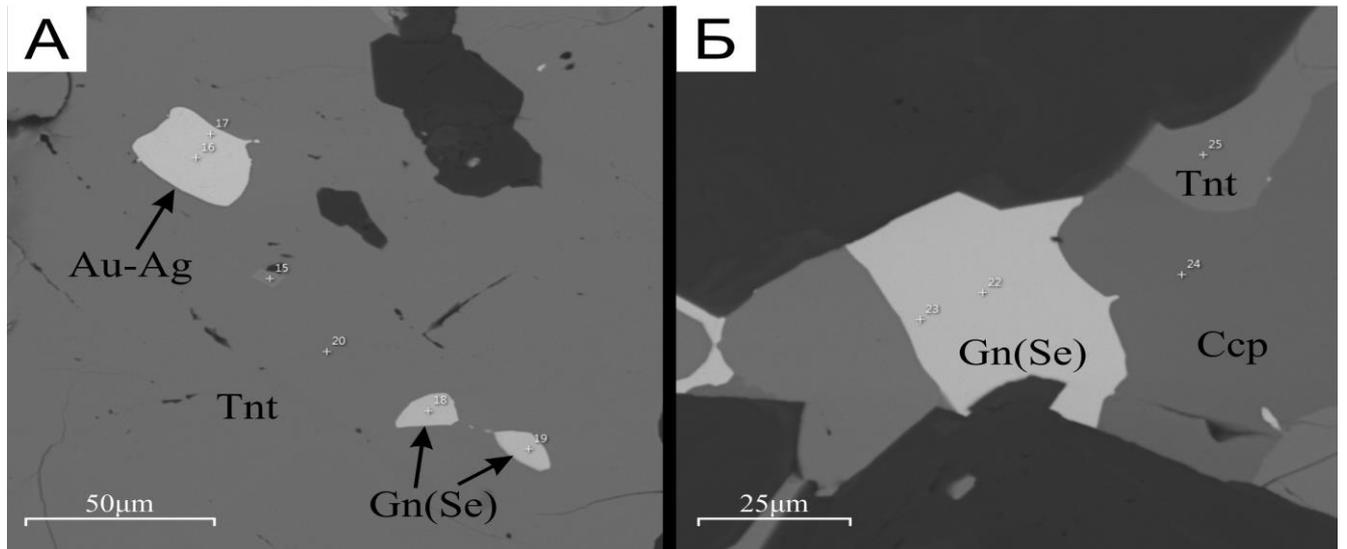


Рисунок 2.52. Селенсодержащий галенит месторождения Ак-Суг. Обратнo-рассеянные электроны.

А – зерна селенсодержащего галенита (Gn) в теннантитовом (Tnt) агрегате в ассоциации с электрумом (Au-Ag); Б – селенсодержащий галенит (Gn) в составе халькопирит-теннантитового сростка. Обр. 7-5/54,3. Номера анализов соответствуют указанным в табл. 23.

Таблица 23. Химический состав галенита месторождения Ак-Суг.

№ аншлифа	№ ан-за	Содержание элементов, мас. %			Сумма
		S	Pb	Se	
7-5/54,3	18	9,47	85,19	6,67	101,33
	19	9,14	85,33	6,90	101,37
	22	9,08	83,24	7,12	99,44
	23	8,63	83,01	8,10	99,74
5Г-1/221,1	1	11,94	88,19	0,81	100,94
5Г-1/225,0	1	11,90	87,45	2,62	101,97
	15	13,16	86,85	-	100,01
7Г-1/27,4	20	12,13	86,20	0,53	98,85
	19	13,08	86,88	-	99,96
6-5/65,6	1	12,85	84,76	-	97,61
7-3/121,0	3	13,12	88,48	-	101,6

Галенит без примеси селена образует мелкие зерна в составе кварц-карбонатных прожилков или тесно срощивается и ассоциирует с кадмийсодержащим сфалеритом (Рис. 2.53, Табл. 23).

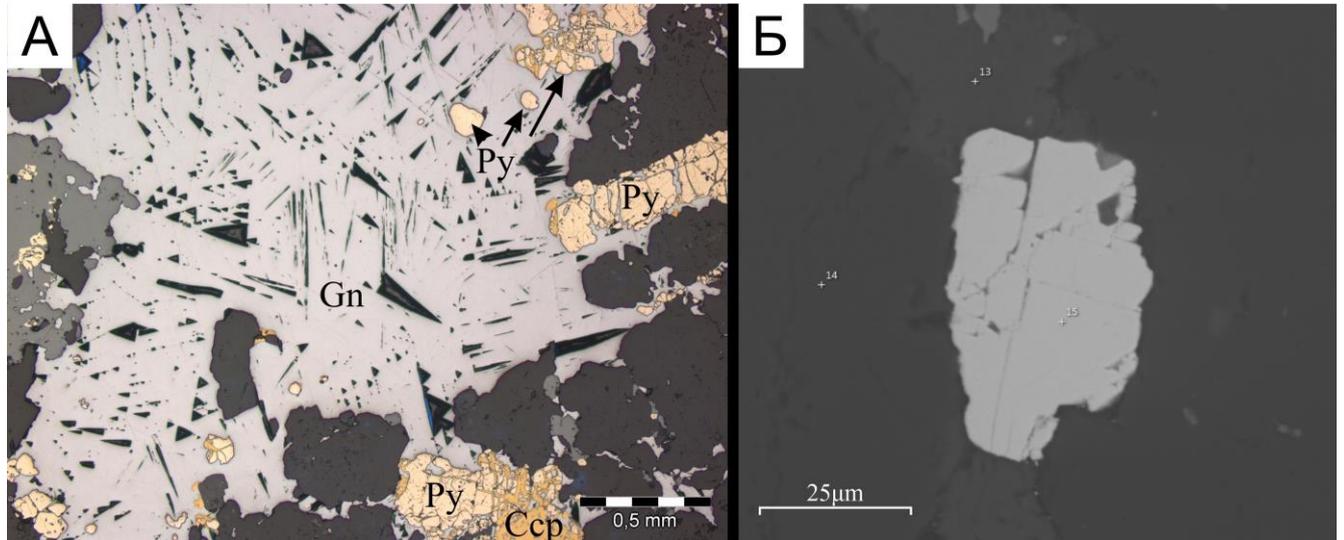


Рисунок 2.53. Бесприемный галенит месторождения Ак-Суг.

А – галенит (Gn) обрастает пирит-халькопиритовые сростки (отраженный свет); Б – обратно-рассеянные электроны. Обр. 5г-2/225,0. Номера анализов соответствуют указанным в табл. 23.

Согласно опубликованной автором информации, «повышение окислительного потенциала на более глубоких горизонтах месторождения, в свою очередь, возможно, связано с участием в рудообразовании метеорных вод. Кроме этого, в рудах месторождения Ак-Суг отмечается галенит с повышенным содержанием висмута (до 3,62–7,05 мас. %), который находится в сростании с минералами висмута (айкинитом, виттихенитом и самородным висмутом)» [Макаров и др., 2024].

Айкинит  $PbCuBiS_3$  на Ак-Сугском месторождении относится к второстепенным и малораспространенным минералам. Согласно данным статьи [Кужугет и др., 2015] айкинит характерен для седьмой, предпоследней минеральной ассоциации минералообразования. Кроме халькопирита, пирита и борнита с айкинитом ассоциируют висмутсодержащий теннантит, некоторые теллуриды, селениды, виттихенит, барит и самородное золото (Рис. 2.54). Химический состав айкинита стехиометричен, но в некоторых случаях

характеризуется незначительной примесью селена и, в редких случаях, серебра (Табл. 24).

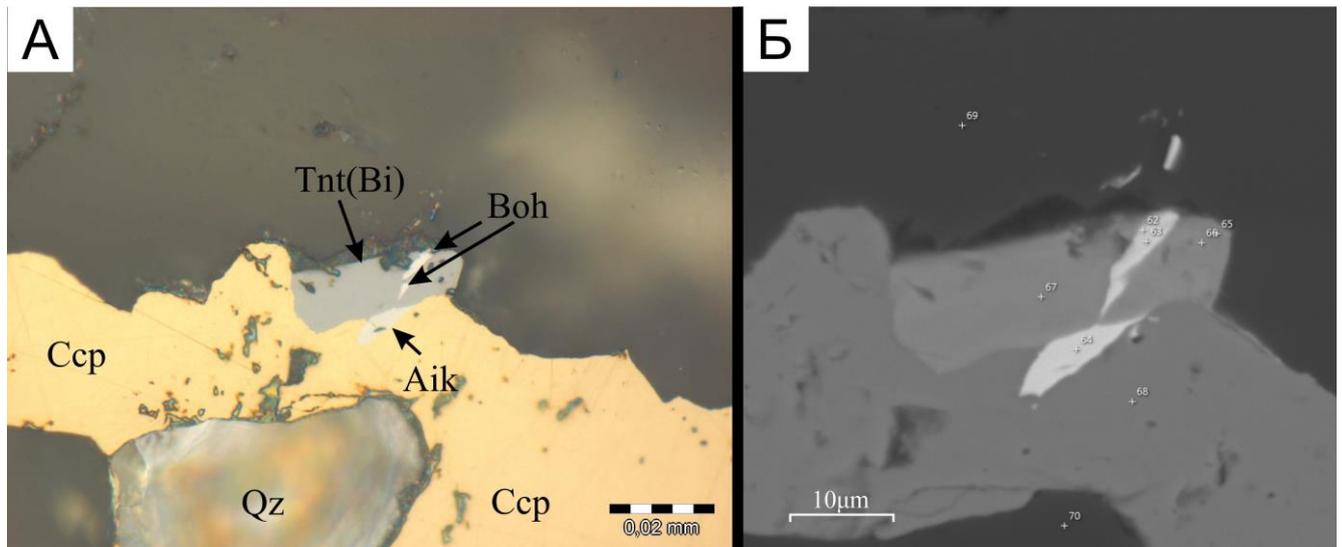


Рисунок 2.54. Айкинит месторождения Ак-Суг.

А – зерно айкинита (Aik) в составе халькопиритового агрегата (Ccp) (отраженный свет); Б – обратно-рассеянные электроны. Обр. 11-9/268,0. Номера анализов соответствуют указанным в табл. 24.

Таблица 24. Химический состав айкинита месторождения Ак-Суг.

№ аншлифа	№ ан-за	Содержание элементов, мас. %						Сумма
		S	Cu	Pb	Bi	Se	Ag	
10-5/275,0	23	17,47	11,65	38,78	32,04	-	-	99,94
	37	17,26	11,35	37,51	33,24	-	-	99,36
	38	17,43	11,24	38,45	31,99	-	-	99,10
11-9/268,0	15	15,07	11,21	38,18	31,11	1,20	0,86	97,63
	64	15,31	12,51	38,98	31,77	1,29	-	99,85
	89	14,86	10,57	41,60	31,98	0,84	-	99,86

Согласно авторским исследованиям вещественного состава руд Ак-Сугского месторождения [Шадчин и др., 2024], в ассоциации с айкинитом могут отмечаются виттихенит ( $\text{Cu}_3\text{BiS}_3$ ) и самородный висмут (Bi) (Рис. 2.55). В статье [Шадчин и др., 2024] приводятся следующие данные об этих минералах: «виттихенит и самородный висмут срastaются с Se- и Bi-содержащим галенитом и обнаружены среди пирит-халькопиритовых агрегатов. В составе сульфидных сростков часто присутствуют включения и каймы виттихенита размером до 5–10 мкм и мелкие (до 5 мкм) зерна галенита. Самородный висмут образует мелкие

линзовидные, округлые или ксеноморфные агрегаты в окружении виттихенита и галенита. Размеры зерен самородного висмута варьируют от 1–2 до 10 мкм. Реже зерна достигают размера 0.02×0.04 мм. Состав виттихенита близок к теоретическому, но его отличают небольшие примеси Ag и Se, типичные для этого минерала [Справочник-определитель..., 1988]. Содержания Fe (до 0,5 мас. %), которые, как и содержания Fe и Cu в составе самородного висмута, можно объяснить вхождением этих элементов (Fe в виде примеси до 1 мас. %) в состав айкинита, из которого, предположительно, они выделились в результате разложения в результате изменения локальных условий. Доказательством того, что самородный висмут мог образоваться в результате разложения айкинита, является отсутствие самородного висмута за пределами возможной реликтовой границы разложившейся сульфосоли, которая в настоящее время представлена контуром виттихенитового агрегата» [Шадчин и др., 2024].

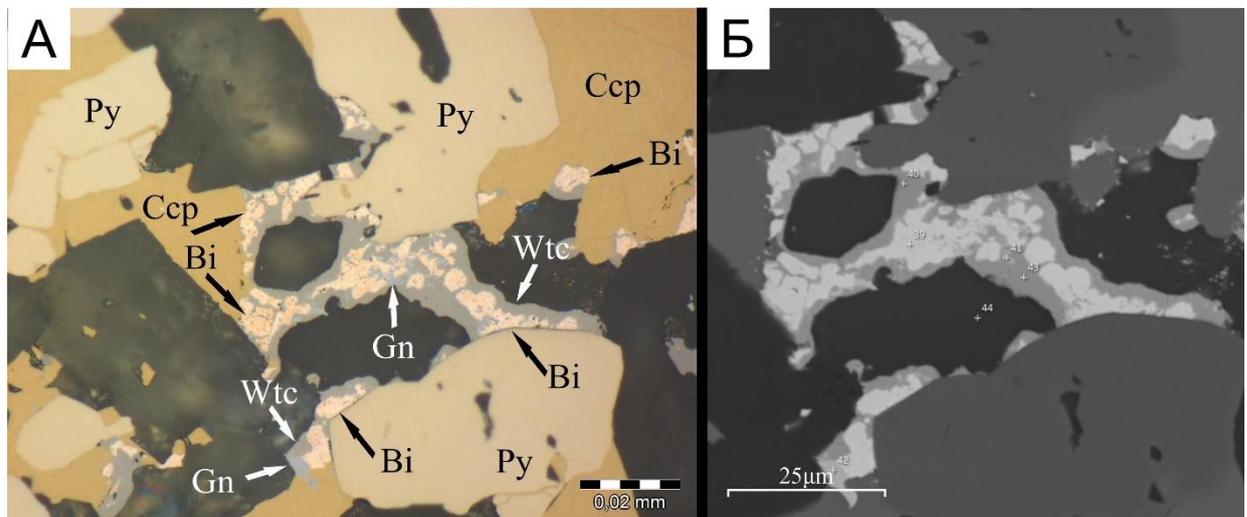


Рисунок 2.55. Виттихенит и самородный висмут месторождения Ак-Суг.

А – разложение айкинита на виттихенит (Wtc), галенит (Gn) и самородный висмут (Bi) в ассоциации с пиритом (Py) и халькопиритом (Ccp) (отраженный свет); Б – Обратнo-рассеянные электроны. Обр. 10-5/275,0. Номера анализов соответствуют указанным в табл. 25.

Таблица 25. Химический состав виттихенита, галенита и самородного висмута.

№ аншлифа	№ ан-за	Содержание элементов, мас. %							Сумма	Минерал
		S	Fe	Cu	Se	Ag	Pb	Bi		
10-5/275,0	40	19,49	0,31	36,21	0,62	2,29	-	40,60	99,53	Виттихенит
	43	19,40	0,50	36,84	0,98	1,80	-	40,67	100,20	Виттихенит
	42	12,20	-	-	3,53	-	80,56	3,69	100,00	Se- и Bi-содержащий галенит
	39	-	0,77	-	-	-	-	-	98,94	Сам. висмут

Также в составе с вышеперечисленными минералами висмута отмечается редкий михарит  $Cu_4FePbBiS_6$ . Согласно данным статьи [Шадчин и др., 2024], данный минерал «выявлен в ассоциации с висмутсодержащей блеклой рудой и айкинитом среди халькопирита, который цементирует раздробленные зерна пирита (Рис. 2.56). Размеры выделений михарита варьируют от  $19 \times 21$  до  $21 \times 62$  мкм. Некоторые зерна располагаются вдоль границ агрегатов пирита и халькопирита и имеют вытянутую форму, другие – угловатую. Отдельные зерна по краям окружены тонкими каймами галенита. В халькопирите с включениями михарита также отмечаются включения мелких зерен борнита. Избыток Fe и S в составе михарита возможно связан с тонкими включениями соседних пирита и халькопирита (Табл. 26)» .

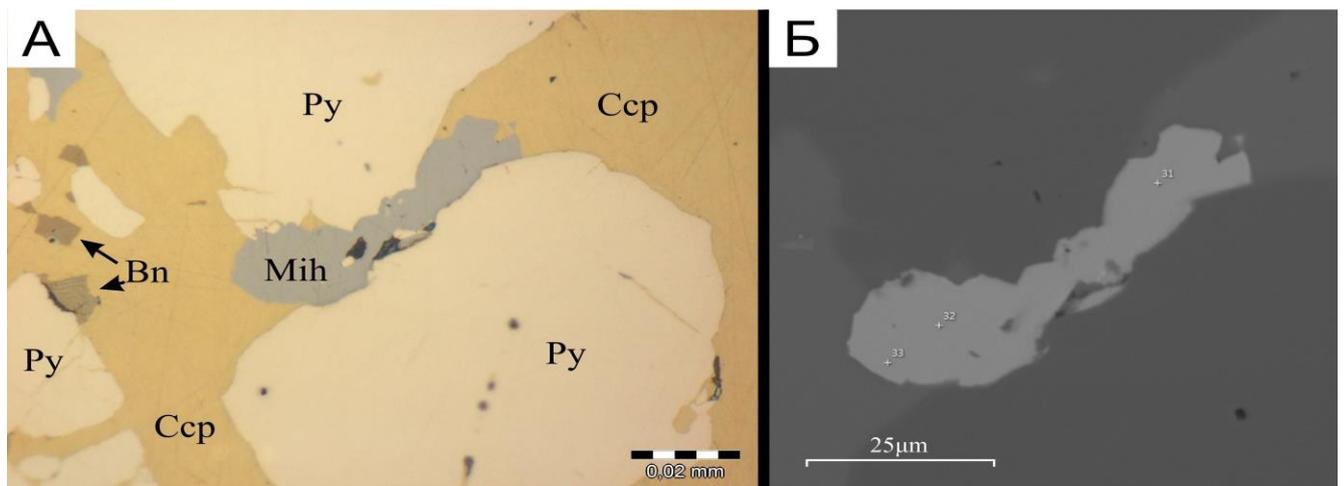


Рисунок 2.56. Михарит месторождения Ак-Суг.

А – зерно михарита (Mih) на границе пирита (Py) и халькопирита (Ccp) с включениями борнита (Bn). (отраженный свет); Б – обратно-рассеянные электроны. Номера анализов

соответствуют указанным в табл. 26.Обр. 10-5/275,0. Номера анализов соответствуют указанным в табл. 26.

Таблица 26. Химический состав михараита.

№ аншлифа	№ ан-за	Содержание элементов, мас. %					Сумма
		S	Fe	Cu	Pb	Bi	
10-5/275,0	31	21,88	7,53	26,78	24,44	19,42	100,04
	32	22,15	7,62	27,11	23,96	19,57	100,38
	33	21,90	7,25	27,7	23,37	19,26	99,09

Также в составе минерального парагенезиса «сульфиды+минералы Ag, Bi, Te» спорадически отмечаются богдановичит и гессит. «Богдановичит  $AgBiSe_2$  представлен линзовидными, клиновидными, реже ксеноморфными зернами размером от  $1,5 \times 13$  до  $12 \times 20$  мкм, которые срastaются с халькопиритом, виттихенитом, гесситом и теннантитом (Рис. 2.57). Чаще всего мелкие зерна богдановичита срastaются с гесситом и находятся среди теннантита. Очень редко богдановичит встречается в кварце на границе с пиритом. Аналогичный парагенезис (богдановичит + гессит) отмечается в ассоциации с виттихенитом. Состав богдановичита близок к стехиометричному (Табл. 27), но имеет повышенные (до 4.77 мас. %) содержания S. По-видимому, повышенные содержания S связаны с вхождением богдановичита в состав халькопирит-теннантитовых сростков» [Шадчин и др., 2024].

Согласно авторским данным, опубликованным в работе [Ак-Сугское месторождение..., 2024] «гессит  $Ag_2Te$  может быть отнесен к второстепенным минералам, но распространен по площади месторождения неравномерно. Наибольшее количество минерала выявлено в составе одной из самых поздних стадий минералообразования с участием висмутсодержащей блеклой руды, айкинита, виттихенита, михараита, богдановичита, самородного висмута и электрума (скважины 10-5 и 11-9)».

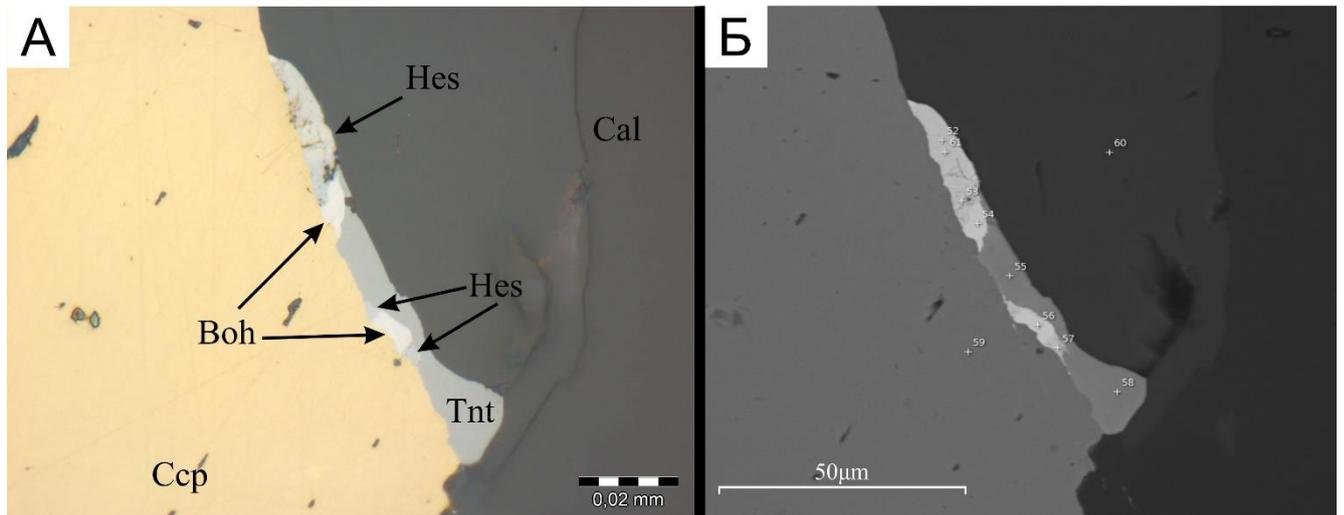


Рисунок 2.57. Богдановичит и гессит месторождения Ак-Суг.

А – зерна богдановичита (Boh) на контакте с гесситом (Hes) и теннантитом (Tnt) в составе кальцитового (Cal) прожилка с халькопиритом (Ccp) (отраженный свет); Б – обратно-рассеянные электроны. Обр. 11-9/268,0. Номера анализов соответствуют указанным в табл. 27.

Таблица 27. Химический состав богдановичита и гессита.

№ аншлифа	№ ан-за	Содержание элементов, мас. %						Сумма	Минерал
		S	Cu	Se	Ag	Te	Bi		
11-9/268,0	54	4,77	-	24,11	25,30	-	46,38	100,55	Богдановичит
	56	4,76	1,37	23,23	24,46	-	45,30	99,11	
	52	-	-	0,71	62,89	36,40	-	100,00	Гессит
	57	-	-	-	61,28	38,71	-	99,99	

#### 2.2.4. Этапы и стадии минералообразования

За основу схемы стадийности минералообразования Ак-Сугского месторождения была принята наиболее детально разработанная Р.В. Кужугетом и его коллегами схема [Кужугет и др., 2019] с добавлениями и правками диссертанта на основе актуальных исследований минеральных ассоциаций [Кужугет и др., 2023] и вещественного состава руд [Шадчин и др., 2024]. Согласно вышеуказанным источникам, на месторождении Ак-Суг выделено (Рис. 2.58) восемь последовательных сменяющих друг друга минеральных ассоциаций (стадий):

1. *Пирит-кварцевая:*

кварц, пирит, магнетит, гематит, ферберит.

2. *Сульфидно-карбонат-кварцевая:*

кварц, кальцит, КППШ, пирит, халькопирит, борнит, теннантит.

3. *Галенит-молибденит-теннантит-халькопирит-кварцевая:*

кварц, халькопирит, теннантит, молибденит, пирит, галенит, сфалерит.

4. *Золото-пирит-борнит-халькопирит-кварцевая:*

кварц, борнит, халькопирит, пирит, галенит, барит, золото.

5. *Золото-теллуридно-борнит-халькопирит-кварцевая:*

кварц, халькопирит, борнит, пирит, теннантит-тетраэдрит, галенит-клаусталит, алтаит, гессит, золото, калаверит, креннерит, меренскиит, арсенопалладинит, сопчеит, темагамит, самородный теллур, барит, молибденит, кобальтин, энаргит.

6. *Золото-пирит-халькопирит-блекловорудно-кварцевая:*

кварц, теннантит-тетраэдрит, халькопирит, пирит, галенит-клаусталит, борнит, касситерит, энаргит, науманнит, барит, ангидрит, сфалерит, золото и электрум.

7. *Золото-висмута-теллуридно-сульфидно-кварцевая:*

кварц, халькопирит, пирит, борнит, Vi-содержащий теннантит, самородные золото и медь (гипергенная), гессит, петцит, цумоит, кавацулит, сильванит, эмпрессит, штютцит, мутманнит, тетрадимит, виттихенит и барит.

8. *Кварц-карбонатная:*

кварц, кальцит, анкерит, барит, ангидрит, вторичные минералы самородной меди.

Этапы Ассоциация	Порфировый		Субэпитеpmальный	Эпитеpmальный			Поздний	
	1	2	3	4	5	6	7	8
Кварц	■	■	■	■	■	■	■	■
Кальцит	—	—						—
Пирит	■	■	—	—	■	—	—	
Борнит	■		■	■	—	—		
Халькопирит	■	■	■	■	■	■		
Молибденит	—	■	—					
Магнетит	—							
Ферберит	—							
Галенит		—	—	—		—		
Сфалерит		—				—		
Блеклые руды		—	—		—	■		
Карролит*		—			—			
Барит			—	—	—	—	—	—
Золото			—	—	—	—		
Клаусталит			—			—		
Энаргит			—		—	—		
Теллуrowисмутит			—					
Гессит			—		—			
Алтаит			—		—			
Меренскийит			—					
Арсенопалладинит			—					
Сопчеит			—					
Темагамит			—					
Кобальтин			—					
Цумоит			—					
Кавацулит			—					
Тетрадимит			—					
Виттихенит			—					
Айкинит			—					
Электрум				—		—		
Петцит					—			
Калаверит					—			
Сильванит					—			
Штютцит					—			
Мутманнит					—			
Эмпрессит					—			
Акантит					—			
Креннерит					—			
Сам. теллур					—			
Анкерит					—			
Науманнит					—	—		
Штрoмейерит*						—		
Маккистриит*						—		
Касситерит						—		
Михараит*						—		
Вольнскийт*						—		
Сидерит						—		
Сам. висмут*						—		
Сам. серебро*						—		
Сам. медь						—	—	
Ангидрит						—		—
Богдановичит*							—	
Берцелианит*								—
Шеелит*								—
Альгодонит*								—
Домейкит*								—
Коугекит*								—
Браннерит*								—
Флоренсит-Се*								—
Ксенотим-У*								—

Распространенность рудных минералов:

■ Распространенные — Второстепенные — Малораспространенные и редкие

Рисунок 2.58. Схема последовательности минералообразования на месторождении Ак-Суг.

Примечание: \* – минералы, ранее не описанные в опубликованной литературе на данных стадиях рудообразования и обнаруженные в рудах месторождения при участии диссертанта.

Анализируя вещественный состав руд месторождения Ак-Суг и стадийность их образования можно сделать ряд выводов.

Минеральный состав руд золото-медно-порфирового месторождения Ак-Суг богат и разнообразен. В составе руд выявлено более 60 рудных минералов, среди которых в масштабе месторождения, безусловно, преобладают и представляют основную экономическую ценность сульфиды цветных и благородных металлов. Также в рудах относительно часто отмечаются самородные металлы (золото, медь, серебро и др.). Кроме того, на Ак-Сугском месторождении и его верхних горизонтах широко развита эпитермальная и субэпитермальная минерализация с теллуридами, селенидами, висмутидами.

Процесс минералообразования и формирования рудных зон происходил в несколько этапов: ранний «допорфировый» (не отражен на Рис. 2.58) этап (внедрение первых двух фаз – диориты, тоналиты, порфировидные тоналиты и плагиограниты) сопровождался тонковкрапленной убогой сульфидной минерализацией, «основной» рудный этап характеризуется образованием Au-Mo-Cu-порфирового оруденения (в ходе гидротермальных процессов после внедрения тоналит-порфиров и плагиогранит-порфиров) и сопутствующей (эпитермальной в апикальной части и полиметаллической Pb-Zn по периферии порфировой системы) минерализации. На поздних этапах минералообразования формировалась преимущественно рассеянная рудная и редкоземельная минерализация в ассоциации с кварц-карбонатными прожилками.

Основной этап рудообразования характеризуется сложной последовательностью минералообразования, связанной с внедрением более поздних плагиогранит-порфиров («несущих» основную часть Mo оруденения) в шток тоналит-порфиров (преимущественно с Au-Cu минерализацией), что, в свою очередь, нашло отражение в пространственном и геохимическом разобщении этих двух типов оруденения.

Общий характер минерализации на месторождении Ак-Суг показывает, что в процессе минералообразования для растворов была характерна низкая фугитивность серы. Об этом свидетельствует широкое распространение на месторождении самородных элементов (меди, серебра, висмута, теллура), теллуридов, селенидов цветных и благородных металлов, присутствие ртутисодержащих минералов.

Формирование поздних низкотемпературных кварц-карбонатных прожилков, сопровождающееся образованием редкоземельной, урановой минерализации (Y-ксенотим, Се-флоренсит, U-Th-Y-браннерит), сульфатной (барит-целестин), возможно, связано с наложенными постмагматическими процессами палеозой-раннемезозойского щелочно-гранитного магматизма в районе Кандатского разлома. Например, в результате данной тектономагматической активизации поблизости от Ак-Суга (радиус до 15 км) сформировались такие объекты с редкоземельной минерализацией, как Арысканское месторождение (Y, Zr, REE), возрастом 473 млн. лет и ряд рудопроявлений среди гранитоидов Окуневского комплекса [Лыхин и др., 2019; Никифоров и др., 2017].

**Совокупность данных, представленных в 1 главе и параграфе 2.1 (2 главы) данной диссертации, позволяет сформулировать и обосновать Первое защищаемое положение: Согласно изотопному U-Pb датированию цирконов вмещающих пород Ак-Сугского месторождения, возраст тел тоналит-порфиров и плагиогранит-порфиров 3 фазы аксугского комплекса, локализирующих основную массу Au-Mo-Cu оруденения, составляет  $523\pm 7$  и  $521\pm 6$  млн. лет соответственно. Полученные геохронологические данные позволяют скоррелировать возраст рассматриваемых интрузивных тел с одним из этапов островодужного магматизма Восточной Тувы.**

### ГЛАВА 3. МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ АК-СУГСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

В основу данной главы легли материалы работы диссертанта совместно с К.В. Лобановым, В.А. Макаровым, Е.А. Муромцевым, Ю.В. Глушковым и др., выводы и результаты которых опубликованы в работах [Лобанов и др., 2023; Макаров и др., 2024; Шадчин, 2021; Шадчин, Макаров, 2023].

#### 3.1. Геохимическая зональность месторождения Ак-Суг

Согласно опубликованной информации [Ак-Сугское медно-порфировое месторождение..., 2024], «основными элементами, определяющими промышленную ценность месторождения Ак-Суг, являются медь, золото и молибден. Из других компонентов в экономически значимом количестве на месторождении присутствуют серебро и рений. Кроме того, в сульфидных концентратах установлены высокие концентрации платиноидов (Pd 924 мг/т, Pt 96 мг/т), а в борнит-халькопирит-теллуридных рудах выявлены минералы палладия – меренскит и арсенопалладинит [Первая находка меренскита..., 2007; Sotnikov et al., 2001]. Таким образом по своему элементному составу Ак-Суг относится к молибден-медно-порфировым месторождениям (с золотом) и обладает многими геохимическими чертами, присущими этому типу месторождений.

На современном эрозионном уровне месторождение Ак-Суг выделяется вторичными геохимическими аномалиями меди и молибдена с изоконцентратами 0,01 % и 0,0003 %, соответственно [Забелин, 1992], которые охватывают практически все минеральные и гидротермальные (включая пропилиты) зоны. Строение первичного геохимического поля месторождения Ак-Суг полностью

отражает основные особенности его минеральной зональности [Лобанов и др., 2023].

Приповерхностный первичный ореол меди, оконтуренный по изолинии 0,3 %, имеет кольцеобразную форму с «пустой» центральной частью («кварцевое ядро») и пространственно соответствует пирит-халькопиритовой минеральной зоне (Рис. 3.1). Широко-вытянутый ореол меди по изолинии 0,5 % фиксирует наиболее богатую часть Северной залежи, при этом изолиния 1,0 % отвечает борнит-халькопиритовой минеральной зоне.

Ореолы молибдена далеко не всегда перекрывают медные и, как правило, смещены относительно них ближе к геометрическому центру месторождения, которое занимает шток плагиогранит-порфиров (порфиров II), а наиболее яркие из них (0,02 % и 0,03 %) группируются в его эндо- и экзоконтактной части.

Ореолы золота развиты в пределах наиболее богатых ореолов меди, соответствующих борнит-халькопиритовой минеральной ассоциации, визуализируя тем самым существующую на минеральном уровне пространственную взаимосвязь этих элементов. Примечательно, что с ореолами золота совпадают и ореолы мышьяка. Это свидетельствует о золотоносности поздней блеклорудной ассоциации. По всей вероятности, с ней же связано и серебро, ореолы которого пространственно и морфологически близки к медным и золотым (Рис. 3.1г).

Свинец и цинк образуют внешние ореолы, причем их наиболее яркие аномалии развиты в пропилитовой зоне. Железо образует кольцеобразный ореол, при этом участки с наиболее высоким его содержанием отвечают внутренней части пропилитовой зоны и пиритовому ореолу (Рис. 3.1б)» [Макаров и др., 2024].

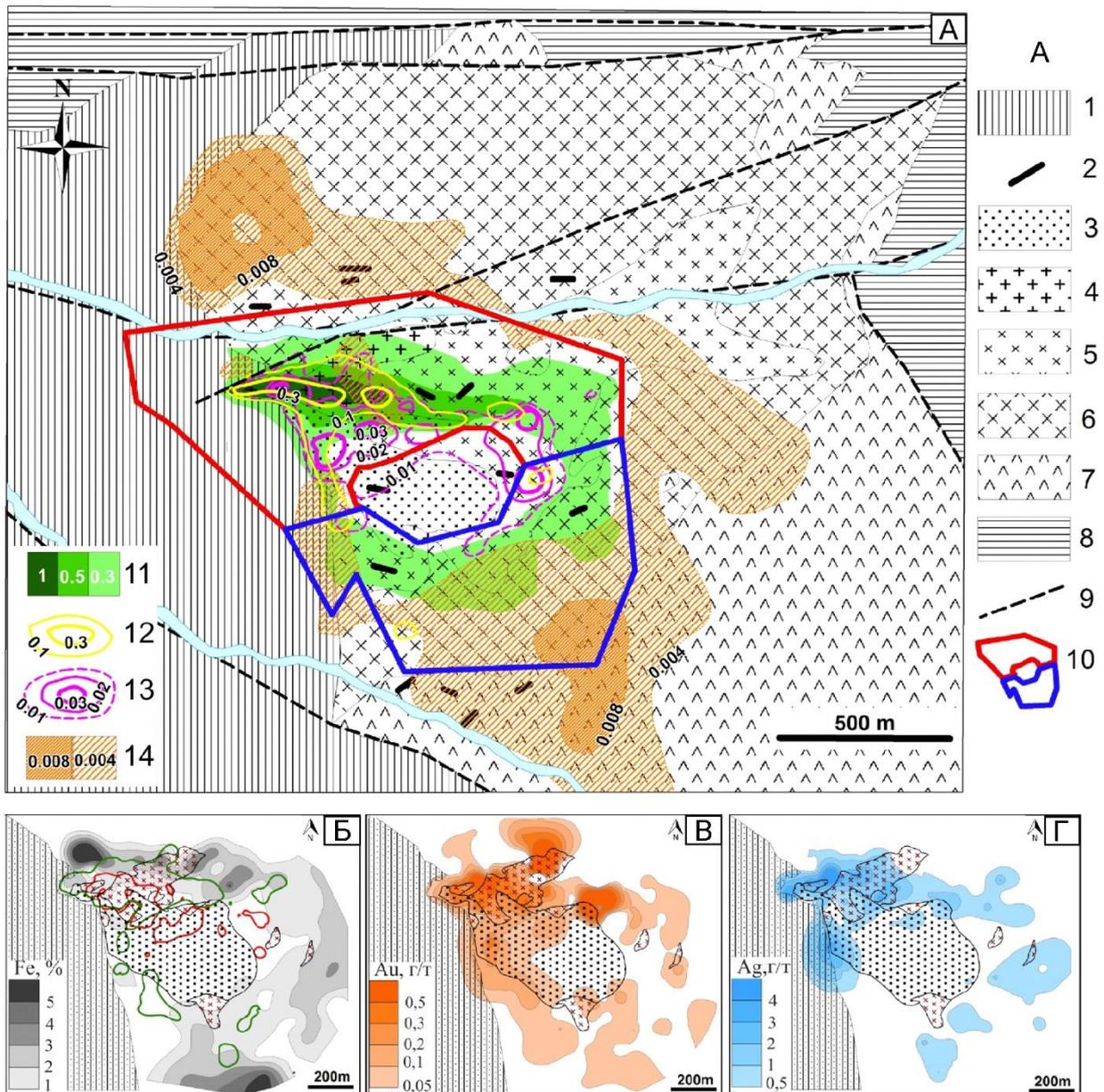


Рисунок 3.1. Геохимическая модель распределения основных рудных элементов на месторождении Ак-Суг.

А – Схема распределения Cu, Mo, Au и Zn в пределах месторождения Ак-Суг по данным кернового опробования, с учетом материалов [Забелин, 1992].

Б–Г – взаиморасположение основных геологических элементов и ореолов железа (Б), золота (В) и серебра (Г) на горизонте 1 300 м (по данным бурения). Изолинии на В: зеленые – 0,5 % Cu, красные – 0,03 % Mo.

Условные обозначения: 1 – девонские красноцветные туфогенно-осадочные отложения; 2 – дайки (вне масштаба, без разделения); 3–7 – аксугский комплекс: 3 – плагиогранит-порфиры (порфиры II) и 4 – тоналит-порфиры (порфиры I) 3-й фазы; 5 – порфировидные тоналиты и плагиограниты 2-й фазы; 6 – диориты, тоналиты, кварцевые диориты 1-й фазы; 7 – габбро,

диориты, 1-ой фазы; 8 – нижнекембрийские вулканогенно-осадочные отложения хамсаринской свиты; 9 – разломы; 10 – контуры проекции на поверхность границ рудных залежей; 11–14 содержание элементов: 11 – Cu (%), 12 – Au (г/т), 13 – Mo (%), 14 – Zn (%).

С целью изучения особенностей распределения и корреляции элементов в геохимическом пространстве месторождения Ак-Суг была проведена статистическая обработка с использованием факторного анализа методом главных компонент результатов количественного анализа 61 752 рядовых (длина пробы 2 м) и 7 451 групповых проб, отобранных из поверхностных выработок и керна скважин. Количество анализируемых в каждой пробе химических элементов (19 в рядовой и 40 в групповой) позволило охватить не только экономически значимые (Cu, Mo, Au, Ag, Re) и сопутствующие им (As, Bi, Cd, Co, Fe, Mn, Hg, Ni, P, Pb, S, Sb, Tl, Zn, Ba, Ce, Cr, Ga, La, Li, Nb, Sc, Se, Sn, Ta, Te, Ti, V, W, Y, Zn, Zr) рудные, но и основные породообразующие (Ca, Mg, Al, K, Na) их представители.

