

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт горного дела, геологии и геотехнологий
(институт)
Геологии месторождений и методики разведки
(кафедра)

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ В.А. Макаров
подпись инициалы, фамилия
« ____ » _____ 2021 г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

21.05.02. Прикладная геология

(код и наименование специальности)

21.05.02.01 Геологическая съёмка, поиски и разведка месторождений полезных
ископаемых

(код и наименование специализации)

Составление прогнозно-металлогенической карты Ак-Сугского рудного узла
масштаба 1: 50 000(респ. Тыва)

(тема)

Пояснительная записка

Руководитель

подпись, дата

В.А. Макаров

инициалы, фамилия

Выпускник

подпись, дата

В.И. Лосев

инициалы, фамилия

Нормоконтролер

подпись, дата

Д.А. Внуков

инициалы, фамилия

Красноярск 2021

Продолжение титульного листа ВКР по теме: «Составление прогнозно-металлогенической карты Ак-Сугского рудного узла масштаба 1: 50 000 (респ. Тыва)».

Консультанты по
разделам:

Геологическая часть _____
наименование раздела подпись, дата

В.А. Макаров
инициалы, фамилия

Нормоконтролер _____
подпись, дата

Д.А. Внуков
инициалы, фамилия

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

Институт горного дела, геологии и геотехнологий
(институт)

Геологии месторождений и методики разведки
(кафедра)

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ В.А. Макаров
подпись инициалы, фамилия
« ____ » _____ 2021 г.

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме дипломной работы

Руководитель ВКР

подпись, дата

В.А. Макаров
инициалы, фамилия

Задание принял к исполнению

подпись, дата

В.И. Лосев
инициалы, фамилия

Студенту: Лосеву Владимиру Ивановичу

Группа: РМП16-02

Специальность: 21.05.02.01 «Геологическая съемка, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых».

Тема выпускной квалификационной работы: «Составление прогнозно-металлогенической карты Ак-Сугского рудного узла масштаба 1: 50 000(респ. Тыва)».

Утверждена приказом по университету.

Руководитель ВКР: профессор В.А. Макаров

Исходные данные для ВКР: Материалы преддипломной практики, открытые данные гиперспектральной съёмки ASTER.

Перечень рассматриваемых разделов ВКР: геологическая часть, специальная часть.

Перечень графического материала: геологическая карта Ак-Сугского рудного узла, масштаб 1:100 000; Ландшафтная карта Ак-Сугского рудного узла, масштаб 1:100 000; Карта поисковых критериев и признаков, масштаб 1: 100 000; Карта предполагаемого распространения минералов на территории Ак-Сугского рудного узла, составленная методом спектрального угла, масштаб 1: 200 000; Карта предполагаемого распространения минералов на территории Ак-Сугского рудного узла, составленная методом главных компонент, масштаб 1 : 200 000; Карта предполагаемого распространения минералов на территории Ак-Сугского рудного узла, составленная методом минеральных индексов, масштаб 1 : 200 000.

КАЛЕНДАРНЫЙ ГРАФИК
выполнения ВКР

Наименование и содержание этапа (раздела)	Срок выполнения
Геологическая часть	09.01.2021-15.04.2021
Специальная часть	09.01.2021-01.06.2021

« ____ » _____ 2021 г.

Руководитель ВКР

подпись, дата

В.А. Макаров
инициалы, фамилия

Задание принял к исполнению

подпись, дата

В.И. Лосев
инициалы, фамилия

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа в форме дипломной работы по теме: «Составление прогнозно-металлогенической карты Ак-Сугского рудного узла масштаба 1: 50 000 (респ. Тыва)» содержит 134 страницы текстового документа, 7 листов графического материала, таблиц, 67 использованных источников.

Ключевые слова: МЕДНО-ПОРФИРОВОЕ, ЗОЛОТО, МЕТАЛЛ, РЕСПУБЛИКА ТЫВА, ВОСТОЧНЫЙ САЯН, ДЗЗ, ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНАЯ СЪЁМКА, ПРОГНОЗНО-МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКАЯ КАРТА, ASTER, МЕТОД МИНЕРАЛЬНЫХ ИНДЕКСОВ, МЕТОДСПЕКТРАЛЬНОГО УГЛА, МЕТОД ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ, АНАЛИЗ.

Объект работ – медно-порфировое оруденение Ак-Сугского рудного узла, Восточный Саян.

Целевое назначение работ: построение прогнозно-металлогенической карты на основе анализа поисковых критериев и признаков; оценка возможностей решения прогнозно-поисковых задач на медно-порфировое оруденение в пределах рудного узла на основе космической гиперспектральной съёмки.

Задачи:

- а) выявление комплекса поисковых критериев и признаков медно-порфирового оруденения;
- б) построение карты прогноза Ак-Сугского рудного узла на медно-порфировое оруденение;
- в) выбор математического аппарата для анализа гиперспектральных изображений;
- г) сравнительный анализ информативности методов для дистанционного картирования поисковых признаков медно-порфирового оруденения.

В результате выполнения поставленных задач построена карта прогноза медно-порфирового оруденения, показана возможность использования метода главных компонент и метода спектрального угла, использование метода минерального индекса можно применять в качестве дополнительно уточняющего исследования.

Сделан вывод о необходимости расширения поисковых работ на площади рудного узла на перспективных участках, выделены площади для проведения детальной гиперспектральной съёмки с целью опережающей разбраковки территории поисков, не только для Ак-Сугского рудного узла, но и для региона Восточного Саяна в целом.

*ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»
ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА, ГЕОЛОГИИ И
ГЕОТЕХНОЛОГИЙ*

Кафедра ГМ и МР

Раздел плана: цветные металлы

Полезное ископаемое: медь

Наименование объекта: Ак-Сугский рудный узел

Местонахождение объекта: Тоджинский район

Республики Тыва

«УТВЕРЖДАЮ»

Зав. кафедрой ГМ и МР

В. А. Макаров

" ____ " _____ 2021 г.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

На выполнение дипломной работы Составление прогнозно-металлогенической карты Ак-Сугского рудного узла масштаба 1: 50 000 (респ. Тыва)».

Основание выдачи геологического задания учебный рабочий план специальности 21.05.02.01 «Геологическая съемка, поиски и разведка МПИ»

1. Целевое назначение работ: пространственные границы объекта; основные оценочные параметры

1.1 Целевое назначение работ: проведение комплексного анализа геологических материалов и выделение прогнозно-поисковых критериев и признаков медно-порфирового оруденения на площади Ак-Сугского рудного узла с построением прогнозно-металлогенической карты. В качестве специальной части оценка возможностей гиперспектральной съёмки для прогноза оруденения.

1.2 Пространственные границы объекта: Ак-Сугский рудный узел, Восточный Саян

1.3 Основные оценочные параметры: прогнозно-поисковые комплексы, перспективные участки (площади), методическое решение по применению гиперспектральной съёмки.

2. Геологические задачи, последовательность и основные методы их решения

Основными задачами исследования являются: выделение прогнозно-поисковых критериев и признаков, построение прогнозно-металлогенической карты, определение математического аппарата для анализа гиперспектральной съёмки, выбор наилучшей методики работ, анализ полученных результатов, выявление площадей перспективных для заправки.

3. Ожидаемые результаты

Перспективные участки для постановки поисковых работ, методические рекомендации для применения гиперспектральной съёмки для прогноза медно-порфирового оруденения в условиях Восточного Саяна.

4. Сроки выполнения работ

Начало- январь 2020 г, завершение- июнь 2021 г.

Руководитель дипломной работы В.А. Макаров

СОДЕРЖАНИЕ

Список графических приложений	10
Список иллюстраций	11
Список таблиц	14
ВВЕДЕНИЕ	15
1. Состояние проблемы.....	17
2. Геологическая характеристика Ак-Сугского рудного узла	30
2.1 Физико-географические условия.....	30
2.2. Положение рудного узла в структурах региона	31
2.3. Геологическая характеристика Ак-Сугского рудного поля	42
3. Геологическая характеристика Ак-Сугского месторождения.....	49
3.1. Характеристика рудного поля	49
3.2. Структура месторождения	56
3.3. Характеристика гидротермальных изменений	58
3.4. Особенности минералого- геохимической зональности.....	65
4. Выделение поисковых критериев и признаков	69
4.1. Региональные поисковые критерии и признаки медно-порфирового оруденения и методика их интерпретации.....	69
4.1.1. Геологические критерии	69
4.1.2. Структурно-тектонические критерии	69
4.1.3. Поисковые признаки.....	70
4.2. Локальные поисковые критерии и признаки	85
5. Предпосылки к применению методов ДЗЗ для прогнозирования и поисков медно-порфирового оруденения в регионе Восточного Саяна.....	88
5.1. Геоморфология и рельеф.....	88
5.2. Почвенно-ландшафтная характеристика.....	92
6. Краткий обзор применения данных ДЗЗ для поисков полезных ископаемых	98
6.1. Метод спектрального угла (SAM)	103
6.2. Метод главных компонент (РСА)	107
7. Опыт реализации методики дистанционного картирования поисковых признаков на Ак-Сугской площади.....	119
7.1. Выбор и описание использованных входных данных ДЗЗ.....	119
7.2 Поиск и предварительная обработка исходных данных	121

7.3 Картирование методом спектрального угла.....	126
7.4. Картирование методом главных компонент	131
7.5. Картирование методом минеральных индексов	137
7.6. Анализ результатов.....	141
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	146
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	148

Список графических приложений

	Наименование приложения	Масштаб	Кол-во листов
1	Приложение А. Карта предполагаемого распространения минералов на территории Ак-Сугского месторождения, составленная различными методами	1: 200 000	1
2	Приложение Б. Геологическая карта Ак-Сугского рудного узла	1: 100 000	1
3	Приложение В. Ландшафтная карта Ак-Сугского рудного узла	1: 100 000	1
4	Приложение Г. Карта поисковых критериев и признаков	1: 100 000	1
5	Приложение Д. Промежуточные результаты данных ДЗЗ	-	1

Список иллюстраций

№ п/п	Наименование рисунка	Страница
1	Рисунок 1.1 – Порфиновые месторождения в мире	17
2	Рисунок 1.2 – Принципиальная схема становления «материнского» полифазного плутона (промежуточного магматического очага) для медно-порфиновых систем	20
3	Рисунок 1.3 – Строение телескопированной медно-порфировой системы	22
4	Рисунки 1.4 – Стандартные зоны гидротермальных изменения не телескопированных медно-порфиновых систем (вверху) и их обобщенная зональность (внизу)	24
5	Рисунок 1.5 – Территория РФ, ранжированная по степени перспективности на обнаружение медно-порфиновых месторождений	26
6	Рисунок 2.1. – Географо-экономическая схема расположения Ак-Сугского рудного узла	28
7	Рисунок 2.2. – 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 30	30
8	Рисунок 2.3. – Условные обозначения к схеме тектонического районирования для рисунка 2.2	31
9	Рисунок 2.4. – Геологическая карта Ак-Сугского рудного узла	40
10	Рисунок 3.1 – Геологическая карта месторождения Ак-Суг	48
11	Рисунок 3.2 – Геологический разрез месторождения Ак-Суг по разведочной линии 5	48
12	Рисунок 3.3 – Геологический разрез месторождения Ак-Суг по разведочной линии 10	49
13	Рисунок 3.4. - Схема метасоматической зональности месторождения Ак-Суг	60
14	Рисунок 3.5. - Распределение ассоциаций элементов по горизонтам рудного тела	64
15	Рисунок 3.6. - Распределение ассоциаций элементов по простиранию рудного тела	64
16	Рисунок 4.1. – Характер разрывной тектоники	68
17	Рисунок 4.2 – Преобладающие направления разломов по простиранию	69
18	Рисунок 4.3 Преобладающие азимуты осей трансгрессивного сжатия в пределах Ак-Сугского рудного поля	70
19	Рисунок 5.1. – Карта контуров предполагаемой гиперспектральной съёмки	92
20	Рисунок 6.1. Область Даралу (англ. Daraloo, медный пояс Керман, Иран). RGB-изображение результатов деления каналов ASTER D4 /D6, D5/D8, D3/D4.	95
21	Рисунок 6.2 Район Даралу–Сармешк (Daraloo–Sarmeshk). Карта распределения минералов, выделенных по результатам обработки данных ASTER SWIR методом согласованной фильтрации	96

22	Рисунок 6.3. – Сравнение мультиспектральной и гиперспектральной съёмки	97
23	Рисунок 6.4. – Спектральные кривые групп минералов	98
24	Рисунок 6.5. – спектральные кривые образца 6-2г	99
25	Рисунок 6.6 – Представление эталонного угла	101
26	Рисунок 7.1. – Расположения исследуемой территории вGooglemaps	117
27	Рисунок 7.2. – Сравнение фрагмента снимка до приведения к проекции «WGS-84 UTM zone 46N» и после	119
28	Рисунок 7.3 – Фрагмент векторного слоя растительности	121
29	Рисунок 7.4. – Фрагмент векторного слоя водных объектов	122
30	Рисунок 7.5. – Спектральные кривые каолинита библиотеки <i>Aster</i>	123
31	Рисунок 7.6. – Спектральные кривые кварца библиотеки <i>Aster</i>	123
32	Рисунок 7.7. – Спектральные кривые мусковита библиотеки <i>Aster</i>	124
33	Рисунок 7.8 – Спектральные кривые тоналита библиотеки <i>Aster</i>	124
34	Рисунок 7.9. – Спектральные кривые хлорита библиотеки <i>Aster</i>	125
35	Рисунок 7.10 – Спектральные кривые эпидота библиотеки <i>Aster</i>	125
36	Рисунок 7.11 – Векторные слои, полученные в результате обработки данных <i>ASTER</i> методом спектрального угла	127
37	Рисунок 7.12 – Фрагмент пятой компоненты снимка 2001 года	132
38	Рисунок 7.13– Фрагмент пятой компоненты снимка 2003 года	132
39	Рисунок 7.14 – Фрагмент пятой компоненты снимка 2007 года	133
40	Рисунок 7.15 – Фрагмент шестой компоненты снимка 2007 года	133
41	Рисунок 7.16 – Коэффициенты калибровки яркости для построения индексированных изображений	135
42	Рисунок 7.17. – Фрагмент изображения по мафическому индексу 2003 год съёмки	136
43	Рисунок 7.18. – Фрагмент изображения по kaolinite индексу 2003 год съёмки	136
44	Рисунок 7.19 – Фрагмент изображения по quartz rich rocks индексу 2007 год съёмки	137
45	Рисунок 7.20– Фрагмент изображения по epidote / chlorite / amphibole индексу 2003 год съёмки	137
46	Рисунок 7.21. – Фрагмент изображения по muscovite индексу 2003 год съёмки	138
47	Рисунок 7.22. – Фрагмент изображения по sericite / muscovite / illite / smectite индексу 2003 год съёмки	138
48	Рисунок 7.23 – Сравнение результатов картирования зон распространения хлорита/эпидота методом спектрального угла с методом минеральных индексов	140
49	Рисунок 7.24. – Сравнение результатов картирования зон распространения каолинита методом спектрального угла с методом минеральных индексов	140
50	Рисунок 7.25. – Сравнение результатов картирования зон распространения мусковита методом спектрального угла с методом минеральных индексов	140
51	Рисунок 7.26 – Сравнение результатов картирования зон распространения кварца методом спектрального угла с методом минеральных индексов	141
52	Рисунок 7.27 – Сравнение результатов картирования зон распространения серицита/тоналита методом спектрального угла с методом минеральных индексов	141

53	Рисунок 7.28 – Действующая буровая площадка, отображенная на снимке Sentinel-2 на которую наложен полигональный результат картирования методом спектрального угла	142
----	---	-----

Список таблиц

№ п/п	Наименование таблицы	Страница
1	Таблица 4.1.–Региональные геофизические критерии и признаки объектов медно-порфирирового типа	73
2	Таблица 4.2 – Значения рудного фактора для элементов, входящих в рудную геохимическую ассоциацию по данным факторного анализа	76
3	Таблица 4.3 – Списки элементов, входящих в расчет геохимических факторов	77
4	Таблица 4.4 – Таблица критериев и признаков медно-порфирирового оруденения Ак-Сугского рудного узла	79
5	Таблица 4.5 – Таблица критериев и признаков медно-порфирирового оруденения в пределах поисковых участков	84
6	Таблица 6.1 – некоторые минеральные и вегетационные индексы ASTER	116
7	Таблица 7.1. – Матрицы собственных векторов 2001г	131
8	Таблица 7.2. – Матрицы собственных векторов 2003г	131
9	Таблица 7.3. – Матрицы собственных векторов 2007г	132

ВВЕДЕНИЕ

Целью работы является создание прогнозно-металлогенической карты Ак-Сугского рудного узла (Восточный Саян) и выработка на её основе геолого-генетической модели Ак-Сугского медно-порфирового месторождения. Границы рудного узла рассматриваются в контуре лицензионной площади ООО «Тывамедь» (1300 кв.км) расположенной в горно-таежных условиях Алтае-Саянской складчатой области.

Для реализации поставленной цели на основании комплексного анализа геологических, геофизических и геохимических данных по месторождению и рудному узлу предполагается решение следующих основных задач:

1. Выявление геологических условий формирования оруденения;
2. Анализ структурно-тектонических условий локализации рудных тел;
3. Выявление геолого-геохимической зональности месторождения;
4. Создание по совокупности всех данных геолого-генетической и прогнозно-поисковой модели медно-порфирового оруденения и выработка на их основе оптимального прогнозно-поискового комплекса.

Разработанные геолого-генетическая и прогнозно-поисковая модели медно-порфирового оруденения в Восточном Саяне должны стать основой для дальнейшей постановки прогнозно-поисковых и оценочных работ в регионе на медно-порфировое оруденение.

В соответствии с названием работы, предполагается выполнение двух крупных задач.

Первая включала сбор материала и создание списка известных в пределах Ак-Сугского рудного узла месторождений, проявлений и пунктов минерализации, как профилирующих (Cu, Mo, Au, Ag), так и других полезных ископаемых. На основе комплексного анализа и переинтерпретации всех собранных материалов и вновь полученных данных предусматривалось построение геолого-структурной карты рудного узла и самого Ак-Сугского

месторождения и построение объемной геолого-геохимической модели последнего. Дипломная работа выполнялась автором при проведении исследований в составе творческого коллектива кафедры Геологии месторождений и методики разведки ИГДГиГ СФУ в рамках научной темы [32]

Специальная часть работы включала в себя анализ возможности применения данных космической гиперспектральной съёмки в целях геологического картирования и решения поисковых задач. Также оценивалась возможность применения методов ДЗЗ для дешифрирования и интерпретации полученных материалов со спутниковой системы TERRA. Даны рекомендации по применению данных методик для исследуемой территории с привлечением данных других космических аппаратов для условий региона Восточного Саяна.

При выполнении данной части работы автору существенную консультационную помощь оказали специалисты ИКИТ СФУ: к.т.н., доцент кафедры систем интеллекта, профессор и руководитель НУЛ Маглинец Юрий Анатольевич, к.т.н., доцент кафедры систем интеллекта Брежнев Руслан Владимирович; специалист ИШПР ТПУ д.г.-м.н., доцент отделения геологии Ананьев Юрий Сергеевич; к.г.н. директор центра дистанционных методов природоресурсных исследований ВСЕГЕИ Кирсанов Александр Андреевич. Автор выражает глубокую признательность за консультации и помощь в выполнении данной работы.