Проведенный анализ [Лобанов и др., 2023] выявил 8 групп элементов (факторов F), образующих хорошо выраженные геохимические ассоциации (Табл. 28). Цветом показаны строки основных рудных элементов, представляющих экономическую ценность. Каждая из ассоциаций отвечает определенному минеральному парагенезису, образовавшемуся в процессе формирования месторождения Ак-Суг:

F1 (породная) – Al-V-Ti-Mg-Ga-Sc-Y-Na;

F2 (пиритового ореола) – Fe-Co-S;

F3 (полиметаллическая) – Zn-Cd- Pb;

F4 (редкоземельная) – Ce-La-Y-P;

F5 (главная рудная) – Cu-Bi-Ag-Se-(As-K-Au);

F6 (сульфосольная) – Sb-As-(Hg)

F7 (низкотемпературная карбонатная с баритом) – Ba-Sr-(Ca)

F8 (молибденовая) – Mo-Re

Таблица 28. Результаты факторного анализа геохимических данных месторождения Ак-Суг.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
Ag	0,10	0,02	0,09	0,12	<b>0,76</b>	0,32	0,02	0,08
Al	<b>0,91</b>	0,04	0,00	0,18	0,03	0,02	0,07	0,09
As	0,12	0,05	0,09	0,19	0,30	<b>0,64</b>	0,06	0,15
Ba	0,32	0,19	0,00	0,06	0,13	0,16	<b>0,54</b>	0,03
Bi	0,07	0,02	0,01	0,05	<b>0,69</b>	0,04	0,04	0,02
Ca	0,21	0,31	0,02	0,20	0,16	0,06	<b>0,32</b>	0,11
Cd	0,02	0,00	<b>0,93</b>	0,01	0,01	0,17	0,02	0,01
Ce	0,17	0,02	0,01	<b>0,92</b>	0,07	0,03	0,01	0,04
Co	0,15	<b>0,90</b>	0,02	0,02	0,07	0,01	0,07	0,06
Cu	<b>0,20</b>	<b>0,04</b>	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>0,77</b>	<b>0,09</b>	<b>0,08</b>	<b>0,06</b>
Fe	0,30	<b>0,88</b>	0,00	0,06	0,02	0,02	0,08	0,07
Ga	<b>0,88</b>	0,06	0,00	0,21	0,11	0,02	0,08	0,08
Hg	0,01	0,00	0,11	0,01	0,02	<b>0,89</b>	0,00	0,01
K	0,30	0,15	0,01	0,33	0,32	0,02	0,02	0,21
La	0,27	0,01	0,01	<b>0,90</b>	0,04	0,02	0,01	0,04
Mg	<b>0,86</b>	0,13	0,02	0,02	0,04	0,04	0,00	0,05
Mn	0,35	0,11	0,09	0,20	0,02	0,05	0,04	0,11
Mo	<b>0,23</b>	<b>0,13</b>	<b>0,01</b>	<b>0,11</b>	<b>0,15</b>	<b>0,07</b>	<b>0,05</b>	<b>0,74</b>
Na	<b>0,61</b>	0,14	0,03	0,31	0,25	0,04	0,00	0,21
P	0,52	0,42	0,01	<b>0,40</b>	0,11	0,01	0,11	0,18
Pb	0,05	0,05	<b>0,60</b>	0,04	0,07	0,07	0,07	0,00
S	0,20	<b>0,86</b>	0,02	0,03	0,07	0,01	0,01	0,03
Sb	0,03	0,00	0,15	0,00	0,07	<b>0,88</b>	0,03	0,01
Sc	<b>0,77</b>	0,08	0,01	0,09	0,00	0,00	0,02	0,07
Se	0,03	0,04	0,00	0,03	<b>0,56</b>	0,09	0,12	0,17
Sr	0,17	0,10	0,03	0,01	0,10	0,02	<b>0,82</b>	0,02
Ti	<b>0,89</b>	0,01	0,01	0,07	0,06	0,01	0,05	0,01
V	<b>0,94</b>	0,06	0,01	0,10	0,07	0,02	0,07	0,02
Y	<b>0,63</b>	0,00	0,01	<b>0,50</b>	0,02	0,04	0,07	0,05
Zn	0,00	0,02	<b>0,95</b>	0,02	0,02	0,10	0,01	0,01
Au	<b>0,05</b>	<b>0,05</b>	<b>0,06</b>	<b>0,02</b>	<b>0,32</b>	<b>0,03</b>	<b>0,05</b>	<b>0,07</b>
Re	0,10	0,04	0,01	0,00	0,06	0,02	0,04	<b>0,76</b>

Ассоциацию элементов (F1) с коррелирующими Al-V-Ti-Mg-Ga-Sc-Y-Na стоит считать отражением геохимических характеристик интрузивных пород массива, например, таких как плюмазитовость (пересыщение пород Al), с коэффициентами глиноземистости  $a_1'$  от 1,2 для габбро до 7,1 для плагиогранитов (высокоглиноземистые и весьма высокоглиноземистые породы). Наличие в данной ассоциации Na и отсутствие K, при факте, что в породах массива  $K_2O$

преобладает над  $\text{Na}_2\text{O}$  ( $0,1-0,5 < \text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} < 2-7$ ) указывает на значительную долю «метасоматического» К, отложенного в виде биотита и калиевого полевого шпата в зоне ранних высокотемпературных метасоматитов северной части месторождения.

Ряд элементов Fe-Co-S (F2) отвечает пиритовому ореолу и зоне пропилитизации месторождения, где часто (до первых %) отмечается пирит с кобальтом в виде изоморфной примеси. Содержание Co в таких пиритах достигает 0,1–2,5 %.

Полиметаллическая ассоциация (F3) Pb-Zn-Cd относится к группе околорудных (надрудных) элементов и развита на периферии и верхних горизонтах месторождения.

Группа редкоземельных элементов Ce-La-Y-P (F4), маркирует немногочисленные в масштабах месторождения прожилки кварц-карбонатного состава, содержащие фторапатит, Y-ксенотим, Се-флоренсит и другие редкоземельные минералы.

Присутствие К и Au в главной рудной ассоциации (F5) Cu-Bi-Ag-Se-(As-K-Au) указывает на их генетическую связь, проявленную на этапе раннего высокотемпературного калиевого метасоматоза в момент формирования наиболее богатых Cu и Au высокотемпературных борнит-халькопиритовых и среднетемпературных теннантит-халькопиритовых руд.

Согласно опубликованным данным, «результаты исследования самородного золота в рудных ассоциациях месторождения Ак-Суг свидетельствуют, что оно связано в основном с сульфидами меди (борнитом и халькопиритом) и мышьяковистой сульфосолью меди (теннантитом), кроме того, оно присутствует в пирите и в виде теллуридов [Забелин, 1992; Кужугет и др., 2015]. При этом существует явная пространственная связь между наиболее богатыми медными рудами (Cu 0,7–1 % и более) и золотом (Au 0,3–0,5 г/т и более). Такая связь основной массы золота с борнит-халькопиритовой минеральной ассоциацией вполне закономерна и наблюдается на всех обогащенных золотом медно-порфириновых месторождениях [Porter et al., 2012; Rivera et al., 2004; John et al.,

2010; Sillitoe, 2000]. Тесная взаимосвязь меди и золота проявляется в том, что мелкие зерна самородного золота (менее 20 мкм) высокой пробы (745–871 ‰) находятся в виде включений неправильной формы в борните и халькопирите [Кужугет и др., 2015]. Подобное наблюдается практически на всех содержащих высокое количество борнита Cu-порфировых месторождениях. При этом следует отметить, что содержание золота в калиевых ассоциациях, богатых борнитом, может быть в 1,5 раза выше, чем в богатых халькопиритом [Sillitoe, 2010]» [Макаров и др., 2024].

Сульфосольная ассоциация с ртутью Sb-As-(Hg) (F6) отражает относительно широкое присутствие в рудах Северной залежи эпitherмальной энаргит-блеклорудной минерализации, характерной для верхнего уровня порфировых систем [Лобанов и др., 2023; Медно-порфировые месторождения..., 2010; Попов, 1977; Sillitoe, 2010].

Ряд элементов Ba-Sr-(Ca) (F7) указывает на сформированные в низкотемпературных гидротермальных условиях минералы этих элементов, таких как барит, целестин и, вероятно, виверит и стронцианит (последний может содержать небольшое количество Ca, изоморфно замещая Sr).

Молибденовая ассоциация Mo-Re (F8) образует отдельную пару элементов, подчеркивая отмеченную ранее пространственную и хронологическую разобщенность формирования Au-Cu оруденения в пределах тела тоналит-порфиров и значительной доли Mo минерализации в плагиогранит-порфирах на Ак-Сугском месторождении.

### **3.2. Зональность гидротермально-метасоматических изменений месторождения Ак-Суг**

В работе [Ак-Сугское медно-порфировое месторождение..., 2024] приведены следующие сведения: «по данным минералогического картирования установлено, что гидротермально-метасоматическая зональность Ак-Сугского месторождения проявлена в последовательной смене от периферии к центру

различных типов гидротермальных изменений. Наиболее крупная по площади зона измененных пород представлена пропилитами (Propylitic), которые слагают внешнюю периферическую часть месторождения и представлена карбонат-хлорит-эпидотовой минеральной ассоциацией (Рис. 3.2). Она охватывает преимущественно тоналиты и плагиограниты аксугского интрузивного комплекса. В плане зона пропилитовых изменений, маркируемая эпидотом, имеет угловатую форму (Рис. 3.2Б), что, очевидно, связано с влиянием разрывной тектоники, а в объеме представляет собой неправильный усеченный конус. При этом на западе месторождения, в пределах красноцветных отложений девона, это кольцо разрывается, что является одним из свидетельств додевонского возраста гидротермальных изменений. Рудная минерализация в пропилитовой зоне представлена редкими прожилками и вкрапленностью пирита, реже встречается гематит, магнетит и халькопирит. Концентрация сульфидов заметно возрастает (до 10–15 %) к внутренней части зоны пропилитов [Лобанов и др., 2023].

По направлению к центру пропилиты сменяются кварц-серицитовыми (Phyllic) и хлорит-серицитовыми (Sericite-Clay-Chlorite, или SCC) метасоматитами, которые часто формируют комплексный кварц-хлорит-серицитовый агрегат и являются доминирующим типом гидротермальных изменений на месторождении, вмещающая около 80 % всех его запасов. Наиболее сильные кварц-хлорит-серицитовые изменения наблюдаются в северной части месторождения. При этом зачастую их интенсивность настолько велика, что трудно диагностировать первичную породу. Именно это обстоятельство во многом затрудняет распознавание в пределах Северной рудной залежи участков проявления более раннего высокотемпературного калиевого метасоматоза (Potassic), предшествующего кварц-хлорит-серицитовым изменениям, хотя его следы в виде вторичного биотита и магнетита, как правило, преобразованного в результате мартитизации в гематит, встречаются здесь во многих местах [Pollard et al., 2017].

В южной, менее измененной части месторождения, а также в восточной и юго-восточной его частях признаки калиевого метасоматоза наблюдаются более

отчетливо, причем с глубиной их интенсивность увеличивается. Здесь они проявлены слабоминерализованными зонами мощностью от первых сантиметров до первых метров и в виде кварц-калишпатовых прожилков с рудной минерализацией.

Гидротермальный биотит, наряду с калиевым полевым шпатом, являясь индикатором калиевого метасоматоза, на месторождении отмечается фрагментарно в виде реликтов в поле развития более поздних метасоматитов. По геохимическим аномалиям калия (Рис. 3.2Б), которые в определенной мере могут быть использованы в качестве геохимических маркеров калиевого метасоматоза, видно, что наиболее интенсивно он проявился в пределах Северной залежи в тесной пространственной ассоциации с богатой медной минерализацией. Последнее обстоятельство не случайно, поскольку на многих медно-порфировых месторождениях именно в зонах высокотемпературного калиевого метасоматоза, связанного с формированием ранних порфиров, локализуются наиболее богатые халькопирит-борнитовые руды [Crane, Kavalieris, 2012; Perello et al., 2012; Porter et al., 2012; Sillitoe, 2010].

В пределах Северной залежи на глубине свыше 300 м развиты многочисленные тонкие (1–3 мм), разнообразно ориентированные прожилки ангидрита – обычного минерала высокотемпературных зон калиевых изменений [John et al., 2010; Perello et al., 2004; Pirajno, 2009; Seedorff et al., 2005; Sillitoe, 2000, 2010], которые ассоциируют с богатыми рудами [Забелин, 1992]. Вблизи поверхности ангидрит часто замещается гипсом.

Все вышесказанное свидетельствует о том, что в пределах наиболее богатой широтно-вытянутой части Северной залежи преобладают хлорит-серицитовые (SCC) изменения, содержащие реликты высокотемпературных калиевых (биотит±магнетит) метасоматитов. На остальной части Северной залежи и на большей части Южной доминируют кварц-серицитовые (Phyllic) изменения. При этом в южной части месторождения интенсивность гидротермальных изменений в целом значительно ниже.

В центральной части месторождения, главным образом в пределах поздних

плаггиогранит-порфиров, развиты существенно кварцевые метасоматиты, которые формируют слабоминерализованное «кварцевое ядро» овальной формы размером на поверхности 350 x 500 м. Оно выражено интенсивным штокверком, образованным сетью кварцевых прожилков мощностью от долей мм до 2–5 см. При этом их количество составляет от 10–20 до 100 на п. м. Вблизи поверхности эти прожилки не содержат рудной минерализации и лишь на глубине отмечается повышение концентрации молибдена. Образование «кварцевого ядра» связано с проявлением наиболее позднего гидротермального этапа формирования месторождения.

Аргиллизация проявлена локально и встречается в виде отдельных, структурно контролируемых, участков среди кварц-серицитовых и кварцевых метасоматитов. Наиболее интенсивно она развита вдоль контакта Ак-Сугского массива с девонскими вулканогенно-терригенными отложениями (по зонам дробления в последних), а также локально внутри «кварцевого ядра». Для аргиллизитов характерна каолинит-кварц-хлорит-серицит-кальцитовая минеральная ассоциация с пиритом. Кроме того, здесь же отмечаются кварцевые и карбонатно-кварцевые прожилки с пиритом, халькопиритом, молибденитом и другими сульфидами. С ним схожи прожилки кварц-карбонатного состава с редкоземельной минерализацией, которые не связаны с порфировой минерализацией. Они образовались значительно позднее и в пределах месторождения проявлены локально.

Турмалин, весьма обычный для многих порфировых месторождений минерал, встречается на месторождении Ак-Суг крайне редко и отмечается лишь в небольшом количестве в кварцевых жилах и прожилках на флангах месторождения. Это указывает на малую роль пневматолитовой составляющей на месторождении Ак-Суг, которая обычно проявляется в виде борсодержащего турмалина. На это же указывает отсутствие в рудных зонах месторождения брекчиевых образований нетектонической природы (гидротермальных брекчий). Последние являются характерным элементом строения большинства порфирового месторождений, а на некоторых из них вмещают значительный объем

промышленных запасов (El Teniente, Los Bronces, Butte, Коунрад, Нурказган и др.).

Таким образом, в пределах месторождения Ак-Суг на сегодня идентифицируются почти все типы гидротермальных изменений, характерные для порфировых объектов, хотя масштабы проявления каждого из них различны. На фоне типичной для месторождений этого типа концентрической зональности ясно просматривается асимметрия в ее внутреннем строении, которая выражается как в различной интенсивности гидротермальных изменений, так и в качественном наборе самих типов изменений, проявленных в пределах Северной и Южной залежей [Геолого-минералогическая и геохимическая зональность..., 2023]».

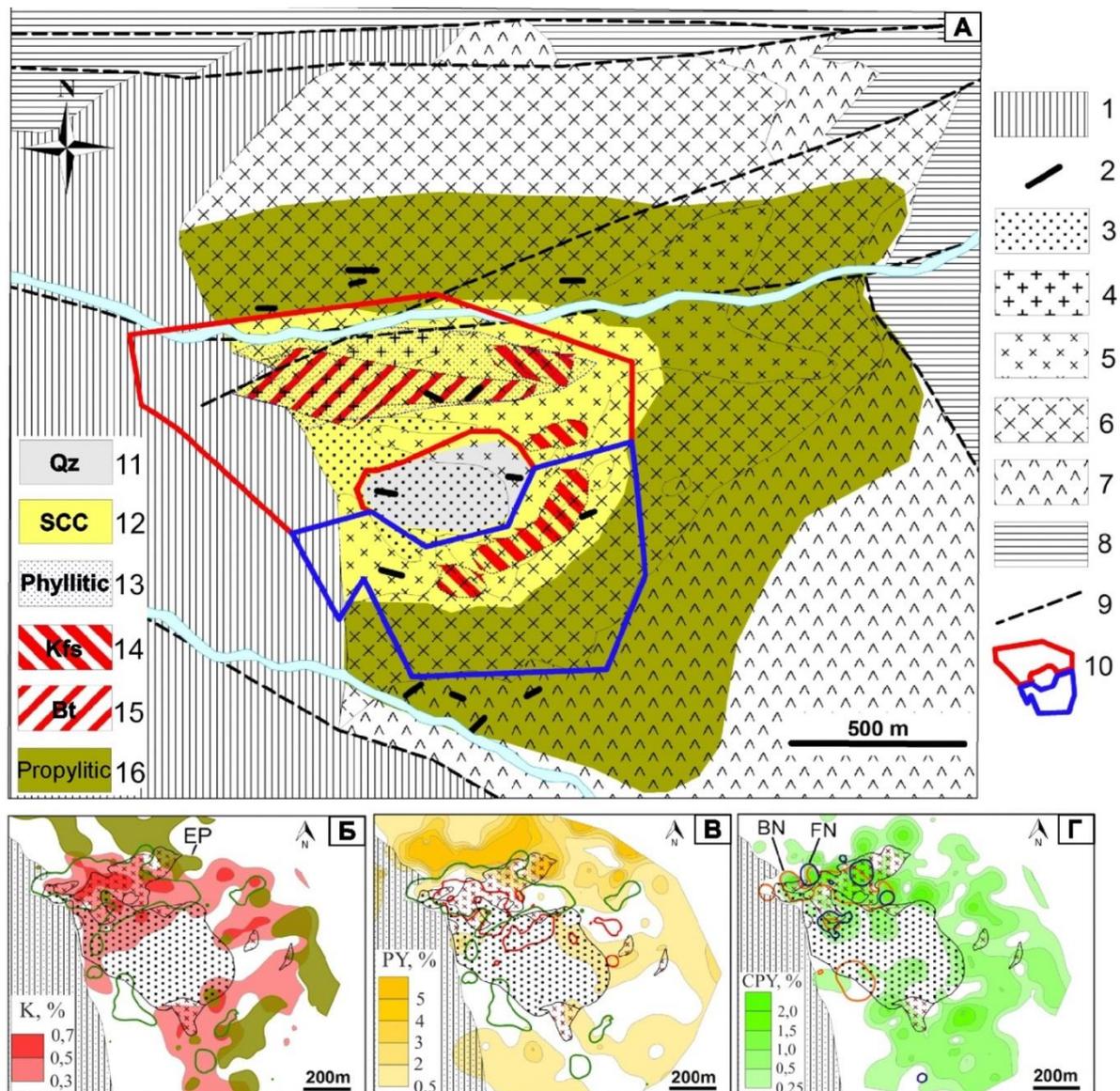


Рисунок 3.2. Схема минералого-геохимической зональности месторождения Ак-Суг.

А – генерализованная схема развития зон гидротермальных изменений месторождения Ак-Суг.  
Б–Г – взаиморасположение основных геологических элементов и некоторых типов гидротермалитов (Б) и главных рудных минералов (В, Г) на горизонте 1 300 м (по данным бурения).

EP – эпидот, PY – пирит, CPY – халькопирит, BN – борнит (более 0,5 %), FN – теннантит (более 0,5 %); изолинии: зеленые – 0,5 % Cu, красные – 0,03 % Mo.

Условные обозначения: 1-10 - см. рис. 3.1; 11 – интенсивное окварцевание («кварцевое ядро»); 12 – кварц-хлорит-серицитовые; 13 – кварц-серицит-хлоритовые; 14 и 15 – калиевые (14 – калишпатизация, 15 – реликты зоны биотитизации); 16 – пропилиты.

### **3.3. Минералогическая зональность месторождения Ак-Суг**

Зональность распределения рудных минералов, выявленная на основе данных минералогического картирования и изучения вещественного состава руд месторождения Ак-Суг, в целом соответствует метасоматической зональности, являясь в конечном итоге отражением структурно-геологических и геохимических особенностей месторождения [Лобанов и др., 2023].

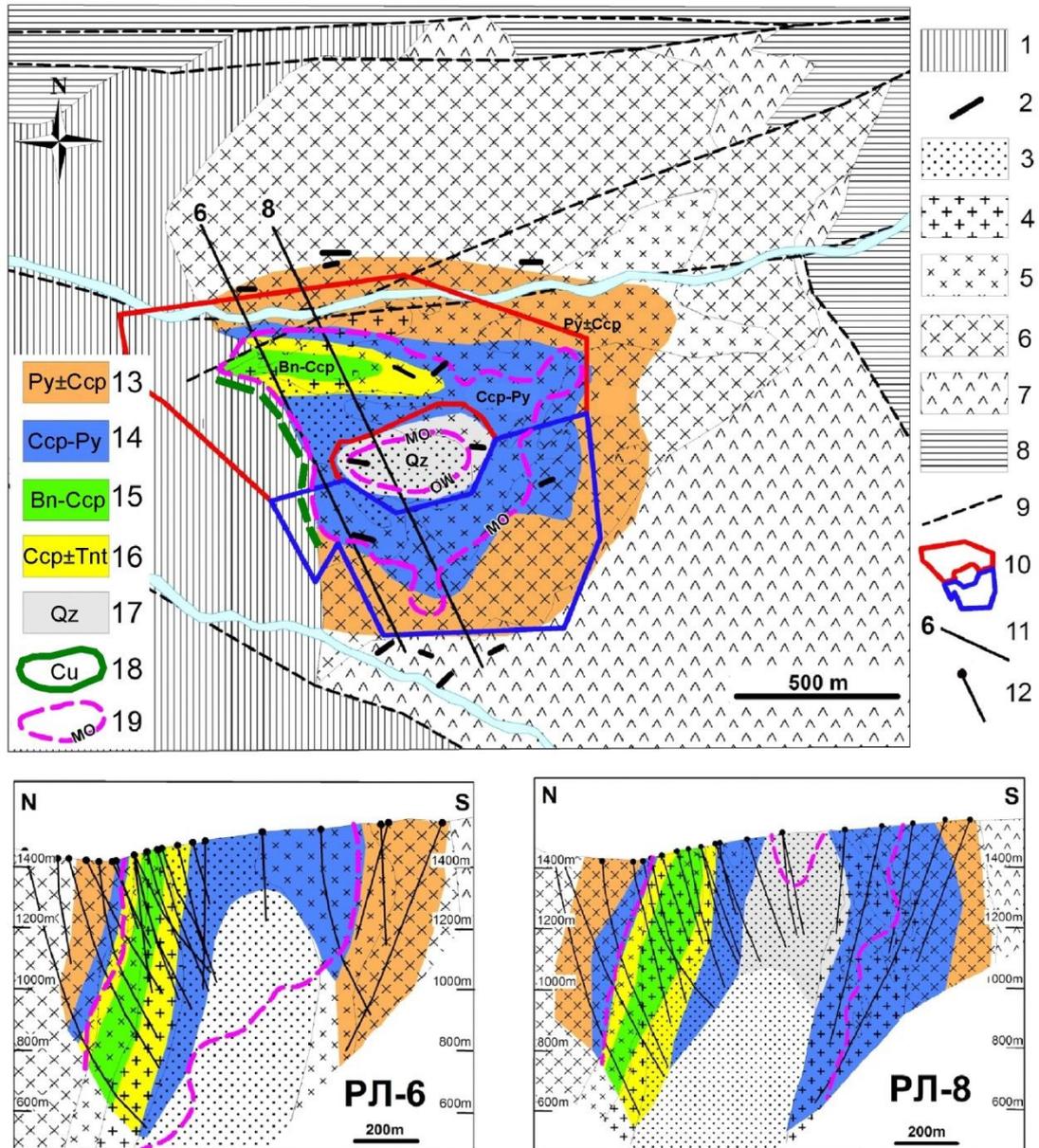


Рисунок 3.3. Схема минералогической зональности месторождения Ак-Суг.

Условные обозначения: 1-10 - см. рис. 3.1; 11 – разведочные линии и их номера, 12 – скважины; 13-19 минеральные зоны: 13 – пиритовая с халькопиритом ( $\text{Py} \gg \text{Ccp}$ ); 14 – халькопирит-пиритовая ( $\text{Ccp} \gg \text{Py}$ ); 15 – борнит-халькопиритовая; 16 - халькопиритовая с теннантитом; 17 – интенсивного окварцевания; 18 – развития самородномедной минерализации; 19 – ореол развития молибденита ( $\text{Mo} > 0,003\%$ ).

Согласно опубликованным данным [Макаров и др., 2024]: «во внутренней части пропилитовой зоны, в области ее перехода в кварц-хлорит-серицитовую, развит пиритовый ореол (Рис. 3.3). Он хорошо выделяется на геохимическом уровне по anomalно высокому содержанию железа, а на минеральном – по

значительному количеству (до 10–25 %) пирита. При этом область его максимального развития находится в северной части месторождения – вблизи северного висячего бока интрузии ранних тоналит-порфиров (Рис. 3.2В). Как и все гидротермальные и минералого-геохимические зоны месторождения Ак-Суг, пиритовое кольцо разрывается в девонских красноцветных отложениях, в которых сульфидная вкрапленность отсутствует.

Халькопирит образует кольцообразный ореол, схожий по морфологии с пиритовым, но более смещенный к «кварцевому ядру» в центре месторождения (Рис. 3.2Г). По количественному соотношению халькопирита с другими сульфидами выделяются три последовательно сменяющие друг друга зоны. Самая крупная из них – пирит-халькопиритовая; своей внешней частью она граничит с пиритовой зоной, отличаясь от нее существенно более высоким количеством халькопирита относительно пирита. Пирит-халькопиритовая зона охватывает как Северную, так и Южную залежи, соответствуя в основном бедным рудам с содержанием меди (Рис. 3.4) на уровне 0,3–0,4 %, сменяясь в центре месторождения безрудным «кварцевым ядром», в пределах которого рудные минералы содержатся в незначительном количестве. Здесь они, как правило, представлены тонкой бедной вкрапленностью сульфидов и редкими кварц-карбонат-баритовыми прожилками с галенитом и сфалеритом. С глубиной в «кварцевом ядре» наблюдается увеличение содержания молибденита при неизменно низком содержании меди.

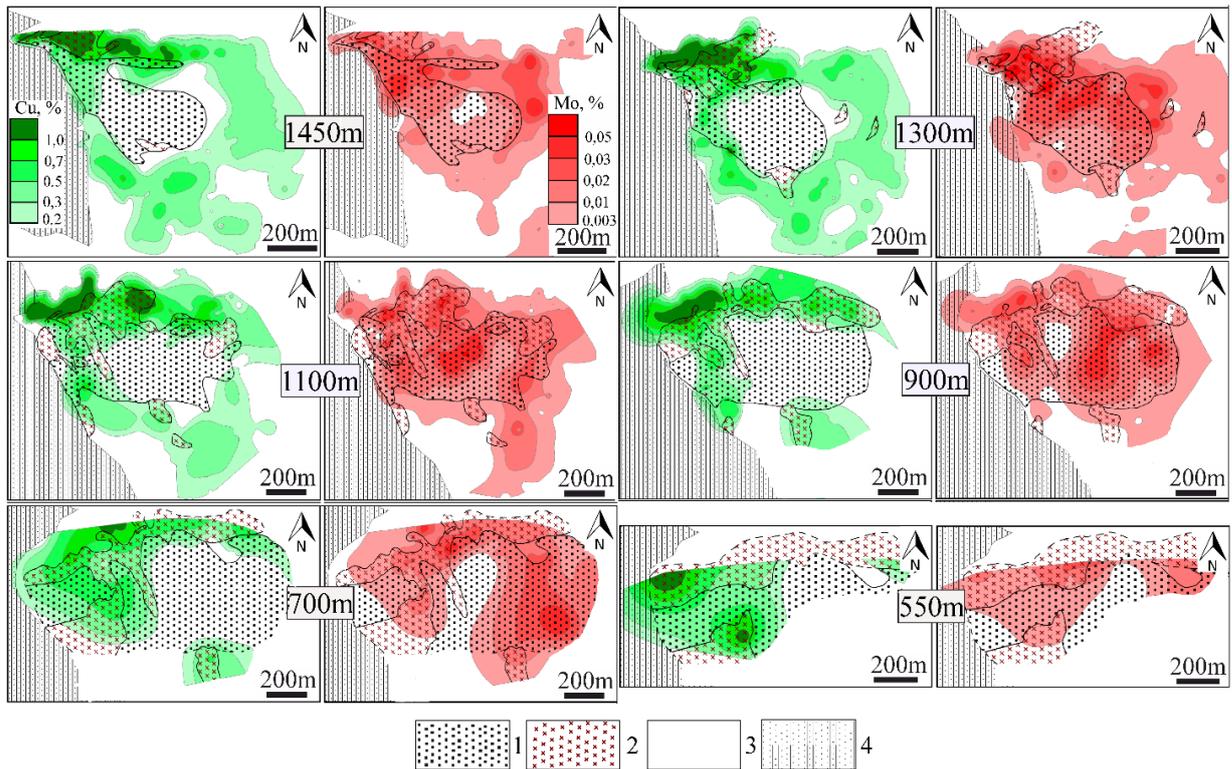


Рисунок 3.4. Погоризонтная модель распределения Cu и Mo на месторождении Ак-Суг.

Условные обозначения: 1 – поздние плагиогранит-порфиры; 2 – ранние тоналит-порфиры; 3 – вмещающие породы ранних фаз; 4 – девонские терригенно-вулканогенные отложения.

В северной половине месторождения, в пределах западной и центральной частях Северной залежи, выделяется область с наиболее высокой концентрацией халькопирита, внутри которой (Рис. 3.2Г) отмечаются участки с повышенными содержаниями борнита и теннантита, а также участки с энаргитом, гипогенным халькозином и дигенитом. Именно здесь находятся наиболее богатые на месторождении Au-Mo-Cu-руды, которые слагают широтно-вытянутое крутопадающее ( $70-85^\circ$ ) на север плитообразное тело длиной более 900 м при горизонтальной мощности около 100 м (по изолинии меди 1 %). По падению отдельными скважинами оно прослежено на 750–900 м и на глубину остается открытым (см. Рис. 3.3, 3.4). В восточном направлении интенсивность оруденения и мощность рудной залежи уменьшаются постепенно, в отличие от западного фланга, где наиболее богатая часть Северной рудной залежи упирается в красноцветные девонские отложения, заполняющие Даштыгойский грабен, и

«ныряет» под них. Плоскость контакта тектонизирована и круто падает в западном направлении, куда погружается и оруденение, размещаясь исключительно в интрузивных породах аксугского комплекса. При этом, по данным бурения, уменьшения мощности рудной залежи и снижения содержаний полезных компонентов в ней с глубиной не наблюдается. По геофизическим данным с глубиной контакт постепенно выполаживается, что открывает хорошие перспективы для прослеживания оруденения в западном направлении и на глубину.

Наиболее богатая часть рудных тел пространственно соответствует борнит-халькопиритовой зоне (см. Рис. 3.3), с примерно равным количеством халькопирита и борнита, причем с последним постоянно ассоциирует первичный халькозин. Следует отметить, что такая халькопирит-халькозин-борнитовая низкосернистая минеральная ассоциация характерна для руд раннего этапа формирования порфировых месторождений и связана с наиболее высокотемпературными калиевыми гидротермальными изменениями [Кривцов и др., 2010; Sillitoe, 2010]. Положение этого богатого участка совпадает с субширотной ориентировкой, крутым северным падением и западным склонением Северной залежи, морфология которой определяется дайкообразным телом ранних тоналит-порфиров, а в конечном итоге – широтно-вытянутой зоной трещиноватости развитой вдоль Аксугского разлома. По краям борнит-халькопиритовая зона окружена оболочкой с преобладающим содержанием халькопирита, которая сменяется на периферии пирит-халькопиритовым, а затем пиритовым ореолом, что является типичной зональностью, наблюдаемой на многих других порфировых месторождениях со значительным количеством борнита [Rivera et al., 2004; Seedorff et al., 2005; Sillitoe, 2010; Porter et al., 2012].

Схожее по составу, но значительно меньшее по масштабу проявления борнит-халькопиритовая ассоциация отмечается в пределах участка северо-западного простираения, примыкающего к западному флангу Северной залежи. Этот участок находится западнее «кварцевого ядра» вблизи контакта с девонскими красноцветами и хорошо выделяется по содержанию меди 0,5-0,7 %

(см. Рис. 3.3). На контакте с отложениями толтаковской свиты здесь отмечается широкое развитие вкрапленности и прожилков самородной меди, а также тонкие прожилки халькозина. Полоса с гипергенной медной минерализации шириной 10–100 м прослеживается вдоль всего контакта, как на поверхности, так и на глубине 100–350 м.

На отдельных участках, а именно в верхней части Северной залежи, в пределах борнит-халькопиритовой и халькопиритовой зон, отмечается значительное количество более поздней наложенной сульфосольной минерализации в виде теннантита и энаргита, с которыми связано повышенное количество серебра в рудах и мышьяковые геохимические аномалии.

Основная масса золота на месторождении Ак-Суг пространственно тесно ассоциирует с медной минерализацией (см. Рис. 2.44-2.47) - халькопиритом, борнитом и теннантитом, образуя в этих минералах мелкие (1–10 мкм) включения неправильной формы [Кужугет и др., 2015; Монгуш, Лебедев, 2013].

Молибденит на месторождении Ак-Суг входит в число наиболее распространенных минералов. В основном он развит в пределах Северной залежи, а в Южной залежи встречается в относительно небольших количествах. Чаще всего молибденит ассоциирует с халькопиритом, однако область его развития далеко не всегда совпадает с участками развития медной минерализации. Это связано с тем, что молибденит здесь представлен как минимум двумя генерациями [Забелин, 1992; Кужугет, и др., 2019; Pollard et al., 2017]. Первая ассоциирует с продуктами раннего этапа формирования месторождения Ак-Суг, с которым связано образование основного объема Au-Mo-Cu-оруденения. Вторая представлена более поздними наложенными мономинеральными молибденитовыми прожилками, выполняющими «сухие» трещины, рассекающими халькопиритовые руды и локализованными главным образом в пределах штока плагиогранит-порфиров и прилегающего к нему пространства. Данная генерация, вероятно, связана со штокверком, образующим в том числе и «кварцевое ядро». Эти две генерации отчетливо отличаются по содержанию рения [Забелин, 1992; Berzina et al., 2005; Pollard et al., 2017]. В пластинчатом

молибдените его содержание варьирует от 400 до 650 г/т (в среднем 500 г/т). В позднем мелкочешуйчатом молибдените содержание рения в два раза ниже – от 100 до 400 г/т, в среднем 260 г/т».

**Материалы, представленные в параграфе 2.2 (2 главы) и 3 главе данной диссертации, позволяют сформулировать и обосновать Второе защищаемое положение: В составе первичных ореолов Ак-Сугского Au-Mo-Si-порфирового месторождения, установлено 8 обособленных геохимических ассоциаций, отражающих состав, геохимическую специализацию вмещающих пород и основные минеральные парагенезисы кольцеобразных минерализованных зон порфировой системы. Метасоматическая зональность проявлена в последовательной смене от периферии к центру зон пропицитизации, кварц-хлорит-серицитовых, кварц-серицит-хлоритовых метасоматитов (с реликтами зон калишпатизации и биотитизации) и окварцевания.**

## **ГЛАВА 4. ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ РУДОНОСНОСТИ ГЛУБОКИХ ГОРИЗОНТОВ И УРОВНЯ ЭРОЗИОННОГО СРЕЗА МЕСТОРОЖДЕНИЯ АК-СУГ**

Оценка уровня эрозионного среза Ак-Сугской порфировой системы и перспектив рудоносности глубоких горизонтов месторождения выполнена на основе анализа объемных моделей месторождения, построенных по результатам разведочных работ Голевской ГРК 2014-2019 гг. Согласно опубликованным данным [Макаров и др., 2024], «результатами разведочных работ на Ак-Сугском месторождении установлено продолжение рудных тел на глубину ниже контура проектного карьера (горизонт +700 м), но рудные тела на глубине не оконтурены. Как видно из рисунков 4.1 и 4.2, Северная зона Ак-Сугского месторождения является наиболее изученной по сравнению с Южной, однако по падению рудного тела (горизонты +700–+400) степень его изученности снижается, что выражено в отсутствии законтурных безрудных скважин (Рис. 4.3, 4.4). В плане месторождение представляет собой кольцеобразную структуру с безрудным «кварцевым ядром» по центру, что является типичной картиной для плутоногенных медно-порфировых месторождений. Геолого-структурные особенности Ак-Сугского месторождения являются аналогичными таким крупным и уникальным месторождениям, как Оуу-Толгой, Erdenet (Монголия), Pebble, Bingham Canyon (США), Chuquibambilla (Чили), Кальмакыр (Узбекистан), Актогай (Казахстан), Песчанка, Малмыжское (Россия). Вертикальный размах оруденения на месторождении Оуу-Толгой составляет около 2 км, на месторождении Pebble порядка 1,5 км. Достоверно установленный вертикальный интервал оруденения на месторождении Ак-Суг, по данным бурения (абс. отм. 1 450–550 м по скважине 2-0), составляющий 900 м, дает основания предполагать прирост рудных ресурсов на глубины не менее 500 метров.

На рисунках 4.1, 4.2 показана объемная модель распределения содержаний меди и молибдена месторождения Ак-Суг. Анализируя модели, можно отчетливо выделить, более богатый, северный, фланг месторождения и южный фланг, с более скромным содержанием полезных компонентов.

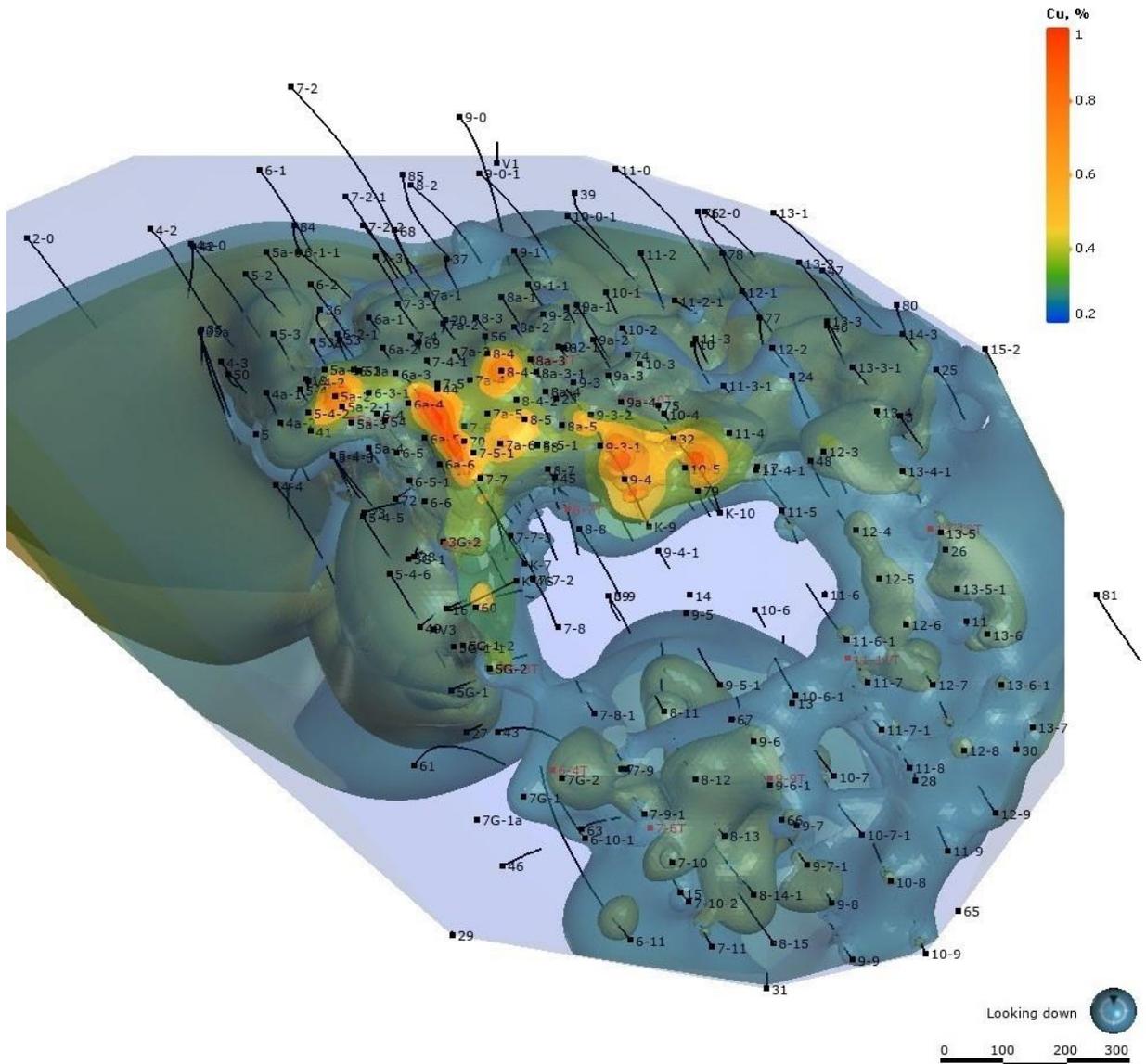
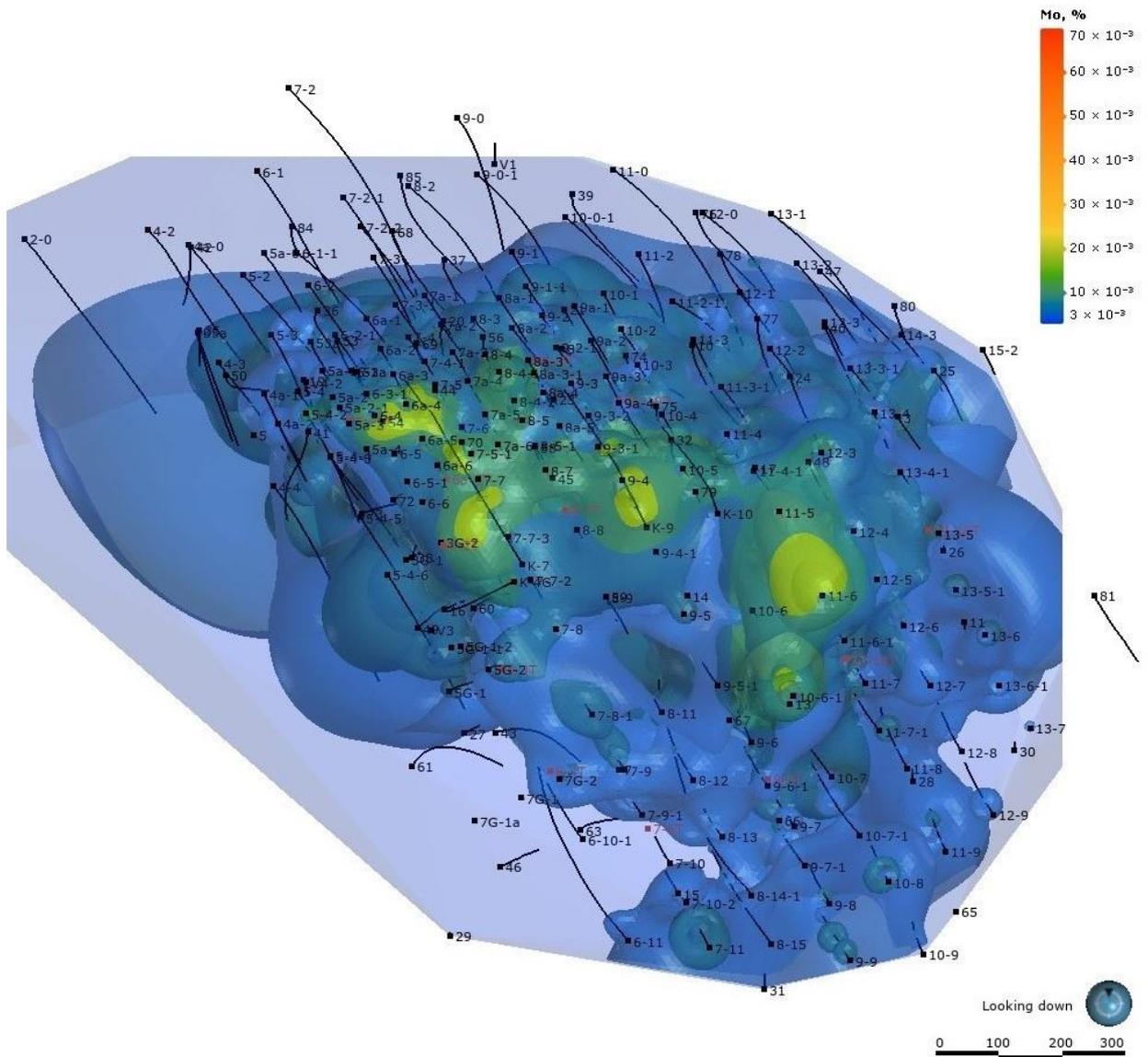


Рисунок 4.1. Распределение меди в объемной модели Ак-Сугского месторождения.



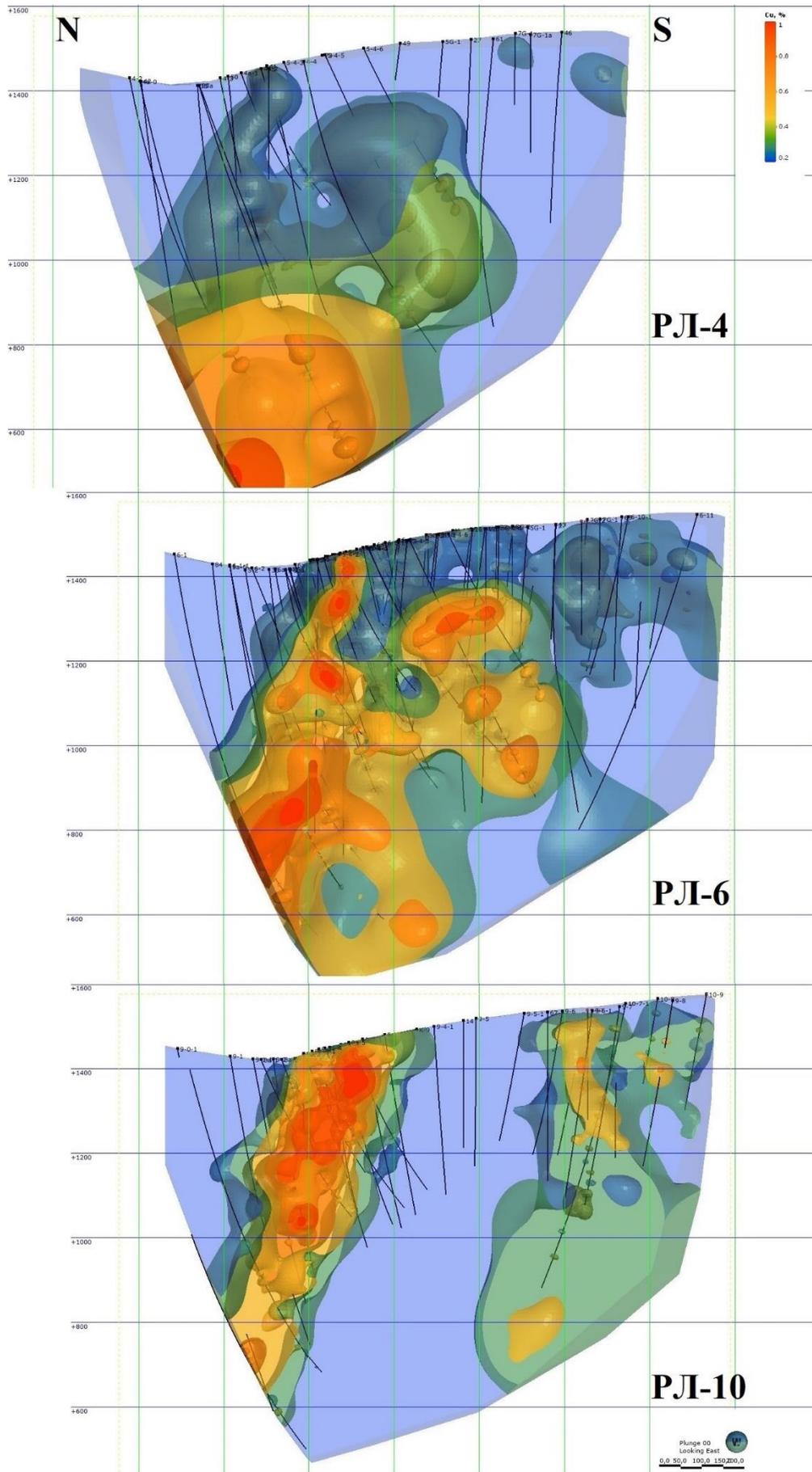


Рисунок 4.3. Содержание меди по разведочным линиям в объемной модели.

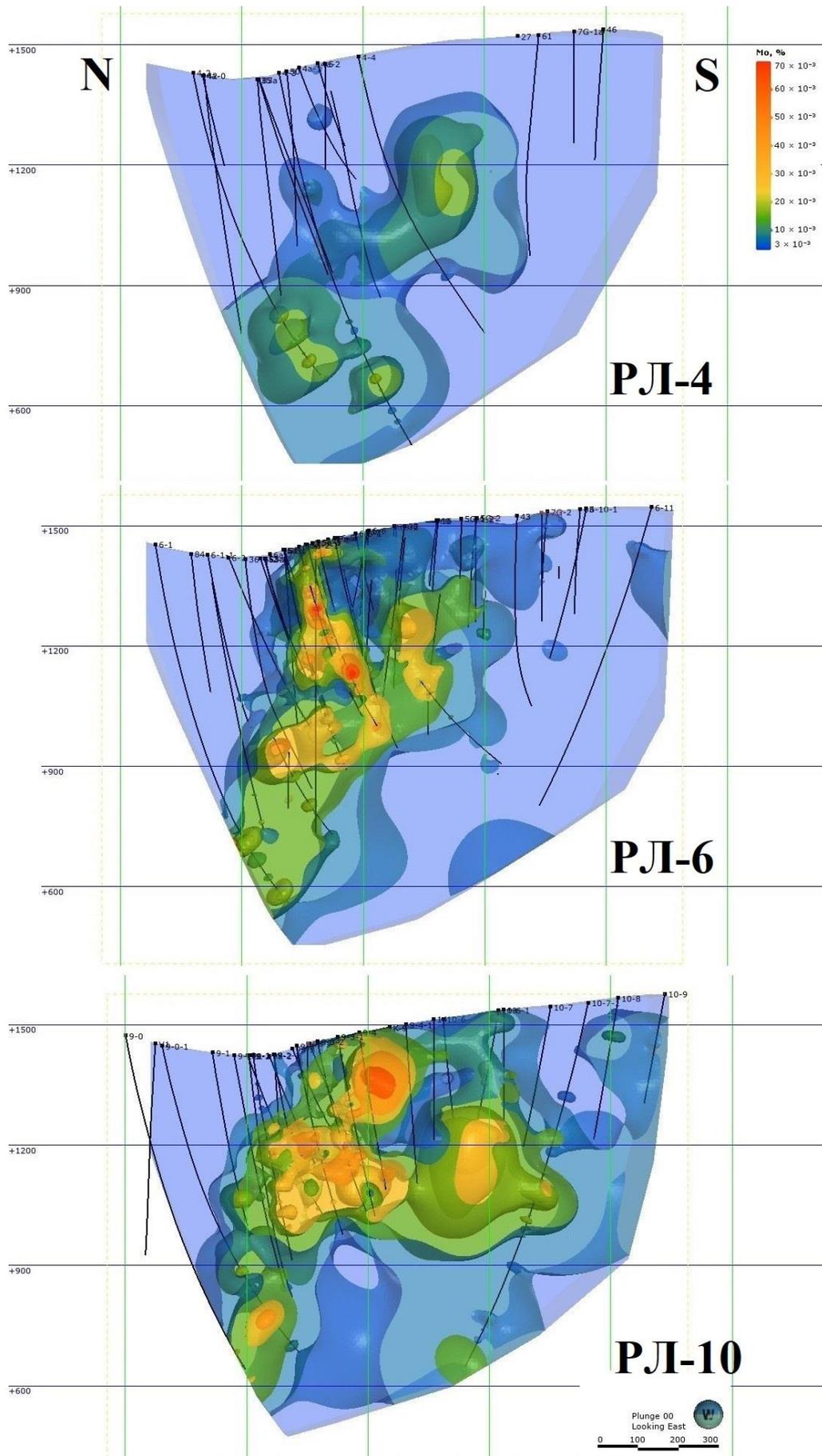


Рисунок 4.4. Содержание молибдена по разведочным линиям в объемной модели.

Мощность рудного тела на глубоких горизонтах изменяется в пределах от десятков до нескольких сотен метров, что указывает на возможное продолжение рудного тела по падению. В этом же направлении получают развитие тоналит-порфиры аксутского комплекса – обнаруживающие наиболее тесную пространственную связь с оруденением. На перспективность глубоких горизонтов также указывают достаточно высокие концентрации меди (местами превышают 1 %) ниже 700 горизонта, что может свидетельствовать о возможности обнаружения на нижележащих горизонтах богатых медных руд. Наибольшие перспективы прироста запасов на глубоких горизонтах открыты на Северной залежи, в первую очередь ее западной части, которая погружается в северо-западном направлении, где имеются пересечения с концентрациями меди более 1 %.

Анализ распределения содержания и продуктивности основных полезных компонентов в блочной модели Северной рудной залежи по простиранию (Рис. 4.5–4.8) и падению (Рис. 4.9, 4.10) подтверждает предположение о перспективности глубоких горизонтов Северной залежи, в том числе в западной ее части. Это выражено в росте содержания полезных компонентов и увеличении продуктивности по простиранию и падению рудного тела.



Рисунок 4.5. Изменение содержания Cu в блочной модели Северного рудного тела по простиранию (с запада на восток).

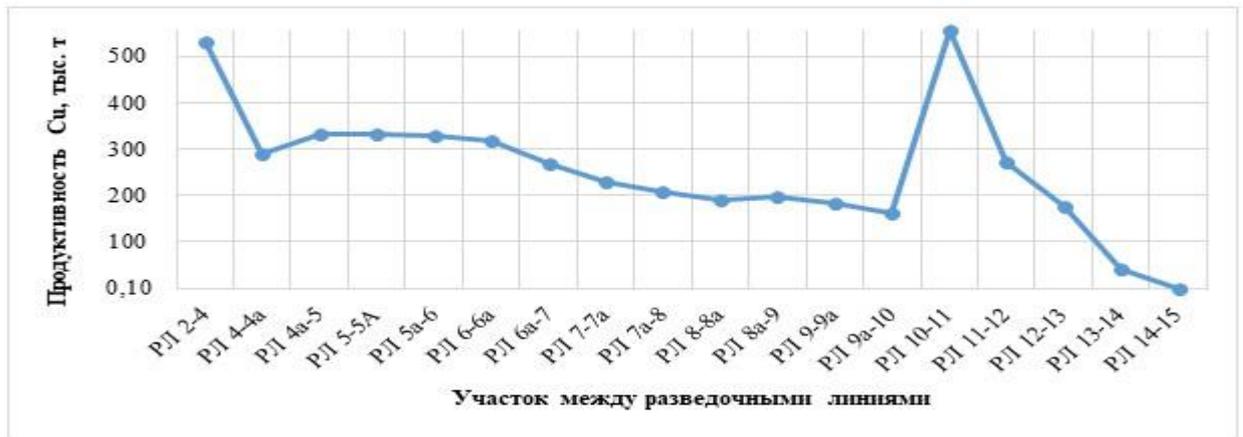


Рисунок 4.6. Изменение продуктивности Si в блочной модели Северного рудного тела по простиранию (с запада на восток).

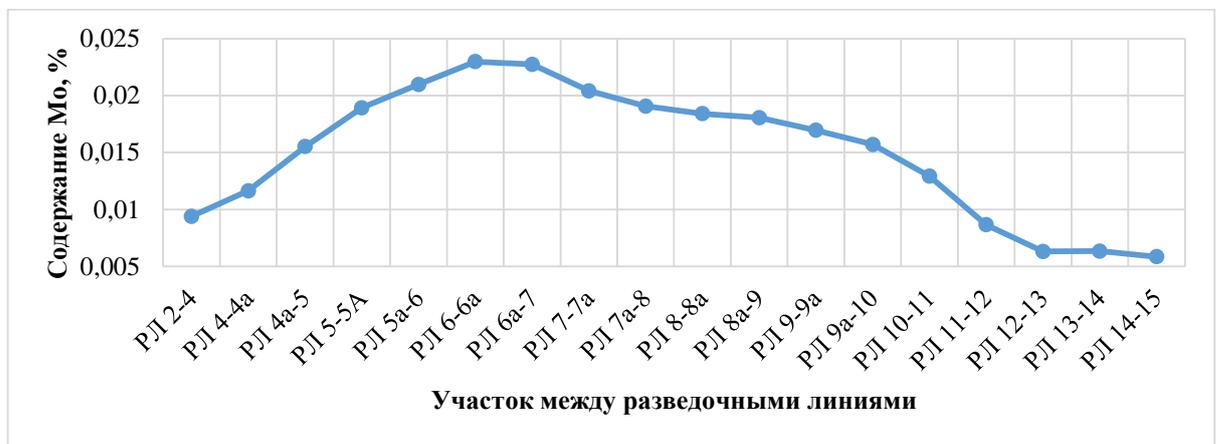


Рисунок 4.7. Изменение содержания Mo в блочной модели Северного рудного тела по простиранию (с запада на восток).

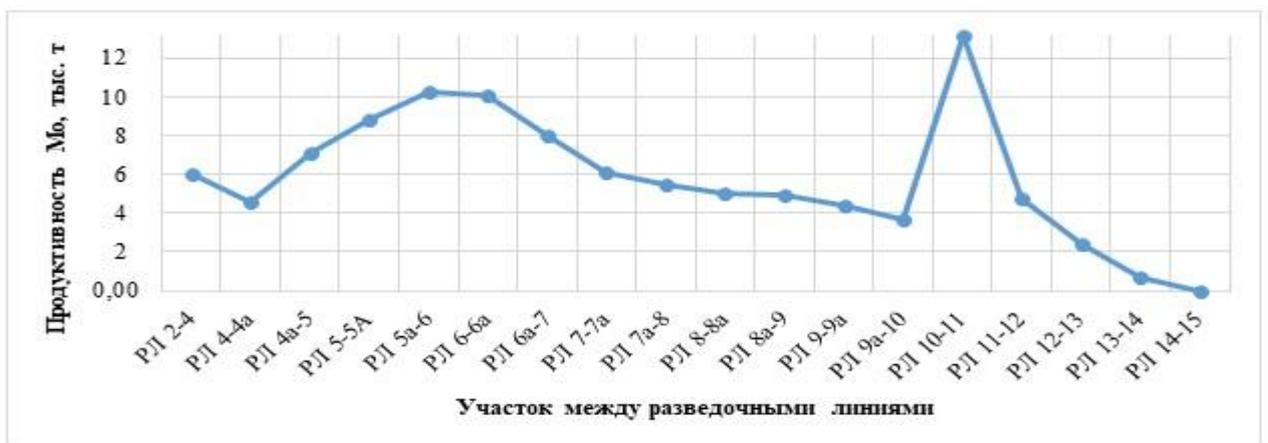


Рисунок 4.8. Изменение продуктивности Mo в блочной модели Северного рудного тела по простиранию (с запада на восток).

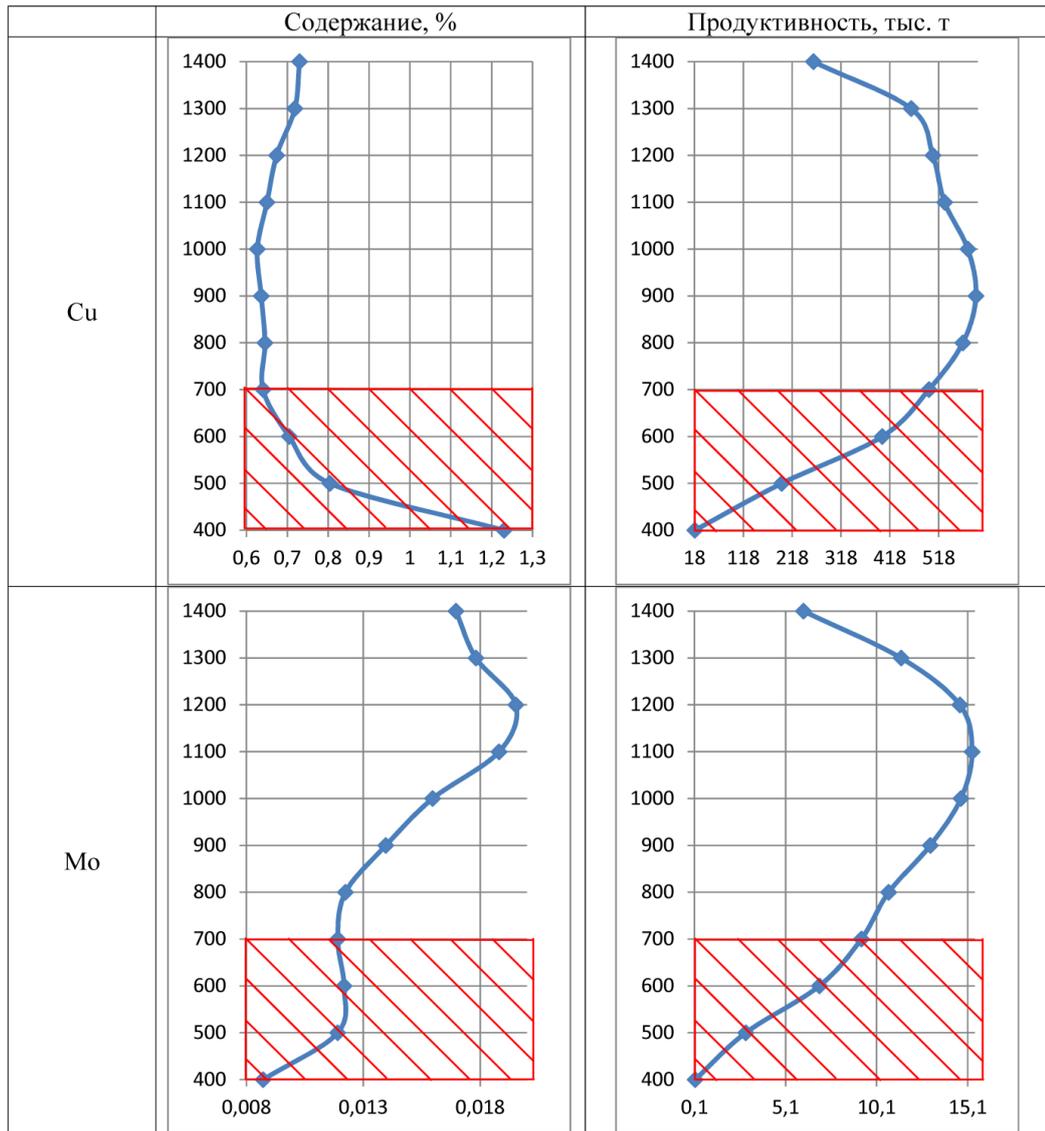


Рисунок 4.9. Распределение содержаний и продуктивности Cu и Mo по падению Северной залежи.

Здесь и на рис. 4.10: вертикальная ось – уровень горизонта месторождения; красная штриховка – зона, в которой отмечается неполное оконтуривание рудной залежи.

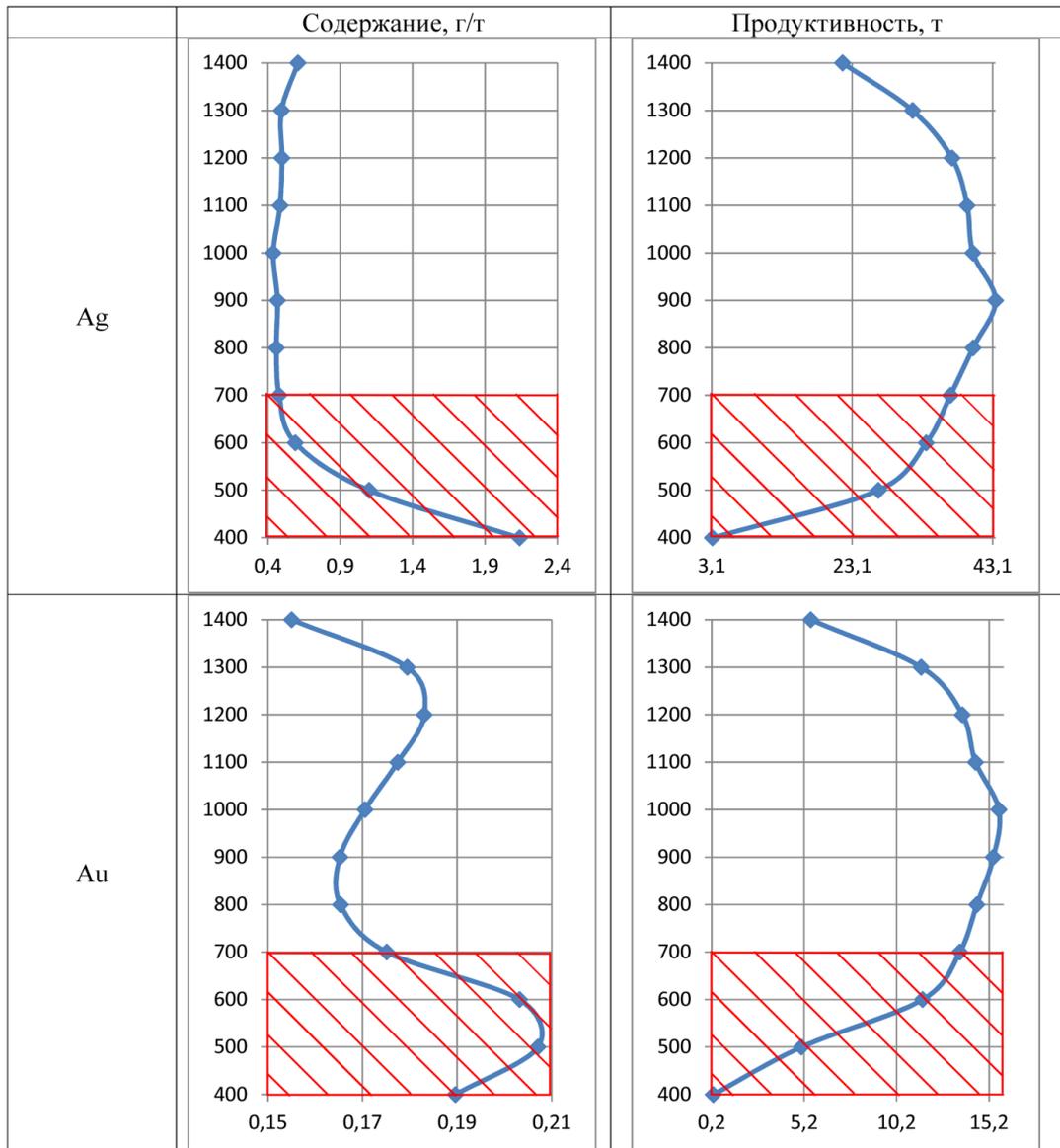


Рисунок 4.10. Распределение содержаний и продуктивности Ag и Au по падению Северной залежи.

Как можно видеть из графиков распределения продуктивности (Рис. 4.9, 4.10), месторождение обладает довольно небольшим уровнем эрозионного среза, а параболообразная форма графика говорит о практически полной изученности месторождения. Однако стоит принять во внимание слабую изученность глубоких горизонтов (красная штриховка на графиках). В этой зоне при дальнейшем изучении месторождения возможна корректировка контуров рудной залежи и прирост запасов руд с содержанием меди более 0,6 %.

Мощность рудного тела на глубоких горизонтах в среднем составляет 120–

150 м, при этом наблюдается тенденция к увеличению мощности рудного тела по направлению к западной части, где в промежутке между РЛ 4-5 она составляет более 300 м. Подобные значения мощности рудной залежи, а также данные с геологических разрезов позволяют выдвинуть предположение о дальнейшем погружении рудного тела в западном направлении, под отложения толтаковской свиты среднего девона, и данные по распределению  $Cu$  в объемной модели (см. Рис. 4.1, 4.3) это предположение подтверждают.

Для оценки перспектив глубоких горизонтов месторождения Ак-Суг была проведена экстраполяция рудных тел с уровня +600 м на глубину до уровня +300 м по падению рудной залежи. Как видно из ранее представленных рисунков, вероятнее всего, участок между разведочными линиями 4 и 5 является началом «разделения» общей рудной залежи на Северную (более богатую и продуктивную) и Южную (руды среднего качества).

Следующим шагом для оценки прогнозируемых объемов руды было построение по полученным контурам каркаса предполагаемого продолжения рудного тела. В результате каркасного моделирования объемы прогнозируемого оруденения при средней плотности  $2,71 \text{ г/см}^3$  составят суммарно 256 973,462 тыс. т руды, в том числе 140 173,06 тыс. т руды по Северной залежи, 116 800,402 тыс. т руды по Южной залежи.

По данным протокола № 3907 от 31 ноября 2014 года ГКЗ Роснедра, суммарные запасы руды (балансовые + забалансовые) составляют 608 121,8 тыс. т по Северной залежи и 204 427,9 тыс. т по Южной, проведение доразведки глубоких горизонтов (от уровня +700 до +300 м) позволит прирастить суммарно до 32 % запасов руды или 23 % по Северной залежи и 57 % по Южной.

Подводя краткие выводы о перспективах глубоких горизонтов Ак-Сугского месторождения, можно отметить, что прирост запасов богатых по качеству руд возможен на западном фланге Северной рудной залежи, прежде всего между разведочными линиями 2 и 4. Прирост запасов руд среднего качества возможен на глубоких горизонтах Южной рудной залежи. Анализируя графики продуктивности оруденения, между горизонтами +700 и +300 м можно ожидать

прирост запасов металлов не менее 25 % от имеющихся по месторождению.

Для анализа уровня эрозионного среза порфировой системы были использованы данные по минералого-геохимической зональности месторождения Ак-Суг и графики распределения содержаний и продуктивности с глубиной. Полноценное зональное распространение всех типичных видов минерализации порфировых месторождений и, соответственно, развитие первичных геохимических ореолов (пиритовый ореол, пирит-халькопиритовый, халькопиритовый, борнит- халькопиритовый), пики по продуктивности в районе горизонтов +1 100–+900 м, а также ненулевые содержания на самых верхних горизонтах месторождения говорят о небольшом уровне эрозионного среза Ак-Сугской рудно-магматической системы» [Макаров и др., 2024]. Малая глубина [Сидорина, 2015, 2016; Sillitoe, 2010] эрозионного среза Ак-Сугской порфировой системы также подтверждается [Шадчин и др., 2024] широким распространением в рудах месторождения эпитермальной (сульфидно-сульфосолевой) минерализации. На текущем этапе исследований эрозионный срез месторождения Ак-Суг оценивается в 10–15 %.

## ГЛАВА 5. РТ-ПАРАМЕТРЫ ФОРМИРОВАНИЯ РУДНЫХ ЗОН

Материал главы базируется на результатах термобарогеохимических исследований, полученных в ходе совместных работ диссертанта со специалистами ИГМ СО РАН (г. Новосибирск).

Физико-химические параметры формирования штокверковых рудных зон Ак-Сугского Au-Mo-Cu порфиривого месторождения были установлены благодаря применению ряда методов: микротермокриометрии, газовой хромато-масс-спектрометрии (ГХ-МС) и рамановской КР-спектроскопии индивидуальных флюидных включений (ФВ) в жильном кварце. Состав флюида в индивидуальных включениях был определен методом рамановской спектроскопии. Валовый состав летучих изучался методом ГХ-МС как в жильном кварце, так и в жильном кальците из рудных зон месторождения.

### 5.1. Характеристика флюидных включений в кварцевых прожилках

Образцы, из которых изготавливались двустороннеполированные кварцевые пластинки отбирались из наиболее представительных (с точки зрения мощности кварцевых прожилков и количества видимой сульфидной минерализации) интервалов внутри рудных зон (выделенных по результатам геохимического опробования) в пределах контура подсчета балансовых запасов Ак-Сугского месторождения.

В изученных образцах с рудных зон присутствует большое количество флюидных включений разнообразной формы, состава и генераций. Для установления РТ-параметров формирования кварцевых прожилков рудных зон месторождения методом термокриометрии изучались различные типы ФВ, размером от 5 мкм, не имеющие признаков расшнурования и разгерметизации. На

начальном этапе термобарогеохимических исследований было установлено, что флюидные включения на Ак-Сугском месторождении в тех или иных количествах отмечаются как в кварцевых зернах порфировых вкрапленников, так и в жильном кварце. Однако ФВ во вкрапленниках имеют слишком малые размеры (порядка 2-4 мкм) и их изучение не представлялось возможным.

Среди 20 изученных кварцевых пластинок не обнаружены зерна кварца с зонами роста, которые, согласно справочной информации [Ермаков, Долгов, 1979; Рёддер, 1987], позволили бы разделить флюидные включения по времени их консервации на первичные, первично-вторичные и вторичные генерации. Для выделения генераций индивидуальных флюидных включений, диссертант руководствовался приемами, описанными в работе [Шапаренко, 2022]: «к первичным и первично-вторичным генерациям отнесены включения, которые либо равномерно распределены по всему зерну кварца, либо образуют группы из 5-10 включений, не приуроченные к залеченным трещинам. Вторичные генерации включений образуют цепочки в залеченных трещинах, секущих границы кварцевых зерен».

При комнатной температуре было выделено три типа флюидных включений в кварце (Рис. 5.1):

1. Однофазные газовые или жидкие ФВ ( $J_{H_2O}$ ,  $\Gamma_{CO_2}$ ) отмечаются в зернах кварца в виде первично-вторичных и вторичных образований с размерами порядка 2-8 мкм;
2. Двухфазные газовой-жидкие ФВ ( $J_{H_2O} + \Gamma_{CO_2}$ ) представлены первичной (около 10-15 мкм), первично-вторичной и вторичной (2-5 мкм) генерациями. Соотношения жидкости и газа во включениях изменяется в соотношениях от 90:10 до 60:40;
3. Многофазные ФВ ( $J_{H_2O \pm CO_2} + \Gamma_{CO_2 \pm KP}$ ) чаще всего имеют размеры до 10 мкм. Твердая фаза в таких ФВ представлена захваченным кристаллом рудного минерала, предположительно, гематита.

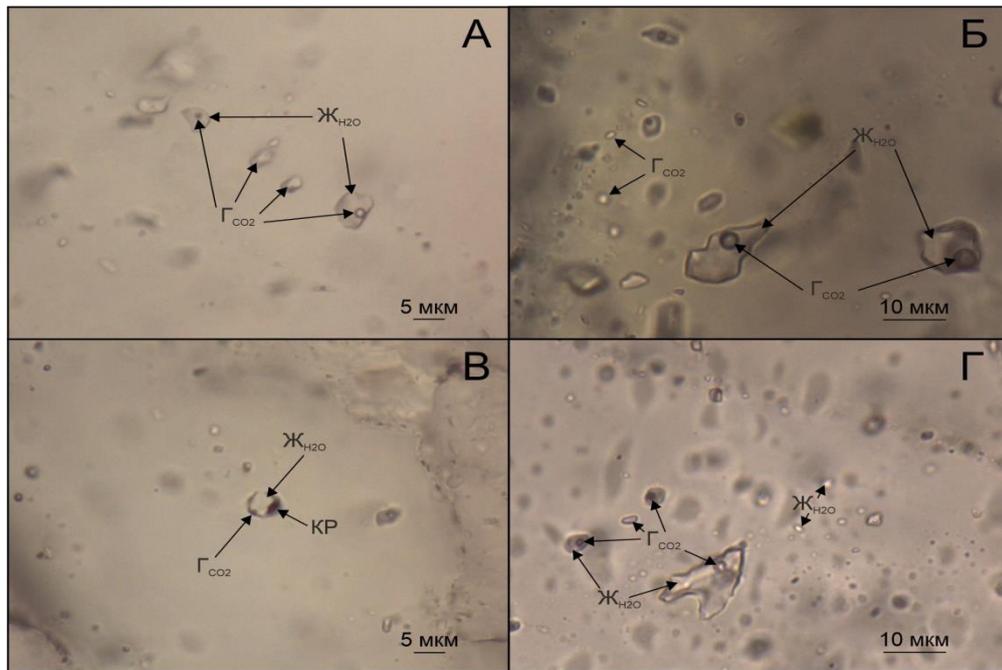


Рисунок 5.2. Флюидные включения в кварце рудных зон месторождения Ак-Суг.

А – первично-вторичные однофазные и двухфазные ФВ; Б – первичные двухфазные и вторичные однофазные ФВ; В – многофазное ФВ с кристаллом рудного минерала; Г – крупное первичное двухфазное ФВ в окружении более поздних однофазных газовых и жидких ФВ.

В ходе изучения индивидуальных флюидных включений в кварце рудных зон, установлено преобладание однофазных ФВ, над двухфазными и многофазными ФВ в количественном соотношении примерно 4:1. Также отмечается значительное преобладание вторичных индивидуальных флюидных включений (по зонам трещиноватости в жильном кварце) над первичными и первично-вторичными включениями в соотношениях порядка 5:1 – 20:1. Соотношение количества включений водного состава по сравнению с газовыми включениями (среди однофазных) изменяется в пропорциях от 3:1 до 1:1 в зависимости от рассматриваемых образцов среди пород и фаз Ак-Сугского интрузивного массива от кварцевых диоритов, тоналит-порфиров к плагиогранит-порфирам. Среди всех изученных ФВ, многофазные ФВ отмечались лишь в единичных случаях, среди твердых фаз в таких включениях не отмечались кристаллики соли.

## 5.2. Результаты микротермометрических исследований

Результаты термометрических исследований флюидных включений в кварце рудных зон Ак-Сугского месторождения представлены в таблице 29 и на рисунках 5.2-5.4. Для некоторых ФВ не удалось установить температуру эвтектики или плавления последнего кристалла льда (ввиду их малого размера) – данные по ним не использовались для расчета солености и плотности захваченного флюида и давления в минералообразующей среде. Расчет солености и давления флюида производился в Microsoft Excel с использованием таблицы для интерпретации микротермометрических данных ФВ, опубликованной в работе [Steele-MacInnis et al., 2012].

Таблица 29. Обобщенные результаты микротермометрических исследований флюидных включений в кварце месторождения Ак-Суг.

Тип включений	Генерация включений *	Вид гом. **	Т <sub>гом.</sub> , °С	Водная фаза			Давление, бар
				Т <sub>эвт.</sub> , °С	Т <sub>пл. льда</sub> , °С	Соленость, мас. %, NaCl-экв.	
Ж <sub>H2O</sub> +Г <sub>CO2</sub>	П, ПВ	Ж	229-500 N=30	-21,8– -23,0 N=3	-1,4– -5,5 N=6	2,41–8,55	26,8– 122,1
	В		79-257 N=110	-18,5– -22,0 N=5	-0,2– -13,7 N=59	0,35–17,52	0,4–40,4
Ж <sub>H2O</sub> +Г <sub>CO2</sub> +КР	В		167	-18,5	-4,9	7,7	7,0

Примечание: \*П – первичные, ПВ – первично-вторичные, В-вторичные; \*\* Ж – в жидкую фазу.

Температуры гомогенизации (Т<sub>гом</sub>) первичных и первично-вторичных флюидных включений в кварце рудных зон изменяются в интервале 229 – 500 °С при гомогенизации в жидкую фазу (Рис. 5.2, 5.4). Температура эвтектики (Т<sub>эвт</sub>) водной фазы первичных и первично-вторичных флюидных включений изменяется в интервале от –21,8 до –23,0 °С и близка к водно-солевой системе NaCl – H<sub>2</sub>O [Bodnar, Vityk, 1994] с соленостью флюида 2,41 – 8,55 мас. %, NaCl-экв (Рис. 5.3, 5.4) и плотностью 0,75 – 0,85 г/см<sup>3</sup>. Расчетное давление флюида в двух вышеописанных типах включений, изменяется в интервале от 26,8 до 122,1 бар.

Флюидные включения вторичной генерации в кварце имеют температуры гомогенизации (в жидкость) от 79 до 257 °С и температуры эвтектики от –18,5 до –22,0 °С, что отображает аналогичный (с первичными и первично-вторичными ФВ) состав водно-солевой системы. Соленость флюида варьирует в диапазоне от 0,35 до 17,52 мас. %, NaCl-эquiv. Плотность растворов составляет 0,81 – 1,1 г/см<sup>3</sup>. Расчетное давление флюида для вторичных включений составляет 0,4 – 40,4 бар.

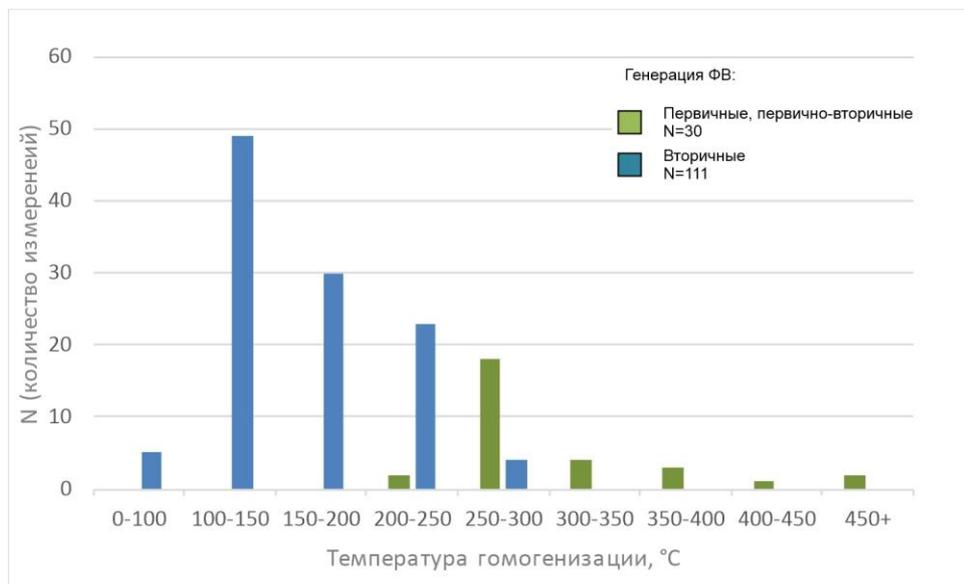


Рисунок 5.2. Диаграмма частоты встречаемости интервалов температур гомогенизации флюидных включений месторождения Ак-Суг.

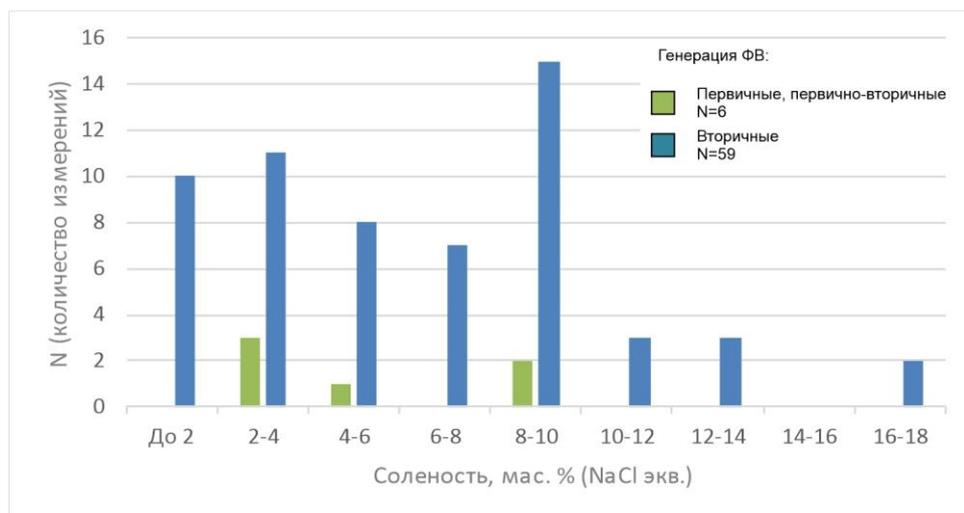


Рисунок 5.3. Диаграмма частоты встречаемости интервалов солености водной фазы флюидных включений месторождения Ак-Суг.