Результаты промежуточной работы неоднократно представлялись на всероссийских научных конференциях таких как: «Уральская минералогическая школа – 2020»; «XIX Всероссийская конференция – конкурс студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования»»; «Перспектив Свободный – 2021».

1. Состояние проблемы

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, ликвидационные медно-никелевые месторождения Норильского рудного района (разрабатываются ПАО «ГМК «Норильский никель»») и колчеданные месторождения Урала (разрабатываются Уральской горно-металлургической компанией). Большая часть этих месторождений отрабатывается трудоемким подземным способом. [32]

В странах лидерах производителей меди (Чили, Перу, США) ведущими типами месторождений меди являются медно-порфиновые объекты, обладающие большими запасами благоприятными для отработки открытым способом. В последние годы месторождения медно-порфинового типа разведаны и начинают осваиваться в России - Песчанка (Чукотка), Ак-Суг (Республика Тыва), Малмыж (Хабаровский край), Михеевское и Томинское (Урал), Бургаликан (Амурская область), Кирганик (Камчатка). Месторождения порфинового типа на 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 больше объёмных комплексных месторождений, которые обеспечивают стабильный уровень добычи полезных компонентов на протяжении многих лет разработки. В настоящее время они обеспечивают около 65% мировой добычи меди, 15% - золота и достаточно крупную долю молибдена. В России доля порфиновых

месторождений несравнимо более низкая - только 1% меди добывается из такого типа месторождений (Михеевское на Урале)

В Центрально-Сибирском регионе известны молибден-порфировые месторождения (Сорское, Агаскырское, Ипчульское), 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, свидетельствует о существенном потенциале этого региона на выявление медно-порфировых месторождений. Это, помимо высокой значимости для экономики региона, имеет важнейшее научное значение, как основание, для оценки (переоценки) потенциала всей Восточно-Саянской металлогенической провинции на данный тип оруденения. Для его раскрытия необходима постановка целенаправленных научных и прогнозно-поисковых работ. Для решения этой актуальной задачи требуется создание надежной геолого-генетической модели объекта эталона, каковым и является Ак-Сугское месторождение. Созданная модель будет являться основой для разработки прогнозно-поискового комплекса для выявления объектов-аналогов в геологических структурах Восточного Саяна и Алтае-Саянской складчатой области в целом.

В настоящее время имеется значительный объем геологической литературы, посвященной месторождениям порфирового типа, при этом доля зарубежных публикаций значительно превышает отечественные. Последнее имеет во многом объективные причины – большая часть выявленных месторождений порфирового типа имеет мезо-кайнозойский возраст и находится в пределах так называемого «тихоокеанского кольца». Из основных публикаций, посвященной этой тематике, можно выделить работы R.Sillitoe, E.Seedorff, J.Richards, HollisterV.F., KeslerS.E., TitleyS.R., SutulovA. и др. Количество публикаций отечественных исследователей несравнимо меньше, и они связаны с именами следующих авторов: В.И.Сотников, А.Н. и А.П.

Берзины, группа ЦНИГРИ (А.И.Кривцов, И.Ф.Мигачев и др.), В.С.Попов и др., И.Г. Павлова, Перваго В.А, Мовсесян С.А., Исаенко М.М.

Широкомасштабные всесторонние исследования медно-порфировых месторождений, проведенные в мире за последние 20-30 лет, позволили не только выявить множество новых месторождений этого типа, в том числе и очень крупных (Аю-Толгой в Монголии, Pebble на Аляске, Cadia и Ridgeway в Восточной Австралии), но и значительно лучше понять особенности их геологического строения, закономерности размещения в пространстве и времени, а также процессы их формирования.

Так изотопно-геохронологические исследования, проведенные в последние годы на многих порфировых месторождениях мира, показали, что их образование происходило на протяжении большей части истории Земли - от архея до настоящего времени. Возраст 576 порфировых месторождений, оцененный по данным абсолютного датирования, варьирует от 3,234 млрд. лет до 1,15 млн. лет, при этом их средний возраст составляет 59 млн. лет, а 90 процентов месторождений моложе 340 млн. лет [1]. Такое возрастное распределение во многом связано с формированием месторождений этого типа в верхней части земной коры (на глубинах 2-5 км) в тектонически активных областях на конвергентных границах плит, вследствие чего районы их развития подвержены поднятиям в ходе последующих орогенических движений. В результате большинство древних домезозойских месторождений было эксгумировано и эродировано. Вероятно, именно поэтому, как уже было сказано выше, подавляющее количество известных порфировых месторождений имеет мезо-кайнозойский возраст, причем их «львиная доля» находится в пределах «тихоокеанского кольца» (рисунок 1.1).

южная часть Перу, юго-западная часть Северной Америки) (рисунок 1.1). В тоже время, есть ряд примеров, когда крупные и уникальные порфировые месторождения могут встречаться в изоляции (Pebble на Аляске, Butte в штате Монтана и Bingham в штате Юта, США).

На сегодня установлено, что основная часть порфировых месторождений формируется в островодужных вулcano-плутонических поясах (K_2O/Na_2O 0,1-0,4) и в пределах магматических дуг андийского типа (K_2O/Na_2O 0,5-1,0). Значительно меньшее их количество образуется в областях ТМА в связи с калиевыми гранитами (K_2O/Na_2O 1,2), причем это исключительно Мо-порфировые месторождения Climax-type [13]. Во всех случаях большую роль в локализации рудоносных порфировых систем и их геометрии играют разломы. Особое рудоконтролирующее значение отводится секущим по отношению к дугам системам разломов, которые проявляют активность в течение магматических процессов и в ходе образования порфировых месторождений.

В масштабе рудных районов порфировые месторождения группируются в виде кластеров (скоплений) или линейных рядов, размеры которых варьируют от 5 до 30 км в поперечнике или по длине, соответственно. Их распределение на поверхности является отражением пространственного положения подстилающих исходных плутонов, либо куполов на их сводах. На этом предположении основана модель становления «материнского» полифазного плутона для медно-порфировых систем, предложенная [10]. Она включает: зоны последовательной кристаллизации магматического тела (полнокристаллические фазы), локальные области остаточного расплава в виде многофазных рудоносных порфировых интрузий, представленных вертикально вытянутыми (>3 км) штоками-апофизами, и так называемой «lithocap» (кварцитовая «шляпа»), формирующейся в самой верхней части порфировой системы в ранее накопившихся комагматичных вулканитах (рисунок 1.2).

Плутоны-предшественники могут выступать в роли вмещающей породы по отношению к отдельно взятому месторождению, однако на большом количестве медно-порфировых систем, в особенности не значительно

эродированных, плутоны-предшественники не установлены, что связано возможно с тем, что они залегают на недоступной глубине.

Предложенная модель хорошо объясняет давно отмечаемую во многих медно-порфировых провинциях закономерность в виде выше упомянутой «скученности» месторождений и эффективно используется при поисках. При этом необходимо учитывать, что каждый из разобщённых в пространстве рудоносных порфировых штоков будет обладать «собственной» зональностью вокруг отдельных магматических тел. Как правило, медно-порфировые месторождения расположены в центральной части порфировых интрузий, форма которых варьируются от вертикальных, куполовидных штоков до протяженных в плане дайкообразных тел, иногда это небольшие неправильной формы тела. Штоки и дайки обычно имеют диаметр или длину менее 1 км, соответственно. Однако, отмечаются и более крупные порфировые интрузии, которые сами по себе являются вмещающими породами. Что касается вертикальных размеров, то добычными работами и глубоким бурением на нескольких крупных медно-порфировых месторождениях установлено, что минерализованные интрузии простираются в вертикальном направлении на глубину более 2 км (Chuquicamata, Escondida, Grasberg), а в некоторых случаях по круто наклоненным системам можно сделать вывод, что и более чем на 4 км[10].

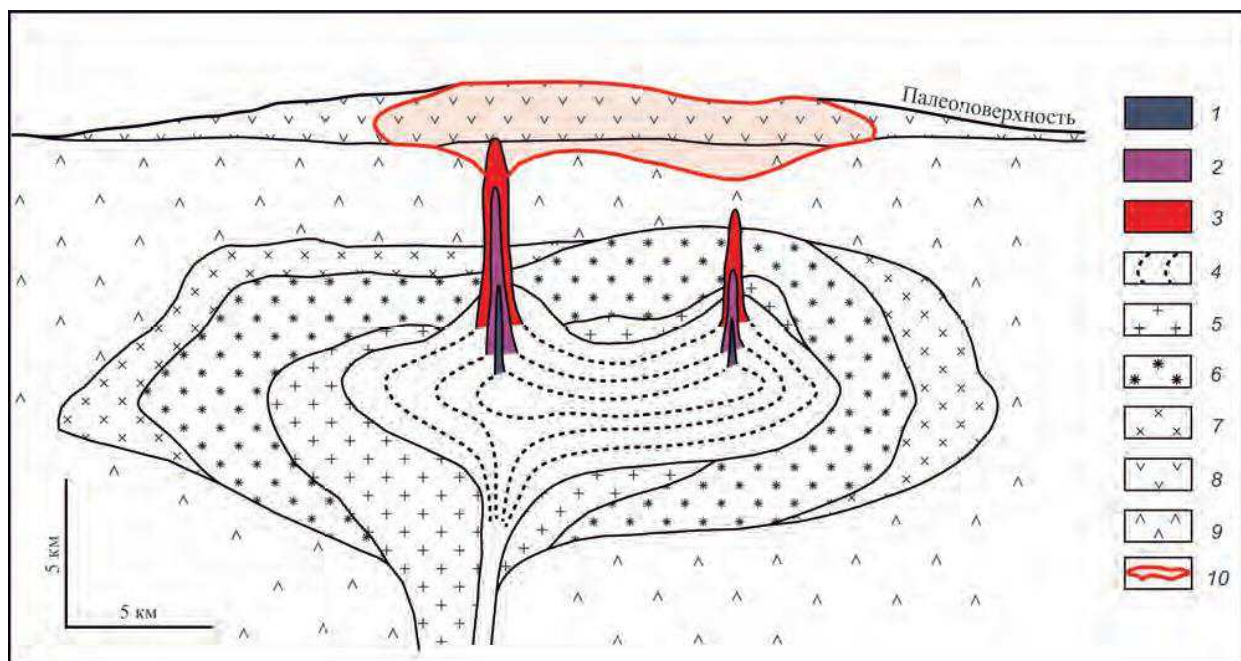


Рисунок 1.2 –Принципиальная схема становления «материнского» полифазного плутона (промежуточного магматического очага) для медно-порфировых систем (по [10]).

1–3 – порфировые фазы: 1 – поздняя, 2 – средняя, 3 – ранняя; 4 – зоны становления магматического тела (последовательной кристаллизации от периферии к центральной части плутона); 5–7 – полнокристаллические фазы: 5 – поздняя, 6 – средняя, 7 – ранняя; 8 – комагматичные вулканогенные породы; 9 – субвулканическое основание; 10 – lithosар (кварцитовая «шляпа»)

Исследование большого числа месторождений показало, что рудоносные порфировые интрузии представлены несколькими фазами, которые образовались: непосредственно перед (ранние, дорудные порфиры), вовремя (внутрирудные порфиры), в конце (поздние рудные порфиры) и после (пост рудные порфиры) гидротермальных процессов и минерализации. Количество таких фаз на разных месторождениях варьирует от 4 до 7, причем интенсивность их минерализации закономерно снижается. Установлено, что непосредственно дорудные, ранние порфиры и сопряженные с ними вмещающие породы содержат высококачественную минерализацию практически на всех месторождениях, кроме самой ранней стадии, которая может быть слабо минерализованной. Внутрирудные порфиры обычно менее минерализованные, а поздние и пост рудные фазы практически уже не содержат руды. Следует отметить, что ранние порфировые тела (фазы) не разрушаются при внедрении более поздних фаз, а лишь только

«раскалываются» [10], что зачастую приводит к разубоживанию сформировавшегося к этому времени оруденения.

Рудоносные порфировые интрузии медно-порфировых месторождений являются исключительно I-типа и принадлежат к магнетитовым сериям [2, 10, 14]. Они обычно относятся к калий-натровыми известково-щелочными, но также могут попадать в группу высоко-калиевых известково-щелочных или щелочных пород. По составу они варьируют от известково-щелочных диоритов и кварцевых диоритов до гранодиоритов, кварцевых монцонитов и щелочных диоритов, монцонитов, редко до сиенитов.

Состав интрузий, связанных с порфировыми месторождениями, имеет определяющее значение для количественного соотношения основных металлов и их содержаний в руде. Au-Cu-порфировые месторождения, как правило, ассоциируют с интрузивными породами с низким содержанием кремнезема (45-65 мас. % SiO_2), начиная от известково-щелочных диоритовых и гранодиоритовых до щелочных монцонитовых. Cu- и Mo-Cu-порфировые месторождения связаны с известково-щелочными породами от среднего до кислого состава от гранодиорита до гранита (60-72 мас. % SiO_2). Mo-порфировые месторождения (тип Climax) обычно ассоциируется с кислыми породами (72-77 мас. % SiO_2), во многих случаях представленных сильно дифференцированными гранитными плутонами [13].

Что касается внутреннего строения медно-порфировых месторождений, то в настоящее время они, как правило, рассматриваются в качестве основной, но все-таки части, более крупной порфировой системы, которая проявляется в виде генетически связанных скарновых, собственно порфировых и эпитеpmальных месторождений (рисунок 1.3) [10]. На схеме видно соотношение в пространстве собственно Cu±Au±Mo-порфирового месторождения, расположенного в центре в многофазном порфировом штоке и его непосредственных вмещающихся горных пород, с периферийными близко расположенными и удаленными скарновыми, карбонатно-замещенными (трубообразное рудное тело), приуроченными к осадочным образованиям

(удаленно-вкрапленные) месторождениями в карбонатных породах и с субэпитермальными жилами в некарбонатных горных породах и вышележащими эпитермальными месторождениями с высоким и средним содержанием сульфидов в вышележащих породах.

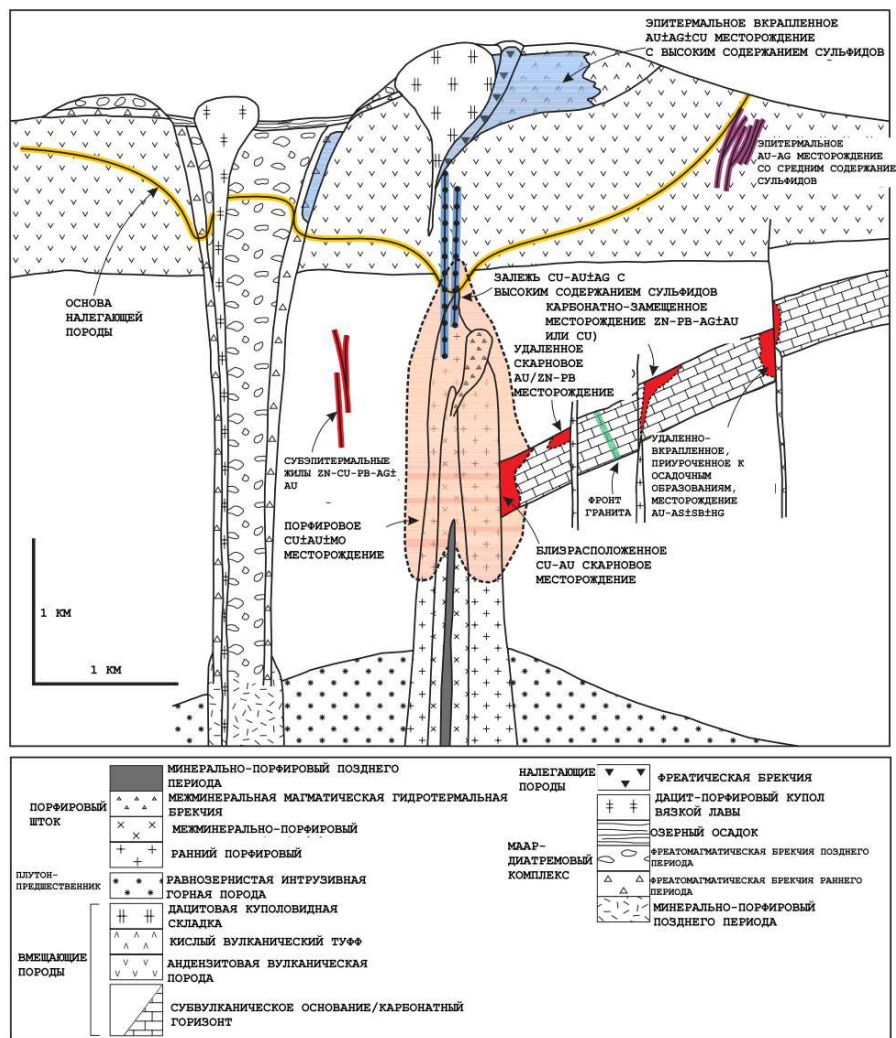


Рисунок 1.3 – Строение телескопированной медно-порфировой системы (по [10]).

Наиболее характерная особенность порфировых месторождений – гидротермальные изменения, которые обычно захватывают несколько кубических километров пород и являются хорошими индикаторами этого типа месторождений. В целом гидротермалиты составляют универсальный набор, который наблюдается практически на всех месторождениях (рисунок 1.4), при этом степень развития того или иного типа изменений варьирует в больших пределах и во многом зависит от типа рудоносных магматитов и особенностей

вещающих пород. Гидротермальные изменения и рудная минерализация формируются по направлению вверх от «пустых», ранних натрово-известковых зон, через калиевые, хлорит-серицитизованные и серицитовые рудосодержащие зоны до аргиллизитов. В результате формируется гидротермально-метасоматическая зональность, представленная вертикальными и горизонтальными рядами в центре, которой находятся калиевые метасоматиты, а на периферии - пропилиты.

Минеральная зональность во многом согласуется с гидротермальной. Наиболее богатые халькопирит ± борнитовые руды на многих медно-порфировых месторождениях в большей степени заключаются в калиевых зонах, с одним или несколькими центрами, богатыми борнитами, характеризующими более глубокие центральные части месторождений. Халькопирит-борнитовая ядерная часть окаймляется халькопирит-пиритовой зоной, которая затем переходит в пиритовые ореолы во внешних пропилитовых зонах. В верхнем направлении количество сульфидов так же увеличивается, формируются пирит±энаргит±ковеллиновые руды.