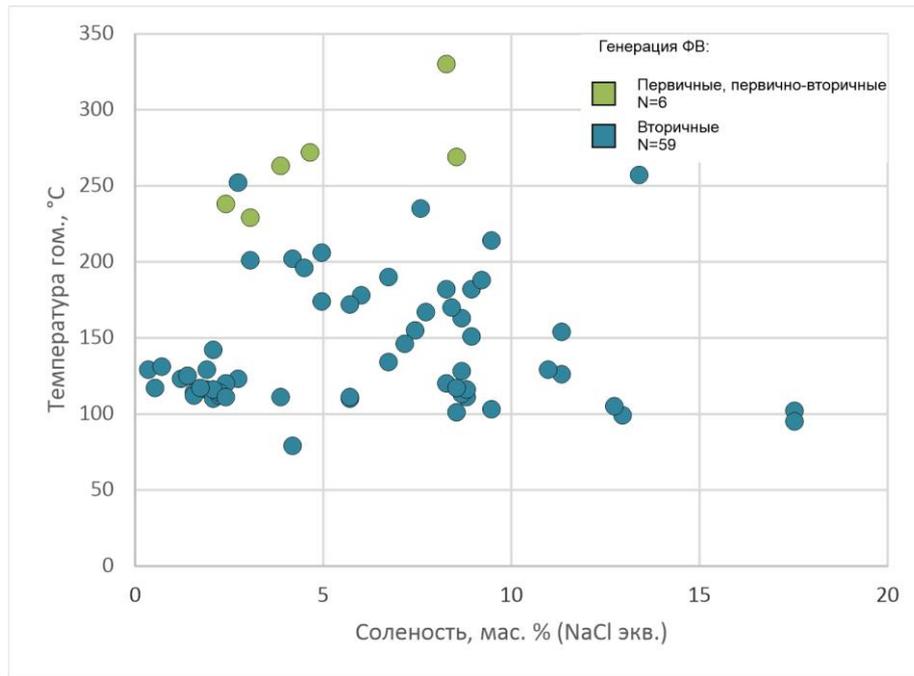


Рисунок 5.4. График «температура – соленость» для флюидных включений месторождения Ак-Суг.

Полученные интервалы температур гомогенизации ФВ отражают основные условия и стадии формирования рудной минерализации Ак-Сугского месторождения: высокотемпературные (500 – 300 °С) флюиды связаны с формированием гипотермальной Au-Mo-Cu-порфировой минерализации, среднетемпературные мезотермальные растворы (300 – 200 °С) связаны с отложением эпитеpmальных (Ag-Te-Bi) минералов, субэпитеpmальных (Au-Ag-Bi-Se-Te ассоциация), полиметаллических (Pb-Zn) и сурьмяно-мышьяковистых минералов. Флюиды низкотемпературной стадии (200 – 70 °С) коррелируют с карбонатной, сульфатной, редкоземельной и редкой субэпитеpmальной минерализацией [Шадчин и др., 2024]. Изменение солености и плотности флюида, формировавшего кварцевые прожилки рудных зон месторождения, а также снижения давления флюида от ранних генераций ФВ к поздним, свидетельствует об эволюции состава флюида и среды минералообразования порфировой системы.

Все результаты, полученные диссертантом в ходе исследования, хорошо согласуются с литературными данными по флюидному режиму Ак-Сугского месторождения. В монографии [Сотников, Берзина, 1993] указывается, что

авторам по единичным газово-жидким включениям в апатите удалось измерить температуры гомогенизации для включений: из диоритов 335 – 600 °С, порфиров 380 – 490 °С, калишпатизированных гранитов – 280 – 420 °С (в которых отмечаются включения с углекислотой). Большинство включений имели размеры меньше 5 мкм и гомогенизировались в жидкую фазу.

В статье [Кужугет и др., 2023] приведены данные термодатиметрических исследований газово-жидких включений в кварце различных рудно-магматических этапов: медно-порфирового, супэпитеpmального, эпитеpmального и соответствующих им рудным ассоциациям (например, золото-пирит-борнит-халькопирит-кварцевая ассоциация). Согласно опубликованным в ней данным, температуры гомогенизации (двухфазных газово-жидких или трехфазных газово-жидких с углекислотой) индивидуальных флюидных включений для медно-порфирового этапа составили 320 – 390 °С, для субэпитеpmального 285 – 370 °С, для эпитеpmального 150 – 335 °С, что хорошо коррелирует с описанной минерализацией в полированных шлифах, описанной как диссертантом [Шадчин и др., 2024], так и авторами статьи [Кужугет и др., 2023]. Соленость водной фазы (NaCl-экв) газово-жидких включений медно-порфирового этапа изменялась в диапазоне 20,1 – 32,8 мас. %, для субэпитеpmального этапа 7,5 – 14,7 мас. %, для эпитеpmального этапа 1,4 – 12,9 мас. % [Кужугет и др., 2023].

Широкий диапазон температур формирования кварцево-жильных зон, аналогичный описанному выше, со значительными вариациями солености флюида в опубликованной литературе описан на месторождении Малмыж [Буханова, 2020; Буханова, Плечов, 2017]. Там интервал температур гомогенизации газово-жидких включений составил 100 – 466 °С для флюидов с соленостью порядка 4 мас. %, NaCl-экв и давлением флюида до 300 бар. Также на Малмыжском месторождении зафиксированы многофазные ФВ с жидкой и газообразной углекислотой с температурами гомогенизации до 580 °С и соленостью флюида до 60 мас. %, NaCl-экв. Давление захвата таких «рассолов» оценивалось в 460-550 бар. Как отмечает исследователь [Буханова, 2020] «формирование месторождения началось при температурах от 730 до 670 °С на

глубине 2,5–3 км с появления ранних кварцевых прожилков. Золото-медно-порфиновые руды формировались в постмагматической гидротермальной обстановке в диапазоне температур от 580 до 330 °С на глубине 1–2 км».

Подводя итог термокриометрическим исследованиям, хочется отметить, что сосуществование различных генераций флюидных включений в кварцевых прожилках различных стадий формирования Ак-Сугского Au-Mo-Cu порфирового месторождения указывает на сложный полистадийный процесс развития порфировой системы с формированием крупных залежей рудной минерализации сложного состава.

### **5.3. Состав флюида Ак-Сугского месторождения**

#### **5.3.1. Состав фаз в индивидуальных флюидных включениях**

Составы фаз в индивидуальных флюидных включениях в кварце определялись методом рамановской спектроскопии. В ходе исследований было изучено 20 кварцевых пластинок из рудных зон месторождения и порядка 180 флюидных включений (как однофазных жидких либо газовых, так и многофазных с жидкостью и газовым пузырьком). В результате установлено (Рис. 5.5), что жидкая фаза в ФВ представлена водой ( $H_2O$ ) с растворенными в ней хлоридами натрия и калия, а газовая фаза во всех рассмотренных случаях была представлена углекислотой ( $CO_2$ ). Метан ( $CH_4$ ) или азот ( $N_2$ ), часто отмечаемые исследователями рудных месторождений различных генетических типов [Буханова, 2020; Сильянов, 2020; Шапаренко, 2022] в составе газовой фазы обнаружены не были.

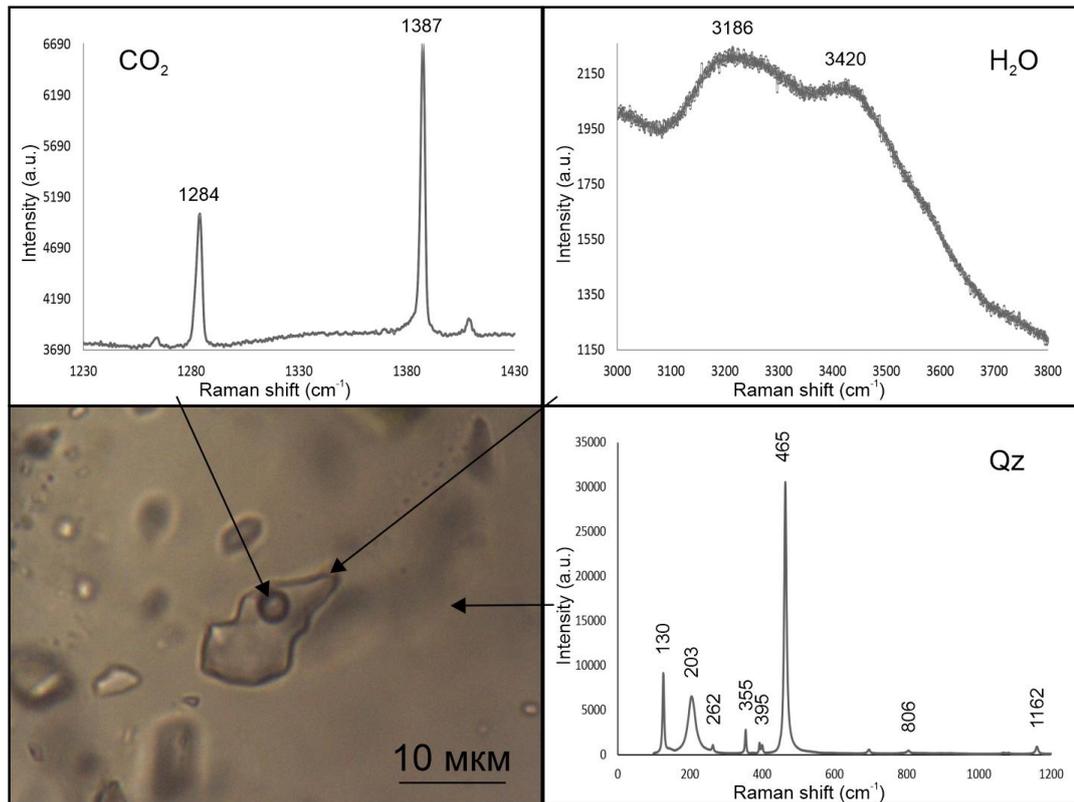


Рисунок 5.5. Рамановские спектры газовой ( $\text{CO}_2$ ) и водной ( $\text{H}_2\text{O}$ ) фаз в кварце (Qz) рудных зон месторождения Ак-Суг.

Как уже отмечалось ранее, соотношение количества включений водного состава по сравнению с включениями углекислотного состава (среди однофазных включений при их значительном преобладании над двух- и многофазными) изменяется в пропорциях от 3:1 до 1:1 в зависимости от рассматриваемых пород массива от ранних образований к поздним. Таким образом, можно констатировать, что состав флюида кварцево-жильных зон Ак-Сугского месторождения постепенно изменялся от преимущественно водного до углекислотно-водного.

### 5.3.2. Валовый состав летучих во флюиде

Методом ГХ-МС (методика исследований приведена в главе 7) в газовой фазе флюидных включений из жильного кварца и жильного кальцита Ак-Сугского месторождения определены вода, углекислота, широкий спектр

бескислородных и кислородсодержащих углеводородов, азот-, серо- и галогенсодержащих соединений (Табл. 30, Табл. П1-П4). Общее количество обнаруженных соединений во флюиде изменяется от 225 в жильном кальците до 230 – 284 в кварце. По данным газовой хромато-масс-спектрометрии, в составе летучих компонентов из флюидных включений вода и углекислота являются основными компонентами флюида. Доля воды в проанализированных образцах изменяется от 30,3 до 70,2 отн. %, доля углекислоты от 24,3 до 48,2 отн. %, доля остальных соединений варьирует в диапазоне от 4,3 до 30,2 отн. %.

Согласно приведенным данным ГХ-МС (Табл. 30, Рис. 5.6) флюид безрудных прожилков имеет преимущественно водный состав с количеством  $H_2O$  порядка 70 отн. %, доля  $CO_2$  составляет примерно 35 отн. %, углеводороды и прочие соединения практически отсутствуют. Флюид прожилков рудных зон имеет несколько иной состав – в нем углекислота начинает преобладать над водой в усредненных соотношениях компонентов около 45:30 соответственно. В составе газовой фазы флюида рудных ассоциаций с уменьшением доли воды во флюиде увеличивается содержание различных органических и неорганических соединений, достигая в отдельных случаях 30,2 отн. %. Из таких соединений в составе флюида отмечаются карбоновые кислоты и эфиры (фталаты). В публикациях [Гибшер и др, 2019; Бульбак и др., 2020; Shaparenko et al., 2021], посвященных изучению флюидного режима месторождений золота отмечается, что для флюида золотоносных ассоциаций на таких крупных месторождениях как Советское и Олимпиада характерно низкое содержание воды и высокая доля углеводородов и их производных. Ряд других исследователей [Hu et al., 2022] отмечает, что летучие компоненты играют важную роль в формировании месторождений золота, повышая растворимость металла в рудоносных флюидах.

Таблица 30. Состав (в отн. %) и количество (в скобках, шт.) летучих компонентов, выделившихся при однократном ударном вскрытии флюидных включений в жильном кварце и кальците месторождения Ак-Суг (по данным газовой хромато-масс-спектрометрии, GC-MS).

Компонент	Рудная зона (Cu>0,5%)		Безрудные интервалы (Cu<0,3%)	
	Кварц	Кварц	Кварц	Кальцит
	5а-1т/432.1	5а-1т/720.5	6а-5т/118.2	7-6т/148.5
Алифатические углеводороды				
Парафины (алканы)	0,61 (32)	0,59 (26)	0,09 (19)	0,84 (24)
Олефины (алкены)	1,14 (46)	0,89 (37)	0,10 (35)	0,18 (16)
Циклические углеводороды				
Циклоалканы, циклоалкены, арены, ПАУ	0,48 (40)	0,75 (44)	3,15 (32)	0,68 (30)
Кислородсодержащие углеводороды				
Спирты	0,31 (13)	0,49 (13)	0,03 (10)	0,21 (15)
Эфиры	25,39 (24)	1,98 (22)	0,03 (11)	0,75 (25)
Альдегиды	0,76 (24)	1,19 (27)	0,29 (27)	1,00 (23)
Кетоны	0,22 (19)	0,52 (21)	0,09 (22)	0,26 (20)
Карбоновые кислоты	0,63 (15)	10,39 (16)	0,18 (12)	0,85 (14)
Гетероциклические соединения				
Диоксаны, диоксины, фураны	0,03 (21)	0,06 (20)	0,02 (18)	0,06 (16)
Азотсодержащие соединения				
Азот, аммиак, нитрилы	0,48 (19)	0,54 (21)	0,14 (17)	2,44 (20)
Серосодержащие соединения				
H <sub>2</sub> S, SO <sub>2</sub> , CS <sub>2</sub> , COS, тиофены	0,175 (28)	0,53 (28)	0,17 (24)	0,11 (18)
Фосфоросодержащие соединения				
Фосфаты	0,0 (0)	0,0 (0)	0,0 (0)	0,01 (1)
Неорганические соединения				
CO <sub>2</sub>	39,46	48,20	25,50	24,33
H <sub>2</sub> O	30,29	33,86	70,21	68,29
Ar	0,01	<0,01	<0,01	0,03
Общее количество компонентов	284	278	230	225
Алканы/алкены	0,54	0,66	0,9	4,67
CO <sub>2</sub> /(CO <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O)	0,57	0,59	0,27	0,26
Σ(C <sub>5</sub> -C <sub>17</sub> )/Σ(C <sub>1</sub> -C <sub>4</sub> )	15,45	8,37	8,53	4,31

Примечание: Относительные концентрации (отн. %) летучих компонентов в изучаемой смеси были получены методом нормализации площадей индивидуальных хроматографических пиков к общей площади всех пиков.

Согласно опубликованным материалам [Шапаренко, 2022] и данным [Blamey, 2012; Norman et al., 2002] «отношение алканы/алкены используется для реконструкции окислительно-восстановительного потенциала флюидов. При доминировании алканов – флюид восстановленный, а при преобладании алкенов – флюид окисленный». Таким образом, согласно представленным данным ГХ-МС, флюид, принимавший участие в формировании безрудных кварц-карбонатных жильных зон имел восстановленный состав, а флюид кварцевых прожилков рудных залежей-окисленный.

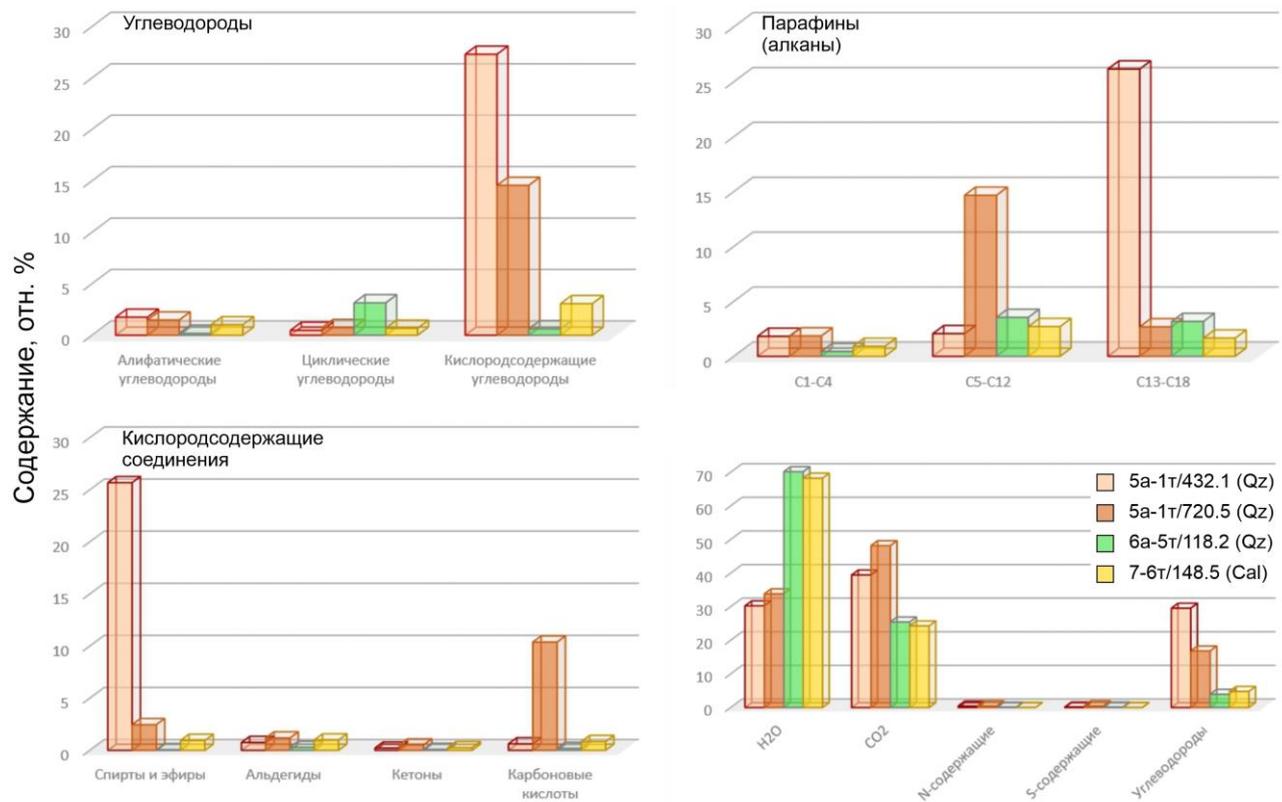


Рисунок 5.6. Распределение летучих компонентов (по данным ГХ-МС) во флюидных включениях из кварца (Qz) и кальцита (Cal) месторождения Ак-Суг.

Проведенные диссертантом термобарогеохимические исследования позволили получить актуальные данные о физико-химических условиях и флюидном режиме Ак-Сугского Au-Mo-Cu порфирового месторождения. Согласно температурам гомогенизации ФВ, кварцевые прожилки рудных зон месторождения были сформированы в широком диапазоне температур от 79 до 500 °С, что указывает на продолжительную историю формирования рудного объекта и отражает многократные поступления минералообразующих растворов в результате локальных тектонических активизаций. Солевой фон водной фазы флюида рудных зон месторождения определяют NaCl и MgCl, а соленость флюида изменялась в интервале от 0,35 до 17,52 мас. % (NaCl-экв.), что является типичным [Richards, 2011] для флюида порфировых месторождений. Давление флюида во время процесса формирования рудных зон изменялось в пределах 0,4 – 122,1 бар, что, согласно [Richards, 2011], соответствует близповерхностному флюиду с глубиной заложения источника около 1 км (Рис. 5.7).

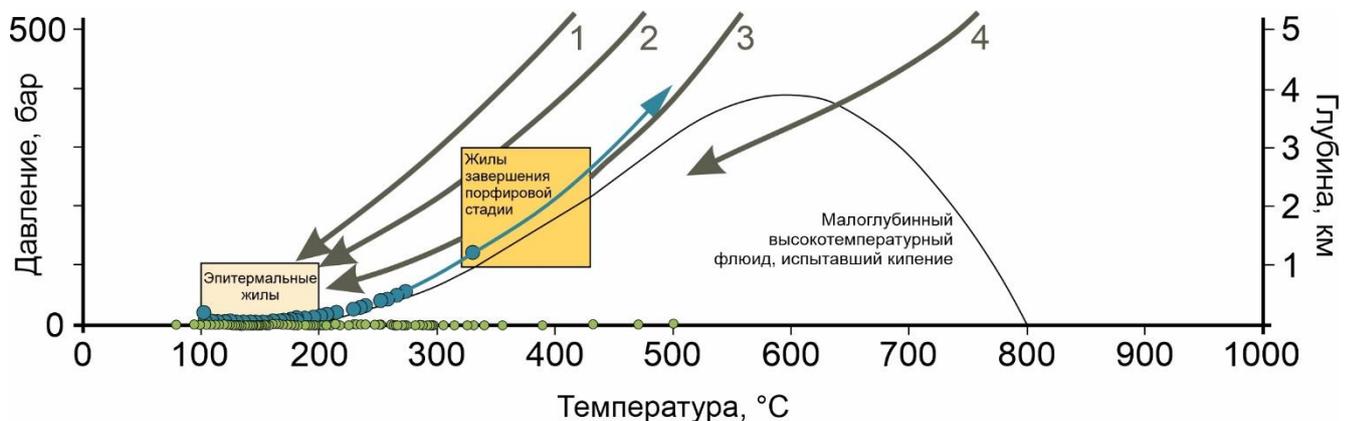


Рисунок 5.7. РТ-параметры формирования рудного флюида месторождения Ак-Суг с путями изменения состава флюида.

Составлена по данным [Richards, 2011]. Диапазоны температур и глубин поздних порфировых жил основной стадии и эпитермальной минерализации, а также пути изменения состава флюида приведены по [Richards, 2011]: 1 – «глубокого сжатия» по [Hedenquist et al., 1998]; 2 – увеличенного давления с незначительной конденсацией флюида по [Heinrich et al., 2004]; 3 – типичного флюида порфировых месторождений; 4 – малоглубинного «горячего» флюида, кипящему досуха. Голубой линией показан линейный тренд увеличения давления флюида рудных зон. Голубыми точками показаны значения РТ для ФВ месторождения Ак-Суг.

Зелеными точками на горизонтальной оси показаны значения температур гомогенизации ФВ месторождения Ак-Суг, для которых не удалось рассчитать давление флюида (не зафиксирован фазовый переход в ФВ).

Обобщение результатов ГХ-МС, микротермометрии и данных рамановской спектроскопии позволяют выделить несколько характерных типов флюида, принимавших участие в формировании рудных зон и безрудных кварцевых жил. Ранний этап формирования Ак-Сугского месторождения характеризуется преимущественно водным составом флюида, доля углекислоты и прочих соединений, в том числе углеводородных, была незначительной. В ходе геологической эволюции порфировой системы, характер минералообразующей среды изменился, флюид принимавший участие в формировании рудных зон приобрел углекислотно-водный (с углеводородами) состав и окисленные свойства.

## ГЛАВА 6. ИСТОЧНИКИ РУДОНОСНЫХ ФЛЮИДОВ

Характеристика источников рудного вещества и флюидов Ак-Сугской рудно-магматической системы проведена на основе изучения изотопного состава S, C, O минералов рудных зон.

### 6.1. Изотопный состав серы сульфидных минералов

Для проведения изотопно-геохимических исследований были отобраны монофракции пирита и халькопирита размером 0,1–0,5 мм. Пробы сульфидных минералов были отобраны из керна технологических скважин (скв. 5а-1т, 6-2т, 6-4т, 8а-8т, 11-11т, 13-12т) с различных глубин. Анализы выполнены в ЦКП «Многоэлементные и изотопные исследования» ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) и лаборатории ФГБУ ЦНИГРИ (г. Москва). Значения  $\delta^{34}\text{S}$  (‰) приведены относительно стандарта троилита из Canyon Diablo (CDT). Воспроизводимость значений  $\delta^{34}\text{S}$  не хуже 0,2 ‰ (2 $\sigma$ ). Наиболее детально методика выполнения исследований описана в 7 главе данной диссертации.

Изотопный состав серы сульфидных минералов месторождения Ак-Суг неоднократно изучался разными коллективами исследователей. Помимо литературных данных об изотопном составе серы (18 анализов) Ак-Сугского месторождения, значительная их часть (30 анализов) была получена в результате авторских исследований пирита и халькопирита с обеих рудных залежей месторождения. Для увеличения выборки значений и получения более обширной информации об источниках рудного вещества также использовались данные исследователей-предшественников, методика и результаты которых отражены в работах [Кужугет и др., 2019; Сотников и др., 2004]

Согласно литературным [Кужугет и др., 2019] и авторским [Шадчин, 2022]

данным, изотопный состав серы халькопирита месторождения Ак-Суг характеризуется диапазоном значений  $\delta^{34}\text{S}$  от  $-2,9$  до  $+2,3$  ‰ при среднем значении  $\delta^{34}\text{S}$  равном  $-0,85$  ‰ для 30 измерений (Табл. 31).

Таблица 31. Изотопный состав серы халькопирита месторождения Ак-Суг.

№ скважины (глубина отбора образца, м) или генерация минерала	$\delta^{34}\text{S}$ , ‰ (CDT)
5а-1г (8,0)	-1,7
- // - (92,6)	-0,1
- // - (171,4)	+0,3
- // - (234,0)	-1,6
- // - (372,3)	-0,6
- // - (375,8)	+1,7
- // - (575,2)	-0,1
- // - (696,4)	+1,1
- // - (719,0)	+0,8
6-2г (208,8)	-2,2
- // - (236,2)	-0,7
6-4г (152,5)	-0,2
7-6г (148,5)	-0,9
8а-8г (43,9)	-0,6
11-11г (80,6)	-2,1
- // - (104,1)	-0,4
- // - (118,0)	-1,1
- // - (118,2)	-1,8
- // - (201,7)	-1,1
13-12г (84,6)	-0,5
- // - (152,4)	-0,7
- // - (164,7)	-0,5
Халькопирит-III*	-0,9
Халькопирит-IV*	-1,6
Халькопирит-V*	-1,9
	-2,3
Халькопирит-VI*	-2,4
	-2,5
	-2,6
	-2,9
Среднее по выборке (n=30)	-0,85

Примечание: \* – данные [Кужугет и др., 2019].

Изотопный состав серы пирита Ак-Сугского месторождения нзначительно отличается от состава серы халькопирита и характеризуется чуть более узким

диапазоном значений  $\delta^{34}\text{S}$  от  $-1,0$  до  $+3,1$  ‰ с преобладанием более «тяжелых» изотопов серы со средним значением  $\delta^{34}\text{S}$  в выборке  $+0,87$  ‰ для 15 измерений (Табл. 32).

Таблица 32. Изотопный состав серы пирита месторождения Ак-Суг.

№ скважины (глубина отбора образца, м) или генерация минерала	$\delta^{34}\text{S}$ , ‰ (CDT)
5а-1г (678,4)	+0,1
6-4г (11,6)	+0,5
– // – (138,7)	+0,5
7-6г (45,2)	+0,6
8а-8г (31,0)	+1,0
– // – (55,9)	+0,8
9-9г (4,8)	+0,4
11-11г (210,3)	-0,1
Пирит-III**	+3,1
	+2,1
	+1,7
	+1,2
	+1,0
Пирит-III*	+1,2
Пирит-V*	-1,0
Среднее по выборке (n=15)	+0,87

Примечание: \*\* – данные [Сотников и др., 2004]; \* – данные [Кужугет и др., 2019].

Согласно литературным данным [Сотников и др., 2004],  $\delta^{34}\text{S}$  молибденита изменяется от  $+2,5$  до  $+3,2$  ‰ со средним значением  $\delta^{34}\text{S}$   $+2,9$  ‰ для 3 анализов. Все имеющиеся значения  $\delta^{34}\text{S}$  были использованы для построения графиков распределения изотопов как относительно минеральных фаз (Рис. 6.1), так и для оценки изменчивости изотопных соотношений в рудных минералах с глубиной (Рис. 6.2).

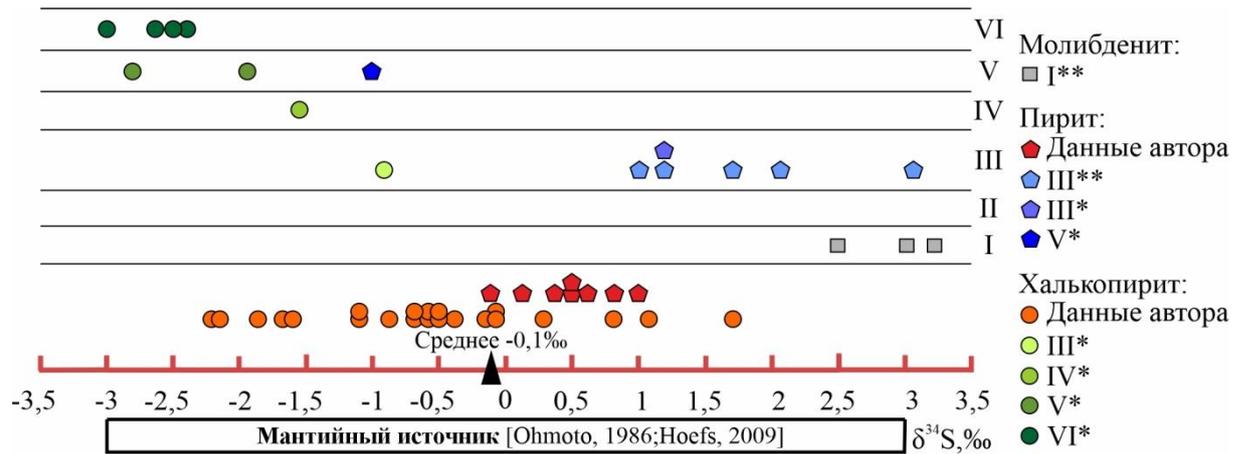


Рисунок 6.1. Изотопный состав серы сульфидных минералов месторождения Ак-Сут.

Примечание: \*- данные Кужугет и др., 2019, \*\*- данные Сотников и др., 2004.

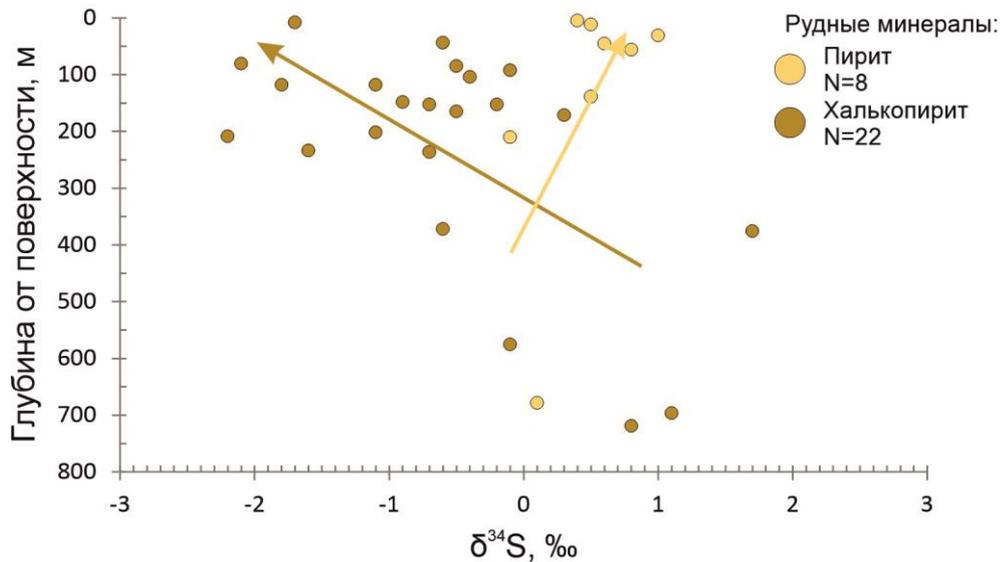


Рисунок 6.2. Изотопный состав серы сульфидных минералов (данные автора) относительно глубины пробы.

Примечание: цветными линиями показаны тренды изменения изотопного состава серы сульфидных минералов от глубоких горизонтов месторождения к его поверхности. Цвет линии соответствует обозначению минерала.

Анализируя полученный массив данных об изотопном составе серы сульфидных минералов Ак-Сутского Au-Mo-Cu порфирового месторождения, можно сделать вывод, что значения  $\delta^{34}\text{S}$  халькопирита, пирита и молибденита различных генераций (см Рис. 6.1) представлены достаточно выдержанным диапазоном значений от -2,9 до +3,2 ‰ со средним -0,1‰ по 48 измерениям в

выборке, что свидетельствует о гомогенности источника серы и незначительном преобладании легких изотопов над более тяжелыми. Полученный диапазон значений изотопных соотношений серы указывает на наибольшую вероятность мантийного [Ohmoto, Goldhaber 1997; Hoefs, 2009, 2015] происхождения рудного флюида.

Также изотопный состав серы сульфидных минералов Ак-Сугского месторождения характеризуется двумя основными трендами изменения значений. Первый тренд – увеличение доли легких изотопов серы от ранних генераций минералов к поздним, что отчетливо прослеживается на рисунке 6.1. Данная зависимость может быть связана с частичным окислением сульфидной серы при увеличении окислительного потенциала и обогащении при этом сульфидов изотопом  $^{32}\text{S}$  [Ohmoto, Rye, 1979]. Второй тренд соответствует незначительному облегчению изотопов серы от глубоких горизонтов месторождения Ак-Суг к верхним (см. Рис. 6.2) и отражает температурное фракционирование изотопов в рудно-магматической системе, а также непосредственное обеднение изотопной системы в ходе процесса рудогенеза. Наиболее наглядно это можно проследить на значениях  $\delta^{34}\text{S}$  халькопирита (см. Рис. 6.2). Тот факт, что линия тренда изменения изотопного состава пирита на данном графике (см. Рис. 6.2) имеет положительный наклон и направление в сторону «утяжеления» серы от глубоких горизонтов месторождения к верхним, можно объяснить малым числом значений в статистической выборке и, очевидно, «смешиванием» результатов анализов не учитывающих генераций рассматриваемого минерала и имеющих различные изотопные значения  $\delta^{34}\text{S}$ .

Анализ литературных источников [Звездов, 2022; Кривцов и др., 1986; Кряжев и др., 2023; Сотников и др., 1985, 2004; Пономарчук, 2005] позволил собрать обширные данные о изотопных характеристиках рудных минералов и ассоциаций для порфировых месторождений России и Монголии различных рудно-формационных типов, что представлено на рисунке 6.3.

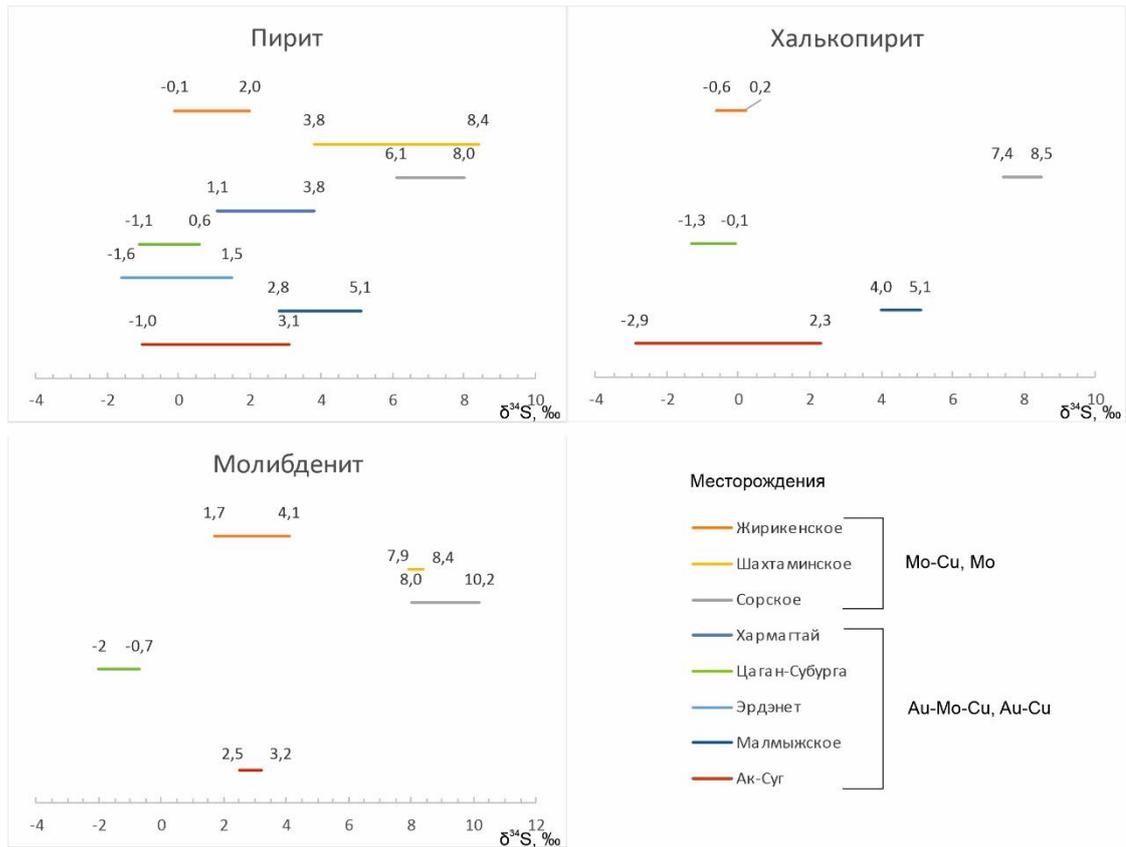


Рисунок 6.3. Изотопный состав серы рудных минералов месторождений России и Монголии. Составлено с использованием данных [Кряжев, 2023; Пономарчук, 2005].

Представленные на рис. 6.3 изотопные данные о других порфировых месторождениях позволяют утверждать, что практически для всех представленных месторождений источником серы сульфидов была сера магматического (Ак-Суг, Малмыж, Эрдэнэт и др.) происхождения. В отдельных случаях, например, как на Сорском и Шахтаминском Мо-порфировых месторождениях, где сульфиды обогащены «тяжелым» изотопом, предполагается [Пономарчук, 2005] смешанный (осадочный+магматический) источник серы. Также, согласно [Ohmoto, Rye, 1979; Ohmoto, Goldhaber, 1997], диапазон  $0 \pm 5$  ‰ является характерным для большинства медно-порфировых месторождений Северной и Южной Америки.

Подводя итоги рассмотрению изотопного состава серы ведущих рудных минералов (халькопирит, пирит, молибденит) месторождения Ак-Суг, необходимо отметить, что все значения  $\delta^{34}\text{S}$  вне зависимости от минерала и

минеральной ассоциации, располагаются в узком диапазоне от  $-2,9$  до  $+3,2$  ‰. Такой незначительный разброс свидетельствует о гомогенности источника серы. Наиболее вероятными ее источниками являлись флюиды мантийного (от  $-3$  до  $+3$  ‰) источника с ограниченным участием метеорных вод. Также, Jochen Hoefs в своей книге *Stable isotope geochemistry* [2015] отмечал, что большинство значений  $\delta^{34}\text{S}$  сульфидов гидротермальных месторождений находится в диапазоне от  $-3$  до  $+1$  ‰, что соответствует значительной части вышеупомянутых соотношений, а также интервалу значений  $\delta^{34}\text{S}$  сульфидов магматического происхождения от  $-5$  до  $+5$  ‰.

## 6.2. Изотопный состав углерода и кислорода жильного кальцита

Изотопный состав углерода и кислорода Ак-Сугского месторождения был определен для монофракций кальцита, отобранных абразивной коронкой из карбонатных и кварц-карбонатных прожилков керна скважин с различных частей и глубин месторождения. Контроль чистоты отбираемого материала осуществлялся под биноклем. Измерения изотопных отношений проводили в ЦКП «Многоэлементные и изотопные исследования» СО РАН г. Новосибирск. Значения  $\delta^{13}\text{C}$  (‰) приведены относительно стандарта VPDB (Vienna Pee Dee Belemnite), для значений  $\delta^{18}\text{O}$  (‰) использован стандарт VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water). Точность измерений изотопных характеристик карбонатного вещества составила не ниже  $0,1$  ‰ для углерода и  $0,2$  ‰ для кислорода. Наиболее детально методика выполнения исследований описана в 7 главе к данной диссертации. Согласно опубликованным данным [Шадчин, 2023] «изотопный состав углерода и кислорода кальцита месторождения Ак-Суг по полученным данным характеризуется диапазонами:  $\delta^{13}\text{C}$  от  $-3,6$  до  $2,2$  ‰ со средним значением  $\delta^{13}\text{C}$   $-1,1$  ‰,  $\delta^{18}\text{O}$  от  $10,4$  до  $21,8$  ‰ со средним  $14,1$  ‰ для 19 измерений» (Табл. 33).

Таблица 33. Изотопный состав углерода и кислорода месторождения Ак-Суг.

Скважина	Глубина	$\delta^{13}\text{C}$ , ‰ (VPDB)	$\delta^{18}\text{O}$ , ‰ (VSMOW)
5а-1г	10,0	-0,4	+14,8
-// -	73,2	-0,6	+12,4
-// -	92,6	-0,3	+14,9
-// -	234,0	-1,8	+12,7
-// -	361,0	-1,0	+13,9
-// -	432,1	-0,1	+21,8
-// -	446,0	-1,3	+16,1
-// -	478,6	-1,5	+11,3
-// -	493,8	-1,2	+12,0
-// -	511,2	+0,2	+21,4
-// -	542,6	-0,8	+13,5
-// -	575,5	-1,8	+13,0
-// -	653,0	-2,9	+13,7
-// -	694,4	-1,1	+13,2
6-3г	178,8	+2,2	+18,8
7-6г	148,5	-2,2	+10,4
8а-8г	93,0	-3,6	+10,4
9а-10г	24,9	-1,7	+11,8
-// -	53,9	-0,5	+11,9
Среднее по выборке (n=19)		-1,1	+14,1

Все полученные значения  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  были использованы для построения графиков распределения изотопов в системе координат  $\delta^{13}\text{C} / \delta^{18}\text{O}$  (Рис. 6.4) и трендов изменения изотопных величин по уравнению декарбонизации релеевского типа (Рис. 6.5) [Дубинина, 2013].

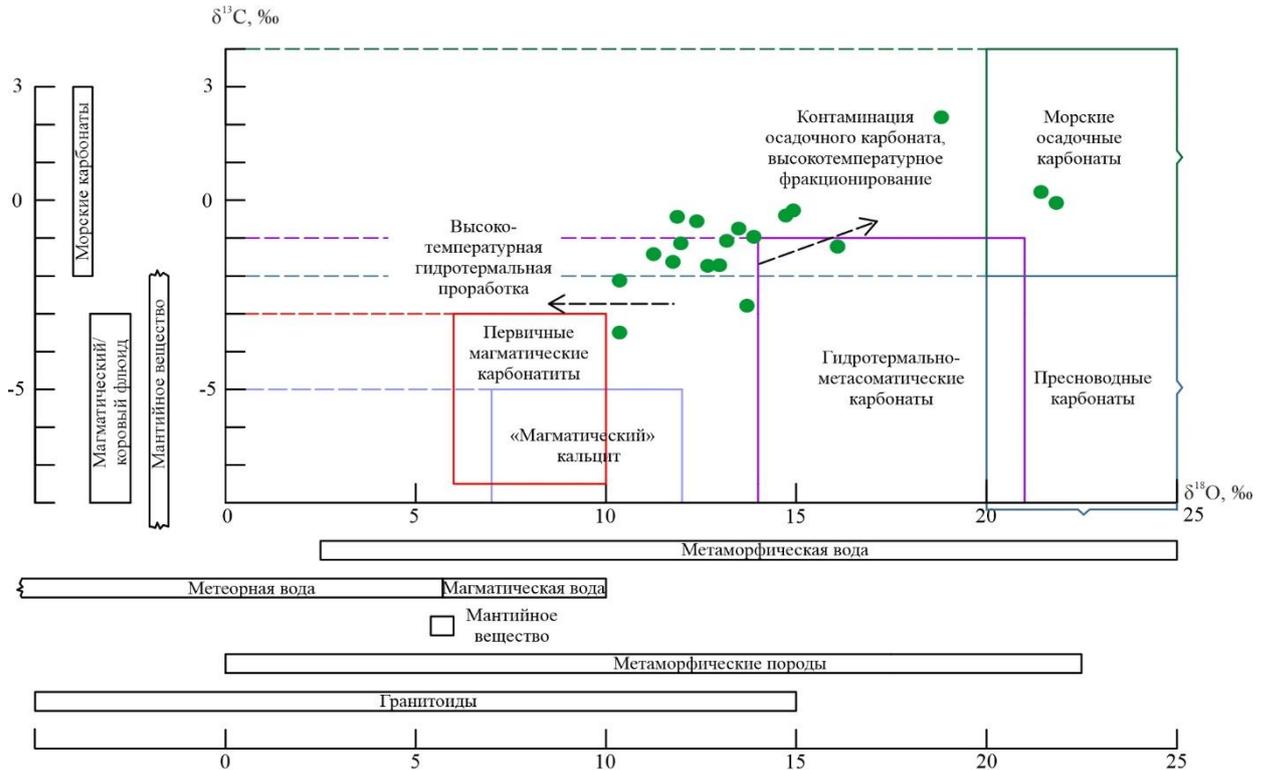


Рисунок 6.4. Изотопный состав углерода и кислорода жильного кальцита месторождения Ак-Сут на диаграмме  $\delta^{13}\text{C}/\delta^{18}\text{O}$

Поля-источники приведены по данным: углерод морских карбонатов [Rollinson, 1993], углерод магматического или глубинного корового флюида [Taylor, 1986], углерод мантийного вещества [Rollinson, 1993], кислород гранитоидов [Hoefs, 2009; Rollinson, 1993], кислород метаморфических пород [Hoefs, 2009], кислород мантийного вещества [Rollinson, 1993], кислород метеорных и магматических вод [Rollinson, 1993], кислород метаморфических вод [Rollinson, 1993], первичные магматические карбонаты [Keller, Hoefs, 1995], «магматический» кальцит [Савинова и др., 2014], гидротермально-метасоматические и пресноводные карбонаты [Краснова и др., 2019], морские осадочные карбонаты [Valley, 1986]. Пунктирные стрелки-основные процессы, влияющие на изменение изотопного состава приведены по [Demény et al., 1998].

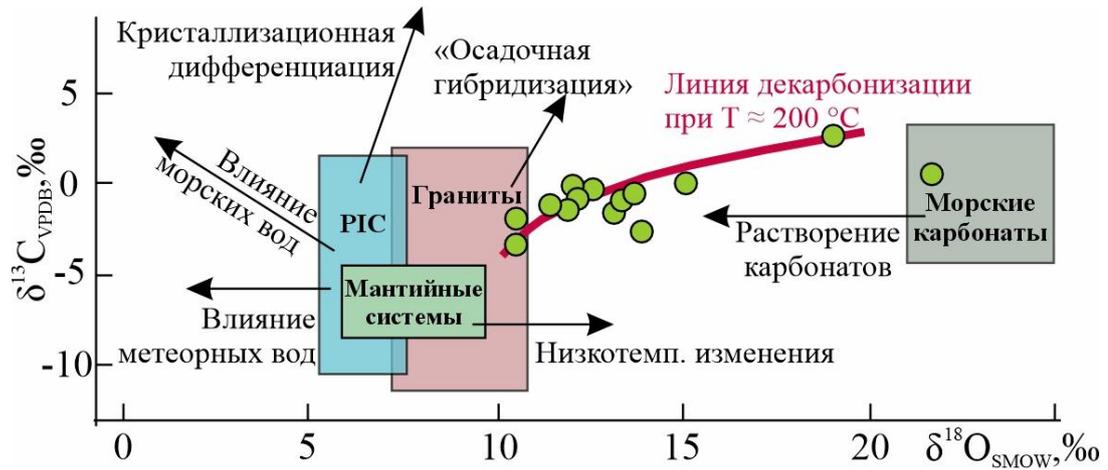


Рисунок 6.5. Изотопный состав углерода и кислорода жильного кальцита рудных зон Ак-Сугского месторождения на диаграмме  $\delta^{13}\text{C}/\delta^{18}\text{O}$  с полями источников вещества и трендами изменений изотопных соотношений.

Поля-источники и линии трендов изменений изотопных соотношений приведены по данным [Hoefs, 2009; Hudson, 1977; Taylor et al., 1967; Ray et al., 1999].

Согласно опубликованным данным, «изотопный состав проанализированных кальцитов характеризуется умеренно узким диапазоном значений  $\delta^{13}\text{C}$  ( $\Delta = 5,8 \text{ ‰}$ ) и широким диапазоном  $\delta^{18}\text{O}$  ( $\Delta = 11,4 \text{ ‰}$ ), что с наибольшей долей вероятности может свидетельствовать о неоднородности источников воды (и, соответственно, кислорода), участвовавшей в образовании жильного кальцита Ак-Сугского месторождения.

Проведенные исследования по изучению изотопного состава углерода и кислорода месторождения Ак-Суг выявили наиболее вероятные источники вещества, принимавшие участие в образовании жильного кальцита различных стадий. Подавляющая часть проанализированных карбонатных прожилков формировалась из растворов, образовавшихся в результате низкотемпературного ( $\sim 200 \text{ °C}$ ) растворения осадочных карбонатов метаморфогенными водами в условиях повышенной кислотности среды, с определенным количеством воды и галогенидов (F, Cl) [Шадчин, 2023]. При этом вещество «осадочных карбонатов», вовлеченное в «современную» карбонатную и кварц-карбонатную жильные

системы, попало значительно раньше и могло быть мобилизовано из морских кембрийских отложений. Об этом могут свидетельствовать точки вверху графика, близкие к полю осадочных карбонатов, чью «изотопную картину» они унаследовали. В процессе проходящей декарбонизации, кроме переотлагающегося кальцита дополнительно выделяется углекислый газ, обедняющий изотопную систему  $\delta^{13}\text{C} / \delta^{18}\text{O}$ , но играющий важную роль в гидротермальных процессах. Переотлагающиеся жильные кальциты обедняются преимущественно изотопом  $\delta^{18}\text{O}$ , о чем свидетельствует приближение точек анализов к полям PIC (Primary Igneous Carbonatites - первичные магматические карбонатиты, см. Рис. 6.5). Немаловажное значение на изотопный состав изучаемых карбонатов могли оказать такие факторы, как поступление воды других источников (например, метеорного), продолжающийся метасоматоз. Не стоит исключать из внимания близость «свежих» интрузивных тел дайкового комплекса и образующиеся карбонаты локальных флюидов. Образование прожилков с наложенной низкотемпературной редкоземельной минерализацией происходило позже остальных и сопряжено с завершением гидротермально-метасоматических процессов» [Макаров и др., 2024].

Подводя итог изотопно-геохимическим исследованиям, можно отметить, что данные по изотопному составу  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  жильного кальцита и  $\delta^{34}\text{S}$  главных рудных минералов Ак-Сугского месторождения подтверждают сложный, неоднородный источник вещества, участвующий в рудно-метасоматических процессах. Источником серы, для образования рудной сульфидной минерализации являлась литосферная мантия, на что указывает узкий диапазон всех значений  $\delta^{34}\text{S}$  и околонулевое среднее значение по выборке, характерное для данного резервуара. Источником углерода и углекислоты в Ак-Сугской порфировой системе являлись осадочные карбонаты (вероятнее всего, морского происхождения), которые в результате воздействия преимущественно метаморфогенных вод, обогащенных галогенидами, способствовали переотложению карбонатных (в описываемом случае кальцита) минералов. Вклад сторонних источников вещества (метеорные воды или сера осадочных пород)

можно оценить как незначительный и носящий локальный характер.

**Материалы, представленные в главах 5 и 6 данной диссертации, позволяют сформулировать и обосновать Третье защищаемое положение: Кварцевые жилы рудных зон Ак-Сугского месторождения сформированы гидротермальными растворами углекислотно-водного состава в диапазоне температур 79 – 500 °С, давлений – 0,4 – 122,1 бар и солености от 0,35 до 17,52 мас. % (NaCl-экв.). В составе минералообразующих флюидов преобладают H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub>. Изотопный состав серы ( $\delta^{34}\text{S} = -2,9 - +3,2\text{‰}$ ) главных сульфидных минералов месторождения свидетельствует о гомогенном мантийном источнике рудного вещества. Соотношения стабильных изотопов углерода и кислорода ( $\delta^{13}\text{C} -3,6 - +2,2\text{‰}$ ;  $\delta^{18}\text{O} +10,4 - +21,8\text{‰}$ ) карбонатных прожилков указывают на полигенный источник углекислоты и воды, вовлеченных в рудно-метасоматический процесс.**

## ГЛАВА 7. ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 7.1. Образцы

Образцы горных пород (126 шт.) для проведения комплекса аналитических исследований были отобраны из керна геологоразведочных и технологических скважин, представленных на рисунке 2.1. Образцы отбирались в пределах рудных зон и безрудных интервалов в контуре как Северной, так и Южной рудных залежей с глубин от 0,8 до 720,0 м. При отборе образцов учитывалась степень гидротермально-метасоматических изменений горных пород, количество и разнообразие видимой рудной минерализации и приуроченность к фазам аксугского интрузивного комплекса. Фотографии некоторых образцов, использованных в данном исследовании представлены на рисунках 7.1 – 7.3. Красным цветом помечены образцы горных пород, описанные в параграфе 2.1.5 (Возраст интрузивного магматизма и рудообразования).

Из одной половины образца изготавливались петрографические шлифы и аншлифы для изучения состава горных пород и минераграфических исследований. При наличии в образце прожилков кварца мощностью более 5-7мм, образец также использовался для изготовления двустороннеполированных пластинок. Изготовление шлифов и аншлифов проводилось по стандартным методикам в ИГМ СО РАН, г. Новосибирск, и ИЦМ СФУ, г. Красноярск.

Вторую половину образца горной породы дробили до необходимой фракции, рассеивали на ситах, после чего производился отбор монофракций сульфидных (пирит, халькопирит) и карбонатных (кальцит) минералов. В некоторых случаях отбор материала из крупных прожилков производился абразивной алмазной коронкой малого диаметра. Далее мономинеральные фракции отмывались в стеклянной трубке с коленообразным перегибом под

напором водопроводной воды. Халькопирит отделялся от пирита с применением элетромагнита. Контроль за чистотой отбираемых минералов осуществлялся с использованием бинокулярной лупы. Монофракции акцессорных минералов (цирконы) выделялись с применением тяжелых жидкостей в лаборатории ООО «ЛИМС», г. Санкт-Петербург. Препараты (эпоксидные шашки) для электронно-микроскопического изучения ряда рудных и акцессорных минералов изготавливались по стандартным методикам в ИЦМ СФУ и ООО «ЛИМС». Подготовка проб для изучения методом ICP-AES осуществлялась путем истирания раздробленной породы на дисковом истирателе до крупности 200 меш. Дальнейшая пробоподготовка производилась в соответствии с ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98 в лаборатории ООО ЦГИ «Прогноз».

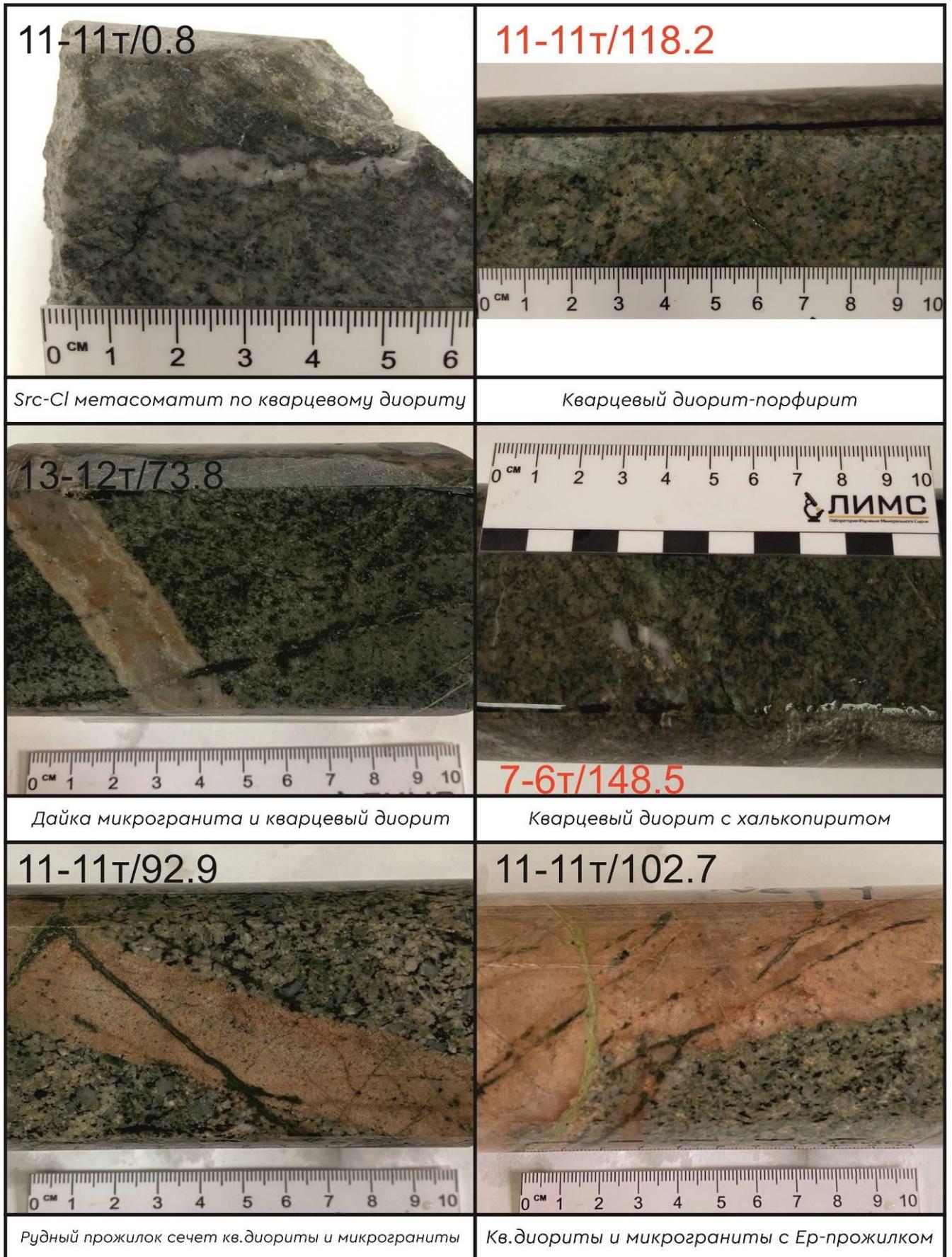


Рисунок 7.1. Породы семейства диоритов месторождения Ак-Суг.

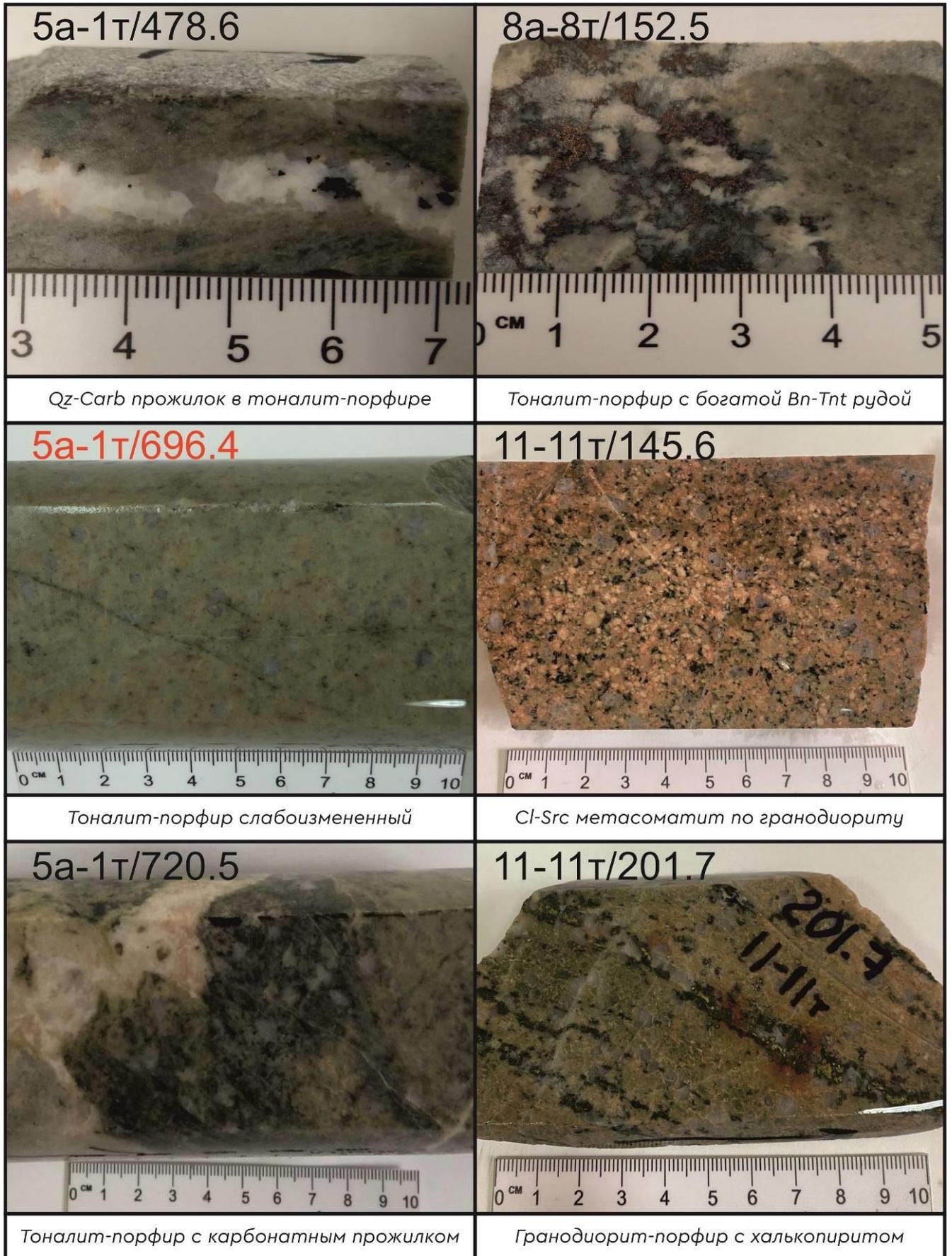


Рисунок 7.2. Породы семейства гранодиоритов месторождения Ак-Суг.

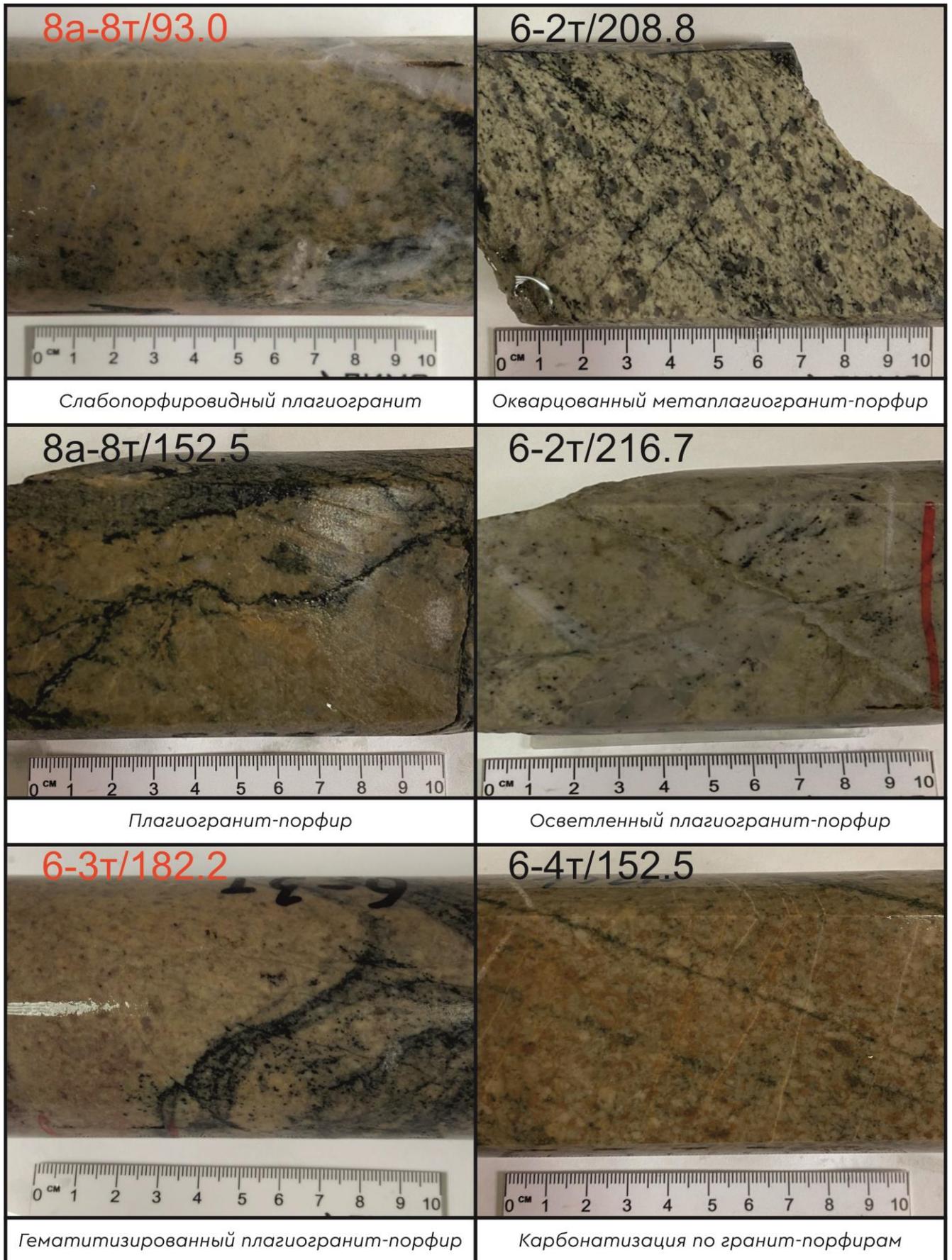


Рисунок 7.3. Породы семейства гранитов месторождения Ак-Суг.

## 7.2. Аналитические методы исследования

Оптическая микроскопия. Микроскопическое исследование вмещающих пород и руд проводилась с использованием оптических поляризационных микроскопов Carl Zeiss Axioskop 40 A Pol и Olympus BX53. Изучение кварцевых пластинок с использованием микроскопа Olympus BX51 с цифровой фотокамерой ColorView III.

Химический состав минералов определялся при помощи сканирующего электронного микроскопа (SEM) Tescan Vega III SBH, оснащенного интегрированной системой энергодисперсионного микроанализа Oxford X-Act в R&D центре ГМК «Норильский никель» ИЦМ СФУ г. Красноярск при следующих условиях: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 2.3 нА, время съемки – 120 с. Результаты анализов обработаны с помощью программного обеспечения Oxford Instruments AZtec. Более детально методика проведения данного вида исследований описана в статье [Шадчин и др., 2024].

U-Pb изотопное датирование цирконов из вмещающих пород Ак-Сугского месторождения проводилось в лаборатории геохронологии и геодинамики Томского государственного университета (аналитик Корнева А.П.). Перед проведением аналитических исследований зерна циркона, вмонтированные в эпоксидную шашку, изучались на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega III SBH (ИЦМ СФУ). Для каждого зерна были получены изображения в режиме регистрации обратно-рассеянных электронов (BSE), позволяющим выявить такие особенности поверхности как включения иных минеральных фаз, естественную трещиноватость, дефекты полировки и прочее. Далее на микроскопе TESCAN VEGA II LMU (ТГУ) в режиме катодной люминесценции (CL) выявлялась структура внутренней неоднородности зерен – ядра протокристаллов и зоны роста. Изотопный анализ циркона проводился методом лазерной абляции и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (LA-Q-ICP-MS) с применением системы лазерной абляции Analyte Excite (Teledyne Photon Machines) с эксимерным лазером (193 нм) и квадрупольного масс-

спектрометра с индуктивно связанной плазмой Agilent 7900 [Cottle et al., 2009]. Эпоксидный блок был помещен в ячейку HelEx II, откуда при абляции анализируемое вещество потоком гелия переносилось в масс-спектрометр. Диаметр лазерного пучка составлял 50 мкм, частота импульсов – 8 Гц, плотность потока энергии лазерного излучения – 3 Дж/см<sup>2</sup>. Каждая точка анализировалась в течение 30 секунд. Для удаления поверхностных загрязнений осуществлялась преабляция. Время измерения фона между анализом точек составляло 20 с. С целью определения содержаний и отношений изотопов для определения абсолютного возраста в качестве стандартов использовались международные стандарты цирконов: 91500 [Wiedenbeck et al., 1995] и SL-1 [Kinny et al., 1991]. По результатам проведенного анализа были получены содержания изотопов <sup>202</sup>Hg, <sup>204</sup>Pb, <sup>206</sup>Pb, <sup>207</sup>Pb, <sup>208</sup>Pb, <sup>232</sup>Th, <sup>238</sup>U. Сигналы по <sup>202</sup>Hg и <sup>204</sup>Pb регистрировались для контроля содержания ртути в транспортирующем газе гелия и содержания нерадиогенного свинца в анализируемых образцах. По содержаниям изотопов <sup>206</sup>Pb, <sup>207</sup>Pb и <sup>238</sup>U с использованием программного обеспечения Iolite 3.7 [Paton et al., 2011], являющегося надстройкой к Igor Pro 7 (WaveMetrics), рассчитывался U-Pb возраст цирконов по трем изотопным системам: <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb, <sup>207</sup>Pb/<sup>235</sup>U, <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U. Для графического отображения результатов в виде диаграмм с конкордией [Wetherill, 1956] использовалось онлайн ПО IsoplotR [Vermeesch, 2018].

Микротермометрические методы исследований индивидуальных флюидных включений основаны на определении температур фазовых переходов внутри вакуолей. Данные методы разделяются на два вида: термометрия (нагревание выше комнатной температуры) и криометрия (охлаждение ниже комнатной температуры). Для микротермометрических исследований была использована термокриокамера Linkam TH-MSG-600, монтированная на оптический микроскоп Olympus BX51 (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск). Температурный диапазон исследований ФВ в термокриокамере от -195 °С до 600°С. Скорость нагрева или охлаждения образца можно регулировать в диапазоне от 0,1 до 90°С/мин, для охлаждения использовался жидкий азот.

Рамановская КР-спектроскопия (спектроскопия комбинационного рассеивания) применялась для анализа и диагностики определенных компонентов в газовой и жидкой фазах индивидуальных флюидных включений без их вскрытия [Dubessy et al., 1989; Burke, 2001; Frezzotti et al., 2012]. Рамановские спектры записывали с использованием прибора Horiba J.Y. спектрометр LabRAM HR800 в сочетании с микроскопом Olympus BX41 (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск). В качестве источника возбуждения использовался твердотельный лазер с диодной накачкой и длиной волны 532 нм (Torus, Laser Quantum) [Шапаренко, 2022].

Метод газовой хромато-масс-спектрометрии (GC-MS или ГХ-МС) применялся для анализа состава летучих компонентов во флюидных включениях кварцевых и карбонатных прожилков. При подготовке проб к анализу не использовались кислоты, растворители и какие-либо органические вещества, которые могли бы внести искажения в первоначальный состав флюида. Исследуемые пробы объемом до 0,06 см<sup>3</sup> отбирались при помощи абразивной алмазной коронки с внутренним диаметром 4 мм. Газовая смесь (компоненты флюида) из образца извлекалась путем однократного ударного разрушения образца в специальной ячейке газового хромато-масс-спектрометра Focus GC/DSQ II MS (аналитик Бульбак Т.А.). Детальное описание принципов используемого метода приведено в работах [Бульбак и др., 2020; Шапаренко, 2022]. Согласно [Шапаренко, 2022] «интерпретация полученных GC-MS данных с идентификацией пиков и выделением из перекрывающихся пиков отдельных компонентов проводилась как с использованием программного обеспечения AMDIS (Automated Mass Spectral Deconvolution and Identification System) версии 2.73, так и в ручном режиме с коррекцией фона по библиотекам масс-спектров NIST 2020 и Wiley Registry 12th Edition с помощью программы NIST MS Search версии 2.4. Относительные концентрации (отн.%) летучих компонентов в разделяемой смеси устанавливались методом нормировки: сумма площадей всех хроматографических пиков анализируемой смеси приравнивалась к 100%, а по величине площади отдельного компонента определялось его процентное

содержание в анализируемой смеси. Площади пиков в хроматограмме определялись по алгоритму ICIS с использованием Qual Browser 1.4 SR1 из пакета программ Xcalibur».

Изотопно-геохимические исследования серы сульфидных минералов (часть анализов) выполнялись в ЦКП «Многоэлементные и изотопные исследования» ИГМ СО РАН г. Новосибирск с использованием масс-спектрометра Delta V Advantage (аналитик Реутский В.Н). Контроль всех измерений проводился анализом образцов относительно стандартов IAEA-S-1 (сульфид серебра с  $\delta^{34}\text{S} = -0,3 \text{ ‰}$ ), IAEA-S-2 (сульфид серебра с  $\delta^{34}\text{S} = +22,7 \text{ ‰}$ ), IAEA-S-3 (сульфид серебра с  $\delta^{34}\text{S} = -32,3 \text{ ‰}$ ) и NBS-123 (сфалерит с  $\delta^{34}\text{S} = +17,44 \text{ ‰}$ ). Наиболее детально методика выполнения исследований описана в работе [Пальянова и др., 2016]. Аналогичный комплекс изотопных исследований серы сульфидов проводился в лаборатории ФГБУ ЦНИГРИ г. Москва с применением масс-спектрометра МИ-1201 (аналитик Кряжев С.Г.) по методике [Устинов и др., 1965]. В качестве эталона использовался лабораторный стандартный образец ЦНИГРИ «Пирит Гайского месторождения» с  $\delta^{34}\text{S} = +0,7 \text{ ‰}$ . Во всех случаях значения  $\delta^{34}\text{S} \text{ (‰)}$  приведены относительно стандарта троилита из Canyon Diablo (CDT), а точность измерений  $\delta^{34}\text{S}$  составляла  $\pm 0,2 \text{ ‰}$  ( $2\sigma$ ).

Изотопный состав углерода и кислорода Ак-Сугского месторождения был определен для монофракций кальцита в ЦКП ИГМ СО РАН г. 10 мг карбонатной пудры помещали в реактор из плавленого кварцевого стекла и откачивали воздух до установления давления в реакторе не более  $1,5 \cdot 10^{-3}$  мбар. Затем реактор герметизировали, нагревали до температуры  $900^\circ\text{C}$  и выдерживали 10 минут для полного разложения карбоната на CaO и CO<sub>2</sub>. Полученную CO<sub>2</sub> очищали от возможных примесей низкотемпературной ректификацией. Измерения проводили с использованием масс-спектрометра Delta V Advantage (аналитик Реутский В.Н). Для мониторинга подготовительных и измерительных систем использовали международные стандарты карбоната NBS-18 ( $\delta^{13}\text{C} = -5,014 \text{ ‰ VPDB}$ ,  $\delta^{18}\text{O} = -23,2 \text{ ‰ VPDB}$ ), NBS-19 ( $\delta^{13}\text{C} = +1,95 \text{ ‰ VPDB}$ ,  $\delta^{18}\text{O} = -0,20 \text{ ‰ VPDB}$ ). Точность измерений составила не ниже  $0,1 \text{ ‰}$  для углерода и  $0,2 \text{ ‰}$  для кислорода.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате комплексного изучения геологического строения и условий образования руд медно-порфирового месторождения Ак-Суг автором были получены новые данные о возрасте проявления интрузивного магматизма, с которым пространственно и парагенетически связано молибденовое, медное и золотое оруденение. Возраст внедрения тоналит-порфиров, с которыми связана большая часть вкрапленной и прожилково-вкрапленной минерализации, определенный U-Pb методом по цирконам, составил  $523 \pm 7$  млн. лет. Возраст плагиогранит-порфиров центральной части интрузивного многофазного штока оценивается в  $521 \pm 6$  млн. лет. Полученные данные позволяют с уверенностью говорить о раннекембрийском возрасте интрузивного магматизма, продуктивного на порфировое оруденение. Геохимические характеристики интрузивных пород аксугского комплекса (высокие содержания  $Al_2O_3$ , умеренные (до 100 ppm) содержания Rb, низкие (в пределах 10-50 ppm) количества Y, Yb, Ta) и геодинамическое положение рассматриваемых пород указывают на то, что источник для формирования данных пород был локализован в зонах океанических островных дуг.

Проявленная во время становления массива геологическая зональность, заключающаяся во «вложенности» более поздних интрузивных фаз в раннюю интрузивную раму, является характерной чертой крупных порфировых систем. Хронология и стадийность внедрения интрузивных фаз нашла своё отражение в четко проявленной концентрической минералого-геохимической и метасоматической зональности, также согласующихся между собой. Внешнему пропилитовому ореолу метасоматических изменений на месторождении соответствует зона ранних пирит-халькопиритовых руд в тоналит-порфирах. В них же размещена и зона кварц-хлорит-серицитовых метасоматитов с богатыми халькопирит-пиритовыми залежами. Небольшим по размерам реликтовым зонам

калиевых преобразований, представленных калишпатизацией и биотитизацией отвечают зоны борнит-халькопиритовых и халькопирит-теннантитовых руд. С результатом магматической и постмагматической деятельности плагиогранит-порфиров связана зона интенсивного окварцевания в центре интрузии («кварцевое ядро») и образование рассеянной молибденовой минерализации. С завершающим этапом рудообразования связано образование низкотемпературной минерализации в карбонатных и кварц-карбонатных прожилках и медной (самородная медь, халькозин, куприт и др.) минерализации по контакту с породами толтаковской свиты в зоне гипергенеза.

Источником серы, участвующей в образовании сульфидных минералов, является мантия, что подтверждается как авторскими данными исследований, так и результатами предшественников. Об этом глубинном гомогенном источнике свидетельствует диапазон значений  $\delta^{34}\text{S}$  в диапазоне от -2,9 до +3,2‰. Вариации изотопных составов углерода и кислорода карбонатных прожилков с месторождения Ак-Суг свидетельствуют о продолжительной эволюции как магматических, так и постмагматических процессах, изменяющих изотопную систему  $\delta^{13}\text{C}/\delta^{18}\text{O}$ . Источником воды для образования карбонатных прожилков служили преимущественно насыщенные F, Cl метаморфические воды, а углекислота привносилась путем декарбонизации (преимущественно низкотемпературной) осадочных карбонатов. Флюид, принимавший участие в формировании рудных зон месторождения, по данным газовой хромато-масс-спектрометрии кварцевых и карбонатных прожилков и рамановской КР-спектроскопии кварцевых прожилков, имеет углекислотно-водный состав. Для флюида безрудных участков характерен преимущественно водный состав. Подобное изменение состава флюида порфировой системы свидетельствует о частичной смене окислительно-восстановительных условий среды рудообразования.

Практическую значимость данного исследования определяет возможность применения результатов диссертации в ходе дальнейшего доизучения месторождения, подготовки и процесса отработки Ак-Сугского Au-Mo-Cu

порфирового месторождения. Основываясь на актуальных исследованиях минералогической зональности месторождения и вещественного состава руд возможны дальнейшие работы и рекомендации по технологии переработки медно-порфировых руд. Оценка уровня эрозионного среза порфировой системы, детальный анализ распределения оруденения в объеме интрузивного массива и данные о перспективах оруденения глубоких горизонтов месторождения позволяют усовершенствовать имеющиеся модели календарного планирования отработки месторождения и управления рудопотоками. При участии диссертанта, коллективом [Макаров и др., 2024] разработана геолого-генетическая модель формирования порфирового оруденения на площади Ак-Сугского рудного узла и Таннуольско-Хамсаринского района АССО. На основе геолого-генетической модели Ак-Сугского месторождения разработан комплекс поисковых критериев и признаков, применение которого может способствовать выявлению аналогичных рудных объектов на территории Восточно-Саянской металлогенической провинции и Алтае-Саянской складчатой области.

## ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

- АССО – Алтае-Саянская складчатая область
- ВП – вызванная поляризация
- ВТС – вулкано-тектоническая структура
- ГХ-МС (GC-MS) – газовая хромато-масс-спектрометрия
- ЕП – естественное поле (электрическое)
- КПШ – калиевый полевой шпат
- Мас. % – массовые проценты
- Мол. % – мольные проценты
- Отн. % – относительные проценты
- СО – складчатая область
- СС – складчатая система
- СФК – структурно-формационные комплексы
- Тгом – температура общей гомогенизации
- ТМА – тектоно-магматическая активизация
- Тпл. льда – температура плавления льда
- Тэвт – температура эвтектики
- ФВ – флюидное(ые) включение(я)
- BSE – backscattered electrons (обратно-рассеянные электроны)
- CAG – continental arc granitoids (гранитоиды континентальных дуг)
- CCG – continental collision granitoids (гранитоиды обстановок континентальной коллизии)
- CEUG – continental epiorogenic uplifts granitoids (гранитоиды континентальных эпиорогенных поднятий)
- CL – cathodoluminescence (катодолюминесценция)
- IAG – island arc granitoids (гранитоиды островных дуг)
- ICP-AES – inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (атомно-эмиссионная спектроскопия с индуктивно-связанной плазмой)

LA-ICP-MS – laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry  
(масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией)

NaCl-экв. – эквивалент NaCl

OP – oceanic plagiogranites (океанические плагиограниты)

ORG – ocean ridge granites (граниты океанических хребтов)

PIC – primary igneous carbonatites (первичные магматические карбонатиты)

POG – postorogenic granitoids (посторогенные гранитоиды)

PT – pressure/temperature (давление и температура)

RRG – rift-related granitoids (гранитоиды, связанные с рифтами)

SEM – scanning electron microscope (сканирующий электронный микроскоп)

syn-COLG – syncollisional granites (синколлиззионные граниты)

VAG – volcanic arc granites (граниты вулканических дуг)

WPG – within plate granites (внутриплитные граниты)

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Алтухов Е.Н. Тектоническое районирование и металлогения Саяно-Тувинского региона. Отчет по научно-исследовательским работам за 1980-1983 гг. -Москва: Фонды ИМГРЭ, 1984.
2. Андреев А.В., Гирфанов М.М., Старостин И.А., Авилова О.В., Кряжев С.Г., Юрмазов Д.Н., Бабкин И.А., Семенов М.И. Геологическое строение, рудно-метасоматическая и минералого-геохимическая зональность золотосодержащего молибден-медно-порфирового месторождения Кызык-Чадр, Республика Тыва. Руды и металлы, 2021, №1, С.57-76.
3. Балицкий В.С., Озерова Н.А., Цепин А.И. и др. О некоторых особенностях вхождения селена в антимонит при перекристаллизации его в селенсодержащих гидротермальных растворах // В сб.: «Новые данные о типоморфизме минералов». М., Наука. – 1968. - С. 89-105.
4. Берзина А.Н., Берзина А.П., Гимон В.О. Cu-Mo-порфировое месторождение Аксуг (Северо-Восточная Тува): хронология процессов магматизма и рудообразования (U-Pb, Re-Os изотопные данные), металлогенические следствия // Геология и геофизика, 2019, т. 60 (9), С.1330-1349.
5. Берзина А. Н., Берзина А. П., Гимон В. О. Cu-Mo-порфировая рудно-магматическая система Ак-Суг (Северо-Восточная Тува): источники и процессы формирования рудоносной магмы. Геология и геофизика, 1. 62, № 4, 2021, С. 549-556.
6. Берзина А. Н., Сотников В. И., Экономоу-Элиопоулос М., Элиопоулос Д. Г. Первая находка меренскита (Pb,Pt)Te<sub>2</sub> в рудах Cu-Mo-порфировых месторождений России // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48. – № 8. – С. 848-851.
7. Берзина А.Н., Сотников В.И. Платина и палладий в рудах медно-молибден-порфировых месторождений Сибири и Монголии // Доклады РАН, 2001, Т. 378, №5. С. 665-667.