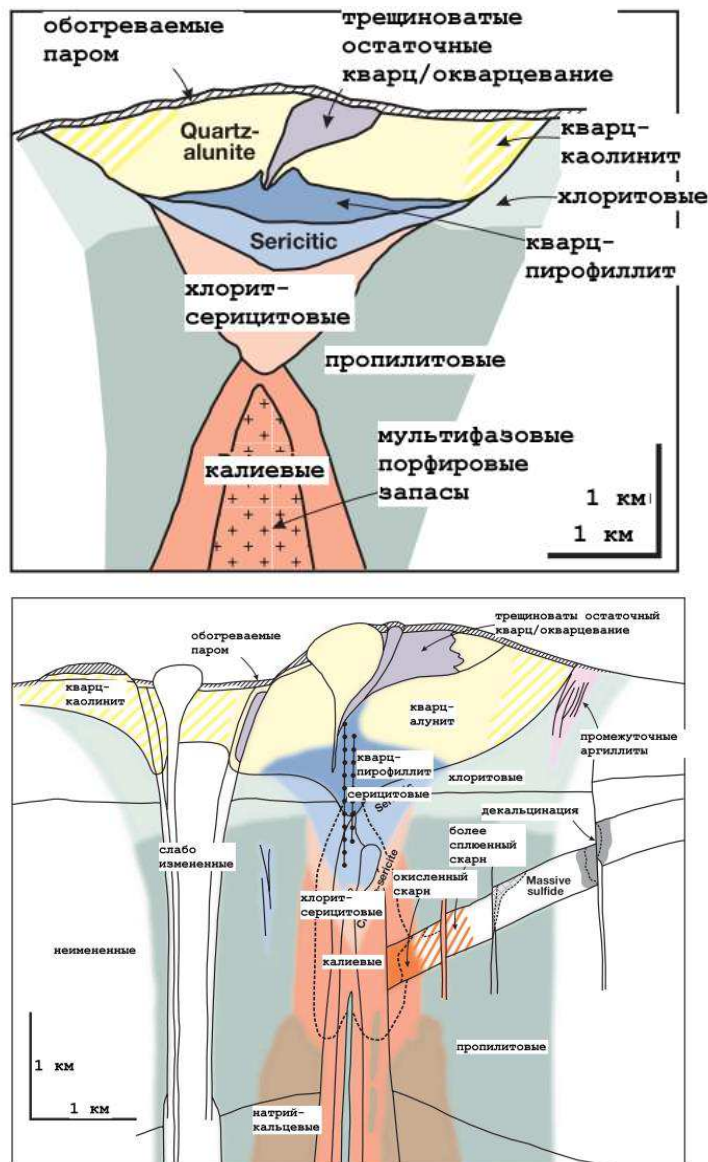


Рисунок 1.4 – Стандартные зоны гидротермальных изменения не телескопированных медно-порфировых систем (вверху) и их обобщенная зональность (внизу) (по [10])

Рудная минерализация проявляется как в виде вкрапленности, так и в кварц содержащих прожилках. Общее количество генераций различных прожилков на крупных месторождениях может достигать полутора-двух десятков, однако в целом они представлены ограниченным типовым набором (EM, EDM, A, B, D, M), при этом на большинство медно-порфировых месторождений прожилки формируются в определенной стандартной последовательности [15, 10]. Изучение их качественного состава (идентификация) и количественная характеристика (плотность на единицу длины/площади) дает ценную информацию о строении месторождения, в том числе о его структуре и минералого-геохимической зональности. На многих

месторождениях в ходе формирования порфировых интрузий образуются магматогенно-гидротермальные брекчии, которые не редко вмещают богатую минерализацию (El Teniente, Чили).

В целом, на сегодня медно-порфировые месторождения, возможно, являются наиболее изученным типом рудных месторождений, а выработанная в настоящее время универсальная модель рудоносной порфировой системы [10] апробирована на многих месторождениях мира и позволяет на новом, значительно более высоком уровне знаний, вести высокоэффективные геологоразведочные и поисковые работы. При этом необходимо учитывать, как уже было сказано выше, тип рудоносной порфировой интрузии, который в значительной степени влияет на масштаб и интенсивность проявления различных элементов порфировой системы, определяя в конечном счете минералого-геохимический облик того или иного месторождения. Кроме того, важнейшим фактором оценки промышленной значимости любого месторождения является уровень его эродированности, понимание которого возможно только после установления основных элементов его зональности.

В России за постсоветский период разведаны и поставлены на государственный баланс шесть месторождений медно-порфирового типа, из которых Песчанка, Малмыжское и Ак-Сугское могут быть отнесены к классу крупных [16]. Что касается Алтае-Саянской области, то по мнению многих исследователей ее территория является одной из наиболее перспективных на выявление порфировых месторождений [17, 18, 14] (рисунок 1.5). В настоящее время здесь помимо Ак-Сугского месторождения выявлено потенциальное месторождение Кызык-Чадр [19], а также ряд рудопроявлений схожего генезиса, причем некоторые из них находятся непосредственно в пределах Ак-Сугского рудного узла. Все это однозначно свидетельствует о значительном потенциале описываемой территории на выявление месторождений медно-порфирового типа.

Ак-Сугское месторождение на сегодня является наиболее изученным медно-порфировым месторождением Алтае-Саянской области. Поэтому

очевидно, что именно на его основе может быть выработана прогнозно-поисковая модель, которая позволит эффективно проводить поиски подобных объектов в этом регионе.

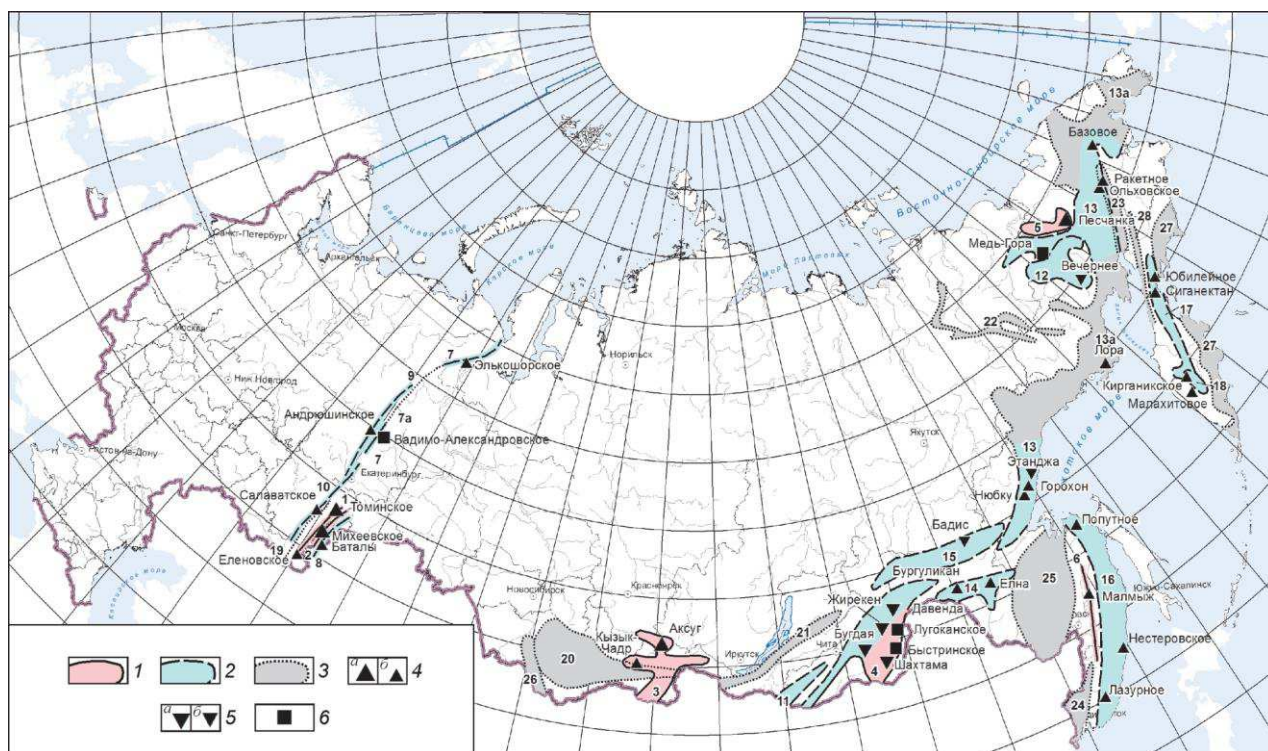


Рисунок 1.5 – Территория РФ, ранжированная по степени перспективности на обнаружение медно-порфировых месторождений (по [18])

1 – перспективные (1 – Увельский, 2 – Новониколаевско-Карамысовский, 3 – Саяно-Тувинский, 4 – Забайкальский, 5 – Курьинский, 6 – Западно-Сихотэ-Алиньский); 2 – потенциально перспективные (7 – Ауэрбаховско-Новогодненский (северный и южный фланги), 8 – Валерьяновский (на территории РФ), 9 – Именновский, 10 – Ирендыкский, 11 – Чикой-Хилокское звено Орхон-Селенгинского, 12 – Кедонский, 13 – Охотско-Чукотский и Удско-Мургальский (Пенжинско-Анадырское, Березовское и Удско-Джугджурское звенья), 14 – Умлекано-Огоджинский, 15 – Становой, 16 – Восточно-Сихотэ-Алиньский, 17 – Корьякско-Центрально-Камчатский, 18 – Ирунейско-Кирганикский); 3 – с неясными перспективами и неперспективные (7а – Ауэрбаховско-Новогодненский (центральное звено), 19 – Гумбейский, 20 – Минусинско-Тувинский, 21 – Джидино-Витимский, 22 – Уяндино-Ясачненский, 13а – Охотско-Чукотский и Удско-Мургальский (центральные звенья, Чукотская фланговая зона), 23 – Окрано-Пенжинский, 24 – Ханкайский, 25 – Хингано-Буреинский (Хингано-Охотский), 26 – Горно-Алтайский, 27 – Олюторско-Восточно-Камчатский, 28 – Пенжинско-Западно-Камчатский); месторождения (а) и проявления (б): 4 – медно-порфировые, молибден-медно-порфировые, 5 – молибден-порфировые, 6 – медно-скарновые (скарновые медно-порфировые)

2. Геологическая характеристика Ак-Сугского рудного узла

Ниже приведены краткие сведения о геологии Восточного Саяна, а также о положении Ак-Сугского месторождения в структурах региона. Отдельное внимание уделено геологической характеристике рудного поля и месторождения Ак-Суг. При подготовке главы использован обширный литературный материал, а также результаты геологических исследований, выполненных УК «Интергео» и ЦГИ «Прогноз» при участии автора.

2.1 Физико-географические условия

Территория исследуемого рудного узла находится на площади листа государственной геологической карты, номенклатуры N-47-XIX, которая отражает территорию, расположенную в Восточном Саяне, административно относится к Тоджинскому району республики Тыва. (рисунок 2.1.). Географически район высокогорный. Населенные пункты отсутствуют. Речная сеть развита широко; главной рекой является Ак-Суг и его притоки. Они не судоходны, с бурным течением, с шиверами и водопадами, и пригодны для спортивного сплава. На территории много озер и все ледникового происхождения. Главными горными сооружениями являются многочисленные хребты Восточного и Западного Саян: Вала, Кошурникова, Ергак-Торгак-Тайга и другие. Они ориентированы в разных направлениях. Высотные отметки колеблются от 660 до 2891 метров (пик Грандиозный). Относительные превышения достигают 1600 метров. Крутизна склонов 20° и более, особенно крутые северные склоны. Растительный покров распределяется зонально. В долинах рек и на южных склонах произрастают лиственные, выше до зоны альпийских лугов – хвойные, в высокогорной тундре – карликовые растения, в том числе много лечебных трав: маралий и золотой корень и др. Животный мир разнообразен. Промысловое значение имеют соболь, белка, норка. Район не освоен, население отсутствует. Экологическая обстановка хорошая. Развернувшиеся работы по оценке перспектив медно-порфирового Ак-Сугского

и редкоземельного Арысканского месторождений и проектирование трех вариантов железной дороги Абакан-Кызыл обусловили проведение на этой труднодоступной территории ГДП-200.

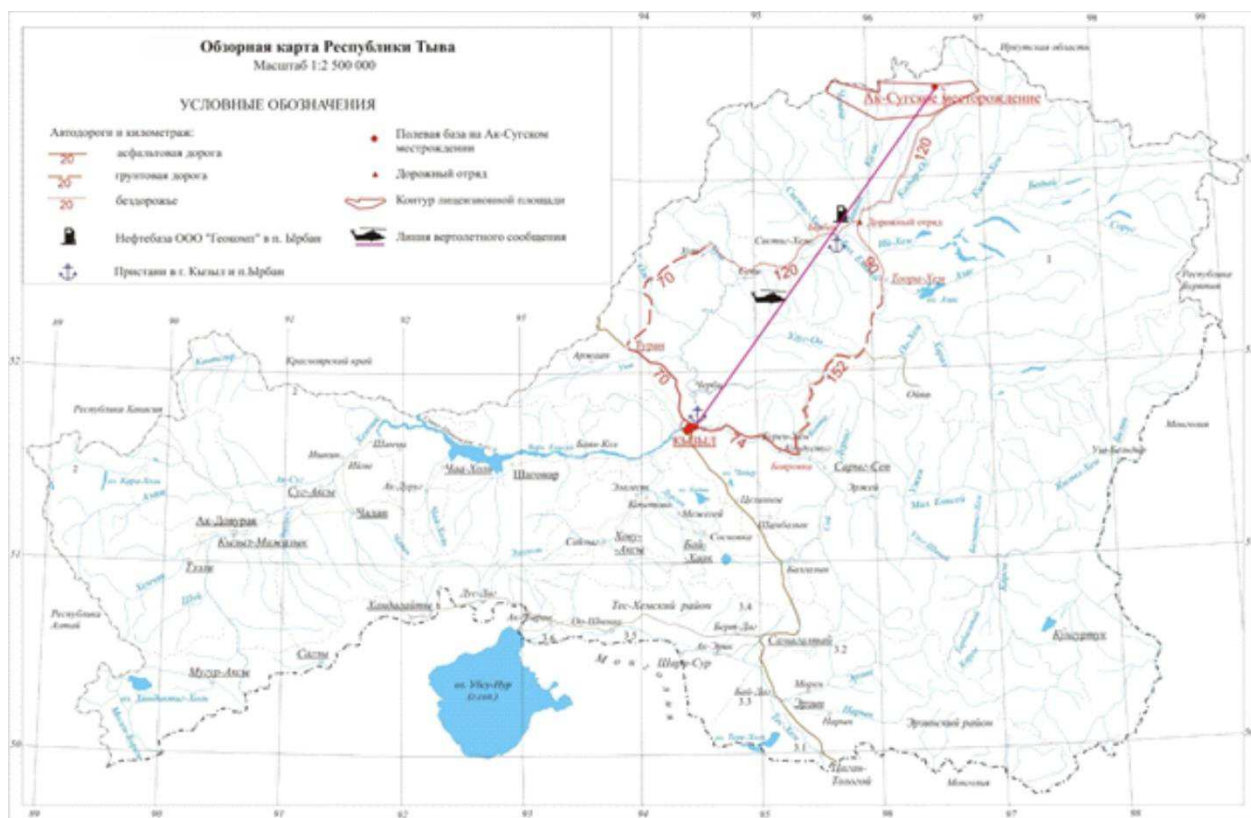


Рисунок 2.1. – Географо-экономическая схема расположения Ак-Сугского рудного узла

Климат района резко континентальный с суровой зимой и коротким летом. Минимальная температура зимой составляет -42°C , максимальная летом $+37^{\circ}\text{C}$. Глубина снежного покрова достигает 2 м, в понижениях рельефа до 10 м. Летнее количество осадков до 1500-1600 мм.

2.2. Положение рудного узла в структурах региона

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 (рисунок 2.2., 2.3.). Ниже приводится

характеристика данных структурно-тектонических подразделений по материалам Госгеолкарты-1000 третьего поколения листов N-47 и N-46 [20,21].

Кизир-Казырская складчатая система (8) представляет собой тектонический 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 [20]. В строении Кизир-Казырской складчатой системы (СС) участвуют стратифицированные и нестратифицированные образования раннеархейского (?), рифейского, венд-раннекембрийского, среднепалеозойского и мезозойского возраста.

Раннеархейский структурный ярус (СЯ) представлен плагиогнейсово-кристаллосланцевой даштыгхемской толщей мощностью около 2000 м, слагающей одноименную глыбу в юго-восточной части тектонического блока и «Магдасское поднятие» (8-3) в поле развития СФК рифейского СЯ. Зоны разломов, ограничивающих глыбу и поднятие, почти повсеместно «залечены» гранитоидами различного возраста. В центральной части поднятие осложнено грабеном субширотного направления, сложенным сланцево-карбонатной ортинской свитой рифейского возраста. Образования даштыгхемской толщи смяты в складки нескольких генераций при общем субмеридиональном простирании главных из них [22].

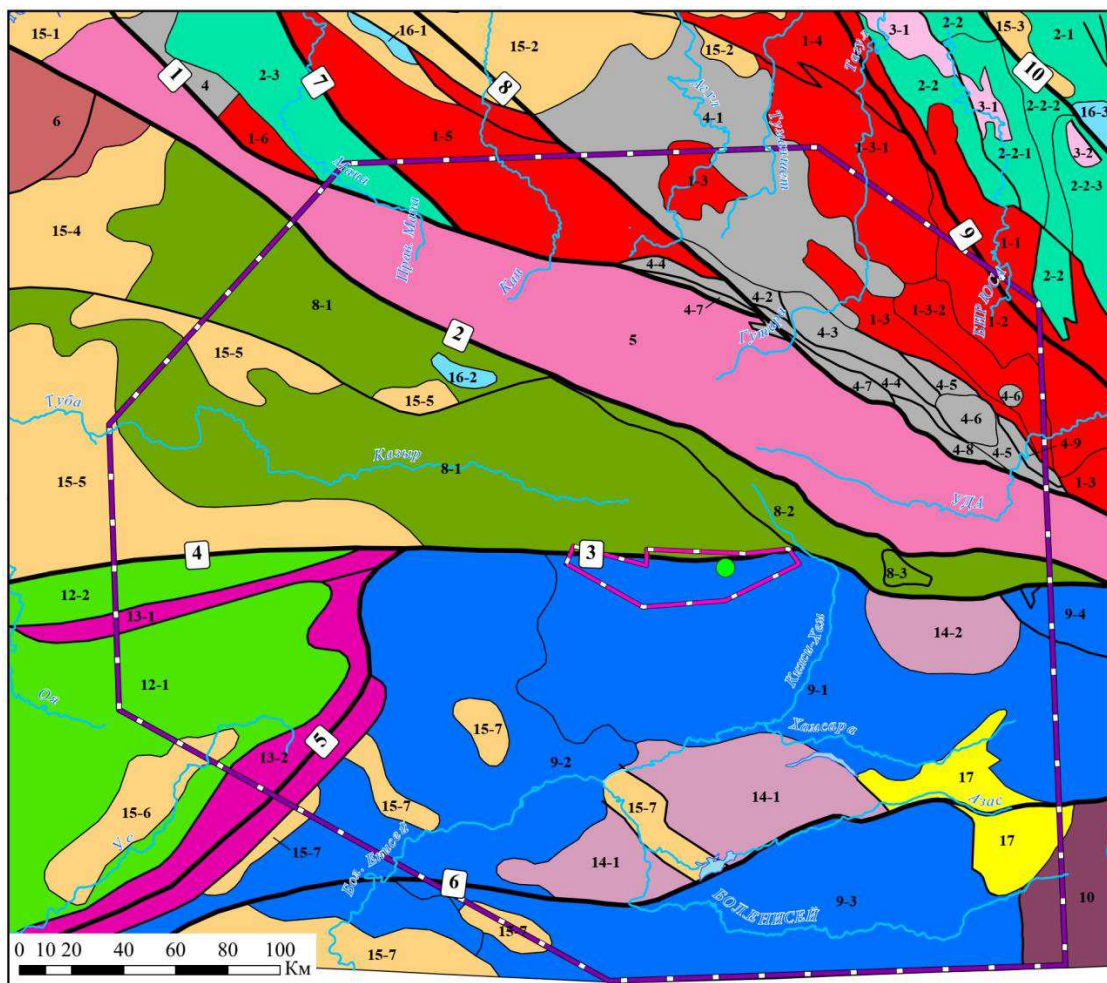













Рисунок 2.2. – Схема тектонического районирования восточной части Алтае-Саянской складчатой области и ее сочленения с Сибирской платформой, составлена по материалам ГГК-1000 (третье поколение) листов N-46 и N-47 [20,21]
 (Условные обозначения на рисунке 2.3.)