8. Бескин С.М., Алексеева А.К. Медно-порфировое оруденение России: перспективные регионы и площади. - М.: Научный мир, 2016. - 78 с.
9. Бортников Н.С., Генкин А.Д., Коваленкер В.А. Минералого-геохимические показатели условий гидротермального рудообразования. – В сб.: «Эндогенные рудные районы и месторождения», М.: Наука, 1987. С. – 40-59.
10. Бульбак Т.А., Томиленко А.А., Гибшер Н.А., Сазонов А.М., Шапаренко Е.О., Рябуха М.А., Хоменко М.О., Сильянов С.А., Некрасова Н.А. Углеводороды во флюидных включениях из самородного золота, пирита и кварца месторождения Советское (Енисейский край, Россия) по данным беспирилизной газовой хромато–масс–спектрометрии // Геология и Геофизика. – 2020. – №11. – С. 1535 – 1560.
11. Буханова Д.С. Минералого-геохимические особенности Малмыжского золото-медно-порфирового месторождения, Хабаровский край: автореферат дис. канд. геол.-минерал. наук: 25.00.11. – ИВиС ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 2020-25 с.
12. Буханова Д.С., Плечов П.Ю. Условия формирования Au-Cu-порфирового месторождения Малмыжское, Хабаровский край (по данным исследования флюидных включений). Вестник КРАУНЦ: Науки о Земле. 34. №2. 2017. С. 61–71.
13. Бухаров Н.С., Кудрявцева А.И., Забелин В.И. и др. Сравнительная характеристика интрузий Центральной и Восточной Тувы, несущих медно-молибденовое штокверковое оруденение // Материалы по геологии Тувинской АССР. - Кызыл, 1981.
14. Воронцов А.А., Сандимиров И.В. Девонский магматизм хребта Кропоткина (Восточный Саян) и источники базитов: геологические, геохимические и изотопные Sm-Nd данные. // Геология и геофизика. – 2010. – Т. 51. – № 8. – С. 1073-1087.
15. Габеев В.А., Митус А.И., Чудин А.В. и др. Геологическое строение и полезные ископаемые района Ак-Сугского медно-порфирового месторождения в

пределах листов N-47-97, N-47-98, И-47-99-А, В. (Отчёт Казасской партии по групповой геологической съёмке м-ба 1: 50 000 за 1976-1980 гг.). - КЫЗЫЛ, 1980.

16. Гибшер Н.А., Томиленко А.А., Сазонов А.М., Бульбак, Т.А., Рябуха, М.А., Сильянов С.А., Некрасова Н.А., Хоменко М.О., Шапаренко Е.О. Олимпиадинское золоторудное месторождение (Енисейский кряж): температура, давление, состав рудообразующих флюидов,  $\delta^{34}\text{S}$  сульфидов,  $^3\text{He}/^4\text{He}$  флюидов, Ar–Ar возраст и продолжительность формирования // Геология и геофизика. – 2019. – Т.60. – № 9. – С.1310–1329.

17. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1: 200 000 Восточно-Саянская серия. Лист N—47-XIX (Ак-Суг). Объяснительная записка - М.:МФ ВСЕГЕИ, 2013. - 214 с.

18. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист N-46 — Абакан. - СПб.: ВСЕГЕИ, 2008. - 391 с.

19. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Ангаро—Енисейская. Лист N—47 — Нижнеудинск. - СПб.: ВСЕГЕИ, 2012. - 652 с.

20. Гусев Н.И., Берзон Е.И., Семенов М.И. Кызыкчадрское меднопорфировое месторождение (Тува): геохимические особенности и возраст магматизма // Региональная геология и металлогения. – 2014. - Т. 59. - С. 70—79.

21. Добрецов Н.Л., Буслов М.М. Позднекембрийско-ордовикская тектоника и геодинамика Центральной Азии // Геология и геофизика, 2007, т.48 (1), С.93-108.

22. Добрянский Г.И., Сотников В.И., Берзина А.Н., Яровой С.А. Особенности магматизма Аксугского медно-молибденового месторождения // Магматизм и металлогения рудных районов Тувы: Сб. науч. тр. - Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1992, С. 49-62.

23. Дубинина Е.О. Стабильные изотопы легких элементов в процессах контаминации и взаимодействия флюид-порода: дис. д-р. геол.-минерал. наук: 25.00.09. -ИГЕМ РАН, Москва, 2013-407 с.

24. Ермаков Н.П., Долгов Ю.А. Термобарогеохимия. – М.: Недра, 1979. – 346 с.
25. Еханин А.Г. прогнозно-металлогеническая карта северо-восточной части Тувинской АССР масштаба 1:200 000 (Отчет по теме: Составление прогнозно-металлогенической карты северо-восточной части Тувинской АССР масштаба 1:200 000 на редкометальное, молибден-медно-порфировое и другие типы оруденения за 1983-1986 гг.) – Красноярск, 1986 г.
26. Забелин В.И. Элементы геолого-генетической модели Ак-Сугского медно-молибденового месторождения // Магматизм и металлогения рудных районов Тувы. - Новосибирск: Наука, 1992. – С. 92–103.
27. Звездов В.С. Модели меднопорфировых рудно-магматических систем и месторождений для прогноза, поисков и оценки: дис. д-р. геол.-минерал. наук: 1.6.10. –ФБГУ «ЦНИГРИ», Москва, 2022, 553 с.
28. Зоненшайн Л.П, Кузьмин М.И, Натапов Л.М. Тектоника литосферных плит территории СССР. М., Недра, 1990, с.328.
29. Краснова А.В., Ростовцева Ю.В., Гаврилов А.Е. Изотопный состав углерода и кислорода вторичных карбонатов в вулканитах доюрского комплекса Западно-Сибирской плиты // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2019. №5. С. 38-43.
30. Кривцов А.И., Звездов В.С., Мигачев И.Ф., Минина О.В. Медно-порфировые месторождения. Серия: Модели месторождений цветных и благородных металлов. Под редакцией А.И.Кривцова. М.: ЦНИГРИ, 2010, 232с.
31. Кривцов А.И., Звездов В.С., Минина О.В., Мигачев И.Ф. Медно-порфировые месторождения. Сер. Модели месторождений цветных и благородных металлов. М.: ЦНИГРИ, 2001.
32. Кривцов А.И. Геологические основы прогнозирования и поисков медно-порфировых месторождений. М. Недра, 1983, 256 с.
33. Кривцов А.И., Мигачев И.Ф., Минина О.В. Минералогическо-геохимические типы руд меднопорфировых месторождений - золотоносность и зональность // Геохимия. 1985. № 10. С. 1417-1429.

34. Кривцов А.И., Мигачев И.Ф., Попов В.С. Меднопорфировые месторождения мира. М.: Недра, 1986. 236 с
35. Кряжев С.Г., Соловьев С.Г., Васюков Е.В., Шумилин Д.А. Изотопный состав серы сульфидов золото-меднопорфирового месторождения Малмыж. XXIII Симпозиум по геохимии изотопов имени академика А.П. Виноградова. Тезисы докладов. / М: ГЕОХИ РАН. 2023. С. 111–113.
36. Кужугет Р.В. Анкушева Н.Н., Хертек А.К., Монгуш А.О., Бутанаев Ю.В. Золото-молибден-меднопорфировое месторождение Ак-Суг (Восточный Саян): благороднометальная минерализация, РТ-параметры и состав рудоносного флюида. // Геология рудных месторождений. 2023. Т. 65. №7. С. 634-661.
37. Кужугет Р.В., Монгуш А.О., Анкушева Н.Н. Источники серы сульфидов медно-золото-порфирового месторождения Ак-Суг (Восточная Тува) // Минералогия, 2019. – Т. 5, №4, С. 73-82.
38. Кужугет Р.В., Монгуш А.А., Монгуш А.О. Эволюция химического состава блеклых руд Ак-Сугского золото-молибден-медно-порфирового месторождения (Северо-Восточная Тува). Томск, Известия Томского политехнического университета. Издательство Инжиниринг георесурсов, 2018. – Т. 329, №2 - С. 81–91.
39. Кужугет Р.В., Хертек А.К., Лебедев В.И., Забелин В.И. Особенности состава самородного золота в рудных ассоциациях Ак-Сугского золото-медно-молибден-порфирового месторождения, Восточная Тува. // Минералогия, рудные и нерудные месторождения, 2015, № 2 (22). С. 63-74, 45-52.
40. Лобанов К.В., Макаров В.А., Макеев С.М., Шведов Г.И., Муромцев Е.А., Шадчин М.В., Глушков Ю.В., Самородский П.Н. Геолого-минералогическая и геохимическая зональность Мо-Аи-Си-порфирового месторождения Ак-Суг, Северо-восточная Тува, Россия // Геосферные исследования. 2023. № 3. с. 29–54.
41. Лыхин Д.А., Ярмолюк В.В., Воронцов А.А., Травин А.В. Состав и возраст флюорит-бериллиевого месторождения Радуга, Западный Саян: к проблеме оценки металлогенических перспектив территории // Доклады

Академии наук. - 2019. - Т. 488. - №3. - С. 282-287. doi: 10.31857/S0869-56524883282-287.

42. Макаров В. А., Шадчин М. В., Шведов Г. И., Макеев С.М., Муромцев Е.А., Глушков Ю.В. Ак-Сугское месторождение-эталонный медно-порфировый объект Восточно-Саянской металлогенической провинции / Сибирский федеральный университет; Институт цветных металлов – Красноярск, 2024. – 174 с.

43. Мигачев И.Ф., Звездов В.С., Минина О.В. Научно-методические основы прогноза и поисков медно-порфировых месторождений и перспективы их обнаружения на территории России // Отечественная геология. 2016. № 2. С. 12-22.

44. Мигачев И.Ф., Минина О.В., Звездов В.С. Перспективы территории Российской Федерации на медно-порфировые руды // Руды и металлы. 2015. № 1. С. 74-92.

45. Минералогические индикаторы генезиса эндогенных руд. /Петровская Н.В., Мозгова Н.Н., Бородаев Ю.С. и др., М.: Наука, 1987. - 231 с.

46. Минералы. Справочник. Том 1. Самородные элементы, интерметаллические соединения, карбиды, нитриды, фосфиды, арсениды, антимониды, висмутиды, сульфиды, селениды, теллуриды. Издательство Академии наук СССР, Москва, 1960 г., 617 стр.

47. Мозгова Н.Н. Нестехиометрия и гомологические ряды сульфосолей. /М.: Наука, 1985. – 264с.

48. Монгуш А.А., Лебедев В.И., Ковач В.П., Сальникова Е.Б., Дружкова Е.К., Яковлева С.З., Плоткина Ю.В., Загорная Н.Ю., Травин А.В., Серов П.А. Тектоно-магматическая эволюция структурно-вещественных комплексов Таннуольской зоны Тувы в позднем венде—раннем кембрии (на основе геохимических, Nd изотопных и геохронологических данных) // Геология и геофизика, 2011, т. 52 (5), с. 649—665.

49. Монгуш А.А., Терлеев А.А., Токарев Д.А., Дружкова Е.К. Гранитоиды и известняки из конгломератов преддуговой зоны Таннуольско-Хамсаринской

островодужной системы (Тува): геохимия, палеонтология, корреляция. Вестник Томского государственного университета, 2013, № 372, С. 184-192.

50. Монгуш А.Д., Лебедев В.И. Ак-Сугское медно-молибден-порфировое месторождение: вещественный состав пород и руд. Известия СО РАН. Отделение секции наук о Земле, 2013, 1(42), с.22–29.

51. Никифоров А.В., Хертек А.К., Козловский А.М. Арысканское редкоземельное месторождение: первые результаты Sm-Nd изотопных исследований, Восточная Тува // Материалы III Всероссийской школы – конференции с международным участием. – Кызыл: Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, 2017. - С. 99–102.

52. Пальянова Г. А., Соболев Е. С., Реутский В. Н., Бортников Н. С. Пиритизированные двустворчатые моллюски из верхнего триаса орогенного золото-сурьмяного месторождения Сентачан (Восточная Якутия): минеральный состав и изотопный состав серы // Геология рудных месторождений. – 2016. – № 6. – С. 513-521.

53. Парфенов Л.М., Берзин Н.А., Ханчук А.И., Бадарч Г., Беличенко В.Г., Булгатов А.Н., Дриль С.И., Кириллова Г.Л., Кузьмин М.И., Ноклеберг У., Прокопьев А.В., Тимофеев В.Ф., Томур-тогоо О., Янь Х. Модель формирования орогенных поясов Центральной и Северо-Восточной Азии // Тихоокеанская геология, 2003, т. 22, № 6, с. 7—41.

54. Петров О.В., Киселёв Е.А., Шпикерман В.И., Змиевский Ю.П. Прогноз размещения месторождений золото-медно-порфирового типа в вулканоплутонических поясах восточных районов России по результатам работ составления листов Госгеолкарты-1000/3 // Региональная геология и металлогения. 2019. № 80. С. 50–74.

55. Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Изд-во ВСЕГЕИ, 2008.- 200 с.

56. Пономарчук В.А. Геохронологические ( $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  и Rb-Sr) и изотопно-геохимические ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $\delta^{34}\text{S}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ ) параметры Cu-Mo-порфировых

рудных систем: Сибирь, Монголия: дис. д-р. геол.-минерал. наук: 25.00.11. –ИГМ СО РАН, Новосибирск, 2005-300 с.

57. Попов В.С., Кудрявцев Ю.К., Алтухов Е.Н., Забелин В.И., Добрянский Г.И. Геологическая позиция медно- и молибден-порфирового оруденения Алтае-Саянской складчатой области // Геология рудных месторождений, 1988, т. 30 (3), с. 84-89.

58. Попов В.С. Геология и генезис медно- и молибден-порфировых месторождений. - М.: Наука, 1977. - 203 с.

59. Практическая петрология: методические рекомендации по изучению магматических образований применительно к задачам госгеолкарт. — СПб: Изд-во ВСЕГЕИ, 2017. 168 с.

60. Рёддер Э. Флюидные включения в минералах. – М., Изд-во «Мир», 1987. – т.1. – С.558.

61. Ринев Р.О. Серийная типизация и формационная принадлежность эффузивов Бийского ареала раннекембрийского манжерокского комплекса (Горный Алтай). // Петрология магматических и метаморфических комплексов. Выпуск 6. Материалы Всероссийской петрографической конференции. Томск: ЦНТИ, 2007. С. 180-184.

62. Руднев С.Н. Раннепалеозойский гранитоидный магматизм Алтае-Саянской складчатой области и озерной зоны западной Монголии: дис. д-р. геол.-минерал. наук: 25.00.04. – ИГМ СО РАН, Новосибирск, 2010, 521 с.

63. Руднев С.Н., Изох А.Э., Ковач В.П., Шелепаев Р.А., Терентьева Л.Б. Возраст, состав, источники и геодинамические условия формирования гранитоидов северной части Озерной зоны Западной Монголии: механизмы роста палеозойской континентальной коры // Петрология. 2009. Т. 17. № 5. С. 470–508.

64. Руднев С.Н., Ковач В.П., Пономарчук В.А. Венд-раннекембрийский островодужный плагиогранитоидный магматизм Алтае-Саянской складчатой области и Озерной зоны Западной Монголии (геохронологические, геохимические и изотопные данные) // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (10), с. 1628—1647.

65. Руднев С.Н., Пономарчук В.А., Киселева В.Ю., Семенова Д.В. Изотопы Sr в гранитоидах Каахемского полихронного батолита (Восточная Тува) // Материалы XVIII международного симпозиума по геохимии изотопов им. акад. А.П. Виноградова международного симпозиума по геохимии изотопов им. акад. А.П. Виноградова. М.: ГЕОХИ, 2007. С. 229–230.

66. Руднев С.Н., Серов П.А., Киселева В.Ю. Венд-раннепалеозойский гранитоидный магматизм Восточной Тувы // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (9), с. 1572—1600.

67. Савинова О.В., Тимкин Т.В., Асканакова О.Ю. Флюидные включения и изотопия карбонатов Топольнинского золото-скарнового поля (Горный Алтай) // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 8-5. – С. 1107-1113.

68. Сидорина Ю. Н. Геохимическая зональность Находкинской порфиоровэпитермальной системы (Западная Чукотка). Вестник Московского университета, серия 4, геология, 2015, № 2, с. 78-83.

69. Сидорина Ю.Н. Геохимические критерии выявления и оценки медно-порфирового оруденения в Баимской меднорудной зоне (западная Чукотка): автореферат дис. канд. геол.-минерал. наук: 25.00.09. – МГУ, Москва, 2016-25 с.

70. Сильянов С.А. Геология и минералого-геохимические индикаторы генезиса золоторудного месторождения Олимпиада (Енисейский кряж): автореферат дис. канд. геол.-минерал. наук: 25.00.11. – ИГДГиГ СФУ, Красноярск, 2021-23 с.

71. Сотников В.И., Поливеев А.Г., Берзина А.Н. Физико-химические условия формирования гранитоидов рудоносного комплекса на Жирекенском медно-молибденовом месторождении // Докл. АН СССР, 1985, т. 283, № 6, с. 1463-1465.

72. Сотников В.И., Пономарчук В.А., Перцева А.П., Берзина А.П., Берзина А.Н., Гимон В.О. Эволюция изотопов серы в Cu-Mo-порфировых рудно-магматических системах Сибири и Монголии // Геология и геофизика, 2004, т. 45, No 8, с. 963-974.

73. Сотников В.И., Пономарчук В.А., Шевченко Д.О., Берзина А.Н. // Аксугское CuMo-порфировое месторождение в Северо-Восточной Туве:  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  геохронология,
74. источники вещества // Геология и геофизика, 2003, т. 44 (11), с. 1119-1132.
75. Сотников В. И., Берзина А. Н. Режим фтора и хлора в медно-молибденовых рудно-магматических системах. СО РАН, ОИГГМ, Новосибирск, 1993, 132 с.
76. Спиридонов Э.М., Филимонов С.В., Куликова И.М. и др. Минералы блеклых руд - индикаторы рудогенеза // Проблемы геологии рудных месторождений, минералогии, петрологии и геохимии. М.: ИГЕМ РАН, 2008, С. – 356-359.
77. Справочник-определитель рудных минералов в отраженном свете / Т.Н. Чвилева, М.С. Безсмертная, Э.М. Спиридонов и др. – М.: Недра, 1988. – 504с.
78. Туркина, О. М. Лекции по геохимии магматического и метаморфического процессов : учеб. пособие / О. М. Туркина ; Новосиб. гос. ун-т. – Новосибирск : РИЦ НГУ, 2014. – 118 с.
79. Уайт У.С. Месторождения самородной меди в северной части штата Мичиган. - В книге: «Рудные месторождения США» в двух томах. Т. 1. – М.: Мир, 1972. - С. 457-481.
80. Устинов В.И., Гриненко В.А. Прецизионный масс-спектральный метод определения изотопного состава серы. – М.: Недра, 1965, 96 с
81. Филимонов С.В. Минералы группы блеклых руд – индикаторы рудогенеза (на примере гидротермальных месторождений золота). – Автореферат диссертации на соискание звания кандидата геолог. - минерал. наук. М.: 2009. – с.
82. Шапаренко Е.О. Физико-химические условия формирования золоторудных месторождений Благодатное и Доброе (Енисейский кряж): автореферат дис. канд. геол.-минерал. наук: 1.6.10. – ИГМ СО РАН, Новосибирск, 2022-22 с.

83. Шадчин М. В. Особенности локализации редкоземельных элементов и их минералов на медно-порфировом месторождении Ак-Суг (восточный Саян) / М. В. Шадчин, Е. А. Муромцев, В. И. Лосев // Проблемы геологии и освоения недр : Труды XXV Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию горно-геологического образования в Сибири, 125-летию со дня основания Томского политехнического университета, Томск, 05–09 апреля 2021 года. Том 2. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2021. – С. 32-33.

84. Шадчин М. В. Изотопный состав серы халькопирита медно-порфирового месторождения Ак-Суг (Восточный Саян) Сборник тезисов докладов III Молодежной научно-образовательной конференции ЦНИГРИ «Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов – от прогноза к добыче». (10-12 апреля 2022 г., Москва, ФГБУ «ЦНИГРИ»). М. : ЦНИГРИ. 2022. 223-228 с.

85. Шадчин М. В. Изотопные соотношения углерода и кислорода карбонатов медно-порфирового месторождения Ак-Суг Рудная школа 2023 Сборник тезисов докладов IV Молодежной научно-образовательной конференции ЦНИГРИ «Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов – от прогноза к добыче». (15-17 февраля 2023 г., Москва, ФГБУ «ЦНИГРИ»). М. : ЦНИГРИ. 2023. С. 172-177.

86. Шадчин М.В., Макаров В.А. Разработка геолого-генетической модели Ак-Сугского месторождения – эталонного медно-порфирового объекта Восточно-Саянской металлогенической провинции // «Науки о Земле. Современное состояние» VI молодежная научно-практическая школа-конференция. 30 июля – 5 августа 2023 года, Геологический полигон «Шира», НГУ, 2023. с. 199–201.

87. Шадчин М.В., Шведов Г.И., Макаров В.А., Лобастов Б.М., Сильянов С.А., Сердюк С.С. Новые данные по минералогии руд Au-Mo-Cu-порфирового месторождения Ак-Суг (Северо-восточная Тува) // Минералогия. 2024. №3. с. 32–51.

88. Шведов Г. И., Самородский П. Н., Макаров В. А., Муромцев Е. А., Шадчин М. В., Лобастов Б. М., Глушков Ю. В. Мышьяковистая самородная медь золото-медно-порфирового месторождения Ак-Суг, Восточная Тыва. Руды и металлы. 2021. № 1. С.77–92.
89. Шведов Г.И. Минеральные ассоциации молибден-порфировых месторождений Джетского рудного узла (Восточный Саян) //В сб.: «Щелочные комплексы Центральной Сибири». Красноярск, 2003. С. 152-164.
90. Якубчук А.С. Российская меднодобывающая промышленность за 30 лет. В кн. Проблемы минерагении, экономической геологии и минеральных ресурсов. Научно-литературный альманах, Фонд академика В.И.Смирнова. Москва, 2022. сс.76-85.
91. Bodnar, R.J. Philosophy of fluid inclusion analysis. Fluid inclusions in minerals: methods and applications. Siena. – 1994. – pp.1–6.
92. Blamey N.J.F. Composition and evolution of crustal, geothermal and hydrothermal fluids interpreted using quantitative fluid inclusion gas analysis // J. Geochem. – 2012. – v. 116–117. – P. 17–27.
93. Burke E.A. Raman microspectry of fluid inclusions // Lithos. – 2001. – V. 55. – P. 139–158.
94. Clark A.H. Are outsize porphyry copper deposits either anatomically or environmentally distinctive? // Society of Economic Geologists Special Publication № 2, 1993. P. 213-283.
95. Cottle J.M., Horstwood M.S.A., Parrish R.R. A new approach to single shot laser ablation analysis and its application to in situ Pb/U geochronology // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. – 2009. – Vol. 24. – P. 1355–1363. – DOI: 10.1039/b821899d
96. Crane D. and Kavalieris I. Geologic Overview of the Oyu Tolgoi porphyry Cu-Au-Mo deposit, Mongolia // Geology and genesis of major copper deposits and districts of the world / J.W. Hedenquist, M. Harris, F. Camus, (eds). Littleton: Society of Economic Geologists, 2012. p. 187–214.

97. Demény A., Ahijado A., Casillas R., Vennemann T.W. Crustal contamination and fluid/rock interaction in the carbonatites of Fuerteventura Canary Islands, Spain: a C, O, H isotope study // *Lithos*. 1998. Vol. 44, N 3–4. P. 101–115.
98. Distribution of rhenium in molybdenite from porphyry Cu-Mo and Mo-Cu deposits of Russia (Siberia) and Mongolia / A. N. Berzina, V. I. Sotnikov, M. Economou-Eliopoulos, D. G. Eliopoulos // *Ore Geology Reviews*. – 2005. – Vol. 26. – No 1-2. – P. 91-113. – DOI 10.1016
99. Dubessy J., Poty B., Ramboz C. Advances in C–O–H–N–S fluid geochemistry based on micro–Raman spectrometric analysis of fluid inclusions // *Eur. J. Miner.* – 1989. – №1. – P. 517–534.
100. Frezzotti M. L., Tecce F., Casagli A. Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2012. – v. 112. – P. 1–20.
101. Frost B. R., Barnes C. G., Collins W. J. et. al. A geochemical classification for granitic rocks // *J. Petrol.* 2001a. V. 42. P. 2033–2048.
102. Gustafson, L.B., and Hunt, J.P. The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile // *Economic Geology*. – 1975. - V. 70. - P. 857–912.
103. Hedenquist J.W., Richards J.P. The influence of geochemical techniques on the development of genetic models for porphyry copper deposits // *Reviews in Economic Geology*. 1998. V.10. P. 235–256.
104. Heinrich C.A., Dreisner T., Steffánson A., Seward T.M. Magmatic vapor contraction and the transport of gold from the porphyry environment to epithermal ore deposits // *Geology*. 2004. V. 32. N. 9. P. 761–764.
105. Hoefs J. *Stable isotope geochemistry/Sixth edition*. – Springer Berlin, Heidelberg, 2009. – 286 p.
106. Hoefs J. *Stable isotope geochemistry/Seventh edition*. – Switzerland: Springer International Publishing, 2015. – 389 p.
107. Hu M., Chou I-M., Wang R., Shang L., Chen C. High solubility of gold in H<sub>2</sub>S-H<sub>2</sub>O±NaCl fluids at 100–200 MPa and 600–800 °C: A synthetic fluid inclusion study // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2022. – V. 330. – P. 116-130.

108. Hudson J.D. Stable isotopes and limestone lithification // *Journal of the Geological Society*. – 1977; V. – 133 (6). – P. 637–660.
109. John, D.A., Ayuso, R.A., Barton, M.D., Blakely, R.J., Bodnar, R.J., Dilles, J.H., Gray, Floyd, Graybeal, F.T., Mars, J.C., McPhee, D.K., Seal, R.R., Taylor, R.D., and Vikre, P.G. Porphyry copper deposit model, chap. B of *Mineral deposit models for resource assessment: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5070–B*, 2010, 169p.
110. Keller J., Hoefs J. Stable isotope characteristics of recent natrocarbonatite from Oldoinyo Lengai // *Carbonatite volcanism: Oldoinyo Lengai and the petrogenesis of natrocarbonatites* / Eds. K. Bell, J. Keller. IAVCEI. Proc Volcanol., 1995, Vol. 4, P. 113–123.
111. Kinny P.D., Compston W., Williams I.S. A reconnaissance ion-probe study of hafnium isotopes in zircons // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1991. – Vol. 55. – P. 849–859. – DOI: 10.1016/0016-7037(91)90346-7
112. Kuzhuget R.V., Ankusheva N.N., Hertek A.K., Kalinin Yu.A., Damdinov B.B., Pirajno P., Butanaev Yu.V., Suge-Maadyr N.V., Soldup S.N. Precious-metal mineralization and formation conditions of the Biche-Kadyr-Oos epithermal Au-Ag ore occurrence (Eastern Sayan, Russia) // *Minerals*. 2023. Vol. 13. Article 1529.
113. Lowell J.D., Guilbert J.M. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry copper deposits // *Economic Geology*. – 1970. - V. 65. - P. 373–409.
114. Maniar P. D., Piccoli P. M. Tectonic discrimination of granitoids // *Geol. Soc. of America Bull.* 1989. Vol. 101. — P. 635–643.
115. Mpodozis C. and Cornejo P. Cenozoic Tectonics and Porphyry Copper Systems of the Chilean Andes. // *Geology and Genesis of Major Copper Deposits and Districts of the World: A Tribute to Richard H. Sillitoe*. / J.W. Hedenquist, M. Harris, F. Camus (eds). Littleton: Society of Economic Geologists, 2012. p. 329–360.
116. Nokleberg, W.J., ed., 2010, *Metallogenesis and tectonics of northeast Asia: U.S. Geological Survey Professional Paper 1765*, 624 p.
117. Norman D.I., Blamey N., Moore J.N. Interpreting geothermal processes and fluid sources from fluid inclusion organic compounds and CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> ratios //

Proceeding of 27th Workshop on geothermal reservoir engineering, Stanford University, Stanford, California, January 28–30. – 2002. – p. 234–241.

118. Ohmoto H., Goldhaber. (1997): Sulfur and carbon isotopes. In: Barnes, H. L. (ed.): *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, John Wiley and Sons, New York: 517–611.

119. Ohmoto H., Rye R.O. (1979) *Isotopes of sulfur and carbon. Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. N.-Y., John Wiley and Sons, 509–567.

120. Ossandon G.C., Freraut R.C., Gustafson L.B., Lindsay D.D., Zentilli M. *Geology of the Chuquicamata Mine: A Progress Report. Economic Geology*, 2001, v. 96, pp. 249–270.

121. Palladium, platinum and gold distribution in porphyry Cu ± Mo deposits of Russia and Mongolia / V. I. Sotnikov, A. N. Berzina, M. Economou-Eliopoulos, D. G. Eliopoulos // *Ore Geology Reviews*. – 2001. – Vol. 18. – No 1-2. – P. 95-111. – DOI 10.1016/S0169-1368(01)00018-X.

122. Paton C., Hellstorm J.C., Paul B., Woodhead J., Hergt J. Iolite: Freeware for the Visualisation and Processing of Mass Spectrometric Data // *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*. – 2011. – Vol. 26. – pp. 2508–2518. – DOI: 10.1039/C1JA10172B

123. Pearce J. A., Harris N. B. W., Tindle A. G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks // *J. Petrol.* 1984. V. 25. P. 956–983.

124. Peccerillo A., Taylor S. R. *Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey // Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1976. Vol. 58(1). — P. 63–81.

125. Perello J., Brockway H., Martini R. *Discovery and geology of the Esperanza porphyry copper-gold deposit, Antofagasta region, Northern Chile. Society of Economic Geologists, Special Publication 11, 2004, p.167–186.*

126. Perello J., Sillitoe R.H., Mpodozis C., Brockway H., Posso H. *Geologic Setting and Evolution of the Porphyry Copper-Molybdenum and Copper-Gold Deposits at Los Pelambres, Central Chile. // Geology and Genesis of Major Copper Deposits and*

Districts of the World: A Tribute to Richard H. Sillitoe. / J.W. Hedenquist, M. Harris, F. Camus (eds). Littleton: Society of Economic Geologists, 2012. p. 79–104.

127. Pirajno F., Hydrothermal Processes and Mineral Systems. Springer Science, 2009, 1273p.

128. Pollard P.J., Pelenkova E., Mathur R. Paragenesis and Re-Os molybdenite age of Cambrian Ak-Sug porphyry Cu-Au-Mo deposit, Tyva Republic, Russian Federation // *Economic Geology*. – 2017. - V. 112 (4). - P. 1021-1028.

129. Porter J.P., Schroeder K., Austin G. Geology of the Bingham Canyon Porphyry Cu-Mo-Au Deposit, Utah // *Geology and genesis of major copper deposits and districts of the world* / J.W. Hedenquist, M. Harris, F. Camus, (eds). Littleton: Society of Economic Geologists, 2012. p. 127–146.

130. Ray J.S., Ramesh R., Pande K. Carbon isotopes in Kerguelen plume-derived carbonatites: evidence for recycled inorganic carbon // *Earth Planet. Science Letter*. 1999. V. 170. P. 205–214.

131. Richards J.P. Magmatic to hydrothermal metal fluxes in convergent and collided margins // *Ore Geology Reviews*. 2011. V.40. N. 1. P. 1–26.

132. Richards J.P. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation // *Econ. Geol.* 2003. Vol. 98. P. 1515–1533.

133. Rivera S.L., Alcota H., Proffett J., Díaz J., Leiva G., and Vergara M. Update of the Geologic Setting and Porphyry Cu-Mo Deposits of the Chuquicamata District, Northern Chile // *Geology and genesis of major copper deposits and districts of the world* / J.W. Hedenquist, M. Harris, F. Camus, (eds). Littleton: Society of Economic Geologists, 2012. p. 19–54.

134. Rivera S.L., Vila T., Osoro J. Geological characteristics and exploration significance of gold-rich porphyry copper deposits in the El Salvador region, Northern Chile. Society of Economic Geologists, Special Publication 11, 2004. pp. 97–111

135. Rollinson H.R. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. – London: Longman Scientific and Technical, 1993. – 352 p.

136. Seedorff E., Dilles J.H., Proffett J.M., Einaudi M.T., Zurcher L., Stavast W.J.A., Johnson D.A., Barton M.D. *Porphyry deposits - Characteristics and origin of*

hypogene features: Society of Economic Geologists, Economic Geology 100th Anniversary Volume, 1905–2005, 2005, p.251–298.

137. Shaparenko E., Gibsher N., Tomilenko A., Sazonov A., Bul'bak T., Ryabukha M., Khomenko M., Silyanov S., Nekrasova N., Petrova M. Ore-Bearing Fluids of the Blagodatnoye Gold Deposit (Yenisei Ridge, Russia): Results of Fluid Inclusion and Isotopic Analyses // Minerals. – 2021. – V.11. – p. 1090.

138. Sillitoe R.H. Gold deposit types: an overview // Geology of the World's Major Gold Deposits and Provinces / R.H.Sillitoe, R.J.Goldfarb, F.Robert, S.F.Simmons (eds). Society of Economic Geologists, 2020. p. 1–28.

139. Sillitoe R.H. Gold-rich porphyry deposits: Descriptive and genetic models and their role in exploration and discovery: Reviews in Economic Geology, 2000, v.13, p. 315–345.

140. Sillitoe R.H. Porphyry copper systems // Economic Geology. – 2010. - V.105. - P. 3–41.

141. Steele-MacInnis, Matthew & Lecumberri-Sanchez, Pilar & Bodnar, Robert. HokieFlincs\_H<sub>2</sub>O-NaCl: A Microsoft Excel spreadsheet for interpreting microthermometric data from fluid inclusions based on the PVTX properties of H<sub>2</sub>O–NaCl. Computers & Geosciences. 2012, 49. 334–337p.

142. Taylor B. Magmatic volatiles: Isotopic variation of C, H, and S // Stable Isotopes in High Temperature Geological Processes: Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy (Eds Valley J.W., etc), 1986, v. 6, p. 185–225.

143. Taylor H.P., Frechen J.B., Degens E.T. Oxygen and carbon isotope studies of carbonatites from the Laacher See district, West Germany and the Alno district, Sweden // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1967 – V. 31 – P. 407-430.

144. Valley J.W. Stable isotope geochemistry of metamorphic rocks // Stable isotopes in high temperature geological processes: Reviews in Mineralogy. 1986. P. 445–481.

145. Vermeesch P. IsoplotR: a free and open toolbox for geochronology. Geoscience Frontiers. – 2018. – Vol. 9. – P. 1479–1493. – DOI: 10.1016/j.gsf.2018.04.001

146. Warr L.N. IMA–CNMNC approved mineral symbols. *Mineralogical Magazine*. 2021, 85, 291–320p.
147. Wetherill G.W. Discordant uranium-lead ages, I // *Transactions, American Geophysical Union*. – 1956. – V. 37. – P. 320–326. – DOI: 10.1029/TR037i003p00320
148. Wiedenbeck M., Allé P., Corfu F., Griffin W.L., Meier M., Oberli F., Von Quadt A., Roddick J.C., Spiegel W. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses // *Geostandards Newsletter*. – 1995. – Vol. 19. – P. 1–23. – DOI: 10.1111/j.1751-908X.1995.tb00147.x
149. White A. J. R., Chappell B. W. Granitoid types and their distribution in the Lachlan Fold Belt, southeastern Australia // *Circum-Pacific Terranes. Geol. Soc. America, Memoir*. 1983. V. 159. P. 21–34.
150. Yakubchuk A., Degtyarev K., Maslennikov V., Wurst A., Stekhin A., Lobanov K. Tectonomagmatic settings, architecture, and metallogeny of the Central Asian copper province // *Geology and genesis of major copper deposits and districts of the world / J.W. Hedenquist, M. Harris, F. Camus, (eds). Littleton: Society of Economic Geologists, 2012. P. 403–432.*

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П1. Результаты ГХ-МС анализа летучих компонентов, выделенных ударно-механическим разрушением из жильного кварца. 284 соединения.