Сибирская платформа:

-  1. Структуры фундамента Сибирской платформы: 1-1 Мангатгольский выступ; 1-2, 1-3 Бирусинская глыба, Ийско-Тагульский выступ, Ийско-Туманшетский прогиб (1-3-1 Гутаро-Бирусинский синклиниорий, 1-3-2 Удинский синклиниорий); 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 Бирусинское 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-Бирусинский 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, Бельско-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. Кайназойские 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 - Бирусинский; 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 2.3. – Условные обозначения к схеме тектонического районирования для рисунка 2.2.

Рифейский структурный ярус. В составе яруса выделяются существенно терригенная ашкасокская свита, карбонатная ортинская свита и существенно

вулканогенная чатырлыгская свита, сиенит-габбровый казырский комплекс, слагающие протяжённую (около 200 км) полосу шириной до 20 км по юго-западному ограничению Дербинского блок-антиклинория – Ашкасокскую зону (8-2). В виде мелких блоков и провесов кровли формационные комплексы (ФК) рифейского СЯ отмечаются в полях развития гранитоидов палеозойского возраста и за пределами этой полосы. В составе рифейского СЯ рассматриваются также гипербазиты актовракского комплекса, слагающие ряд мелких тел в полях развития рифейских вулканогенно-осадочных образований. Степень метаморфизма пород рифейского СЯ, при преобладающем развитии в них парагенезисов эпидот-амфиболитовой фации, на отдельных участках достигает амфиболитовой фации (восточная часть СС). Складчатая структура характеризуется сочетанием линейных, симметричных и асимметричных, иногда изоклиналильных складок с куполовидными (Магдасское) поднятиями. Простираие их осей подчиняется направлениям Восточно-Саянского и Кандатского разломов, в восточной части – субширотное, а в западной – северо-западное. Крупная сложно построенная синклиналь субширотного простирания, к ядру которой приурочен Ханский массив габброидов, закартирована в восточной части СФО. Слоистость слагающих эту синклиналь пород чатырлыгской свиты как бы «облекает» массив. При общем совпадении структурного плана Дербинского блок-антиклинория и Кизир-Казырской СС на отдельных участках между ними фиксируется выраженное структурное несогласие.

Стратиграфическое несогласие между СФК раннепротерозойского возраста и рифейскими СФК Кизир-Казырской СС достоверно не установлено, но с большой вероятностью предполагается по наличию в разрезах рифейских образований «пуддинговых конгломератов», в которых многочисленны гальки карбонатных пород и гранитоидов, характерных для Дербинского блок-антиклинория [22]. Массивы габброидов казырского комплекса (иногда расслоенные) имеют преимущественно изометричную форму, отмечается их приуроченность к ядрам синклинальных структур.

В ретроспективном плане Кизир-Казырской СС на рифейском этапе её эволюции отвечает рифтовая зона по юго-западному ограничению поднятия (Дербинского блока), а сам прогиб рядом исследователей отнесён к типу зеленокаменных.

Венд-раннепалеозойский структурный ярус. На территории Кизир-Казырской СС в составе СЯ присутствуют: сланцево (кремнисто)-карбонатная (существенно доломитовая) формация венд-раннекембрийского возраста (чибижекская свита), эффузивно (базальтовая)-карбонатно-терригенная формация раннекембрийского возраста (колпинская и балахтисонская свиты), габбро-гранодиоритовая формация среднекембрийского возраста (ольховский комплекс), эффузивно-груботерригенная (песчаниково-конгломератовая) формация среднекембрийского возраста (осиновская свита). С определённой условностью в его состав включается пироксенит-габбровая формация ордовикского (?) возраста (запеваляхинский комплекс).

Несогласное налегание чибижекской свиты на разные подразделения рифейского СЯ установлено в бассейне р. Кизи-Хем [23]. Из-за фрагментарного расположения стратифицированных образований венд-раннекембрийского возраста их общая структура не расшифровывается. В целом северо-западное и субширотное простирание является преобладающим при крутом залегании слоистости (55–70°). Осиновская свита с конгломератами в основании залегает на венд-раннекембрийских стратифицированных образованиях, а также на интрузивных образованиях ольховского комплекса.

Среднепалеозойский структурный ярус представлен контрастно дифференцированной базальт-риолитовой формацией (имирская свита), сиенитовой, щелочно-сиенитовой (нефелинсодержащей) формацией (сайбарский комплекс) раннедевонского(?) возраста. Положение слагающих эти ФК тел контролируются системой разломов северо-западного и субширотного направлений. Локально, в виде небольших по площади и субгоризонтальнозалегających конгломератово-песчаниковых толщ на

территории СС развиты образования юрского структурного яруса (нарингольская свита).

Восточно-Тувинская складчатая система (9) представляет собой крупный геоблок, ограниченный с севера от Кизир-Казырской СС 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 СС последними региональными исследованиями [20, 21] выделяются 4 структурно-тектонические зоны (Рис. 1, 2): Хамсаринская (9-1), Хемчикско-Систигхемская (9-2), Харальская (9-3), Утхумская (9-4). Аксугский рудный узел локализован в северной части Хамсаринской зоны вдоль линии Кандатского разлома.

Хамсаринская зона (9-1) Восточно-Тувинской складчатой системы [20,21] характеризуется большим возрастным диапазоном и разнообразием слагающих её СФК, исключительно широким развитием интрузивных образований палеозойского возраста, а также наложенными структурами тектономагматической активизации (ТМА) Алтае-Саянской складчатой области – Азасская (14-1) и Алымская (14-2) вулcano-тектонические структуры (ВТС).

Рифейский структурный ярус. Позднерифейские образования представлены семейством вулcanoгенно-кварцито-карбонатно-терригенных пород билинской, балыктыгхемской, иркутской свит; гипербазитами ильчирского, актовраковского комплексов и гранитоидами сумсунурского комплекса. Из-за фрагментарного развития стратифицированных образований общая структура рифейского СЯ в контуре Хамсаринской зоны остаётся во многих отношениях неясной [21]. Залегание пород осложнено линейными складками субширотного простирания различных размеров (вплоть до плейчатысти) [24, 25]. Преобладающие падения слоистости – на юг, юго-восток под углами 60-70°. На отдельных участках, в зонах крупных разломов отмечаются развороты осевых линий складок в северо-западном (иногда северо-восточном) направлении, северо-западная направленность проявлена в западной части зоны. Гранитоиды сумсунурского комплекса слагают

немногочисленные интрузии в северном крыле Азасского разлома. Степень метаморфических преобразований пород рифейского СЯ различна и при преобладающем развитии парагенезисов эпидот-амфиболитовой (до зеленосланцевой) фации, на отдельных участках достигает амфиболитовой фации.

Венд-раннепалеозойский структурный ярус представлен эффузивно(андезитбазальтовой)-карбонатно-терригенной (алевритов–песчаников) формацией вендского (охемская свита), карбонатно-эффузивной (риолит-андезит-базальтовой) формацией раннекембрийского возраста (хамсаринская свита), семейством пироксенит-габбровым можалыкским, сиенит-габбровым остюренским комплексами, габбро и плагиогранитами хойтоокинского, таннуольского комплексов ранне-среднекембрийского возраста, а также локально развитой в западной части, эффузивно-терригенной формацией ордовикского возраста – систигхемская серия. Этот формационный ряд соответствует полному циклу развития Алтае-Саянских салаирид. Метаморфизм пород, слагающих СЯ, отвечает Р–Т-условиям низкотемпературных субфаций зеленосланцевой фации [20,21].

Наблюдаемые в относительно крупных полях развития этого СЯ складчатые формы характеризуются, по сравнению со складчатыми формами рифейского СЯ, гораздо большей простотой. Простираение пород в разных блоках меняется от северо-восточного и субширотного (бассейны рек Кадыр-Ос, Чангыс-Ама) до северо-западного (бассейн р. Хамсара) при углах падения 40-75°. Северо-западная направленность более характерна для западной части зоны. На территории Хамсаринской зоны расположены крупнейшие в Алтае-Саянской СО ареал-плутоны интрузивных пород габбро-плагиогранитовой ассоциации. Совместно с несогласно залегающими на них груботерригенными образованиями систигхемской серии ордовикского возраста они слагают верхний – орогенный подъярус венд-палеозойского СЯ.

Средне-верхнепалеозойский структурный ярус включает в себя СФК, отражающие этап тектономагматической активизации Алтае-Саянской СО,

такие, как: контрастно дифференцированные вулканиты илейской толщи, кендейской свиты, сиенит-граносиенит-гранитовый аксугский комплекс, щелочно-сиенитовые – ботогольский, сайбарский комплексы, красноцветную вулканогенно-груботерригенная сангасская свита раннедевонского (?) возраста, а также красно- и пестроцветные карбонатно-груботерригенные атакшильская и уюкская свиты среднедевонского возраста и девон-раннекарбоновая шибитская толща. Вулканогенные и осадочно-вулканогенные образования средне-позднепалеозойского возраста с резким стратиграфическим и структурным несогласием налегают на ФК рифейского и венд-раннепалеозойского СЯ, характеризуются фациальной невыдержанностью, значительными колебаниями мощностей, свидетельствующими об их формировании в изолированных, автономно развивающихся впадинах – вулcano-тектонических депрессиях (ВТС). Внутренняя структура таких ВТС характеризуется, как правило, синклинальным строением с пологим (10–35°) падением крыльев и близким к горизонтальному залеганию пород в их ядрах. В зонах ограничивающих их разломов углы падения становятся круче – отмечаются флексуры и приразломные складки различной морфологии. Характерны вулканические аппараты центрального типа, с некоторыми из них связаны проявления золота, полиметаллов (Хребтовое, Улуг-Алымское и др.) [21].

Многочисленные разломы преимущественно субширотного и восток-северо-восточного направлений в восточной части Хамсаринской зоны и северо-западного направления – в западной ее части контролируют положение интрузий огнитского и бреньского комплексов, определяют их морфологию.

Мезозойский структурный ярус включает малые интрузии щелочно-гранитовой формации (арысканский комплекс) раннетриасового возраста и отложения терригенной «угленосной» формации юрского возраста. Пространственное положение и структурный контроль малых, но важных в металлогеническом отношении интрузий арысканского комплекса, как и интрузий огнитского комплекса, определяется системой субширотных разломов и узлами из пересечений разломами других направлений.

К главным разрывным нарушениям исследуемого региона Алтае-Саянской СО относятся глубинные долгоживущие разломы (рисунок 3.1, 3.2): Главный Саянский (1), Восточно-Саянский (2), Кандатский (3), Саяно-Минусинский (4), Куртушубинский (5) и Азасский (6). Ак-Сугское месторождение, как и весь Аксугский рудный узел, приурочено к зоне влияния Кандатского разлома.

Кандатский разлом (3) – одна из крупнейших разрывных структур Алтае-Саянской СО. Он тянется в широтном направлении от бассейна Утхума на востоке, где под углом 35° 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, далее Кандатский разлом прослеживается под именем Саяно-Минусинский разлом.

Кандатский разлом отделяет СФК Дербинской и Кизир-Казырской СС от СФК Восточно-Тувинской СС. На всём 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 $60-75^\circ$ и может быть классифицирован как взброс [21].

Фрагментарно отмечается резкое, ступенеобразное изменение широтного простирания разлома на северо-западное ($305-310^\circ$), что является, возможно, результатом его смещения по зоне сквозьструктурного разлома северо-западного простирания, фиксирующегося в ФК Кизир-Казырской СС и Хамсаринской зоны Восточно-Тувинской СС. На большем своем протяжении разлом ограничивает ареалы палеозойского магматизма, характерного для Хамсаринской зоны, с севера. Вследствие сказанного, он отчётливо выражен в характере магнитного поля, фиксируется зонами градиентов поля силы тяжести широтной ориентировки. Разлом хорошо дешифрируется на аэро- и космофотоснимках, выражен геоморфологически спрямлёнными участками долин. Об активности разлома в рифее свидетельствует приуроченность к нему

мелких тел гипербазитов актоврацкого комплекса, гораздо большая степень динамометаморфических изменений в ФК рифейского и раннепротерозойского возраста относительно ФК палеозойского возраста.

Несомненна активность разлома в палеозое, о чём 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-карбонным возрастом слагающих её отложений. В «структурном узле», на сочленении Кандатского и Главного Саянского разломов (восточнее исследуемой территории), расположены довольно крупные интрузии огнитского комплекса, прорывающие СФК Дербинской и Восточно-Тувинской СС без заметных смещений контуров интрузий. Этот факт необходимо учитывать в связи с распространённым 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 ФК рифейского и раннепалеозойского возраста, медно-молибденового (Ак-Сугское месторождение), редкометалльного и редкоземельного оруденения (Арысканское месторождение и др.), связанного с ФК среднепалеозойского и мезозойского возраста.

По совокупности характеристик разлом может быть отнесён к взбросу с северным падением сместителя, к крупноамплитудным (по вертикальной составляющей), по глубине заложения – к нижнекоровым, возможно и корово-мантийным, к долгоживущим, магмо- и рудоконтролирующим, отвечающим понятию «глубинный» [21].

2.3. Геологическая характеристика Ак-Сугского рудного поля

Как было отмечено выше, Ак-Сугский рудный узел, вмещающий одноименное медно-порфировое месторождение (рисунок 2.4.) приурочен к нижнепалеозойскому Кандатскому шовному прогибу, развившемуся в зоне сочленения краевых массивов Хамсаринской и Казыр-Кизирской внешних зон раннекаледонских геосинклиналей [26]. 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.

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.), выполненные 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.

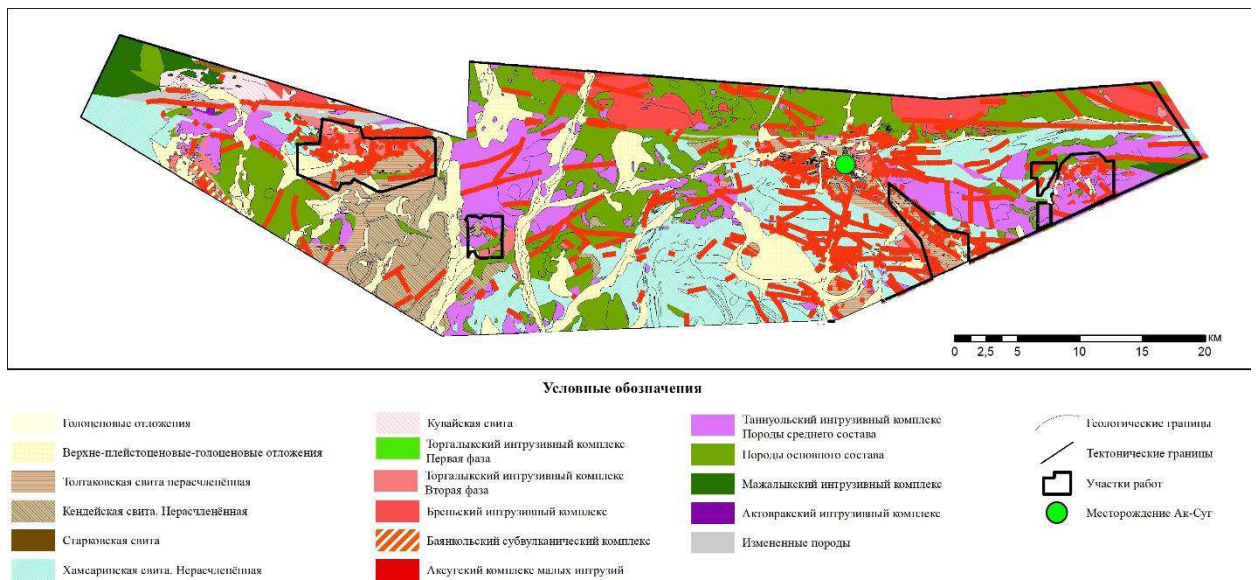


Рисунок 2.4.– Геологическая карта Ак-Сугского рудного узла.
Составлена по материалам [27]

Из стратиграфических образований в пределах рудного района снизу-вверх выделяются отложения протерозоя, кембрия и девона. Протерозойские отложения представлены охемской свитой ($PR_2 oh$) по составу подразделяющейся на две пачки: нижнюю – преимущественно кристаллических орто - и парасланцев и верхнюю - существенно карбонатную. Кембрийские отложения представлены балахтисонской ($E_1 bl$) и хамсаринской ($E_1 hm$) свитами. Первая сложена 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 пачки – нижнюю, сложенную песчанистыми известняками, и верхнюю, представленную мраморами и мраморизованными известняками. Хамсаринская свита ($E_1 hm$) подразделяется на три подсвиты, которые хорошо выделяются лишь в восточной и центральной частях района. 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 порфирировидные породы; к югу и востоку широко распространены лавобрекчии и туфы. В составе средней подсвиты, развиты преимущественно андезитовые

порфиры плагиоклазовые и плагиоклаз-роговообманковые, лавобрекчии, шаровые лавы, фельзиты и порфиритоиды. Для верхней подсвиты, характерны риолитовые порфиры, плагиоклазовые и кварц-плагиоклазовые порфиры, кератофиры и их туфы, порфириды и мраморизованные известняки.

Отложения девонской системы в районе развиты, главным образом, в наложенных грабенах и отнесены к толтаковской свите ($D_2 t_l$). По литологическому составу она преимущественно гравелито-песчаниковая туфогенная, с прослоями туфоконгломератов, алевролитов, потоками андезит-дацитовых порфиритов и лавобрекчий. Окраска пород красноватая. Мощность разреза свиты около 1000 м.

Магматические образования, имеющие широкое развитие в районе Ак-Сугского месторождения, сформировались в две главные эпохи - нижнепалеозойскую (кембрий) и средневерхнепалеозойскую (девон). С нижнепалеозойской (раннекаледонской) эпохой связано формирование габбро-плагиогранитной формации (таннуольский комплекс), с герцинской - граносиенит-гранитная и гранитоидная формации (бреньский, аксугский, торгалыкский комплексы).

Нижнепалеозойские интрузии.

Массивы таннуольского комплекса ($\gamma_3 p \gamma - q \delta_2 \delta v_1 \in 2-3 t$) пользуются широким распространением в пределах Хамсаринской структурной зоны. В формировании массивов выделяется три фазы [28]: первая фаза - габбро-диориты, диориты; вторая - плагиограниты, кварцевые диориты, тоналиты; третья - лейкократовые плагиограниты, адамеллиты.

Средне-верхнепалеозойские интрузии.

Бреньский (сютхольский) комплекс ($\gamma D_{1-2} b$) 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. Нижнее-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.

Ак-Сугский комплекс ($\rho\gamma, \delta Da$), с которым связана молибденово-медная штокверковая минерализация, выделен и обоснован в 1981 г. [29]. Он представлен многофазными дифференцированными массивами в виде небольших по размеру штокообразных залежей. Размещение их контролируется крупными разломами субширотного (оперяющие разрывы Кандатского разлома) или северо-западных направлений. Для рудоносных массивов аксугского типа характерна завершающая фаза порфировидных интрузий, с которыми непосредственно связано оруденение. Намечается два подтипа интрузий: в первом преобладают породы ранних фаз – диориты, кварцевые диориты, с которыми связывается преимущественно медная минерализация; во втором более развиты граниты с ведущей ролью минерализации молибдена.

Торгалыкский комплекс ($\delta, \gamma \xi D_{3t}$) 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, иногда обнаруживающие порфировидное строение. Породы состоят из плагиоклаза, пироксена, биотита, реже присутствует кварц, хлорит и калиевый полевой шпат. Вторая фаза представлена розовыми, розовато-серыми граносиенитами с массивной, иногда порфировидной текстурой. В состав породы входят порфировые зерна плагиоклаза, калиевый полевой шпат, кварц, хлоритизированный биотит.

Породы первой фазы прорываются граносиенитами, кроме того, в последних наблюдались ксенолиты диоритов.

Позднедевонский возраст становления пород торгалыкского комплекса устанавливается на основании прорывания ими отложений атакшильской свиты среднего девона.

В структурном плане описываемая площадь принадлежит, в основном, Западно-Хамсаринскому и отчасти Казырскому краевым массивам соответственно Таннуольско-Хамсаринской и Казыр-Кизирской внешних зон 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, Кижинский – к югу. Наиболее же опущенными и переработанными блоками являются Кара-Хемский и Уран-Сайский [26]. Кандатский рифтоподобный прогиб причленяется на востоке к структурам ранних рифейд Восточного Саяна. С юга (за пределами площади) Западно-Хамсаринский массив ограничивается зоной Азасского разлома. Как Ингишский, так и Кижинский блок осложнены сформировавшимися в герценскую 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 синклиналичных

структур (Даштыгойская грабен-синклираль и др.). Углы падения пород в ядерных частях и на крыльях складок пологие (10-15°), вблизи разломов – более крутые (50-70°). Морфология синклиральных 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-синклираль 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 каковым могут 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 амплитудой перемещения в сотни метров. Разрывы сопровождаются катаклизмом, рассланцеванием, 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.

3. Геологическая характеристика Ак-Сугского месторождения

3.1. Характеристика рудного поля

В геологическом строении Ак-Сугского месторождения принимают участие, преимущественно, породы одноименного интрузивного массива, распространенные в центральной, северной и восточной его части. На западе и с юга они окаймляются вулканогенно-осадочными отложениями девона (толтаковская свита). По долинам рек Ак-Суг и Даштыг-Ой, протекающим через месторождение, а также на выровненных склонах и водоразделах гор широко развиты рыхлые четвертичные отложения (рисунок 3.1, 3.2, 3.3).

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 порфиритов, 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. Сохраняется их крутое залегание под углом $60-85^\circ$ к западу. Иногда наблюдается обратное падение пород под углом 80° , 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 1600-1800 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 их с красноцветными толщами в наложенных

грабенах других районов Западного Саяна 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 последних, 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, порфириты хамсаринской свиты и плагиогранит-порфиры. В свежих сколах крупных обломков обнаруживаются мелкие вкрапленники пирита и халькопирита. Цементом является ожелезненная супесь, на ее долю приходится 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 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-песчанистым или суглинистым несортированным материалом.

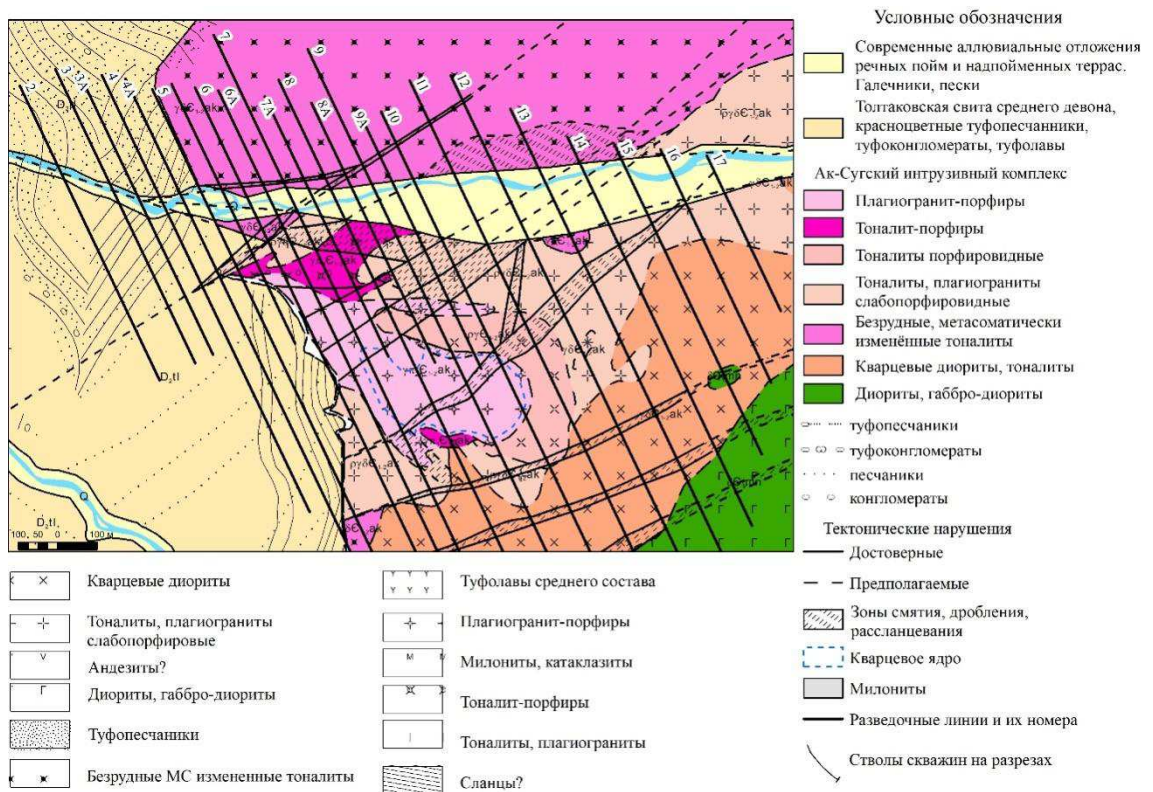


Рисунок 3.1 – Геологическая карта месторождения Ак-Суг. Составлена по материалам разведочных работ [27]

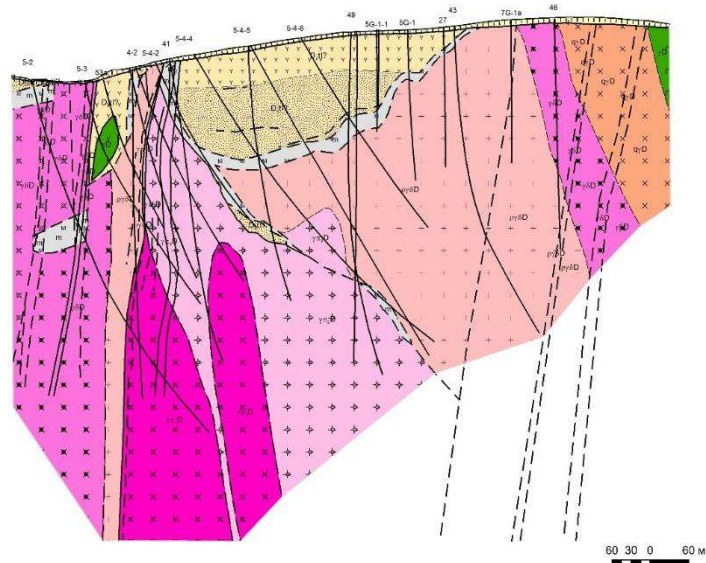


Рисунок 3.2 – Геологический разрез месторождения Ак-Суг по разведочной линии 5
Условные обозначения на рисунке 3.1

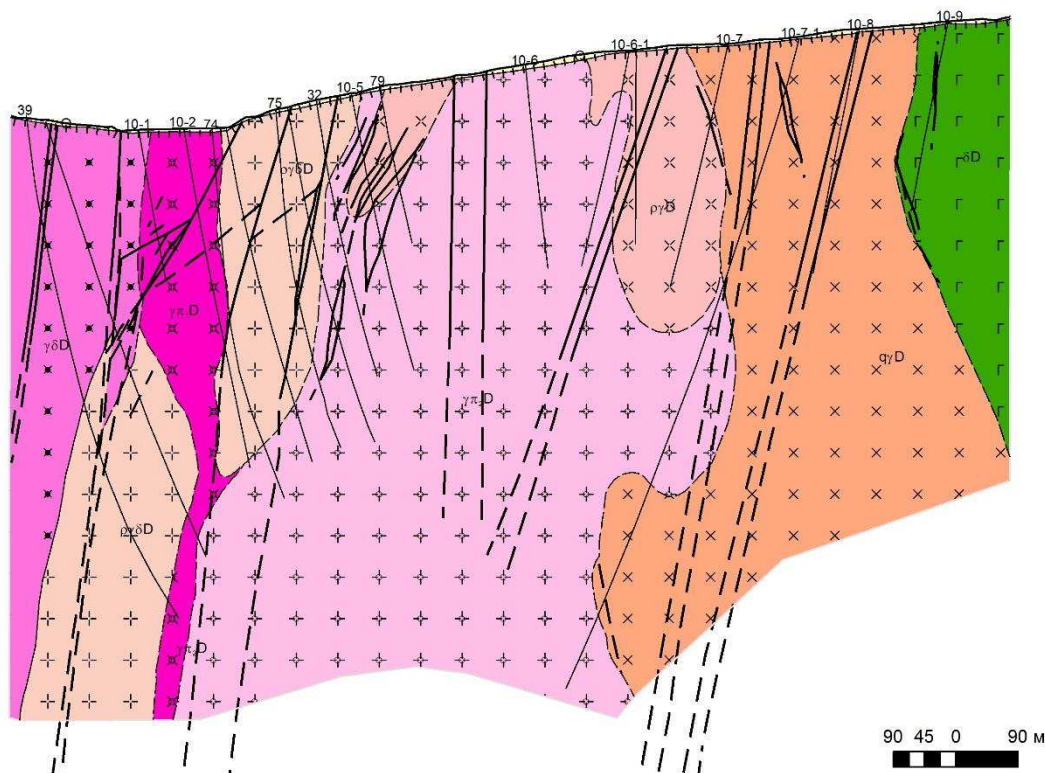


Рисунок 3.3 – Геологический разрез месторождения Ак-Суг по разведочной линии 10.

Условные обозначения на рисунке 3.1

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.

Ведущую роль, определяющую геологическое строение месторождения играют интрузивные образования, представленные Ак-Сугским массивом.

Породы Ак-Сугского комплекса и одноименного массива, развиты на преобладающей части площади рудного поля. Предполагается, что они сформировались последовательно в несколько фаз, образовав при этом обычный гомодромный ряд от диоритов и габбро по южной периферии массива до плагиогранитов и кварц-плагиоклазовых порфиров в его центральной части. Массив имеет клиновидную форму, ориентированную в северо-западном направлении. С севера он ограничен зоной Кандатского глубинного разлома, на

востоке и юго-востоке также по зоне дробления он контактирует с эффузивами хамсаринской свиты и гранодиоритами таннуольского комплекса. Южная и западная границы – тектонические с красноцветными отложениями девона.

По данным предварительной разведки [30] и результатам работ Голевской ГРК в составе массива выделяется три основные группы пород, соответствующие фазам его формирования. Первая представлена габбро, диоритами, кварцевыми диоритами, тоналитами; вторая - порфировидными гранодиоритами, тоналитами, плагиогранитами; третья - порфирами.

Породы первой фазы занимают около 70% площади интрузии и слагают северную, восточную и юго-восточную части. Тоналиты, кварцевые диориты первой фазы расположены в северной части массива. Юг массива сложен средне-основными (от габбро до кварцевых диоритов) породами. Более основные разности пород тяготеют к периферии массива. Среди пород этой группы около 45% объема приходится на диориты.

Габбро в пределах пород первой фазы распространены незначительно – не более 1-3% площади всего массива. Они образуют несколько тел овальной формы среди диоритов. Размеры тел не превышают 100-200 м по длинной оси. Отмечаются ксенолиты габбро в диоритах, наблюдались непосредственные контакты габбро с кварцевыми диоритами.

Кварцевые диориты имеют северо-восточное и юго-восточное распространение, тяготея к центральной части массива представлены роговообманковой разновидностью.

Тоналиты первой фазы развиты в северной части массива. Породы в большинстве своем катаклазированные и интенсивно метасоматически измененные, связано это с непосредственной близостью к Кандатскому разлому. Структура породы катакlastовая, 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.

Породы второй фазы слагают совместно с породами 3 фазы вытянутое в

северо-восточном направлении тело в центральной части интрузии. В северном контакте тело имеет крутое падение на север, в южном – крутое южное. Тело сложено преимущественно порфиroidными по кварцу и плагиоклазу средне-мелкозернистыми тоналитами и плагиогранитами, с востока на запад прослеживается более интенсивная милонитизация пород, отмечаются тонкозернистые разновидности с выраженной сланцеватой текстурой и бластопорфиroidной структурой. Общая особенность пород фазы – наличие порфиroidных вкрапленников, а также высокая степень гидротермальных и метаморфических изменений, породы меняются от фации аргиллизитов до серицит-кварцевых метасоматитов, и от катаклазитов к милонитам.

Породы второй фазы, которые приурочены к восточной части Ак-Сугского массива представлены тоналитами с массивной текстурой и порфиroidной, гипидиоморфозернистой и гранитовой структурой.

Породы второй фазы, тяготеющие к центральной части массива, являются в большинстве своем продуктами дислокационного метаморфизма и представлены милонитизированными и катаклазированными порфиroidными и слабопорфиroidными плагиогранитами. Структура породы порфиroidкласовая, переходящая в милонитовую; структура цементирующей массы катакласовая и лепидобластовая, текстура сланцеватая.

К третьей фазе формирования Ак-Сугского массива отнесено штокообразное, сложно построенное тело порфиroidов в центре массива, с которыми тесно в пространстве и времени связано образование основной части оруденения. Четко обособляется и уверенно диагностируется два типа порфиroidов, различающихся структурно-текстурными особенностями.

Порфиroidы первого типа – более ранние, по составу соответствующие кварц-плагиоклазовым тоналит (гранодиорит) – плагиогранит-порфиroidам, слагают неправильной формы тело (500x300 м) на западном фланге Ак-Сугского массива в зоне его контакта с вулканопластическими образованиями толтаковской свиты. Контакты тела крутые, с преимущественным падением на север с вмещающими этот шток порфиroidными средне-мелкозернистыми

тоналитами-плагиогранитами порфиры имеют 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.

Порфиры второго типа – поздние, по составу соответствующие плагиогранит-порфирам – адамеллит-порфирам, образуют тело неправильной формы в центральной части массива.

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

С порфирами ранней генерации связывают формирование основной массы медно-порфирового оруденения [27]. Поздняя генерация была гораздо менее продуктивной и сопровождалась интенсивным окварцеванием, что привело к образованию в центральной части месторождения «кварцевого ядра».

Кроме охарактеризованных штоков порфиров в Ак-Сугском интрузивном массиве выявлены многочисленные дайки порфиров. Наиболее интенсивно проявлены дайки в висячем блоке штоков порфиров (в долине р. Ак-Суг), трассируя тем самым зону повышенной проницаемости Ак-Сугского разлома. Наиболее яркой диагностической особенностью даек, связанных в той или иной мере с формированием Ак-Сугской 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 послерудным 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.

3.2. Структура месторождения

Структура месторождения определяется строением Ак-Сугского интрузивного массива, вмещающего оруденение, положением его относительно региональных структурных элементов района месторождения, пространственным размещением околорудных и рудовмещающих метасоматитов и рудной минерализации. Интрузивный массив располагается вблизи стыка двух региональных разломов Ак-Сугского и Челдезрикского. Ак-Сугский разлом ограничивает рудоносную интрузию с севера, имеет близширотное простирание и является ветвью Кандатского глубинного разлома. Челдезрикский разлом имеет северо-западную ориентировку, следует вдоль северного борта Даштыгойского грабена, в значительной мере определяя морфологию последнего.

Зона Ак-Сугского разлома выражена мощной полосой дробления, интенсивной трещиноватости и рассланцевания пород (до нескольких сот метров).

В пределах месторождения она представлена отрицательными формами рельефа – долиной р. Ак-Суг. на глубине зона подсечена многими скважинами. Она обычно представлена интервалами развальцевания пород (до тектонической глинки) с частыми кавернами, заполненными сыпучим мелкозернистым материалом преимущественно кварц-полевошпатового состава. Мощность интервалов – от первых до десятков метров.

Зоны развальцевания и дробления имеют преимущественно крутое (70-85°) падение на север и запад – юго-западное простирание, являясь, таким образом, многочисленными мелкими ответвлениями основной структуры широтного простирания. Зона дробления и смятия пород сопровождается широкой полосой трещиноватости, охватывающей практически все рудное поле месторождения. При этом среди систем трещиноватости самой различной

ориентировки преобладает юго-западная при крутом падении в ту или иную сторону. Наблюдаются и пологопадающие трещины, но они распространены в меньшей степени. Наибольшая густота трещин отмечается в пределах Северной рудной залежи и в центральной части месторождения («кварцевом ядре»). Количество трещин при этом составляет от 7-10 до 50-70 на 1 п.м. К югу от «кварцевого ядра» интенсивность трещиноватости уменьшается вдвое-втрое. Преобладающее юго-западное простирание трещиноватости охватывает не только все породы интрузии, но распространяется также и на красноцветные отложения к западу от месторождения.

Челдезрикский разлом, проходящий по долине р. Даштыг-ой, в пределах рудного поля месторождения изучен слабо. Предполагается его северное крутое падение и наличие от него ответвлений субширотного и субмеридионального направлений. Как и Ак-Сугский, Челдезрикский разлом является крупной региональной структурой. Он ограничивает диориты Ак-Сугского массива с юга, и, по всей вероятности, контролировал размещение интрузий аксугского типа в структурах северного обрамления Даштыгойского грабена.