Formula	Name	<sup>1</sup> CAS/(NIST)	<sup>2</sup> MW	Кварц 5а-1т/432.1	
				<sup>3</sup> RT, min	<sup>4</sup> A, %
<b>Aliphatic hydrocarbons</b>					
<i>Paraffins</i>					
CH <sub>4</sub>	Methane	74-82-8	16	1.67	0.002
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Ethane	74-84-0	30	2.57	0.007
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	n-Propane	74-98-6	44	3.91	0.010
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	2-Methylpropane	75-28-5	58	5.40	0.012
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	n-Butane	106-97-8	58	5.75	0.006
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	2-Methylbutane	78-78-4	72	7.59	0.014
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	n-Pentane	109-66-0	72	7.99	0.018
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	2-Methylpentane	107-83-5	86	10.53	0.012
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	n-Hexane	110-54-3	86	11.17	0.009
C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> Cl	1-Chlorobutane	109-69-3	92	11.82	0.008
C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	2-Methylhexane	591-76-4	100	14.22	0.008
C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	3-Methylhexane	589-34-4	100	14.44	0.003
C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	n-Heptane	142-82-5	100	15.04	0.013
C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	2,3,3-Trimethylpentane	560-21-4	114	17.32	0.012
C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	2-Methylheptane	592-27-8	114	18.20	0.026
C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	3-Methylheptane	589-81-1	114	18.35	0.026
C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	n-Octane	111-65-9	114	19.03	0.025
C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	3,5-Dimethylheptane	926-82-9	128	21.30	0.027
C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	4-Methyloctane	2216-34-4	128	21.93	0.016
C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	2-Methyloctane	3221-61-2	128	22.05	0.021
C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	3-Methyloctane	2216-33-3	128	22.17	0.041
C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	n-Nonane	111-84-2	128	22.85	0.025
C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	n-Decane	124-18-5	142	26.40	0.015
C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>	n-Undecane	1120-21-4	156	29.69	0.015
C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	n-Dodecane	112-40-3	170	32.74	0.016
C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>	6-Ethylundecane	17312-60-6	184	33.37	0.012
C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>	6-Methyldodecane	6044-71-9	184	34.04	0.033
C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>	4-Methyldodecane	6117-97-1	184	34.42	0.009
C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>	n-Tridecane	629-50-5	184	36.04	0.017
C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>	n-Tetradecane	629-59-4	198	40.90	0.026
C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	n-Pentadecane	629-62-9	212	48.44	0.048
C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	n-Hexadecane	544-76-3	226	60.32	0.075
<i>Olefins</i>					
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	Acetylene	74-86-2	26	2.10	0.024
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Ethylene	74-85-1	28	2.28	0.034
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	1-Propene	115-07-1	42	3.73	0.042
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	2-Methyl-1-propene	115-11-7	56	5.40	0.138
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	1-Butene	106-98-9	56	5.58	0.171
C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	1-Butyne	107-00-6	54	5.68	0.023
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	2-Butene	107-01-7	56	5.78	0.068
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	(Z)-2-Butene	590-18-1	56	5.88	0.071
C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	1,2-Butadiene	590-19-2	54	6.03	0.002

C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	2-Butyne	503-17-3	54	6.61	0.001
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	Isopentyne	598-23-2	68	7.43	0.002
C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	1-Pentene	109-67-1	70	7.73	0.018
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	Isoprene	78-79-5	68	7.96	0.016
C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	2-Pentene	109-68-2	70	8.18	0.002
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	3-Methyl-1,2-butadiene	598-25-4	68	8.18	0.005
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	(E)-1,3-Pentadiene	2004-70-8	68	8.38	0.001
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	1,3-Pentadiene	504-60-9	68	8.44	0.004
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	(Z)-1,3-Pentadiene	1574-41-0	68	8.51	0.003
C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	2-Methyl-1,4-pentadiene	763-30-4	82	10.49	0.002
C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	1,5-Hexadiene	592-42-7	82	10.59	0.002
C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	1-Hexyne	693-02-7	82	10.76	0.001
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	1-Hexene	592-41-6	84	10.87	0.015
C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	4-Methyl-2-pentyne	21020-27-9	82	10.89	0.001
C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	1,4-Hexadiene	592-45-0	82	11.06	0.001
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	2-Hexene	592-43-8	84	11.22	0.002
C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	(Z),(Z)-2,4-Hexadiene	6108-61-8	82	11.97	0.005
C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	2,4-Hexadiene	592-46-1	82	12.24	0.003
C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	1-Heptene	592-76-7	98	14.70	0.007
C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	2-Heptene	592-77-8	98	15.14	0.005
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	4-Ethyl-1-hexene	16746-85-3	112	18.12	0.017
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	5-Methyl-1-heptene	13151-04-7	112	18.20	0.018
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	5-Methyl-3-heptene	13172-91-3	112	18.29	0.021
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	4-Methyleneheptane	15918-08-8	112	18.34	0.010
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	3-Methyleneheptane	1632-16-2	112	18.45	0.086
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	(Z)-4-Octene	7642-15-1	112	18.63	0.046
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	(E)-3-Octene	14919-01-8	112	18.72	0.051
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	1-Octene	111-66-0	112	18.83	0.068
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	(Z)-3-Octene	14850-22-7	112	18.93	0.028
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	2-Octene	111-67-1	112	19.17	0.025
C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>	1-Nonene	124-11-8	126	22.60	0.011
C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>	2-Nonene	2216-38-8	126	22.98	0.008
C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>	1-Decene	872-05-9	140	26.18	0.007
C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>	1-Undecene	821-95-4	154	29.49	0.009
C <sub>13</sub> H <sub>26</sub>	1-Tridecene	2437-56-1	182	35.85	0.014
C <sub>14</sub> H <sub>28</sub>	1-Tetradecene	1120-36-1	196	40.70	0.019
C <sub>15</sub> H <sub>30</sub>	1-Pentadecene	13360-61-7	210	48.01	0.034
<b>Cyclic hydrocarbons</b>					
<i>Cycloalkanes (naphthenes) and cycloalkenes</i>					
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	Cyclobutane	287-23-0	56	6.38	0.033
C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	3-Methylcyclopentene	1120-62-3	82	11.34	0.010
C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	4-Methylcyclopentene	1759-81-5	82	11.67	0.002
C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	Isopropenylcyclopropane	4663-22-3	82	11.81	0.002
C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	Bicyclo[3.1.0]hexane	285-58-5	82	12.49	0.003
C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	Isopropylcyclobutane	872-56-0	98	14.97	0.005
<i>Arenes</i>					
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Benzene	71-43-2	78	11.79	0.046
C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	Toluene	108-88-3	92	16.07	0.088
C <sub>7</sub> H <sub>7</sub> F	(Fluoromethyl)benzene	350-50-5	110	19.63	0.002
C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	Ethylbenzene	100-41-4	106	20.02	0.016
C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	p-Xylene	106-42-3	106	20.28	0.049

C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	o-Xylene	95-47-6	106	20.40	0.006
C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	m-Xylene	108-38-3	106	20.65	0.008
C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	Styrene	100-42-5	104	20.93	0.031
C <sub>8</sub> H <sub>9</sub> F	5-Fluoro-m-xylene	461-97-2	124	21.00	0.014
C <sub>8</sub> H <sub>9</sub> F	2-Fluoro-m-xylene	443-88-9	124	21.45	0.013
C <sub>8</sub> H <sub>9</sub> F	3-Fluoro-o-xylene	443-82-3	124	23.06	0.015
C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	(1-Methylethyl)-benzene	98-82-8	120	23.20	0.011
C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	Propylbenzene	103-65-1	120	23.78	0.005
C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	1-Ethyl-4-methyl-benzene	622-96-8	120	23.81	0.006
C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	1-Ethyl-3-methyl-benzene	620-14-4	120	23.98	0.003
C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	1-Ethyl-2-methyl-benzene	611-14-3	120	24.31	0.004
C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	1,3,5-Trimethylbenzene	108-67-8	120	24.78	0.006
C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	1,2,4-Trimethylbenzene	95-63-6	120	25.56	0.005
C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	p-Cymene	99-87-6	134	26.28	0.003
C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	o-Cymene	527-84-4	134	26.58	0.022
C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	m-Cymene	535-77-3	134	26.76	0.003
C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	Butylbenzene	104-51-8	134	27.49	0.005
C <sub>11</sub> H <sub>16</sub>	Pentylbenzene	538-68-1	148	30.87	0.005
C <sub>12</sub> H <sub>18</sub>	Hexylbenzene	1077-16-3	162	34.04	0.008
C <sub>13</sub> H <sub>20</sub>	Heptylbenzene	1078-71-3	176	38.09	0.014
C <sub>14</sub> H <sub>22</sub>	Octylbenzene	2189-60-8	190	44.16	0.008
<i>Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH)</i>					
C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	Naphthalene	91-20-3	128	31.09	0.007
C <sub>11</sub> H <sub>10</sub>	2-Methylnaphthalene	91-57-6	142	34.60	0.002
C <sub>11</sub> H <sub>10</sub>	1-Methylnaphthalene	90-12-0	142	35.07	0.005
C <sub>13</sub> H <sub>18</sub>	1,1,5,6-Tetramethylindane	942-43-8	174	36.64	0.003
C <sub>13</sub> H <sub>18</sub>	1,1,4,7-Tetramethylindan	1078-04-2	174	36.95	0.001
C <sub>13</sub> H <sub>18</sub>	1,1,6,7-Tetramethylindane	16204-58-3	174	37.70	0.007
C <sub>13</sub> H <sub>18</sub>	1,1,4,5-Tetramethylindane	16204-57-2	174	38.04	0.001
C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	Phenanthrene	85-01-8	178	78.87	0.002
<b>Oxygenated hydrocarbons</b>					
<i>Alcohols</i>					
CH <sub>4</sub> O	Methyl Alcohol	67-56-1	32	3.93	0.166
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	Ethanol	64-17-5	46	6.26	0.053
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	2-Propanol	67-63-0	60	7.34	0.004
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	1-Propanol	71-23-8	60	8.69	0.002
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	Isobutylalcohol	78-83-1	74	11.49	0.053
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	1-Butanol	71-36-3	74	11.96	0.002
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O	Phenol	108-95-2	94	24.05	0.017
C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	o-Cresol	95-48-7	108	25.10	0.001
C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	p-Cresol	106-44-5	108	26.63	0.002
C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	m-Cresol	108-39-4	108	27.56	0.005
C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	2,4-Dimethylphenol	105-67-9	122	30.71	0.001
C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	3,5-Dimethylphenol	108-68-9	122	31.86	0.004
C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	2,3-Dimethylphenol	526-75-0	122	32.02	0.003
<i>Ethers and esters</i>					
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	Methyl methacrylate	80-62-6	100	13.66	0.005
C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	Butyrolactone	96-48-0	86	18.93	0.010
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	δ-Valeryllactone	542-28-9	100	25.45	0.010
C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	γ-Hexalactone	695-06-7	114	26.68	0.002
C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	δ-Hexalactone	823-22-3	114	27.53	0.002

C <sub>8</sub> H <sub>12</sub> O <sub>4</sub>	Diethyl maleate	141-05-9	172	28.88	0.002
C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	γ-Heptalactone	105-21-5	128	30.38	0.001
C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	γ-Octalactone	104-50-7	142	33.52	0.002
C <sub>9</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	γ-Nonalactone	104-61-0	156	37.44	0.004
C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>	γ-Decalactone	706-14-9	170	43.23	0.003
C <sub>11</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub>	γ-Undecalactone	104-67-6	184	52.32	0.003
C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub>	γ-Dodecalactone	2305-05-7	198	66.31	0.004
C <sub>13</sub> H <sub>24</sub> O <sub>2</sub>	γ-Tridecalactone	x	212	88.99	0.003
C <sub>13</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>	Hexyl benzoate (isomers 1/2)	6789-88-4	206	59.88	0.028
C <sub>13</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>	Hexyl benzoate (isomers 2/2)	x	206	66.34	0.028
C <sub>14</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub>	Heptyl benzoate (isomers 1/3)	7155-12-6	220	72.96	0.043
C <sub>14</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub>	Heptyl benzoate (isomers 2/3)	x	220	78.55	0.030
C <sub>14</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub>	Heptyl benzoate (isomers 3/3)	x	220	93.69	0.024
C <sub>14</sub> H <sub>18</sub> O <sub>4</sub>	Dipropyl phthalate	131-16-8	250	94.50	22.831
C <sub>15</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub>	Octyl benzoate (isomers 1/4)	94-50-8	234	108.08	0.014
C <sub>15</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub>	Octyl benzoate (isomers 2/4)	x	234	114.02	0.008
C <sub>15</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub>	Octyl benzoate (isomers 3/4)	x	234	121.25	0.009
C <sub>15</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub>	Octyl benzoate (isomers 4/4)	x	234	129.97	0.015
C <sub>12</sub> H <sub>14</sub> O <sub>4</sub>	Monobutyl phthalate	131-70-4	222	129.67	2.312
<i>Aldehydes</i>					
CH <sub>2</sub> O	Formaldehyde	50-00-0	30	2.28	0.030
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	Acetaldehyde	75-07-0	44	5.03	0.423
C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O	2-Propenal	107-02-8	56	6.93	0.010
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	n-Propanal	123-38-6	58	7.08	0.006
C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O	2-Methylpropenal	78-85-3	70	9.19	0.021
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	2-Methylpropanal	78-84-2	72	9.21	0.007
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	n-Butanal	123-72-8	72	9.96	0.004
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O	2-Methyl-2-butenal	497-03-0	84	12.67	0.005
C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	3-Methylbutanal	590-86-3	86	12.94	0.006
C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	n-Pentanal	110-62-3	86	13.89	0.005
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O	2-Methyl-2-butenal	1115-11-3	84	16.14	0.005
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O	(E)-2-Pentenal	1576-87-0	84	16.42	0.004
C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	2-Furaldehyde	98-01-1	96	16.74	0.001
C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	3-Furaldehyde	498-60-2	96	17.59	0.010
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	5-Methyl-2-furancarboxaldehyde	620-02-0	110	22.55	0.003
C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O	Benzaldehyde	100-52-7	106	23.20	0.040
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	2-Ethylhexanal	123-05-7	128	24.56	0.005
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	n-Octanal	124-13-0	128	25.91	0.022
C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> O <sub>3</sub>	2,5-Furandicarbaldehyde	823-82-5	124	27.01	0.002
C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O	n-Nonanal	124-19-6	142	29.36	0.024
C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O	n-Decanal	112-31-2	156	32.54	0.037
C <sub>11</sub> H <sub>22</sub> O	n-Undecanal	112-44-7	170	35.87	0.018
C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O	n-Dodecanal	112-54-9	184	40.40	0.006
C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O	n-Pentadecanal	2765-11-9	226	78.98	0.070
<i>Ketones</i>					
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	2-Propanone	67-64-1	58	7.26	0.007
C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O	2-Butenone	78-94-4	70	9.76	0.004

C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	2,3-Butanedione	431-03-8	86	10.04	0.001
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	2-Butanone	78-93-3	72	10.13	0.003
C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	2-Pentanone	107-87-9	86	13.71	0.001
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	5-Methyl-3-heptanone	541-85-5	128	24.81	0.009
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	2-Methyl-6-heptanone	928-68-7	128	24.96	0.006
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	5-Methyl-2-heptanone	18217-12-4	128	25.08	0.008
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	2-Octanone	111-13-7	128	25.63	0.008
C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O	Acetophenone	98-86-2	120	27.14	0.006
C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O	2-Nonanone	821-55-6	142	29.06	0.010
C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>	Dihydro-2H-pyran-2,6(3H)-dione	108-55-4	114	30.54	0.003
C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O	2-Decanone	693-54-9	156	32.21	0.007
C <sub>8</sub> H <sub>4</sub> O <sub>3</sub>	1,3-Isobenzofurandione	85-44-9	148	34.89	0.072
C <sub>11</sub> H <sub>22</sub> O	2-Undecanone	112-12-9	170	35.47	0.013
C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O	2-Dodecanone	6175-49-1	184	40.08	0.008
C <sub>13</sub> H <sub>26</sub> O	2-Tridecanone	593-08-8	198	47.19	0.018
C <sub>14</sub> H <sub>28</sub> O	2-Tetradecanone	2345-27-9	212	58.27	0.018
C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O	2-Pentadecanone	2345-28-0	226	75.95	0.022
<i>Carboxylic acids</i>					
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	Acetic acid	64-19-7	60	10.97	0.099
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	n-Propanoic acid	79-09-4	74	14.84	0.004
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	n-Butanoic acid	107-92-6	88	18.37	0.030
C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	3-Methylbutanoic acid	503-74-2	102	21.32	0.002
C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	n-Pentanoic acid	109-52-4	102	22.23	0.010
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	n-Hexanoic acid	142-62-1	116	25.70	0.043
C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	n-Heptanoic acid	111-14-8	130	29.06	0.014
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	n-Octanoic acid	124-07-2	144	32.09	0.036
C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>	n-Nonanoic acid	112-05-0	158	35.14	0.064
C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub>	n-Decanoic acid	334-48-5	172	39.48	0.041
C <sub>11</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub>	n-Undecanoic acid	112-37-8	186	46.28	0.008
C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O <sub>2</sub>	n-Dodecanoic acid	143-07-7	200	56.65	0.057
C <sub>13</sub> H <sub>26</sub> O <sub>2</sub>	3-Methyldodecanoic acid	13490-36-3	214	70.61	0.042
C <sub>13</sub> H <sub>26</sub> O <sub>2</sub>	n-Tridecanoic acid	638-53-9	214	73.59	0.046
C <sub>14</sub> H <sub>28</sub> O <sub>2</sub>	n-Tetradecanoic acid	544-63-8	228	99.98	0.132
<b>Heterocyclic compounds</b>					
<i>Dioxanes</i>					
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	1,4-Dioxane	123-91-1	88	12.94	0.000
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	1,2-Dioxane	5703-46-8	88	13.09	0.000
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	1,3-Dioxane	505-22-6	88	17.05	0.000
<i>Dioxines and furans</i>					
C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O	Furan	110-00-9	68	6.83	0.002
C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> O	2-Methylfuran	534-22-5	82	9.64	0.003
C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> O	3-Methylfuran	930-27-8	82	9.91	0.002
C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	2,3-Dihydro-1,4-dioxin	543-75-9	86	11.57	0.000
C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O	2-Ethylfuran	3208-16-0	96	13.21	0.001
C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O	3-Ethylfuran	67363-95-5	96	13.34	0.001
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O	2-Vinylfuran	1487-18-9	94	13.99	0.000
C <sub>7</sub> H <sub>10</sub> O	2-Propylfuran	4229-91-8	110	17.09	0.000
C <sub>7</sub> H <sub>10</sub> O	2-Ethyl-5-methylfuran	1703-52-2	110	20.03	0.007
C <sub>8</sub> H <sub>12</sub> O	2-Butylfuran	4466-24-4	124	21.02	0.001
C <sub>8</sub> H <sub>12</sub> O	3-Butylfuran	57393-55-2	124	21.18	0.002

C <sub>9</sub> H <sub>14</sub> O	2-Pentylfuran	3777-69-3	138	24.98	0.004
C <sub>11</sub> H <sub>18</sub> O	2-Heptylfuran	3777-71-7	166	31.71	0.002
C <sub>11</sub> H <sub>18</sub> O	3-Heptylfuran	x	166	31.79	0.001
C <sub>12</sub> H <sub>20</sub> O	2-Octylfuran	4179-38-8	180	34.89	0.001
C <sub>12</sub> H <sub>20</sub> O	3-Octylfuran	x	180	35.20	0.002
C <sub>13</sub> H <sub>22</sub> O	2-Nonylfuran	68532-53-6	194	39.18	0.002
C <sub>16</sub> H <sub>28</sub> O	2-Dodecylfuran	75308-12-2	236	72.52	0.003
<b>Nitrogenated compounds</b>					
N <sub>2</sub>	Nitrogen	7727-37-9	28	1.68	0.246
H <sub>3</sub> N	Ammonia	7664-41-7	17	2.81	0.024
CHNO	Hydrogen isocyanate	75-13-8	43	6.20	0.040
C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> N	Acetonitrile	75-05-8	41	6.60	0.028
C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> N	Propanenitrile	107-12-0	55	9.01	0.003
C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> N	Pyrrole	109-97-7	67	13.97	0.003
C <sub>5</sub> H <sub>5</sub> N	Pyridine	110-86-1	79	14.94	0.002
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> NO	Acetamide	60-35-5	59	15.85	0.013
C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> NO <sub>2</sub>	2-Oxo-propanamide	631-66-3	87	16.92	0.001
C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> N <sub>2</sub>	1H-Pyrazole	288-13-1	68	22.27	0.063
C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> NO	Pentanamide	626-97-1	101	26.94	0.000
C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> NO <sub>2</sub>	2,5-Pyrrolidinedione	123-56-8	99	28.33	0.006
C <sub>6</sub> H <sub>13</sub> NO	Hexanamide	628-02-4	115	30.21	0.001
C <sub>7</sub> H <sub>15</sub> NO	Heptanamide	628-62-6	129	33.52	0.001
C <sub>8</sub> H <sub>17</sub> NO	Octanamide	629-01-6	143	37.37	0.002
C <sub>9</sub> H <sub>19</sub> NO	Nonanamide	1120-07-6	157	42.95	0.003
C <sub>10</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>2</sub>	5H-furo[3,2-f]indolizin-9-one	x	173	46.43	0.004
C <sub>10</sub> H <sub>21</sub> NO	Decanamide	2319-29-1	171	51.51	0.003
C <sub>12</sub> H <sub>17</sub> NO	N,N-Diethyl-3-methylbenzamide	134-62-3	191	52.89	0.033
<b>Sulfonated compounds</b>					
H <sub>2</sub> S	Hydrogen sulfide	7783-06-4	34	2.73	0.002
COS	Carbonyl sulfide	463-58-1	60	3.21	0.007
O <sub>2</sub> S	Sulfur dioxide	7446-09-5	64	4.46	0.061
CH <sub>4</sub> S	Methanethiol	74-93-1	48	5.23	0.008
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> S	Dimethylsulfid	75-18-3	62	7.34	0.016
CS <sub>2</sub>	Carbon disulfide	75-15-0	76	7.34	0.019
C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> S	Thiophene	110-02-1	84	11.56	0.022
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> S <sub>2</sub>	Dimethyl disulfide	624-92-0	94	14.50	0.003
C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> S	2-Methylthiophene	554-14-3	98	15.59	0.004
C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> S	3-Methylthiophene	616-44-4	98	15.94	0.005
C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> S	2-Ethylthiophene	872-55-9	112	19.58	0.001
C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> S	2,4-Dimethylthiophene	638-00-6	112	19.98	0.001
C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> S	3,4-Dimethylthiophene	632-15-5	112	20.10	0.001
C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> S	3-Ethylthiophene	1795-01-3	112	19.77	0.000
C <sub>7</sub> H <sub>10</sub> S	2-Propylthiophene	1551-27-5	126	22.96	0.001
C <sub>7</sub> H <sub>10</sub> S	3-Propylthiophene	1518-75-8	126	23.43	0.001
C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> OS	3-Thiophenecarboxaldehyde	498-62-4	112	27.19	0.001
C <sub>8</sub> H <sub>12</sub> S	2-Butylthiophene	1455-20-5	140	27.23	0.002
C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> OS	2-Thiophenecarboxaldehyde	98-03-3	112	27.44	0.000
C <sub>8</sub> H <sub>12</sub> S	3-Butylthiophene	34722-01-5	140	27.51	0.000
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> OS	2-Formyl-3-methylthiophene	5834-16-2	126	28.33	0.002
C <sub>9</sub> H <sub>14</sub> S	2-Pentylthiophene	4861-58-9	154	30.62	0.003

C <sub>10</sub> H <sub>16</sub> S	2-Hexylthiophene	18794-77-9	168	33.86	0.001
C <sub>10</sub> H <sub>16</sub> S	3-Hexylthiophene	1693-86-3	168	34.06	0.002
C <sub>11</sub> H <sub>18</sub> S	2-Heptylthiophene	18794-78-0	182	37.87	0.004
C <sub>11</sub> H <sub>18</sub> S	3-Heptylthiophene	65016-61-7	182	38.45	0.003
C <sub>12</sub> H <sub>20</sub> S	2-Octylthiophene	880-36-4	196	43.90	0.003
C <sub>12</sub> H <sub>20</sub> S	3-Octylthiophene	65016-62-8	196	44.30	0.002
<b>Inorganic compounds</b>					
<i>Oxides</i>					
CO <sub>2</sub>	Carbon dioxide	124-38-9	44	1.82	39.460
H <sub>2</sub> O	Water	7732-18-5	18	3.05	30.292
<i>Noble gases</i>					
Ar	Argon	7440-37-1	40	1.72	0.011

Примечание (здесь и далее для таблиц Приложения):

<sup>1</sup>CAS/(NIST) – уникальный численный идентификатор химических соединений, внесённых в реестр Chemical Abstracts Service (<https://www.cas.org>) или NIST number (a unique number given to each spectrum in the NIST archive);

<sup>2</sup>MW – номинальная масса;

<sup>3</sup>RT – время удержания аналитической колонкой индивидуального компонента газовой смеси;

<sup>4</sup>A – нормализованная площадь, отношение площади компонента газовой смеси к сумме площадей всех компонентов в хроматограмме.

Таблица П2. Результаты ГХ-МС анализа летучих компонентов, выделенных ударно-механическим разрушением из жильного кварца. 278 соединений.

Formula	Name	<sup>1</sup> CAS/(NIST)	<sup>2</sup> MW	Кварц 5а-1т/720.5	
				<sup>3</sup> RT, min	<sup>4</sup> A, %
<b>Aliphatic hydrocarbons</b>					
<i>Paraffins</i>					
CH <sub>4</sub>	Methane	74-82-8	16	1.68	0.004
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Ethane	74-84-0	30	2.36	0.007
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	n-Propane	74-98-6	44	3.88	0.020
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	2-Methylpropane	75-28-5	58	5.40	0.003
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	n-Butane	106-97-8	58	5.75	0.003
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	2-Methylbutane	78-78-4	72	7.61	0.004
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	n-Pentane	109-66-0	72	8.01	0.005
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	2-Methylpentane	107-83-5	86	10.56	0.005
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	n-Hexane	110-54-3	86	11.19	0.014
C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> Cl	1-Chlorobutane	109-69-3	92	11.74	0.082
C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	n-Heptane	142-82-5	100	15.05	0.019
C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	2,3,3-Trimethylpentane	560-21-4	114	17.39	0.009
C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	2-Methylheptane	592-27-8	114	18.22	0.011
C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	3-Methylheptane	589-81-1	114	18.32	0.026
C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	n-Octane	111-65-9	114	19.05	0.039
C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	3-Methyl-3-ethylhexane	3074-76-8	128	21.58	0.009
C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	3-Methyl-4-ethylhexane	3074-77-9	128	21.70	0.009
C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	n-Nonane	111-84-2	128	22.88	0.049
C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	n-Decane	124-18-5	142	26.43	0.047
C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>	n-Undecane	1120-21-4	156	29.71	0.023
C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	n-Dodecane	112-40-3	170	32.77	0.021
C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>	n-Tridecane	629-50-5	184	36.10	0.020
C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>	n-Tetradecane	629-59-4	198	40.95	0.025
C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	n-Pentadecane	629-62-9	212	48.48	0.059
C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	n-Hexadecane	544-76-3	226	60.28	0.040
C <sub>17</sub> H <sub>36</sub>	n-Heptadecane	629-78-7	240	79.52	0.036
<i>Olefins</i>					
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	Acetylene	74-86-2	26	2.12	0.012
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Ethylene	74-85-1	28	2.30	0.007
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	1-Propene	115-07-1	42	3.75	0.023
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	2-Methyl-1-propene	115-11-7	56	5.38	0.006
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	1-Butene	106-98-9	56	5.58	0.051
C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	1-Butyne	107-00-6	54	5.68	0.007
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	2-Butene	107-01-7	56	5.78	0.009
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	(Z)-2-Butene	590-18-1	56	5.88	0.006
C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	1,2-Butadiene	590-19-2	54	6.05	0.001
C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	2-Butyne	503-17-3	54	6.61	0.000
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	Isopentyne	598-23-2	68	7.44	0.001
C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	1-Pentene	109-67-1	70	7.74	0.007
C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	2-Methyl-1-butene	563-46-2	70	7.94	0.006
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	Isoprene	78-79-5	68	7.98	0.004
C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	2-Pentene	109-68-2	70	8.08	0.008
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	3-Methyl-1,2-butadiene	598-25-4	68	8.19	0.001
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	(E)-1,3-Pentadiene	2004-70-8	68	8.39	0.000
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	1,3-Pentadiene	504-60-9	68	8.44	0.002

C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	(Z)-1,3-Pentadiene	1574-41-0	68	8.53	0.001
C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	2-Methyl-1,4-pentadiene	763-30-4	82	10.51	0.002
C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	1-Hexyne	693-02-7	82	10.76	0.001
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	1-Hexene	592-41-6	84	10.91	0.003
C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	1,4-Hexadiene	592-45-0	82	10.94	0.001
C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	(Z),(Z)-2,4-Hexadiene	6108-61-8	82	11.94	0.013
C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	2,4-Hexadiene	592-46-1	82	12.22	0.004
C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	1-Heptene	592-76-7	98	14.72	0.010
C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	2-Heptene	592-77-8	98	15.17	0.008
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	4-Ethyl-1-hexene	16746-85-3	112	18.12	0.039
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	4-Methyleneheptane	15918-08-8	112	18.32	0.063
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	3-Methyleneheptane	1632-16-2	112	18.47	0.245
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	(Z)-4-Octene	7642-15-1	112	18.65	0.097
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	(E)-3-Octene	14919-01-8	112	18.73	0.068
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	1-Octene	111-66-0	112	18.85	0.128
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	2-Octene	111-67-1	112	19.18	0.009
C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>	1-Nonene	124-11-8	126	22.61	0.015
C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>	1-Decene	872-05-9	140	26.21	0.013
C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>	1-Undecene	821-95-4	154	29.49	0.018
<b>Cyclic hydrocarbons</b>					
<i>Cycloalkanes (naphthenes) and cycloalkenes</i>					
C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	3-Methylcyclopentene	1120-62-3	82	11.34	0.006
C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	4-Methylcyclopentene	1759-81-5	82	11.69	0.004
C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	Bicyclo[3.1.0]hexane	285-58-5	82	12.51	0.004
<i>Arenes</i>					
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Benzene	71-43-2	78	11.79	0.089
C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	Toluene	108-88-3	92	16.09	0.075
C <sub>7</sub> H <sub>7</sub> F	(Fluoromethyl)benzene	350-50-5	110	19.65	0.006
C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	Ethylbenzene	100-41-4	106	20.03	0.017
C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	p-Xylene	106-42-3	106	20.30	0.127
C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	o-Xylene	95-47-6	106	20.38	0.009
C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	m-Xylene	108-38-3	106	20.47	0.022
C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	Styrene	100-42-5	104	20.95	0.031
C <sub>8</sub> H <sub>9</sub> F	5-Fluoro-m-xylene	461-97-2	124	21.03	0.006
C <sub>8</sub> H <sub>9</sub> F	2-Fluoro-m-xylene	443-88-9	124	21.25	0.002
C <sub>8</sub> H <sub>9</sub> F	3-Fluoro-o-xylene	443-82-3	124	21.40	0.004
C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	(1-Methylethyl)-benzene	98-82-8	120	23.20	0.026
C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	Propylbenzene	103-65-1	120	23.80	0.012
C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	1-Ethyl-4-methyl-benzene	622-96-8	120	23.83	0.007
C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	1,3,5-Trimethylbenzene	108-67-8	120	24.80	0.011
C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	1,2,4-Trimethylbenzene	95-63-6	120	25.58	0.011
C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	p-Cymene	99-87-6	134	26.29	0.007
C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	o-Cymene	527-84-4	134	26.59	0.026
C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	m-Cymene	535-77-3	134	26.76	0.001
C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	Butylbenzene	104-51-8	134	27.53	0.018
C <sub>11</sub> H <sub>16</sub>	Pentylbenzene	538-68-1	148	30.87	0.022
C <sub>12</sub> H <sub>18</sub>	Hexylbenzene	1077-16-3	162	34.05	0.024
C <sub>13</sub> H <sub>20</sub>	Heptylbenzene	1078-71-3	176	38.13	0.028
C <sub>14</sub> H <sub>22</sub>	Octylbenzene	2189-60-8	190	44.25	0.053
C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	Nonylbenzene	1081-77-2	204	53.81	0.036
<i>Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH)</i>					

C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	Naphthalene	91-20-3	128	31.12	0.004
C <sub>11</sub> H <sub>10</sub>	2-Methylnaphthalene	91-57-6	142	34.64	0.004
C <sub>11</sub> H <sub>10</sub>	1-Methylnaphthalene	90-12-0	142	35.25	0.007
C <sub>13</sub> H <sub>18</sub>	1,1,5,6-Tetramethylindane	942-43-8	174	36.37	0.002
C <sub>13</sub> H <sub>18</sub>	1,1,4,7-Tetramethylindan	1078-04-2	174	36.65	0.007
C <sub>13</sub> H <sub>18</sub>	1,1,6,7-Tetramethylindane	16204-58-3	174	37.70	0.010
C <sub>13</sub> H <sub>18</sub>	1,1,4,5-Tetramethylindane	16204-57-2	174	38.28	0.003
C <sub>12</sub> H <sub>12</sub>	2-Ethyl naphthalene	939-27-5	156	39.12	0.001
C <sub>12</sub> H <sub>12</sub>	1-Ethyl naphthalene	1127-76-0	156	39.80	0.002
C <sub>12</sub> H <sub>12</sub>	2,6-Dimethylnaphthalene	581-42-0	156	40.85	0.002
C <sub>12</sub> H <sub>12</sub>	2,7-Dimethylnaphthalene	582-16-1	156	41.35	0.001
C <sub>12</sub> H <sub>12</sub>	1,3-Dimethylnaphthalene	575-41-7	156	41.73	0.001
C <sub>13</sub> H <sub>14</sub>	1-Isopropyl naphthalene	6158-45-8	170	46.43	0.002
C <sub>13</sub> H <sub>14</sub>	1-Propyl naphthalene	2765-18-6	170	48.46	0.001
C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	Phenanthrene	85-01-8	178	78.92	0.008
C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	Anthracene	120-12-7	178	82.03	0.008
<b>Oxygenated hydrocarbons</b>					
<i>Alcohols</i>					
CH <sub>4</sub> O	Methyl Alcohol	67-56-1	32	4.75	0.064
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	Ethanol	64-17-5	46	6.26	0.024
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	2-Propanol	67-63-0	60	7.34	0.007
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	1-Propanol	71-23-8	60	8.54	0.008
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	Isobutyl alcohol	78-83-1	74	11.37	0.236
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	1-Butanol	71-36-3	74	12.41	0.085
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O	Phenol	108-95-2	94	24.06	0.037
C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	o-Cresol	95-48-7	108	25.11	0.003
C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	p-Cresol	106-44-5	108	26.64	0.007
C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	m-Cresol	108-39-4	108	27.56	0.013
C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	2,4-Dimethylphenol	105-67-9	122	30.76	0.002
C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	3,5-Dimethylphenol	108-68-9	122	31.86	0.005
C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	2,3-Dimethylphenol	526-75-0	122	32.04	0.003
<i>Ethers and esters</i>					
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	Methyl methacrylate	80-62-6	100	13.66	0.024
C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	Butyrolactone	96-48-0	86	18.97	0.010
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	δ-Valerylactone	542-28-9	100	25.43	0.015
C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	γ-Hexalactone	695-06-7	114	26.66	0.030
C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	δ-Hexalactone	823-22-3	114	27.53	0.007
C <sub>8</sub> H <sub>12</sub> O <sub>4</sub>	Diethyl maleate	141-05-9	172	28.89	0.005
C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	γ-Heptalactone	105-21-5	128	30.21	0.005
C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	γ-Octalactone	104-50-7	142	33.52	0.011
C <sub>9</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	γ-Nonalactone	104-61-0	156	37.44	0.015
C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>	γ-Decalactone	706-14-9	170	43.28	0.017
C <sub>11</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub>	γ-Undecalactone	104-67-6	184	52.21	0.003
C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub>	γ-Dodecalactone	2305-05-7	198	66.46	0.014
C <sub>13</sub> H <sub>24</sub> O <sub>2</sub>	γ-Tridecalactone	x	212	88.64	0.006
C <sub>13</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>	Hexyl benzoate	6789-88-4	206	60.23	0.004
C <sub>14</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub>	Heptyl benzoate (isomers 1/2)	7155-12-6	220	76.14	0.005
C <sub>14</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub>	Heptyl benzoate (isomers 2/2)	x	220	78.67	0.005
C <sub>15</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub>	Octyl benzoate (isomers 1/4)	94-50-8	234	108.66	0.017
C <sub>15</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub>	Octyl benzoate (isomers 2/4)	x	234	114.32	0.013

C <sub>15</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub>	Octyl benzoate (isomers 3/4)	x	234	121.76	0.009
C <sub>15</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub>	Octyl benzoate (isomers 4/4)	x	234	130.37	0.022
C <sub>14</sub> H <sub>26</sub> O <sub>2</sub>	γ-Tetradecalactone	2721-23-5	226	125.23	0.039
C <sub>12</sub> H <sub>14</sub> O <sub>4</sub>	Monobutyl phthalate	131-70-4	222	130.31	1.706
<i>Aldehydes</i>					
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	Acetaldehyde	75-07-0	44	5.03	0.330
C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O	2-Propenal	107-02-8	56	6.93	0.003
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	n-Propanal	123-38-6	58	7.08	0.002
C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O	2-Methylpropenal	78-85-3	70	8.96	0.025
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	2-Methylpropanal	78-84-2	72	9.21	0.018
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	n-Butanal	123-72-8	72	9.98	0.017
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O	2-Methyl-2-butenal	497-03-0	84	12.69	0.021
C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	3-Methylbutanal	590-86-3	86	12.94	0.010
C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	n-Pentanal	110-62-3	86	13.89	0.017
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O	2-Methyl-2-butenal	1115-11-3	84	16.12	0.015
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O	(E)-2-Pentenal	1576-87-0	84	16.40	0.010
C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	2-Furaldehyde	98-01-1	96	16.70	0.003
C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	3-Furaldehyde	498-60-2	96	17.57	0.025
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	n-Hexanal	66-25-1	100	18.10	0.027
C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O	n-Heptanal	111-71-7	114	22.18	0.065
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	5-Methyl-2-furancarboxaldehyde	620-02-0	110	22.55	0.007
C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O	Benzaldehyde	100-52-7	106	23.20	0.092
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	2-Ethylhexanal	123-05-7	128	24.58	0.024
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	n-Octanal	124-13-0	128	25.93	0.074
C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> O <sub>3</sub>	2,5-Furandicarbaldehyde	823-82-5	124	27.01	0.008
C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O	n-Nonanal	124-19-6	142	29.38	0.078
C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O	n-Decanal	112-31-2	156	32.56	0.084
C <sub>11</sub> H <sub>22</sub> O	n-Undecanal	112-44-7	170	35.90	0.035
C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O	n-Dodecanal	112-54-9	184	40.77	0.042
C <sub>13</sub> H <sub>26</sub> O	n-Tridecanal	10486-19-8	198	48.09	0.067
C <sub>14</sub> H <sub>28</sub> O	n-Tetradecanal	124-25-4	212	60.07	0.035
C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O	n-Pentadecanal	2765-11-9	226	78.98	0.053
<i>Ketones</i>					
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	2-Propanone	67-64-1	58	7.28	0.007
C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O	2-Butenone	78-94-4	70	9.78	0.012
C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	2,3-Butanedione	431-03-8	86	9.88	0.003
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	2-Butanone	78-93-3	72	10.14	0.005
C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	2-Pentanone	107-87-9	86	13.71	0.007
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	2-Hexanone	591-78-6	100	17.89	0.008
C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O	2-Heptanone	110-43-0	114	21.88	0.016
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	5-Methyl-3-heptanone	541-85-5	128	24.83	0.026
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	2-Methyl-6-heptanone	928-68-7	128	25.00	0.006
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	5-Methyl-2-heptanone	18217-12-4	128	25.11	0.013
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	2-Octanone	111-13-7	128	25.65	0.060
C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O	Acetophenone	98-86-2	120	27.11	0.012
C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O	2-Nonanone	821-55-6	142	29.08	0.029
C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>	Dihydro-2H-pyran-2,6(3H)-dione	108-55-4	114	30.51	0.014
C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O	2-Decanone	693-54-9	156	32.24	0.011
C <sub>8</sub> H <sub>4</sub> O <sub>3</sub>	1,3-Isobenzofurandione	85-44-9	148	34.89	0.168
C <sub>11</sub> H <sub>22</sub> O	2-Undecanone	112-12-9	170	35.49	0.020

C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O	2-Dodecanone	6175-49-1	184	40.13	0.011
C <sub>13</sub> H <sub>26</sub> O	2-Tridecanone	593-08-8	198	47.23	0.023
C <sub>14</sub> H <sub>28</sub> O	2-Tetradecanone	2345-27-9	212	58.32	0.016
C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O	2-Pentadecanone	2345-28-0	226	76.05	0.053
<i>Carboxylic acids</i>					
CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Formic acid	64-18-6	46	10.89	0.013
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	Acetic acid	64-19-7	60	10.91	0.296
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	n-Propanoic acid	79-09-4	74	14.70	0.011
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	n-Butanoic acid	107-92-6	88	18.32	0.095
C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	3-Methylbutanoic acid	503-74-2	102	21.33	0.010
C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	n-Pentanoic acid	109-52-4	102	22.20	0.043
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	n-Hexanoic acid	142-62-1	116	25.65	0.223
C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	n-Heptanoic acid	111-14-8	130	29.04	0.035
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	n-Octanoic acid	124-07-2	144	32.09	0.061
C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>	n-Nonanoic acid	112-05-0	158	35.17	0.068
C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub>	n-Decanoic acid	334-48-5	172	39.57	0.037
C <sub>8</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>	4-Formylbenzoic acid	619-66-9	150	45.80	9.367
C <sub>11</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub>	n-Undecanoic acid	112-37-8	186	46.74	0.009
C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O <sub>2</sub>	n-Dodecanoic acid	143-07-7	200	57.07	0.037
C <sub>13</sub> H <sub>26</sub> O <sub>2</sub>	n-Tridecanoic acid	638-53-9	214	75.65	0.007
C <sub>14</sub> H <sub>28</sub> O <sub>2</sub>	n-Tetradecanoic acid	544-63-8	228	101.53	0.079
<b>Heterocyclic compounds</b>					
<i>Dioxanes</i>					
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	1,4-Dioxane	123-91-1	88	12.94	0.001
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	1,2-Dioxane	5703-46-8	88	13.06	0.000
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	1,3-Dioxane	505-22-6	88	17.04	0.000
<i>Dioxines and furans</i>					
C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O	Furan	110-00-9	68	6.84	0.002
C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> O	2-Methylfuran	534-22-5	82	9.66	0.009
C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> O	3-Methylfuran	930-27-8	82	9.94	0.002
C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O	2-Ethylfuran	3208-16-0	96	13.21	0.003
C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O	3-Ethylfuran	67363-95-5	96	13.39	0.001
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O	2-Vinylfuran	1487-18-9	94	13.97	0.000
C <sub>7</sub> H <sub>10</sub> O	2-Propylfuran	4229-91-8	110	17.09	0.002
C <sub>7</sub> H <sub>10</sub> O	2-Ethyl-5-methylfuran	1703-52-2	110	20.07	0.012
C <sub>8</sub> H <sub>12</sub> O	2-Butylfuran	4466-24-4	124	21.22	0.003
C <sub>8</sub> H <sub>12</sub> O	3-Butylfuran	57393-55-2	124	21.47	0.002
C <sub>9</sub> H <sub>14</sub> O	2-Pentylfuran	3777-69-3	138	25.00	0.007
C <sub>11</sub> H <sub>18</sub> O	2-Heptylfuran	3777-71-7	166	31.74	0.003
C <sub>11</sub> H <sub>18</sub> O	3-Heptylfuran	x	166	31.87	0.001
C <sub>12</sub> H <sub>20</sub> O	2-Octylfuran	4179-38-8	180	34.95	0.003
C <sub>12</sub> H <sub>20</sub> O	3-Octylfuran	x	180	35.27	0.002
C <sub>13</sub> H <sub>22</sub> O	2-Nonylfuran	68532-53-6	194	39.28	0.004
C <sub>16</sub> H <sub>28</sub> O	2-Dodecylfuran	75308-12-2	236	71.57	0.002
<b>Nitrogenated compounds</b>					
N <sub>2</sub>	Nitrogen	7727-37-9	28	1.72	0.275
H <sub>3</sub> N	Ammonia	7664-41-7	17	2.85	0.017
CHNO	Hydrogen isocyanate	75-13-8	43	6.25	0.004
C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> N	Acetonitrile	75-05-8	41	6.59	0.023
C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> N	Propanenitrile	107-12-0	55	9.01	0.003
CH <sub>3</sub> NO	Formamide	75-12-7	45	12.29	0.026

C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> N	Pyrrrole	109-97-7	67	13.97	0.007
C <sub>5</sub> H <sub>5</sub> N	Pyridine	110-86-1	79	14.90	0.008
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> NO	Acetamide	60-35-5	59	15.72	0.033
C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> NO <sub>2</sub>	2-Oxo-propanamide	631-66-3	87	16.89	0.004
C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> N <sub>2</sub>	1H-Pyrazole	288-13-1	68	22.25	0.083
C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> NO	Butanamide	541-35-5	87	23.10	0.004
C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> NO	Pentanamide	626-97-1	101	26.91	0.001
C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> NO <sub>3</sub>	3-Methyl-2,5-oxazolidine-dione	5840-76-6	115	28.08	0.017
C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> NO <sub>2</sub>	2,5-Pyrrolidinedione	123-56-8	99	28.29	0.015
C <sub>6</sub> H <sub>13</sub> NO	Hexanamide	628-02-4	115	30.36	0.003
C <sub>7</sub> H <sub>15</sub> NO	Heptanamide	628-62-6	129	33.56	0.002
C <sub>8</sub> H <sub>17</sub> NO	Octanamide	629-01-6	143	37.34	0.003
C <sub>9</sub> H <sub>19</sub> NO	Nonanamide	1120-07-6	157	42.98	0.004
C <sub>10</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>2</sub>	5H-furo[3,2-f]indolizin-9-one	x	173	46.53	0.008
C <sub>10</sub> H <sub>21</sub> NO	Decanamide	2319-29-1	171	51.57	0.005
<b>Sulfonated compounds</b>					
H <sub>2</sub> S	Hydrogen sulfide	7783-06-4	34	2.81	0.002
COS	Carbonyl sulfide	463-58-1	60	3.23	0.007
O <sub>2</sub> S	Sulfur dioxide	7446-09-5	64	4.11	0.319
CH <sub>4</sub> S	Methanethiol	74-93-1	48	5.23	0.000
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> S	Dimethylsulfid	75-18-3	62	7.34	0.005
CS <sub>2</sub>	Carbon disulfide	75-15-0	76	7.34	0.092
C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> S	Thiophene	110-02-1	84	11.57	0.002
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> S <sub>2</sub>	Dimethyl disulfide	624-92-0	94	14.50	0.009
C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> S	2-Methylthiophene	554-14-3	98	15.60	0.007
C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> S	3-Methylthiophene	616-44-4	98	15.94	0.011
C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> S	2-Ethylthiophene	872-55-9	112	19.63	0.002
C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> S	2,4-Dimethylthiophene	638-00-6	112	19.98	0.003
C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> S	2,5-Dimethylthiophene	638-02-8	112	20.18	0.002
C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> S	3,4-Dimethylthiophene	632-15-5	112	20.85	0.003
C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> S	3-Ethylthiophene	1795-01-3	112	19.73	0.001
C <sub>7</sub> H <sub>10</sub> S	2-Propylthiophene	1551-27-5	126	23.45	0.007
C <sub>7</sub> H <sub>10</sub> S	3-Propylthiophene	1518-75-8	126	23.68	0.009
C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> OS	3-Thiophenecarboxaldehyde	498-62-4	112	27.03	0.001
C <sub>8</sub> H <sub>12</sub> S	2-Butylthiophene	1455-20-5	140	27.23	0.005
C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> OS	2-Thiophenecarboxaldehyde	98-03-3	112	27.58	0.003
C <sub>8</sub> H <sub>12</sub> S	3-Butylthiophene	34722-01-5	140	27.66	0.006
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> OS	2-Formyl-3-methylthiophene	5834-16-2	126	28.29	0.008
C <sub>9</sub> H <sub>14</sub> S	2-Pentylthiophene	4861-58-9	154	30.66	0.004
C <sub>10</sub> H <sub>16</sub> S	2-Hexylthiophene	18794-77-9	168	33.89	0.004
C <sub>11</sub> H <sub>18</sub> S	2-Heptylthiophene	18794-78-0	182	37.90	0.006
C <sub>11</sub> H <sub>18</sub> S	3-Heptylthiophene	65016-61-7	182	38.48	0.003
C <sub>12</sub> H <sub>20</sub> S	2-Octylthiophene	880-36-4	196	43.91	0.006
C <sub>13</sub> H <sub>22</sub> S	2-Nonylthiophene	57754-07-1	210	53.24	0.008
<b>Inorganic compounds</b>					
<i>Oxides</i>					
CO <sub>2</sub>	Carbon dioxide	124-38-9	44	1.83	48.195
H <sub>2</sub> O	Water	7732-18-5	18	3.01	33.859
<i>Noble gases</i>					
Ar	Argon	7440-37-1	40	1.70	0.005

Таблица ПЗ. Результаты ГХ-МС анализа летучих компонентов, выделенных ударно-механическим разрушением из жильного кварца. 230 соединений.