Ак-Сугская интрузия имеет куполовидную асимметричную форму, крутое падение ($70-80^\circ$) контактов в сторону от нее под вмещающие породы. Интрузия имеет зональное строение. С востока и с юга по периферии она сложена диоритами и кварцевыми диоритами первой фазы, составляющими около 75% площади выхода интрузии на поверхность. Контакт кварцевых диоритов с диоритами на юго-восточном фланге крутой ($78-85^\circ$) с падением на юг.

В северной части ее, по правобережью р. Ак-Суг на площади $0,2-0,5*2$ км, развиты тоналиты первой фазы. Центральная и частично западная часть интрузии сложена плагиогранитами-тоналитами второй фазы. Они развиты на площади $1,2*0,7$ км. Контакты тела плагиогранитов-тоналитов под крутыми углами направлены в стороны от него. Установлены дайки и мелкие тела гранитов среди диоритов, как с поверхности, так и на глубине, являющимися, вероятно, апофиозами тела плагиогранитов-тоналитов.

Плагиограниты и тоналиты с запада, а диориты – с юга контактируют с вулканогенно-осадочными породами девона толтаковской свиты. Контакт имеет крутое, под углом 60-80° падение под породы девона в сторону от интрузии. Здесь отмечается довольно сложная его морфология. При относительно ровном крутом его падении на запад под углом 80-75° наблюдается зона перехода мощностью в 20-40 и более метров, где наблюдается перемежаемость милонитов, милонитизированных пород, катаклазитов по интрузивным и вулканогенно-осадочным породам девона, а также метасоматитам преимущественно кварц-серицитового состава с рудной минерализацией. В связи с этими данными, интерпретация контакта может быть следующей - контакт интрузивный, впоследствии осложненный разрывными нарушениями.

Плагиограниты-тоналиты центральной части интрузии вблизи контакта с осадочными породами девона прорваны двумя штоками порфиров. Шток более поздних порфиров (плагиогранит-порфиров) занимает центральное положение. Он имеет практически вертикальное падение контактов с юга, востока и с запада и крутое (под углом 80°) – северное. Шток более ранних порфиров смещен относительно поздних к западу, к контакту Ак-Сугской интрузии с вулканогенно-осадочными породами девона. Этот шток прорывает плагиограниты-тоналиты и имеет более сложную изменчивую форму.

3.3. Характеристика гидротермальных изменений

Гидротермально-метасоматические изменения пород и характер метасоматической зональности на Ак-Сугском месторождении свидетельствует в целом о соответствии Ак-Суга модели типичного медно-порфирового месторождения. Как на многих месторождениях этого типа внешняя зона измененных пород здесь представлена пропилитами, промежуточная образована кварц-серицитовыми метасоматитами и аргиллизитами, а внутренняя сложена существенно кварцевыми метасоматитами. Особенностью

Ак-Сугского месторождения является отсутствие обычно приуроченных к внутренней зоне калиевых метасоматитов с ортоклазом и биотитом.

По породам штоков и вмещающих их плагиогранитам-тоналитам, частично тоналитам и кварцевым диоритам развиваются интенсивное окварцевание и серицитизация с образованием метасоматитов аргиллизитовой и кварц-серицитовой фаций. Аргиллизиты в виде отдельных локальных участков развиваются по кварцевым диоритам, тоналитам, частично по плагиогранитам-тоналитам и порфирам. Кварц-серицитовые и серицит-кварцевые метасоматиты обособляются во внутреннюю зону размером ориентировочно 0,7-1,0 км, они образуются преимущественно по плагиогранитам-тоналитам и породам порфировых интрузий. Внутри кварц-серицитовой зоны выделяется так называемое полуовальное «кварцевое ядро». Ядро имеет штокообразную форму, крутые до вертикальных контактов со склонением к северу под углом около 80°. Породы «ядра» отличаются от кварц-серицитовых метасоматитов интенсивным прокварцеванием, развитием обильных кварцевых прожилков (от 20 до 100 прожилков на 1 п.м). Помимо окварцевания в «ядре» наблюдаются и участки аргиллизированных пород: порфиров и плагиогранитов-тоналитов. Оруденение в пределах характеризуемой интрузии занимает вполне определенное положение. В зоне кварц-серицитовых метасоматитов к северу от «кварцевого ядра» расположено пластинообразное тело богатых руд Северной рудной залежи. Внешним пределом развития промышленного молибденово-медного оруденения служит довольно четкая граница между внешней пропилитовой зоной и внутренней – кварц-серицитовой (филлизитовой). Южным ограничением залежи богатых руд является «кварцевое ядро», породы которого содержат убогую вкрапленность сульфидов с ведущей ролью молибденита.

К югу и востоку от «кварцевого ядра» располагаются бедные по содержанию меди и молибдена руды в пропилитизированных тоналитах и плагиогранитах, а еще южнее – в кварцевых диоритах и диоритах развита преимущественно убогая прожилковая пирит-халькопиритовая минерализация

(Южная залежь). Таким образом, свыше 95% объема рудной массы на месторождении Ак-Суг локализуется в порфирах, порфиroidных плагиогранитах и тоналитах, преобразованных преимущественно в кварц-серицитовые метасоматиты.

Серицитизация проявляется как ведущий процесс в рудообразовании порфировых месторождений, так как является основной составляющей кварц-серицитовых метасоматитов – основных рудовмещающих пород Ак-Сугского медно порфирового месторождения. Пространственное расположение продуктов серицитизации определяет структуру месторождения и контролирует вещественный состав и качественные показатели руд на Ак-Сугском месторождении. Совместно с окварцеванием процесс серицитизации является типоморфным для зон кварц-серицитовых метасоматитов.

Важную роль процесс серицитизации играет в зоне кварцевых метасоматитов, где является вторым по важности процессом после окварцевания.

В пропилитовой зоне серицитизация проявлена слабо и встречается редко. Часто такие участки сопровождаются повышенными содержаниями рудных компонентов, до промышленных, с образованием маломощных линз с промышленными параметрами.

В пределах Южной залежи процесс серицитизации проявился практически по всем разностям пород, от основных до кислых. Характерно пятнистое распределение процесса серицитизации. Но закономерность приуроченности более богатых руд к более интенсивно серицитизированным породам сохраняется. Такое же распределение процесса серицитизации характерно для восточной части Северной залежи.

Кроме того, серицитизация отмечается в прослоях эффузивов преимущественно кислого состава вблизи контактов с интрузивными породами аксугского комплекса.

Окварцевание является вторым по важности процессом метасоматических преобразований, определяющих распределение рудных минералов в составе

Ак-Сугского месторождения. Окварцевание является основным типоморфным процессом в формировании практически безрудной центральной части месторождения – так называемого «кварцевого ядра» вплоть до образования кварцитов.

В зоне кварц-серицитовых метасоматитов процесс окварцевания является вторым по важности в формировании основных рудоконтролирующих пород Ак-Сугского месторождения.

В пределах Северной залежи месторождения расположены участки среднего и слабого окварцевания, где этот метасоматический процесс не сопровождается другими метасоматическими преобразованиями. Такие участки являются практически безрудными.

Среднее и слабое окварцевание присутствует участками и в пропилитовой зоне.

Кроме того, окварцевание отмечено в поле развития эффузивно-осадочных пород толтаковской свиты вблизи контакта с породами аксугского комплекса.

Хлоритизация наиболее всего проявлена в зоне пропилитизации, являясь для нее типоморфным процессом. Область распространения интенсивной хлоритизации пространственно совпадает с участками распространения внешней безрудной пропилитовой зоной.

Пространственно области хлоритизации совпадают с областями распространения эпидотизации. Слабая хлоритизация встречается и в областях развития кварц-полевошпатовых, реже кварцевых метасоматитов. Причем в кварц-полевошпатовых пространственно участки хлоритизации совпадают с понижением содержания полезных компонентов.

Эпидотизация менее распространена чем хлоритизация. Приурочена к внешней пропилитовой зоне. Области ее распространения меньше, чем области распространения хлоритизации. Обычно совпадают с максимумами интенсивности хлоритизации. В кварц-полевошпатовой зоне эпидотизация встречается редко, в кварцевой практически не отмечена.

Распределение эпидотизации в пределах в обрамлении северной залежи не меняется с запада на восток как по интенсивности, так и распространенности процесса. Примерно такая же картина и по Южной залежи. В отличие от Северной здесь эпидотизация развита во всех метасоматических зонах.

Редко процесс эпидотизации отмечается в эффузивных разностях пород толтаковской свиты вблизи контакта с породами ак-сугского комплекса.

Карбонатизация наименее распространенный метасоматический процесс на месторождении чем ранее описанные. Она проявляется, как во внешней пропилитовой зоне, так и в пределах Северной, так и Южной рудных залежах. Более всего процесс карбонатизации проявлен в основных породах первой фазы. Для пород второй и особенно третьей фаз данный процесс менее характерен.

Карбонатизация отмечена так же в эффузивно-осадочных породах толтаковской свиты вблизи контакта с породами Ак-Сугского комплекса.

Гематитизация образует зоны, реже изометричные участки незначительных размеров, тяготея к местам повышенной трещиноватости и брекчирования пород. Чаще всего гематитизация проявлена по породам второй и третьей фаз аксугского комплекса. В пределах Северной рудной залежи, в ее западной богатой части, отмечается связь процесса гематитизации к зоне кварц-полевошпатовых метасоматитов. Максимальная интенсивность процесса приурочена к наиболее богатым частям залежи. На востоке гематитизация проявляется, как в пропилитах, так и в кварц-серицитовых метасоматитах. В Южной залежи, где имеет место сложное взаимоналожение разных метасоматических зон гематитизация развита по всей залежи во всех типах метасоматитов по породам всех трех фаз аксугского комплекса.

Процесс гематитизации также проявлен на контакте эффузивно-осадочных пород девона с породами аксугского комплекса на западе месторождения. Полоса гематитизации, преимущественно по породам аксугского комплекса хорошо фиксируется по разрезам от 2 до 5. Так же процесс гематитизации наблюдается и в пределах эффузивно осадочных пород

толтаковской свиты, где наиболее интенсивное его проявление тяготеет с ослабленным зонам повышенной трещиноватости.

Калишпатизация достаточно хорошо проявленный процесс в пределах Ак-Сугского месторождения. В распределении метасоматитов данного типа на месторождении не отмечается какой-либо закономерности. Распределение калишпатизации и ее интенсивность не обнаруживают связи с качеством руды.

Метасоматическая зональность месторождения Ак-Суг согласуется со структурой Ак-Сугского интрузивного массива и структурой связанного с ним оруденения (рисунок 3.4.)

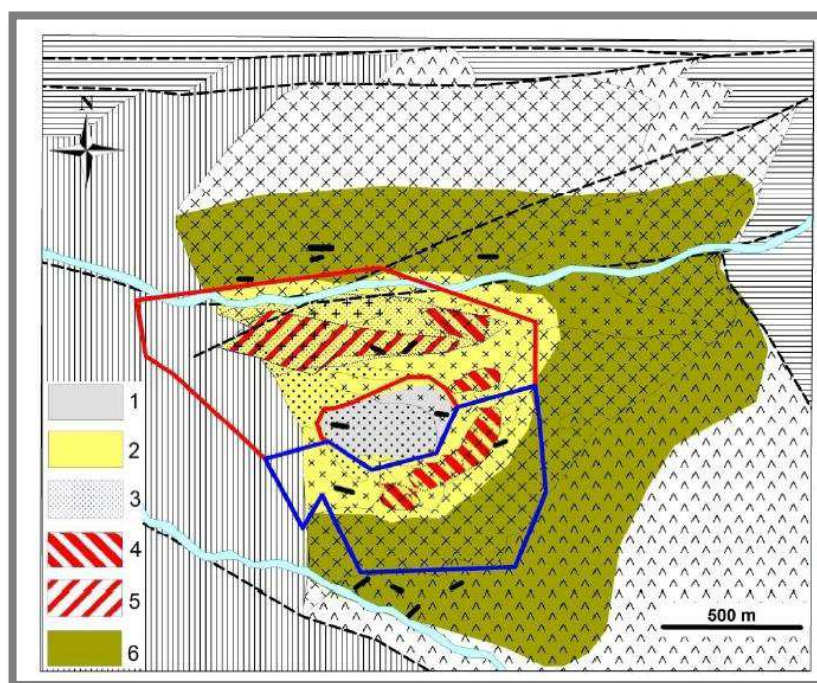


Рисунок 3.4. - Схема метасоматической зональности месторождения Ак-Суг.

1 - Интенсивное окварцевание (кварцевое ядро), 2 – Кварц-хлорит-серицитовые, 3 – Кварц-серицит-хлоритовые, 4 – Калишпатизация, 5 – Реликты зоны биотизации, 6 – Пропилиты[33]

Вместе с тем в рудном поле в качестве внешнего ореола развиты ранние кварц-калишпатовые прожилки с халькопиритом и пиритом в диоритах, кварцевых диоритах и гранодиоритах, т.е. в породах первой фазы. Вероятно, отсутствие широкого проявления калиевого метасоматоза может быть объяснено натровым уклоном магматизма при становлении Ак-Сугской интрузии.

Предполагается, что в процессе становления интрузии отделение восходящих флюидов было неоднократным, что и привело вначале к формированию связанной с ранней фазой обширной зоны пропилитизации, а затем – обусловленной внедрением более кислых по составу поздних фаз – калиевого, кварц-серицитового и кварцевого метасоматоза и аргиллизацией. Образование большей части промышленного молибденово-медного оруденения произошло вслед за внедрением порфиоров ранней генерации. С поздней фазой порфиоров, по-видимому, связано переотложение ранее образовавшихся руд и формирование богатых скоплений в виде круто падающей пластинообразной залежи, ориентированной в широтном направлении в трещинной зоне Ак-Сугского разлома.

Поздняя фаза была рудоносной в гораздо меньшей степени, чем первая, и сопровождалась интенсивным окварцеванием, что привело к образованию в центральной части месторождения «кварцевого ядра». К северу от него развита кварц-серицитовая зона с богатыми молибденово-медными рудами, затем следует пропилитовая с преимущественно прожилковой минерализацией пирита. Гипогенные минеральные ассоциации отложились на месторождении минимум в восемь стадий, разделенных катаклазом. Рудный процесс завершился формированием ангидрит-гипсовых прожилков.

В целом представляется, что образование многофазной гранитоидной интрузии и связанного с ней оруденения на месторождении Ак-Суг происходило длительное время, поскольку породы ранних фаз интрузии обнаруживаются в гальке отложений нижнего-среднего девона, а процесс аргиллизацией и одна из поздних минеральных ассоциаций (халькозиновая) наложены на последние.

В формировании метасоматической зональности месторождения принимают многочисленные метасоматические процессы, взаимоотношение которых создает сложную рудно-метасоматическую структуру, определяющую сложное строение месторождения Ак-Суг.

3.4. Особенности минералого- геохимической зональности

Рудный штокверк имеет нечёткие границы и условно ограничивается по содержанию условной меди в 0,3%. Штокверк представляет собой кольцеобразную залежь с зауженной западной и широкими южной и восточной частями кольца. Кольцеобразное очертание зоны молибденово-медного оруденения обусловлено его приуроченностью преимущественно к кварц-серицитовым метасоматитам, локализующимися вокруг изометричного крутопадающего «кварцевого ядра». [34]

В качестве материалов для изучения геохимических полей месторождения Ак-Суг использовались результаты аналитических исследований групповых проб (7451 шт) в пределах рудного тела по бортовому содержанию условной меди 0,3%. Групповые пробы направлялись ICP-AR, PG - растворение в царской водке с последующим определением основных элементов методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой, (количественный анализ на 40 элементов: Ag, Al, As, Ba, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, Fe, Ga, Hg, K, La, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, P, Pb, S, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Ta, Te, Ti, Tl, V, W, Y, Zn, Zr). Тантал, теллур, таллий, вольфрам и олово были исключены поскольку их концентрации во всех проанализированных пробах находятся ниже порога обнаружения.

Во внутренней рудной зоне концентрации указанных выше элементов распределены достаточно неравномерно. Для выделения основных геохимических ассоциаций по групповым пробам, отобранных из рудной зоны месторождения, в программе STATISTICA выполнен факторный анализ, который позволил выделить 5 ассоциаций элементов (по уменьшению факторного коэффициента): M1 (V-Mg-Al-Ti-Ga-Sc-Y-Ni-Na-P-Li-Mn-Cr-Ca-Fe-La); M2 (Fe-Co-S-P-Zr-Li-Ca); M3 (Pb-Zn-Cd); M4 (Ce-La-P-Y-K-Zr-Na-Ga-Al); M5 (Cu-As-Bi-Sb-Hg-Mo-Ag-Se-Ba-Re-Zr-K-Au)

Как видно из графиков (Рисунок 3.5., 3.6.) ассоциации элементов довольно изменчивы как по падению, так и простиранию рудного тела.

В ходе дальнейшего изучения закономерностей распределения концентраций проанализированных элементов в обоих направлениях произведен расчет значений показателей зональности по методике предложенной С.В. Григорьяном [31] предполагающей ранжирование элементов по положению максимума их относительной продуктивности. Относительная продуктивность (показатель зональности) представляет собой отношение продуктивности ореола данного элемента к сумме продуктивностей ореолов всех элементов-индикаторов оруденения. Согласно методике С.В. Григорьяна, при расчетах показателя зональности используются линейные продуктивности ореолов, представляющие собой произведение ширины ореола в данном сечении на среднее содержание химического элементов. В нашем случае, использовалась не линейная продуктивность, а объемная. Т.е. концентрации химических элементов умножались на совокупный объем элементарных блоков блочной модели, ограниченных горизонтами и разведочными линиями. В случае ряда вертикальной зональности, в левой части ряда располагаются элементы максимальные показатели зональности, которые локализованы на верхних частях разреза, и наоборот. Для ряда зональности по простиранию местом отсчёта служил участок между разведочными линиями 2-4. При приуроченности максимальных значений показателя зональности к одинаковым пространственным уровням, положения элементов в ряду зональности, согласно методике, изложенной в [31] уточнялось с учетом градиента показателя зональности.

По результатам выполненных расчётов, ряд продольной (от участка РЛ 2-4 до РЛ 14-15, т.е. с запада на восток) следующий: Fe-Co-Ag-K-Se-Bi-Sb-Zr-Cd-Mn-Zn-Nb-Hg-Mo-Au-As-Sc-Re-Cu-Ca-Ce-Y-La-S-Ni-Ti-V-Li-Al-Mg-Ga-P-Ba-Na, а осевой (сверху вниз) ряд зональности имеет вид: Ti-V-Li-Mg-Cr-La-Al-Ni-Ce-Y-Sc-P-Na-Zr-Mo-Pb-Cd-Re-Zn-Ca-K-Ga-Ba-Hg-Sr-As-Sb-Mn-Au-S-Co-Fe-Se-Nb-Cu-Bi-Ag.

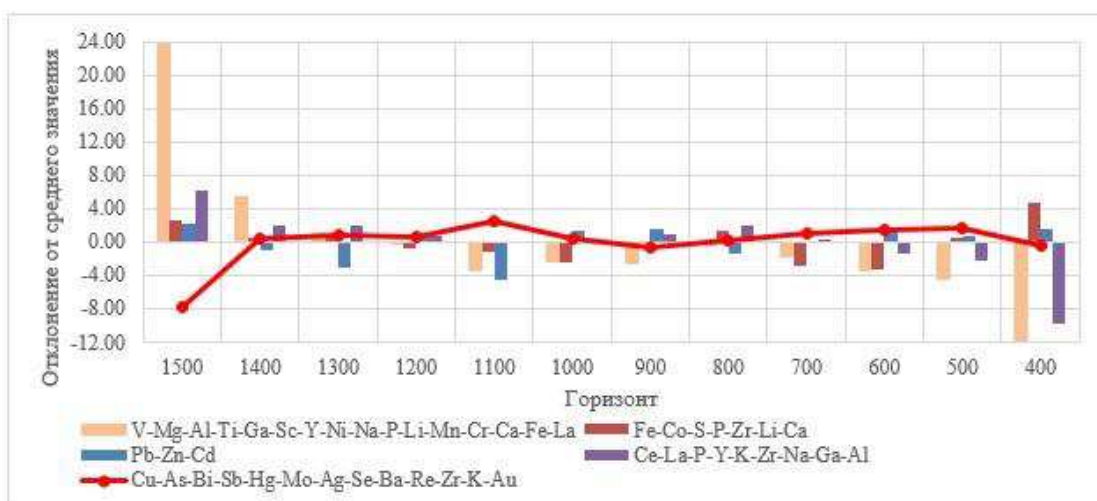


Рисунок 3.5. - Распределение ассоциаций элементов по горизонтам рудного тела

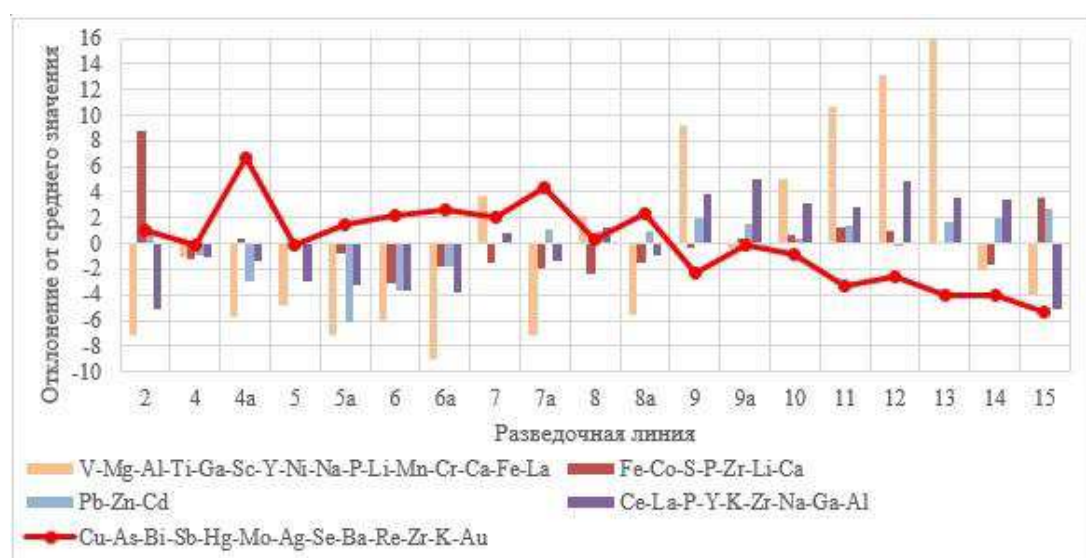


Рисунок 3.6. - Распределение ассоциаций элементов по простиранию рудного тела

Основными элементами, определяющими промышленную ценность месторождения Ак-Суг, являются медь, золото и молибден. Попутно могут извлекаться серебро и рений, которые содержатся в рудах в экономически значимом количестве. Кроме того, в сульфидных концентратах установлены высокие концентрации платиноидов (Pd 924мг/т, Pt 96мг/т), а в борнит-халькопирит-теллуридных рудах выявлены минералы Pd - меренскит и арсенопалладинит. Таким образом по своему элементному составу Ак-Суг относится к Мо-Аи-Си-порфировым месторождениям и обладает многими геохимическими чертами, присущими этому типу месторождений.

На современном эрозионном уровне месторождение Ак-Суг выделяется вторичными геохимическими аномалиями меди и молибдена с

изоконцентрами, соответственно, 0,01% и 0,0003% (Забелин, 1992), которые охватывают практически все охарактеризованные выше минеральные и гидротермальные (включая пропилиты) зоны. Строение первичного геохимического поля месторождения Ак-Суг полностью отражает основные особенности его минеральной зональности.

Приповерхностный первичный ореол меди очерченный по изолинии 0,3% имеет кольцеобразную форму с «пустой» центральной частью («кварцевое ядро») и пространственно соответствует пирит-халькопиритовой минеральной зоне. 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, что свидетельствует о золотоносности поздней блеклорудной ассоциации. По всей вероятности, с ней же связано и серебро, ореолы которого принципиально схожи с медными и золотыми.

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.

4. Выделение поисковых критериев и признаков

При выполнении данной работы были проанализированы результаты работ предшественников, и на основании этого была предложена прогнозно-поисковая модель медно-порфирового оруденения для Ак-Сугского рудного узла. При успешной заверке данной прогнозно-поисковой модели на исследуемой площади с некоторыми доработками её можно постараться применить для Восточного Саяна при поиске аналогичного оруденения.

4.1. Региональные поисковые критерии и признаки медно-порфирового оруденения и методика их интерпретации

К региональным поисковым критериям, участвующим в построении карты прогноза по площади рудного узла отнесены две группы критериев магматические и структурно-тектонические.

4.1.1. Геологические критерии

– рудоносные порфировые интрузивы (Ак-Сугский комплекс D?), слагающие небольшие штоки и субвулканические тела, несущие и вмещающие основную массу медного оруденения.

4.1.2. Структурно-тектонические критерии

- зона влияния регионального Кандатского разлома
- субширотные, северо-западного и северо-восточного простирания зоны разломов и узлы их пересечения, определяющие локализацию рудоносных порфировых интрузий, медных проявлений, пунктов минерализаций и зон околорудных гидротермальных изменений; Они выделены как зоны повышенной плотности разрывных нарушений;
- границы унаследованных девонских впадин);

– области праводвигового растяжения, контролирующие размещение девонских наложенных впадин рифтового типа. К ним относятся правосторонние сдвиги аномалий регионального гравитационного поля, находящиеся в конфигурации междвигового растяжения;

– области сопряжения субширотных нарушений и осевых линий праводвигового сжатия, выделенные по данным магнитометрии, контролирующие распределение месторождений медно-порфирового типа в пределах лицензионной площади.

– области междвигового сжатия, контролирующие очаги гранитизации и связанные с ними зоны разуплотнения, определяющие ареалы развития рудных месторождений флюидогенной природы (в том числе медно-порфировых).

4.1.3. Поисковые признаки

Поисковые признаки следует разделить на две группы по степени их значимости (прямые и косвенные).

1. *Прямые поисковые признаки:*

– месторождения и рудопроявления меди. Отражают наличие рудных пересечений с промышленными концентрациями условной меди

– пункты минерализации меди и молибдена;

– вторичные моноэлементные геохимические аномалии меди и молибдена;

– комплексные геохимические аномалии, построенные на основе рудного фактора (Cu-As-Bi-Sb-Hg-Mo-Ag-Se-Ba-Re-Zr-K-Au), выделенного на эталонном Ак-Сугском месторождении;

– шлиховые ореолы меди и молибдена.

2. *Косвенные поисковые признаки:*

– месторождения и рудопроявления сопутствующих металлов (золото, молибден);

- пункты минерализации свинца и цинка;
- пункты минерализации золота;
- вторичные моноэлементные геохимические аномалии сопутствующих металлов (Au, Pb, Zn);
- моноэлементные геохимические аномалии прочих металлов (редкие земли);
- шлиховые ореолы золота;
- участки локальных аномалий калия, отражающие процессы околорудного метасоматоза;
- биполярные аэромагнитные аномалии. Осевые линии сопряженных между собой положительных и отрицательных аэромагнитных аномалий, отражающие процесс перехода магнетита в пирит

Области выхода пород *Ак-Сугского комплекса* были конвертированы непосредственно из векторной геологической карты в бинарный растр со значениями ячеек 0 (нет пород) либо 1 (есть породы).

Для построения критерия *разломов* был проведен анализ направлений всех тектонических нарушений, попадающих в лицензионную площадь. Для этого оцифрованные линейные объекты разломов были разбиты на вершинах на простые линейные отрезки. Для отрезков были вычислены азимуты простирания и построена частотная гистограмма, по которой стало возможно выделить три преимущественных направления разломов (рисунок 4.1., 4.2.). Шаг для разбиения разломов по направлениям был выбран равным 5 градусов. Частотность встречаемости вычислялась не по количеству отрезков данного направления, а по их суммарной длине, что дает более точную картину. Выделены следующие направления. Наиболее распространённое - 82,5-102,5 градуса. Два менее заметных – 51,5-72,5 и 107,5-127,5.

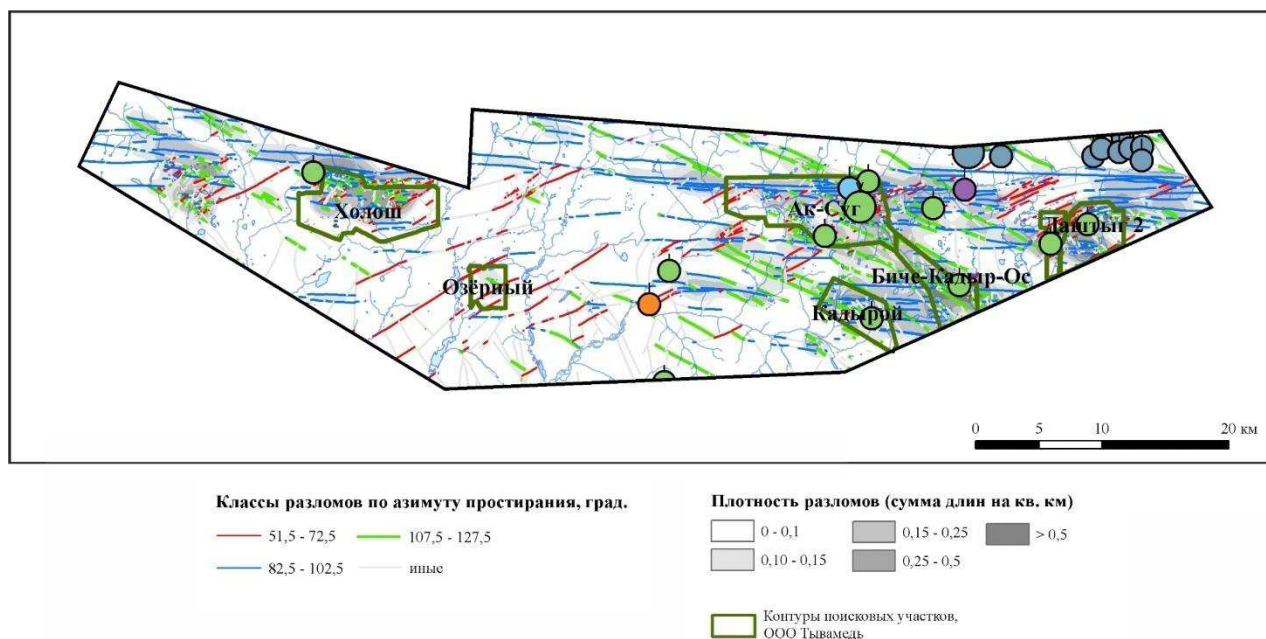


Рисунок 4.1. – Характер разрывной тектоники

Для построения критерия были использованы тектонические нарушения только этих трех диапазонов простирания. Построение проведено при помощи функции ArcGIS «Плотность линий». Она вычисляет суммарную длину линий в окне поиска и делит на его площадь. Было использовано круглое окно поиска диаметром 50 ячеек растра (20 на 20 м). Для каждого диапазона направлений построен отдельный растр.

Полученные растры плотностей были нормированы к единице и переклассифицированы на два класса для получения бинарного растра: менее 0,5 – ноль и более 0,5 – единица.

Вокруг *Кандатского разлома* средствами ArcGIS были построены буферные зоны шириной в 1000 м. Буферы были конвертированы в бинарный растр, аналогичный растру Аксугского комплекса.

Ближайшие окрестности *девонских впадин*. Для построения этого критерия были вручную оцифрованы контуры впадин. При оцифровке учитывались как выходящие на поверхность, так и скрытые под четвертичными отложениями породы девона. От этих контуров были построены и также переведены в бинарный растр буферные зоны шириной по 1000 м.

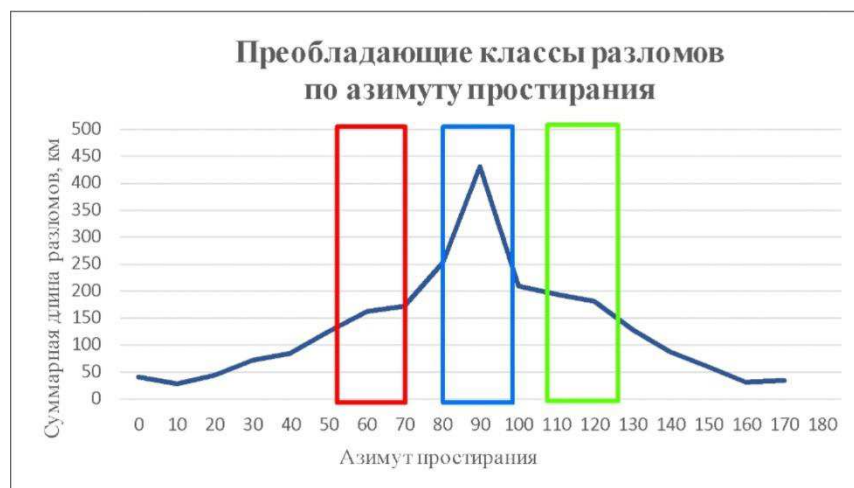


Рисунок 4.2 – Преобладающие направления разломов по простираению.

Субширотные тектонические зоны, выделенные по данным аэромагнитометрии, представляют собой буферные зоны шириной 1 км вокруг осей низкочастотных (имеющих глубокое заложение: 3-4 км) отрицательных по знаку магнитных аномалий преимущественно субширотного простираения. Данный геофизический критерий отражает, по нашему мнению, субширотные структурные нарушения Ак-Сугского рудного узла, важные с прогнозной точки зрения - кулисную структуру линейного типа, трассирующую Кандатский глубинный разлом и субпараллельную ему структуру в ~ 9 км к югу.

Области праводвигового растяжения, контролирующие размещение девонских наложенных впадин рифтового типа, выделены по данным анализа гравитационного поля. В качестве количественной меры для бинарного выделения этих областей использовались значения потенциала растяжения в диапазоне значений 0,02-1,0 отн. ед.

Зоны праводвигового и леводвигового сжатия. Эти два геофизических критерия выделены на основе структурного анализа магнитного поля Ак-Сугского рудного узла и отражают условия тектонического сжатия, необходимые для функционирования флюидогенных систем медно-порфирового типа. Анализ азимутального распределения осей право- и леводвигового сжатия показал, что первые (праводвиговые) отражают режим транспрессии, действовавший, вероятнее всего, вдоль тектонических нарушений северо-западного направления, а вторые (леводвиговые) – северо-

восточного (рисунок 4.3.). Этот вывод подтверждается хорошим совпадением азимутов главных мод осей право- и левосдвигового сжатия (71° и 116°) с направлениями простирания разломов ($51,5^\circ$ - $72,5^\circ$ и $107,5^\circ$ - $127,5^\circ$), выделенных на рисунке 4.1. Таким образом, предлагаемый геофизический критерий является важным дополнением *критерия разломов*, придавая последнему геодинамический смысл, необходимый для прогнозирования объектов медно-порфирового типа. В качестве количественной меры для бинарного выделения зон право- и левосдвигового сжатия использовались значения потенциала сжатия в диапазоне 0,02-1,0 отн. ед., рассчитанные согласно методике, изложенной в работе [35].

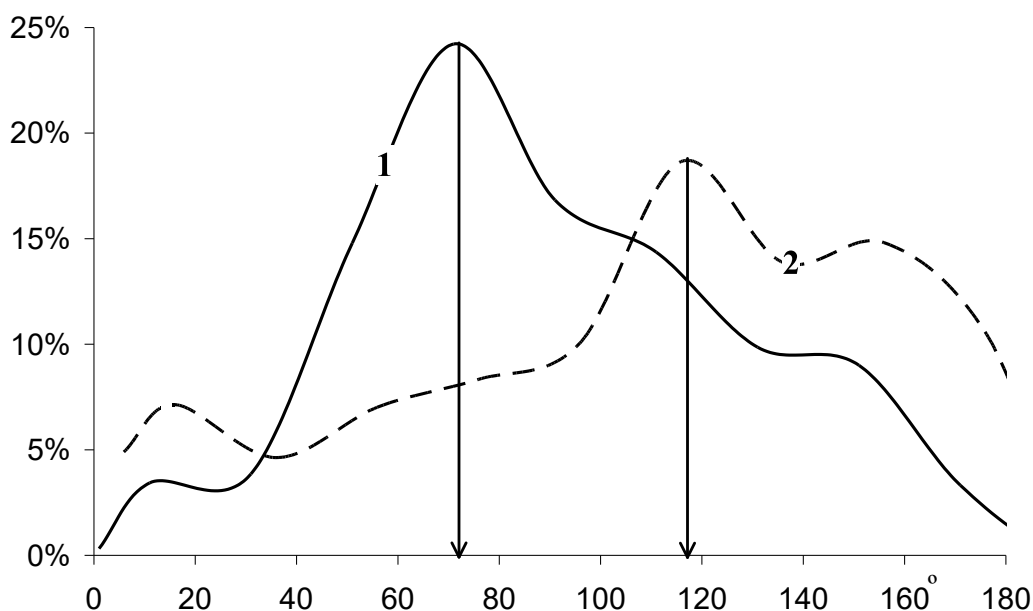


Рисунок 4.3 Преобладающие азимуты осей трансгрессивного сжатия в пределах Ак-Сугского рудного поля: 1 – левосдвигового; 2 – правосдвигового

Радиохимические аномалии калия выделены по данным аэрогаммаспектрометрии и отражают процессы околорудного метасоматоза (серицитизации горных пород). Для увеличения контрастности выделялась часть этих аномалий, некоррелированная с торием – эпигенетические аномалии, связанные с привнесом калия в горные породы. Уровень аномальности оценивался экспертно, исходя из максимальной контрастности и локальности

аномалии калия вблизи объекта-эталона (месторождение Ак-Суг), и выбран на уровне содержаний калия $>0.12\%$.