Formula	Name	<sup>1</sup> CAS/(NIST)	<sup>2</sup> MW	Кварц 6а-5т/118.2	
				<sup>3</sup> RT, min	<sup>4</sup> A, %
<b>Aliphatic hydrocarbons</b>					
<i>Paraffins</i>					
CH <sub>4</sub>	Methane	74-82-8	16	1.75	<0.001
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Ethane	74-84-0	30	2.52	0.003
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	n-Propane	74-98-6	44	3.95	0.002
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	n-Butane	106-97-8	58	5.88	0.002
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	n-Pentane	109-66-0	72	8.18	0.003
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	2-Methylpentane	107-83-5	86	10.76	0.002
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	n-Hexane	110-54-3	86	11.41	0.005
C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> Cl	1-Chlorobutane	109-69-3	92	12.06	0.003
C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	n-Heptane	142-82-5	100	15.34	0.007
C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	n-Octane	111-65-9	114	19.33	0.008
C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	n-Nonane	111-84-2	128	23.15	0.006
C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	n-Decane	124-18-5	142	26.71	0.003
C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>	n-Undecane	1120-21-4	156	29.99	0.004
C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	n-Dodecane	112-40-3	170	33.04	0.003
C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>	n-Tridecane	629-50-5	184	36.47	0.004
C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>	n-Tetradecane	629-59-4	198	41.58	0.004
C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	n-Pentadecane	629-62-9	212	49.33	0.007
C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	n-Hexadecane	544-76-3	226	62.32	0.007
C <sub>17</sub> H <sub>36</sub>	n-Heptadecane	629-78-7	240	81.00	0.013
<i>Olefins</i>					
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	Acetylene	74-86-2	26	2.23	0.004
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Ethylene	74-85-1	28	2.35	0.003
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	1-Propene	115-07-1	42	3.81	0.002
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	2-Methyl-1-propene	115-11-7	56	5.45	0.004
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	1-Butene	106-98-9	56	5.70	0.012
C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	1-Butyne	107-00-6	54	5.71	0.000
C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	2-Butyne	503-17-3	54	5.80	0.001
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	(E)-2-Butene	624-64-6	56	5.90	0.003
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	2-Butene	107-01-7	56	6.00	0.003
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	(Z)-2-Butene	590-18-1	56	6.11	0.004
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	1,4-Pentadiene	591-93-5	68	7.59	0.001
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	1-Pentyne	627-19-0	68	7.91	0.004
C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	1-Pentene	109-67-1	70	7.91	0.003
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	Isoprene	78-79-5	68	8.14	0.004
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	3-Methyl-1,2-butadiene	598-25-4	68	8.26	0.001
C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	2-Pentene	109-68-2	70	8.28	0.000
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	(E)-1,3-Pentadiene	2004-70-8	68	8.38	0.001
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	1,3-Pentadiene	504-60-9	68	8.63	0.001
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	(Z)-1,3-Pentadiene	1574-41-0	68	8.71	0.001
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	1-Hexene	592-41-6	84	11.12	0.001
C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	(Z),(Z)-2,4-Hexadiene	6108-61-8	82	12.21	0.002
C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	2,4-Hexadiene	592-46-1	82	12.47	0.002
C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	1-Heptene	592-76-7	98	15.00	0.002
C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	2-Heptene	592-77-8	98	15.42	0.001
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	3-Methyleneheptane	1632-16-2	112	18.77	0.014

C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	(Z)-4-Octene	7642-15-1	112	18.92	0.005
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	(E)-3-Octene	14919-01-8	112	19.03	0.008
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	1-Octene	111-66-0	112	19.13	0.002
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	(Z)-3-Octene	14850-22-7	112	19.25	0.001
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	2-Octene	111-67-1	112	19.45	0.002
C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>	1-Nonene	124-11-8	126	22.88	0.001
C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>	2-Nonene	2216-38-8	126	23.33	0.001
C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>	1-Decene	872-05-9	140	26.48	0.002
C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>	1-Undecene	821-95-4	154	29.79	0.002
C <sub>13</sub> H <sub>26</sub>	1-Tridecene	2437-56-1	182	36.04	0.001
<b>Cyclic hydrocarbons</b>					
<i>Cycloalkanes (naphthenes) and cycloalkenes</i>					
C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	3-Methylcyclopentene	1120-62-3	82	11.61	0.002
C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	4-Methylcyclopentene	1759-81-5	82	11.91	0.001
C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	Isopropenylcyclopropane	4663-22-3	82	12.07	0.000
C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	Bicyclo[3.1.0]hexane	285-58-5	82	12.77	0.001
C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	Isopropylcyclobutane	872-56-0	98	15.29	0.001
C <sub>12</sub> H <sub>20</sub>	1,3-Dimethyladamantane	702-79-4	164	32.01	0.526
C <sub>12</sub> H <sub>20</sub>	1,4-Dimethyladamantane (isomer 1)	(460670)	164	33.09	2.507
<i>Arenes</i>					
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Benzene	71-43-2	78	12.02	0.015
C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	Toluene	108-88-3	92	16.35	0.015
C <sub>7</sub> H <sub>7</sub> F	(Fluoromethyl)benzene	350-50-5	110	19.92	0.001
C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	Ethylbenzene	100-41-4	106	20.30	0.002
C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	p-Xylene	106-42-3	106	20.58	0.011
C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	o-Xylene	95-47-6	106	20.85	0.004
C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	m-Xylene	108-38-3	106	20.93	0.003
C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	Styrene	100-42-5	104	21.23	0.006
C <sub>8</sub> H <sub>9</sub> F	5-Fluoro-m-xylene	461-97-2	124	21.30	0.001
C <sub>8</sub> H <sub>9</sub> F	2-Fluoro-m-xylene	443-88-9	124	21.50	0.001
C <sub>8</sub> H <sub>9</sub> F	3-Fluoro-o-xylene	443-82-3	124	21.62	0.001
C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	Propylbenzene	103-65-1	120	24.06	0.002
C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	1,3,5-Trimethylbenzene	108-67-8	120	25.08	0.002
C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	1,2,4-Trimethylbenzene	95-63-6	120	25.90	0.005
C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	p-Cymene	99-87-6	134	26.60	0.001
C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	o-Cymene	527-84-4	134	26.86	0.003
C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	m-Cymene	535-77-3	134	27.13	0.001
C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	Butylbenzene	104-51-8	134	27.79	0.003
C <sub>11</sub> H <sub>16</sub>	Pentylbenzene	538-68-1	148	31.14	0.003
C <sub>12</sub> H <sub>18</sub>	Hexylbenzene	1077-16-3	162	34.37	0.003
C <sub>14</sub> H <sub>22</sub>	Octylbenzene	2189-60-8	190	44.03	0.002
<i>Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH)</i>					
C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	Naphthalene	91-20-3	128	31.37	0.001
C <sub>11</sub> H <sub>10</sub>	2-Methylnaphthalene	91-57-6	142	34.94	0.003
C <sub>11</sub> H <sub>10</sub>	1-Methylnaphthalene	90-12-0	142	35.42	0.003
C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	Phenanthrene	85-01-8	178	84.43	0.017
<b>Oxygenated hydrocarbons</b>					
<i>Alcohols</i>					
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	Ethanol	64-17-5	46	6.35	0.007
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	2-Propanol	67-63-0	60	7.49	0.004

C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	1-Propanol	71-23-8	60	8.58	0.001
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O	Phenol	108-95-2	94	24.31	0.009
C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	o-Cresol	95-48-7	108	25.33	0.001
C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	p-Cresol	106-44-5	108	27.16	0.003
C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	m-Cresol	108-39-4	108	27.81	0.003
C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	2,4-Dimethylphenol	105-67-9	122	30.83	0.000
C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	3,5-Dimethylphenol	108-68-9	122	32.07	0.003
C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	2,3-Dimethylphenol	526-75-0	122	32.31	0.001
<i>Ethers and esters</i>					
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	Methyl methacrylate	80-62-6	100	13.89	0.007
C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	Butyrolactone	96-48-0	86	20.47	0.002
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	δ-Valeryllactone	542-28-9	100	25.65	0.002
C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	γ-Hexalactone	695-06-7	114	26.86	0.001
C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	δ-Hexalactone	823-22-3	114	27.83	0.001
C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	γ-Heptalactone	105-21-5	128	30.41	0.001
C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	γ-Octalactone	104-50-7	142	33.74	0.001
C <sub>9</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	γ-Nonalactone	104-61-0	156	37.80	0.002
C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>	γ-Decalactone	706-14-9	170	43.80	0.003
C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub>	γ-Dodecalactone	2305-05-7	198	67.86	0.003
C <sub>14</sub> H <sub>26</sub> O <sub>2</sub>	γ-Tetradecalactone	2721-23-5	226	129.44	0.012
<i>Aldehydes</i>					
CH <sub>2</sub> O	Formaldehyde	50-00-0	30	3.06	0.045
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	Acetaldehyde	75-07-0	44	5.11	0.079
C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O	2-Propenal	107-02-8	56	7.04	0.004
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	n-Propanal	123-38-6	58	7.09	0.006
C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O	2-Methylpropenal	78-85-3	70	9.24	0.004
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	2-Methylpropanal	78-84-2	72	9.39	0.007
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	n-Butanal	123-72-8	72	10.14	0.005
C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O	2-Butenal	4170-30-3	70	11.72	0.010
C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	3-Methylbutanal	590-86-3	86	13.16	0.003
C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	n-Pentanal	110-62-3	86	14.14	0.003
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O	2-Methyl-2-butenal	1115-11-3	84	16.37	0.003
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O	(E)-2-Pentenal	1576-87-0	84	16.64	0.003
C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	2-Furaldehyde	98-01-1	96	16.94	0.001
C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	3-Furaldehyde	498-60-2	96	17.80	0.013
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	n-Hexanal	66-25-1	100	18.35	0.004
C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O	n-Heptanal	111-71-7	114	22.42	0.007
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	5-Methyl-2-furancarboxaldehyde	620-02-0	110	22.78	0.002
C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O	Benzaldehyde	100-52-7	106	23.43	0.024
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	2-Ethylhexanal	123-05-7	128	24.81	0.006
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	n-Octanal	124-13-0	128	26.16	0.005
C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> O <sub>3</sub>	2,5-Furandicarbaldehyde	823-82-5	124	27.19	0.005
C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O	n-Nonanal	124-19-6	142	29.61	0.009
C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O	n-Decanal	112-31-2	156	32.79	0.010
C <sub>11</sub> H <sub>22</sub> O	n-Undecanal	112-44-7	170	36.29	0.007
C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O	n-Dodecanal	112-54-9	184	41.30	0.005
C <sub>13</sub> H <sub>26</sub> O	n-Tridecanal	10486-19-8	198	49.01	0.015
C <sub>14</sub> H <sub>28</sub> O	n-Tetradecanal	124-25-4	212	61.47	0.007
<i>Ketones</i>					
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	2-Propanone	67-64-1	58	7.39	0.005
C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O	2-Butenone	78-94-4	70	9.94	0.003

C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	2,3-Butanedione	431-03-8	86	10.23	0.001
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	2-Butanone	78-93-3	72	10.31	0.004
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O	1-Penten-3-one	1629-58-9	84	12.91	0.003
C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	2-Pentanone	107-87-9	86	13.91	0.002
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	2-Hexanone	591-78-6	100	18.12	0.001
C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O	3-Heptanone	106-35-4	114	21.82	0.002
C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O	2-Heptanone	110-43-0	114	22.12	0.001
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	5-Methyl-3-heptanone	541-85-5	128	25.06	0.004
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	2-Methyl-6-heptanone	928-68-7	128	25.35	0.003
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	5-Methyl-2-heptanone	18217-12-4	128	25.55	0.001
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	2-Octanone	111-13-7	128	25.91	0.006
C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O	Acetophenone	98-86-2	120	27.36	0.002
C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O	2-Nonanone	821-55-6	142	29.41	0.002
C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O	2-Decanone	693-54-9	156	32.49	0.005
C <sub>8</sub> H <sub>4</sub> O <sub>3</sub>	1,3-Isobenzofurandione	85-44-9	148	35.12	0.018
C <sub>11</sub> H <sub>22</sub> O	2-Undecanone	112-12-9	170	35.79	0.002
C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O	2-Dodecanone	6175-49-1	184	40.53	0.002
C <sub>13</sub> H <sub>26</sub> O	2-Tridecanone	593-08-8	198	48.03	0.009
C <sub>14</sub> H <sub>28</sub> O	2-Tetradecanone	2345-27-9	212	59.83	0.002
C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O	2-Pentadecanone	2345-28-0	226	78.15	0.014
<i>Carboxylic acids</i>					
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	Acetic acid	64-19-7	60	11.12	0.067
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	n-Propanoic acid	79-09-4	74	14.95	0.005
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	n-Butanoic acid	107-92-6	88	18.54	0.033
C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	3-Methylbutanoic acid	503-74-2	102	21.53	0.002
C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	n-Pentanoic acid	109-52-4	102	22.48	0.005
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	n-Hexanoic acid	142-62-1	116	25.93	0.020
C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	n-Heptanoic acid	111-14-8	130	29.29	0.004
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	n-Octanoic acid	124-07-2	144	32.32	0.011
C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>	n-Nonanoic acid	112-05-0	158	35.45	0.010
C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub>	n-Decanoic acid	334-48-5	172	40.05	0.008
C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O <sub>2</sub>	n-Dodecanoic acid	143-07-7	200	58.47	0.008
C <sub>14</sub> H <sub>28</sub> O <sub>2</sub>	n-Tetradecanoic acid	544-63-8	228	104.70	0.011
<b>Heterocyclic compounds</b>					
<i>Dioxanes</i>					
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	1,4-Dioxane	123-91-1	88	13.17	0.000
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	1,2-Dioxane	5703-46-8	88	13.31	0.000
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	1,3-Dioxane	505-22-6	88	17.19	0.000
<i>Dioxines and furans</i>					
C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O	Furan	110-00-9	68	6.98	0.003
C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> O	2-Methylfuran	534-22-5	82	9.88	0.003
C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> O	3-Methylfuran	930-27-8	82	10.14	0.002
C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	2,3-Dihydro-1,4-dioxin	543-75-9	86	11.74	0.000
C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O	2-Ethylfuran	3208-16-0	96	13.47	0.001
C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O	3-Ethylfuran	67363-95-5	96	13.69	0.000
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O	2-Vinylfuran	1487-18-9	94	14.24	0.001
C <sub>7</sub> H <sub>10</sub> O	2-Propylfuran	4229-91-8	110	17.35	0.000
C <sub>7</sub> H <sub>10</sub> O	2-Ethyl-5-methylfuran	1703-52-2	110	21.37	0.001
C <sub>8</sub> H <sub>12</sub> O	2-Butylfuran	4466-24-4	124	21.47	0.001
C <sub>8</sub> H <sub>12</sub> O	3-Butylfuran	57393-55-2	124	21.73	0.000
C <sub>9</sub> H <sub>14</sub> O	2-Pentylfuran	3777-69-3	138	25.25	0.001

C <sub>11</sub> H <sub>18</sub> O	2-Heptylfuran	3777-71-7	166	31.97	0.001
C <sub>12</sub> H <sub>20</sub> O	2-Octylfuran	4179-38-8	180	35.20	0.002
C <sub>12</sub> H <sub>20</sub> O	3-Octylfuran	x	180	35.44	0.001
<b>Nitrogenated compounds</b>					
N <sub>2</sub>	Nitrogen	7727-37-9	28	1.78	0.070
H <sub>3</sub> N	Ammonia	7664-41-7	17	2.90	0.010
CHNO	Hydrogen isocyanate	75-13-8	43	6.33	0.013
C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> N	Acetonitrile	75-05-8	41	6.71	0.014
C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> N	Propanenitrile	107-12-0	55	9.16	0.001
C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> N	Pyrrole	109-97-7	67	14.21	0.003
C <sub>5</sub> H <sub>5</sub> N	Pyridine	110-86-1	79	15.09	0.002
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> NO	Acetamide	60-35-5	59	15.87	0.005
C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> NO <sub>2</sub>	2-Oxo-propanamide	631-66-3	87	17.09	0.001
C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> N <sub>2</sub>	1H-Pyrazole	288-13-1	68	22.45	0.013
C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> NO	Pentanamide	626-97-1	101	26.88	0.000
C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> NO <sub>2</sub>	2,5-Pyrrolidinedione	123-56-8	99	28.49	0.006
C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> NO <sub>2</sub>	2,4-Pyrrolidinedione	37772-89-7	99	29.11	0.001
C <sub>6</sub> H <sub>13</sub> NO	Hexanamide	628-02-4	115	30.53	0.001
C <sub>7</sub> H <sub>15</sub> NO	Heptanamide	628-62-6	129	33.62	0.001
C <sub>8</sub> H <sub>17</sub> NO	Octanamide	629-01-6	143	37.67	0.001
C <sub>9</sub> H <sub>19</sub> NO	Nonanamide	1120-07-6	157	43.48	0.003
<b>Sulfonated compounds</b>					
H <sub>2</sub> S	Hydrogen sulfide	7783-06-4	34	3.05	0.001
COS	Carbonyl sulfide	463-58-1	60	4.06	0.002
O <sub>2</sub> S	Sulfur dioxide	7446-09-5	64	4.50	0.117
CH <sub>4</sub> S	Methanethiol	74-93-1	48	5.33	0.002
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> S	Dimethylsulfid	75-18-3	62	7.49	0.007
CS <sub>2</sub>	Carbon disulfide	75-15-0	76	7.51	0.014
C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> S	Thiophene	110-02-1	84	11.82	0.000
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> S <sub>2</sub>	Dimethyl disulfide	624-92-0	94	14.77	0.007
C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> S	2-Methylthiophene	554-14-3	98	15.87	0.001
C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> S	3-Methylthiophene	616-44-4	98	16.22	0.001
C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> S	2-Ethylthiophene	872-55-9	112	19.63	0.000
C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> S	2,4-Dimethylthiophene	638-00-6	112	19.47	0.001
C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> S	3-Ethylthiophene	1795-01-3	112	19.88	0.001
C <sub>7</sub> H <sub>10</sub> S	2-Propylthiophene	1551-27-5	126	23.91	0.001
C <sub>7</sub> H <sub>10</sub> S	3-Propylthiophene	1518-75-8	126	24.03	0.000
C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> OS	3-Thiophenecarboxaldehyde	498-62-4	112	27.44	0.001
C <sub>8</sub> H <sub>12</sub> S	2-Butylthiophene	1455-20-5	140	27.59	0.002
C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> OS	2-Thiophenecarboxaldehyde	98-03-3	112	27.94	0.001
C <sub>8</sub> H <sub>12</sub> S	3-Butylthiophene	34722-01-5	140	27.94	0.001
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> OS	2-Formyl-5-methylthiophene	13679-70-4	126	27.29	0.002
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> OS	2-Formyl-3-methylthiophene	5834-16-2	126	28.56	0.001
C <sub>9</sub> H <sub>14</sub> S	2-Pentylthiophene	4861-58-9	154	30.91	0.001
C <sub>10</sub> H <sub>16</sub> S	2-Hexylthiophene	18794-77-9	168	34.34	0.001
C <sub>10</sub> H <sub>16</sub> S	3-Hexylthiophene	1693-86-3	168	34.62	0.001
<b>Inorganic compounds</b>					
<i>Oxides</i>					
CO <sub>2</sub>	Carbon dioxide	124-38-9	44	1.97	25.499
H <sub>2</sub> O	Water	7732-18-5	18	3.08	70.207
<i>Noble gases</i>					
Ar	Argon	7440-37-1	40	1.77	0.002

Таблица П4. Результаты ГХ-МС анализа летучих компонентов, выделенных ударно-механическим разрушением из жильного кальцита. 225 соединений.

Formula	Name	<sup>1</sup> CAS/(NIST)	<sup>2</sup> MW	7-6т/148.5	
				<sup>3</sup> RT, min	<sup>4</sup> A, %
<b>Aliphatic hydrocarbons</b>					
<i>Paraffins</i>					
CH <sub>4</sub>	Methane	74-82-8	16	1.88	0.106
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	Isobutane	75-28-5	58	5.40	0.053
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	n-Butane	106-97-8	58	5.76	0.005
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	Isopentane	78-78-4	72	7.59	0.002
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	n-Pentane	109-66-0	72	7.98	<0.001
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	n-Hexane	110-54-3	86	11.16	0.002
C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	Hexane, 2-methyl-	591-76-4	100	14.21	0.043
C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	Hexane, 3-methyl	589-34-4	100	14.42	0.026
C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	n-Heptane	142-82-5	100	15.02	0.005
C <sub>6</sub> H <sub>13</sub> Cl	3-Chlorohexane	2346-81-8	120	16.45	0.010
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	3-Methyleneheptane	1632-16-2	112	18.40	0.014
C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	n-Octane	111-65-9	114	19.00	0.003
C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	Heptane, 2,5-dimethyl	2216-30-0	128	21.28	0.080
C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	2-Methyloctane	3221-61-2	128	22.02	0.062
C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	n-Nonane	111-84-2	128	22.82	0.040
C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	n-Decane	124-18-5	142	26.36	0.027
C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>	2-Methyldecane	6975-98-0	156	28.79	0.002
C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>	n-Undecane	1120-21-4	156	29.64	0.048
C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	n-Dodecane	112-40-3	170	32.69	0.002
C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>	n-Tridecane	629-50-5	184	35.99	0.052
C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	n-Pentadecane	629-62-9	212	48.19	0.003
C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	n-Hexadecane	544-76-3	226	59.90	0.005
C <sub>17</sub> H <sub>36</sub>	n-Heptadecane	629-78-7	240	78.55	0.004
C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>	Octadecane	593-45-3	254	108.48	0.246
<i>Olefins</i>					
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	1-Propene	115-07-1	42	5.58	0.022
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	(E)-2-Butene	624-64-6	56	5.80	0.003
C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	1-Pentene	109-67-1	70	7.76	0.002
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	Isoprene	78-79-5	68	7.98	0.002
C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	(2E)-2-Pentene	646-04-8	70	8.08	0.002
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	1-Hexene	592-41-6	84	10.91	0.015
C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	1-Heptene	592-76-7	98	14.69	0.038
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	(E)-4-Octene	14850-23-8	112	18.60	0.012
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	(E)-3-Octene	14919-01-8	112	18.65	0.006
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	1-Octene	111-66-0	112	18.80	0.013
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	(Z)-3-Octene	14850-22-7	112	18.92	0.006
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	2-Octene	111-67-1	112	19.14	0.003
C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>	2-Heptene, 2,6-dimethyl	5557-98-2	126	21.65	0.024
C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>	1-Nonene	124-11-8	126	22.58	0.003
C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>	1-Decene	872-05-9	140	26.15	0.013
C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>	1-Undecene	821-95-4	154	29.48	0.017
<b>Cyclic hydrocarbons</b>					
<i>Cycloalkanes (naphthenes) and cycloalkenes</i>					
C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	3-Methylcyclopentene	1120-62-3	82	11.36	0.012
C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	4-Methylcyclopentene	1759-81-5	82	11.92	0.007

<i>Arenes</i>					
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Benzene	71-43-2	78	11.79	0.035
C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	Toluene	108-88-3	92	16.05	0.316
C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	Ethylbenzene	100-41-4	106	20.00	0.023
C <sub>7</sub> H <sub>7</sub> F	(Fluoromethyl)benzene	350-50-5	110	20.02	0.007
C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	p-Xylene	106-42-3	106	20.27	0.057
C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	o-Xylene	95-47-6	106	20.93	0.006
C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	Styrene	100-42-5	104	20.93	0.007
C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	Propylbenzene	103-65-1	120	23.76	0.009
C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	o-Cymene	527-84-4	134	26.56	0.011
C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	m-Cymene	535-77-3	134	27.13	0.003
C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	Butylbenzene	104-51-8	134	27.48	0.011
C <sub>8</sub> H <sub>9</sub> Cl	2-Ethylchlorobenzene	89-96-3	140	28.31	0.001
C <sub>11</sub> H <sub>16</sub>	Pentylbenzene	538-68-1	148	30.83	0.016
C <sub>12</sub> H <sub>18</sub>	Hexylbenzene	1077-16-3	162	34.01	0.016
C <sub>13</sub> H <sub>20</sub>	Heptylbenzene	1078-71-3	176	37.99	0.023
C <sub>14</sub> H <sub>22</sub>	Octylbenzene	2189-60-8	190	44.00	0.050
C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	Nonylbenzene	1081-77-2	204	53.39	0.043
<i>Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH)</i>					
C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	Naphthalene	91-20-3	128	31.09	0.002
C <sub>11</sub> H <sub>10</sub>	2-Methylnaphthalene	91-57-6	142	34.57	0.002
C <sub>11</sub> H <sub>10</sub>	1-Methylnaphthalene	90-12-0	142	35.02	0.001
C <sub>13</sub> H <sub>18</sub>	1,1,6,7-Tetramethylindane	16204-58-3	174	36.34	0.001
C <sub>13</sub> H <sub>18</sub>	1,1,4,7-Tetramethylindan	1078-04-2	174	36.57	0.005
C <sub>13</sub> H <sub>18</sub>	1,1,4,6-Tetramethylindane	941-60-6	174	37.59	0.008
C <sub>12</sub> H <sub>12</sub>	2,7-Dimethylnaphthalene	582-16-1	156	39.70	0.001
C <sub>13</sub> H <sub>14</sub>	1,4,6-Trimethylnaphthalene	2131-42-2	170	48.11	0.002
C <sub>13</sub> H <sub>14</sub>	2,3,6-Trimethylnaphthalene	829-26-5	170	48.69	0.001
C <sub>13</sub> H <sub>14</sub>	2,3,5-Trimethylnaphthalene	2245-38-7	170	50.31	0.002
C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	Phenanthrene	85-01-8	178	78.60	0.007
<b>Oxygenated hydrocarbons</b>					
<i>Alcohols</i>					
CH <sub>4</sub> O	Methyl Alcohol	67-56-1	32	5.06	0.012
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	Ethanol	64-17-5	46	6.28	0.025
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	Isopropyl Alcohol	67-63-0	60	7.73	0.001
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	1-Butanol	71-36-3	74	11.79	0.002
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O	Phenol	108-95-2	94	24.03	0.040
C <sub>7</sub> H <sub>7</sub> FO	4-Fluorobenzyl alcohol	459-56-3	126	25.93	0.001
C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	o-Cresol	95-48-7	108	26.68	0.004
C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	p-Cresol	106-44-5	108	27.50	0.015
C <sub>7</sub> H <sub>7</sub> FO	3-Fluorobenzyl alcohol	456-47-3	126	28.33	0.002
C <sub>7</sub> H <sub>7</sub> FO	2-Fluoro-4-methylphenol	452-81-3	126	29.06	0.001
C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	m-Cresol	108-39-4	108	29.16	0.001
C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	3,5-Dimethylphenol	108-68-9	122	31.74	0.002
C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	2,3-Dimethylphenol	526-75-0	122	31.96	0.002
C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	2-Phenoxyethanol	122-99-6	138	33.26	0.075
C <sub>11</sub> H <sub>24</sub> O	1-Undecanol	112-42-5	172	40.53	0.024
<i>Ethers and esters</i>					
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	Methyl methacrylate	80-62-6	100	13.66	0.003
C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	Butyrolactone	96-48-0	86	20.35	0.002
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	δ-Valerolactone	542-28-9	100	25.98	0.004

C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	γ-Hexalactone	695-06-7	114	26.71	0.005
C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	δ-Hexalactone	823-22-3	114	28.36	0.009
C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	γ-Heptalactone	105-21-5	128	30.24	0.004
C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	δ-Heptalactone	3301-90-4	128	31.28	0.001
C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	γ-Octalactone	104-50-7	142	33.54	0.008
C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	δ-Octalactone	698-76-0	142	34.44	0.002
C <sub>9</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	γ-Nonalactone	104-61-0	156	37.42	0.003
C <sub>9</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	δ-Nonalactone	3301-94-8	156	38.72	0.002
C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>	γ-Decalactone	706-14-9	170	43.23	0.009
C <sub>13</sub> H <sub>22</sub> O	Geranylacetone	3796-70-1	194	43.61	0.038
C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>	δ-Decalactone	705-86-2	170	45.05	0.003
C <sub>11</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub>	γ-Undecalactone	104-67-6	184	52.61	0.009
C <sub>9</sub> H <sub>9</sub> BrO <sub>2</sub>	Methyl 4-(bromomethyl)benzoate	2417-72-3	228	53.11	0.016
C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub>	γ-Dodecalactone	2305-05-7	198	66.16	0.010
C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub>	δ-Dodecalactone	713-95-1	198	72.71	0.008
C <sub>14</sub> H <sub>11</sub> FO <sub>2</sub>	2-Methylphenyl ester 2-fluorobenzoic acid	(299045)	230	95.77	0.009
C <sub>16</sub> H <sub>19</sub> FO <sub>2</sub>	2-Fluorobenzoic acid, 2-methyloct-5-yn-4-yl ester	(299166)	262	101.97	0.016
C <sub>17</sub> H <sub>19</sub> FO <sub>2</sub>	4-Fluorobenzoic acid, 2,7-dimethyloct-7-en-5-yn-4-yl ester	(299156)	107.5 3	107.53	0.043
C <sub>13</sub> H <sub>8</sub> ClFO <sub>2</sub>	2-Chlorophenyl ester 4-fluorobenzoic acid	(299050)	113.2 7	113.27	0.035
C <sub>13</sub> H <sub>8</sub> ClFO <sub>2</sub>	2-Chlorophenyl ester 3-fluorobenzoic acid	(299057)	120.6 7	120.67	0.017
C <sub>14</sub> H <sub>26</sub> O <sub>2</sub>	γ-Tetradecalactone	2721-23-5	226	124.21	0.040
C <sub>13</sub> H <sub>14</sub> O <sub>4</sub>	Ethylallylphthalate	33672-94-5	234	129.53	0.427
<i>Aldehydes</i>					
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	Acetaldehyde	75-07-0	44	5.06	0.139
C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O	2-Propenal	107-02-8	56	6.96	0.002
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	n-Propanal	123-38-6	58	7.11	0.001
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	2-Methylpropanal	78-84-2	72	9.98	0.005
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	n-Butanal	123-72-8	72	10.00	0.015
C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O	2-Butenal	4170-30-3	82	11.51	0.005
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O	2-Methyl-2-butenal	497-03-0	84	12.69	0.003
C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	3-Methylbutanal	590-86-3	86	12.96	0.001
C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	n-Pentanal	110-62-3	86	13.92	<0.001
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O	(E)-2-Pentenal	1576-87-0	84	16.17	0.010
C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	2-Furaldehyde	98-01-1	96	16.74	0.001
C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	3-Furaldehyde	498-60-2	96	17.62	0.010
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	n-Hexanal	66-25-1	100	18.12	0.004
C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O	n-Heptanal	111-71-7	114	22.15	0.132
C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O	Benzaldehyde	100-52-7	106	23.22	0.054
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	2-Ethylhexanal	123-05-7	128	24.55	0.028
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	n-Octanal	124-13-0	128	25.90	0.070
C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> O <sub>3</sub>	2,5-Furandicarbaldehyde	823-82-5	124	27.08	0.002
C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O	n-Nonanal	124-19-6	142	29.33	0.094
C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O	n-Decanal	112-31-2	156	32.51	0.151
C <sub>11</sub> H <sub>22</sub> O	n-Undecanal	112-44-7	170	35.82	0.060
C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O	n-Dodecanal	112-54-9	184	40.78	0.122
C <sub>13</sub> H <sub>26</sub> O	n-Tridecanal	10486-19-8	198	47.76	0.091
<i>Ketones</i>					
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	2-Propanone	67-64-1	58	7.31	0.012

C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O	2-Butenone	78-94-4	70	9.21	0.010
C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	2,3-Butanedione	431-03-8	86	10.53	0.001
C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	2-Pentanone	107-87-9	86	13.72	0.001
C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> O	2-Cyclopenten-1-one	930-30-3	82	17.59	0.006
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	2-Hexanone	591-78-6	100	17.89	0.003
C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O	2-Heptanone	110-43-0	114	21.88	0.008
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	2-Methyl-6-heptanone	928-68-7	128	24.81	0.009
C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O	5-Hepten-2-one, 6-methyl-	110-93-0	126	25.08	0.005
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	2-Octanone	111-13-7	128	25.61	0.008
C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O	2-Nonanone	821-55-6	142	29.04	0.008
C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O	2-Decanone	693-54-9	156	32.21	0.010
C <sub>8</sub> H <sub>4</sub> O <sub>3</sub>	1,3-Isobenzofurandione	85-44-9	148	34.96	0.006
C <sub>11</sub> H <sub>22</sub> O	2-Undecanone	112-12-9	170	35.42	0.017
C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O	2-Dodecanone	6175-49-1	184	40.00	0.007
C <sub>10</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	o-Diacetylbenzene	704-00-7	162	41.85	0.004
C <sub>13</sub> H <sub>26</sub> O	2-Tridecanone	593-08-8	198	47.05	0.015
C <sub>14</sub> H <sub>28</sub> O	2-Tetradecanone	2345-27-9	212	57.64	0.028
C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O	2-Pentadecanone	2345-28-0	226	75.45	0.071
C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O	2-Hexadecanone	18787-63-8	240	103.30	0.027
<i>Carboxylic acids</i>					
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	Acetic acid	64-19-7	60	10.93	0.228
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	n-Propanoic acid	79-09-4	74	14.67	0.010
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	n-Butanoic acid	107-92-6	88	18.27	0.114
C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	3-Methylbutanoic acid	503-74-2	102	21.23	0.007
C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	n-Pentanoic acid	109-52-4	102	22.15	0.035
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	n-Hexanoic acid	142-62-1	116	25.61	0.150
C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	n-Heptanoic acid	111-14-8	130	28.96	0.034
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	n-Octanoic acid	124-07-2	144	32.01	0.062
C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>	n-Nonanoic acid	112-05-0	158	35.11	0.048
C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub>	n-Decanoic acid	334-48-5	172	39.43	0.037
C <sub>11</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub>	n-Undecanoic acid	112-37-8	186	46.20	0.005
C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O <sub>2</sub>	n-Dodecanoic acid	143-07-7	200	56.62	0.020
C <sub>13</sub> H <sub>26</sub> O <sub>2</sub>	n-Tridecanoic acid	638-53-9	214	73.39	0.016
C <sub>14</sub> H <sub>28</sub> O <sub>2</sub>	n-Tetradecanoic acid	544-63-8	228	100.13	0.088
<b>Heterocyclic compounds</b>					
<i>Dioxanes</i>					
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	1,2-Dioxane	5703-46-8	88	12.97	0.001
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	1,3-Dioxane	505-22-6	88	17.50	0.001
<i>Dioxines &amp; furans</i>					
C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O	Furan	110-00-9	68	6.86	<0.001
C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> O	2-Methylfuran	534-22-5	82	9.68	0.006
C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O	2-Ethylfuran	3208-16-0	96	13.17	0.001
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O	2-Vinylfuran	1487-18-9	94	14.01	<0.001
C <sub>7</sub> H <sub>10</sub> O	2-Propylfuran	4229-91-8	110	17.07	0.001
C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	Furan, 2-methoxy	25414-22-6	98	17.19	0.004
C <sub>7</sub> H <sub>10</sub> O	2-Ethyl-5-methylfuran	1703-52-2	110	20.97	0.004
C <sub>8</sub> H <sub>12</sub> O	2-Butylfuran	4466-24-4	124	21.17	0.002
C <sub>8</sub> H <sub>6</sub> O	Benzofuran	271-89-6	118	23.95	0.024
C <sub>9</sub> H <sub>14</sub> O	2-Pentylfuran	3777-69-3	138	24.93	0.005
C <sub>10</sub> H <sub>16</sub> O	2-Hexylfuran	3777-70-6	152	28.44	0.003
C <sub>12</sub> H <sub>20</sub> O	2-Octylfuran	4179-38-8	180	34.82	0.002

C <sub>13</sub> H <sub>22</sub> O	2-Nonylfuran	68532-53-6	194	39.17	0.004
C <sub>16</sub> H <sub>28</sub> O	2-Dodecylfuran	75308-12-2	236	81.03	0.003
<b>Nitrogenated compounds</b>					
N <sub>2</sub>	Nitrogen	7727-37-9	28	1.87	2.218
H <sub>3</sub> N	Ammonia	7664-41-7	17	2.88	0.024
C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> N	Acetonitrile	75-05-8	41	6.23	0.061
C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> N	Propanenitrile	107-12-0	55	6.64	0.008
C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> N	Azetidine	503-29-7	57	13.32	0.006
C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> N	Pyrrrole	109-97-7	67	13.99	0.003
C <sub>5</sub> H <sub>5</sub> N	Pyridine	110-86-1	79	14.97	0.005
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> NO	Acetamide	60-35-5	59	15.89	0.013
C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> NO <sub>2</sub>	2-Oxo-propanamide	631-66-3	87	16.95	0.002
C <sub>10</sub> H <sub>11</sub> Cl <sub>2</sub> NO	2-Chloro-N-[1-(2-chlorophenyl)ethyl]acetamide	40023-10-7	231	17.70	0.001
C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> N <sub>2</sub>	1H-Pyrazole	288-13-1	68	22.32	0.030
C <sub>7</sub> H <sub>15</sub> N	Piperidine, 2,6-dimethyl	504-03-0	113	25.46	0.042
C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> NO	Pentanamide	626-97-1	101	26.98	0.001
C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> NO <sub>2</sub>	2,5-Pyrrolidinedione	123-56-8	99	28.88	0.010
C <sub>6</sub> H <sub>13</sub> NO	Hexanamide	628-02-4	115	30.38	0.003
C <sub>8</sub> H <sub>5</sub> F <sub>2</sub> NO	3,6-Difluoro-2-methoxybenzotrile	1010413-52-1	169	31.91	0.001
C <sub>7</sub> H <sub>15</sub> NO	Enanthamide	628-62-6	129	33.71	0.001
C <sub>8</sub> H <sub>17</sub> NO	Octanamide	629-01-6	143	37.32	0.003
C <sub>9</sub> H <sub>19</sub> NO	Nonanamide	1120-07-6	157	42.90	0.002
C <sub>10</sub> H <sub>21</sub> NO	Decanamide	2319-29-1	171	51.46	0.004
<b>Sulfonated compounds</b>					
H <sub>2</sub> S	Hydrogen sulfide	7783-06-4	34	2.76	0.008
COS	Carbonyl sulfide	463-58-1	60	3.26	0.003
O <sub>2</sub> S	Sulfur dioxide	7446-09-5	64	4.51	0.044
CH <sub>4</sub> S	Methanethiol	74-93-1	48	5.23	0.002
CS <sub>2</sub>	Carbon disulfide	75-15-0	76	7.36	0.011
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> S <sub>2</sub>	Dimethyl disulfide	624-92-0	94	14.51	0.002
C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> S	2-Methylthiophene	554-14-3	98	15.39	0.004
C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> S	3-Methylthiophene	616-44-4	98	15.61	0.002
C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> S	2-Ethylthiophene	872-55-9	112	20.60	0.007
C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> S	3-Ethylthiophene	1795-01-3	112	20.88	0.004
C <sub>9</sub> H <sub>14</sub> S	2-Pentylthiophene	4861-58-9	154	30.61	0.003
C <sub>9</sub> H <sub>14</sub> S	3-Pentylthiophene	102871-31-8	154	31.03	0.004
C <sub>10</sub> H <sub>16</sub> S	2-Hexylthiophene	18794-77-9	168	34.62	0.001
C <sub>10</sub> H <sub>16</sub> S	3-Hexylthiophene	1693-86-3	168	34.80	0.000
C <sub>12</sub> H <sub>20</sub> S	2-Octylthiophene	880-36-4	196	46.06	0.001
C <sub>12</sub> H <sub>20</sub> S	3-Octylthiophene	65016-62-8	196	47.09	0.001
C <sub>14</sub> H <sub>24</sub> S	2-Decylthiophene	24769-39-9	224	72.69	0.004
C <sub>14</sub> H <sub>24</sub> S	3-Decylthiophene	65016-55-9	224	75.07	0.005
<b>Phosphorus-containing compounds</b>					
C <sub>12</sub> H <sub>27</sub> O <sub>4</sub> P	tri-sec-Butyl phosphate	2528-45-2	266	70.64	0.009
<b>Inorganic compounds</b>					
<i>Oxides</i>					
CO <sub>2</sub>	Carbon dioxide	124-38-9	44	1.88	24.327
H <sub>2</sub> O	Water	7732-18-5	18	3.06	68.292
<i>Noble gases</i>					
Ar	Argon	7440-37-1	40	1.83	0.032