Биполярные аэромагнитные аномалии, отражающие процесс перехода магнетита в пирит, были выделены визуально из карты магнитного поля Ак-Сугского рудного узла, опираясь на результаты анализа связи магнитной восприимчивости и содержаний меди по данным каротажа разведочных скважин месторождения Ак-Суг и структуры магнитного поля на месторождении. Непосредственно в качестве признака была выбрана буферная зона шириной 500 м вокруг осевых линий положительной и отрицательной ветвей 12-ти биполярных аномалий.

Региональные геофизические критерии и признаки, использованные для прогнозирования медно-порфирового оруденения собраны воедино в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Региональные геофизические критерии и признаки объектов медно-порфирового типа

№ ппё	Критерии	Описание критерия	Примечания	Вес, усл. Ед
1	2	3	4	5
Структурно-тектонические критерии				
1	Субширотные тектонические зоны, выделенные по данным магнитометрии	Осевые линии низкочастотных магнитных аномалий отрицательного знака	Буфер 1 км	1
2	Области правоствигового растяжения, контролирующее размещение девонских наложенных впадин рифтового типа	Правосторонние сдвиги аномалий регионального гравитационного поля, находящиеся в конфигурации междвигового растяжения	Значения потенциала междвигового растяжения в диапазоне значений 0,02-1 отн. ед.	1

Продолжение таблицы 4.1.

1	2	3	4	5
3	Зоны правосдвигового сжатия, благоприятные для флюидогенеза	Правосторонние и левосторонние сдвиги аэромагнитных аномалий, находящиеся в конфигурации междвигового сжатия	Значения потенциала междвигового сжатия в диапазоне значений 0,02-1 отн. ед.	1
	Зоны левосдвигового сжатия, благоприятные для флюидогенеза			1
Косвенные				
1	Локальные аномалии калия, отражающие процессы околорудного метасоматоза	Положительные аномалии калия со снятой положительной корреляцией с торием (эпигенетические аномалии калия)	>0,12 %	1
2	Биполярные аэромагнитные аномалии (положительная ветвь)	Осевые линии сопряженных между собой положительных и отрицательных аэромагнитных аномалий	Буфер 0,5 км	1
	Биполярные аэромагнитные аномалии (отрицательная ветвь)			2

Для построения растров *месторождений, рудопроявлений и пунктов минерализации* вокруг этих объектов, отдельно для каждого металлического типа, были построены буферы шириной 250 м, а буферы конвертированы в бинарные растры.

Моноэлементные геохимические аномалии для построения региональной прогнозной карты были представлены в виде полигональных шейп-файлов. Они были непосредственно конвертированы в бинарные растры (по одному растру на каждый элемент). Для построения прогнозных карт детализационных участков использовались растры вторичных геохимических полей. Эти растры

были переклассифицированы на два класса: ниже трех стандартных отклонений над фоном (0) и выше его (1).

Шлиховые аномалии представлены как в форме полигональных шейп-файлов, так и в виде линейных потоков рассеяния и точечных объектов. Для линейных и точечных объектов перед конвертацией в растр также были построены буферы шириной 250 м.

Комплексные геохимические аномалии рудного фактора для региональной прогнозной карты построены на основе данных предшественников, представленных в виде полигональных шейп-файлов с моноэлементными аномалиями. Все аномалии (для каждого элемента по отдельности) были переведены в форму бинарного растра со значениями 0 или 1. Растры были умножены на значения рудного фактора и суммированы калькулятором растра из Набора инструментов «Алгебра карт» ArcGIS.

Полученный суммарный растр с дискретными значениями был переведен в форму с плавным изменением поля путем сглаживания с помощью функции ArcGIS «Фокальная статистика». Для сглаживания применялось круглое окно поиска диаметром 50 ячеек растра, в котором вычислялось среднее значение по всем попавшим в окно ячейкам.

Полученный растр был нормирован к единице путем деления на максимальное значение. Нормированный растр был переклассифицирован таким образом, что все ячейки, имеющие значение более 0.2, получили значение единица, а остальные – ноль.

Таблица 4.2 – Значения рудного фактора для элементов, входящих в рудную геохимическую ассоциацию по данным факторного анализа

Элемент	Значение рудного фактора, усл.ед.	Элемент	Значение рудного фактора, усл.ед.
Au	0,23	Bi	0,53
Ag	0,37	Cu	0,67
As	0,61	Mo	0,38
Ba	0,31	Zr	0,27

Комплексные геохимические аномалии рудного и редкоземельного факторов для прогнозных карт детализационных участков построены на основе данных литогеохимического опробования. Значения факторов были подсчитаны индивидуально для каждой точки опробования и после по этим данным построены непрерывные поля.

При подсчете была использована следующая методика. На первом этапе данные о содержании элементов были нормированы к фоновому значению по формуле $S_n = (C - C_f) / \sigma$, где S_n – нормированное значение, C – измеренная концентрация, C_f – фоновое значение, σ – стандартное отклонение по фоновой выборке. Затем нормированное значение каждого из элементов было умножено на значение коэффициента участия элемента в факторе. Затем путем суммирования полученных произведений были вычислены два геохимических фактора: рудный и редкоземельный.

Для каждого участка набор элементов для формирования факторов был разным, так как от участка к участку разнятся списки проанализированных элементов. На участках Озёрный и Даштыг списки элементов, входящих в рудный фактор, существенно короче. Так как значение фактора вычисляется суммированием и зависит от количества слагаемых, величины факторов для этих участков получились ниже, чем для остальных.

Таблица 4.3 – Списки элементов, входящих в расчет геохимических факторов

Участок	Рудный фактор F5	Редкоземельный фактор F4
Биче-Кадыр-Ос	As, Ba, Cu, K, Mo, Zr	Al, Ce, Ga, K, La, Na, P, Y, Zr
Даштыг	As, Cu, K, Mo	Ce, K
Озёрный	As, Cu, Mo	Ce, La, Y
Холош	As, Ba, Cu, K, Mo, Zr	Al, Ce, Ga, K, La, Na, P, Y, Zr
Аксуг	As, Ba, Cu, K, Mo, Sb, Zr	Ga, K, La, Na, P, Y, Zr

Поля распределения геохимических факторов были построены с помощью инструмента ArcGIS «GeostatisticalAnalyst». При построении был использован метод обратно взвешенного расстояния (ОВР) со скользящим окном 600 на 150 м, вытянутым поперек профилей. Затем поля были конвертированы в формат растра и сглажены инструментом «Фокальная статистика» с окном размером 5 ячеек, для упрощения формы изолиний. Также из растров были получены изолинии по списку значений (функция ArcGIS «Изолинии по значениям»).

Распространённость *вторичных изменений* и *эруптивных брекчий* учитывалась только при построении прогнозных карт детализационных участков. Вторичные изменения представлены в виде полигональных и линейных шейп-файлов, брекчии – в виде точечных или полигональных объектов. Вокруг линейных и точечных объектов были построены буферы шириной 250 м. Буферные зоны объединены путем слияния с полигональными зонами соответствующего типа и конвертированы в бинарный растр. Для каждого типа вторичных изменений был создан отдельный растр.

Ореолы развития дайкового комплекса также использованы только для детальных прогнозных карт. Ореолы были оцифрованы вручную, опираясь на визуальный анализ взаимного расположения даек. Выделенные зоны были конвертированы в бинарный растр.

В связи с наличием на лицензионной площади только одного объекта-эталона (Ак-Сугское месторождение) присвоение весов критериям и признакам производилось с помощью метода экспертной оценки по десятибалльной шкале (0 – критерия или признака нет, 10 – основополагающий критерий или признак оруденения) Результатом стала таблица критериев и признаков медно-порфирового оруденения Ак-Сугского рудного узла (таблица 4.4).

Все растры распределения отдельных критериев и признаков были умножены на значения их весовых характеристик, отражающих степень связи с медно-порфировым оруденением и присвоенных им на основании экспертных оценок (таблица 4.4). Полученные растры суммированы. Суммирование, как и умножение растров осуществлены с помощью функции «Калькулятор растра» ArcGIS. Наборы растров для составления суммарной прогнозной карты для разных участков несколько отличаются (см п 4.2, таблица. 4.5). Суммарный растр, для лучшей читаемости, был сглажен функцией ArcGIS «Фокальная статистика». При сглаживании применено круглое окно радиусом 1000 м.

Совокупный анализ геолого-геохимических и геофизических данных по Ак-Сугскому месторождению, рудному узлу и поисковым участкам, позволил предложить набор поисковых критериев, определяющих закономерности размещения оруденения на изучаемой площади.

Таблица 4.4 – Таблица критериев и признаков медно-порфирового оруденения Ак-Сугского рудного узла

№ ппё	Критерии	Описание критерия	Параметры критерия	Вес, усл. ед
1	2	3	4	5
Магматические критерии				
1	Рудоносные порфировые интрузивы (Ак-Сугский комплекс D?)	Слагает небольшие штоки и субвулканические тела, несущие и вмещающие основную массу медного оруденения	Есть-нет	10
Структурно-тектонические критерии				
2	Зона влияния кандатского разлома	Контролирует размещение интрузий Ак-сугского комплекса	Двухсторонний буфер 1 км	2
3	Зоны повышенной плотности разрывных нарушений субширотные	Определяют локализацию рудоносных порфировых интрузий, медных проявлений, пунктов минерализаций и зон окolorудных гидротермальных изменений	Плотность разломов (нормированная к 1) больше 0.5	4
	Зоны повышенной плотности разрывных нарушений северо-западного простирания			3
	Зоны повышенной плотности разрывных нарушений северо-восточного простирания			1
4	Границы унаследованных девонских впадин	Индикаторы процессов тектоно-магматической активизации, благоприятных для внедрения рудоносных интрузий	Внешний буфер, 1 км	3
5	Субширотные тектонические зоны, выделенные по данным магнитометрии	Осевые линии низкочастотных магнитных аномалий отрицательного знака	Буфер 1 км	1

Продолжение таблицы 4.4

1	2	3	4	5
6	Области праводвигового растяжения, контролирующее размещение девонских наложенных впадин рифтового типа	Правосторонние сдвиги аномалий регионального гравитационного поля, находящиеся в конфигурации междвигового растяжения	Значения потенциала междвигового растяжения в диапазоне значений 0-1 отн. ед.	1
7	Зоны праводвигового сжатия, благоприятные для флюидогенеза	Правосторонние и левосторонние сдвиги аэромагнитных аномалий, находящиеся в конфигурации междвигового сжатия	Значения потенциала междвигового сжатия в диапазоне значений 0-1 отн. ед.	1
	Зоны леводвигового сжатия, благоприятные для флюидогенеза			1
Прямые				
1	Месторождения и рудопроявления меди	Отражают наличие рудных пересечений с промышленными концентрациями условной меди	Буфер 1 км	10
2	Пункты минерализации меди и молибдена	Несут в различных сочетаниях набор рудных минералов (пирит, халькопирит, молибденит, магнетит; на ряде объектов – борнит, халькозин, энаргит) в виде гнезд, вкрапленности и прожилков	Буфер 1 км	5

Продолжение таблицы 4.4

1	2	3	4	5
3	Комплексные геохимические аномалии рудного фактора (Cu-Mo-As-Bi-Sb-HgAg-Se-Ba-Re-Zr-K-Au), выделенного на эталонном Ак-Сугском месторождении	Мультипликативный показатель на основе моноэлементных геохимических аномалий с присвоенным им факторным весом	Выбраны площади с нормированным факторным весом более 0,2	4
4	Моноэлементные геохимические аномалии меди	По данным Н.С. Анастасиева, А.Г. Еханина, В.А. Габеева, В.В.Ковалевича	Есть-нет	3
	Моноэлементные геохимические аномалии молибдена			3
5	Шлиховые ореолы меди	По данным Н.С. Анастасиева, А.Г. Еханина, В.А. Габеева, В.В.Ковалевича	Для потоков рассеяния и точечных объектов построены буферы 250 м	2
	Шлиховые ореолы молибдена			2
Косвенные				
1	Месторождения и рудопроявления сопутствующих металлов (золото, молибден)	По данным Н.С. Анастасиева, А.Г. Еханина, В.А. Габеева, В.В.Ковалевича	Буфер 1 км	8
2	Пункты минерализации свинца и цинка	По данным Н.С. Анастасиева, А.Г. Еханина, В.А. Габеева, В.В.Ковалевича	Буфер 1 км	3
	Пункты минерализации золота		Буфер 1 км	3

Продолжение таблицы 4.4

2	3	4	5	
3	Моноэлементные геохимические аномалии сопутствующих металлов (золото, свинец, цинк)	По данным Н.С. Анастасиева, А.Г. Еханина, В.А. Габеева, В.В.Ковалевича	Есть-нет	2
	Моноэлементные геохимические аномалии прочих металлов (редкие земли)			1
4	Шлиховые ореолы золота		Для потоков рассеяния и точечных объектов построены буферы 250 м	2
5	Локальные аномалии калия, отражающие процессы околорудного метасоматоза	Положительные аномалии калия со снятой положительной корреляцией с торием (эпигенетические аномалии калия)	>0,12 %	1
6	Биполярные аэромагнитные аномалии (положительная ветвь)	Осевые линии сопряженных между собой положительных и отрицательных аэромагнитных аномалий	Буфер 0,5 км	1
	Биполярные аэромагнитные аномалии (отрицательная ветвь)			2

4.2. Локальные поисковые критерии и признаки

К локальным критериям, которые будут использованы для построения карт автоматизированного прогноза по поисковым участкам стоит отнести те же геологические и структурно-тектонические критерии, исключив зону влияния Кандатского разлома, которая будет учтена в виде зон повышенной плотности субширотных тектонических нарушений и области правосдвигового растяжения, контролирующей размещение девонских наложенных впадин рифтового типа в связи с их неравномерным распространением в пределах поисковых участков. Также к геологическим критериям следует отнести локальные ореолы развития дайковых комплексов в пределах поисковых участков.

К локальным поисковым признакам в целом были отнесены те же, что и в пределах рудного узла, но по возможности часть признаков заменялось крупномасштабными работами в пределах поисковых участков. Также были добавлены следующие косвенные признаки:

- наличие взрывчатых брекчий;
- комплексные геохимические аномалии редкоземельного фактора (Al-Sc-K-La-Na-P-Y-Zr), выделенного на эталонном Ак-Сугском месторождении;
- ореолы гидротермально-метасоматических изменений зонального строения (окварцевание, серицитизация, пропилитизация, калишпатизация, гематитизация, лимонитизация);
- ореолы пиритизации, формирующие внешнюю зону медно-порфировых систем;
- комплексные аномалии высокой дисперсии магнитного поля и магнитного минимума, отражающие процесс перераспределения железа из оксидной в сульфидную форму (аномалии дисперсии и магнитные минимумы);
- локальные аномалии калия, отражающие процессы околорудного метасоматоза;

– участки высокой электрической поляризуемости, отражающие процесс сульфидизации пород;

Таблица 4.5– Таблица критериев и признаков медно-порфирового оруденения в пределах поисковых участков

№ пп	Критерии/признаки	Описание критерия/признака	Участки	Вес, усл. ед
1	2	3	4	5
Магматические критерии				
1	Ореол развития дайкового комплекса	Проявляются в верхних частях медно-порфировых рудно-магматических систем	Холош, Даштыг	2
Прямые признаки				
1	Моноэлементные геохимические аномалии меди	По данным Ю.В. Глушкова, 2019 г.	Все	3
	Моноэлементные геохимические аномалии молибдена			3
2	Комплексные геохимические аномалии рудного фактора (Cu-Mo-As-Ba-Zr-K), выделенного на эталонном Ак-Сугском месторождении	Мультипликативный показатель построенный на основе вторичных литогеохимических аномалий с присвоенным им факторным весом	Все	8
Косвенные признаки				
1	Моноэлементные геохимические аномалии сопутствующих металлов (свинец, цинк)	По данным Ю.В. Глушкова, 2019 г.	Все	2
2	Моноэлементные геохимические аномалии сопутствующих металлов (золото)		Все	3
3	Окварцевание	Околорудные гидротермальные изменения	Все	1
	Пиритизация (лимонитизация)			1
	Пропилитизация			1
	Калишпатизация			1
	Эпидотизация			1
	Серцитизация			1
	Сульфидизация			1

Продолжение таблицы 4.5

1	2	3	4	5
4	Комплексные геохимические аномалии редкоземельного фактора (Al-Сe-K-La-Na-P-Y-Zr), выделенного на эталонном Ак-Сугском месторождении	Мультипликативный показатель построенный на основе вторичных литогеохимических аномалий с присвоенным им факторным весом	Все	2
5	Эксплозивные брекчии	Ассоциируют с флюидно-эксплозивными структурами, надстраиваемыми рудоносный порфировый интрузив	Даштыг, Кадырой	2
7	Комплексные аномалии высокой дисперсии магнитного поля и магнитного минимума, отражающие процесс перераспределения железа из оксидной в сульфидную форму (аномалии дисперсии)	Стандартное отклонение в радиусе 200 м	Все	1
8	Комплексные аномалии высокой дисперсии магнитного поля и магнитного минимума, отражающие процесс перераспределения железа из оксидной в сульфидную форму (магнитные минимумы)	Отрицательные аномалии магнитного поля	Все	1
9	Локальные аномалии калия, отражающие процессы околорудного метасоматоза	Положительные аномалии калия некоррелированные с торием (эпигенетические аномалии калия)	Все	1
10	Участки вызванной электрической поляризуемости, отражающие процесс сульфидизации пород	Положительные аномалии коэффициента вызванной поляризации	Все	1

5. Предпосылки к применению методов ДЗЗ для прогнозирования и поисков медно-порфирового оруденения в регионе Восточного Саяна

5.1. Геоморфология и рельеф

Район исследования (лицензионная площадь ООО «Тывамедь» площадью около 1300 кв. км) находится в центральной части В. Саяна и представляет собой высокогорный узел хребта Пограничный Саян с его отрогами – хребты Крыжина, Кошурникова, Ергак-Торгак-Тайга. Хребет Ергак-Торгак-Тайга является водоразделом бассейнов рек Амыл и Казыр. Абсолютные отметки колеблются от 600 м (долина р. Казыр) до 2891 м (пик Грандиозный), относительные превышения 1600 м и более. Крутизна склонов более 20° с крутыми северными экспозициями. Для центральных частей хребтов типичны скалистые гребни, обрывы, кары, снежные ниши, ледниковые озера, крупно глыбовые курумы. Площадь представляет собой область устойчивого и длительного новейшего поднятия и характеризуется преимущественно *выработанным* и *аккумулятивным* рельефами. (Прил.В)

Выработанный рельеф подразделяется на экзарационный, экзарационно-денудационный, экзарационно-нивальный, эрозионно-денудационный, денудационно-эрозионный.

Экзарационный рельеф, занимающий большую часть площади высокогорья, связан с деятельностью позднеплейстоценовых ледников и характеризуется типичными альпийскими формами – карами, пилообразными хребтами, цирками, ригелями, карлингами, троговыми долинами, развитыми на абсолютных высотах свыше 2000 м. В зависимости от длительности формирования и интенсивности процессов морозного выветривания, размеры каров колеблются от зачаточных до крупных чашеобразных образований, достигая 2-5 км в поперечнике и 300-800 м глубины. Чаще развиты одиночные кары, хотя нередко встречаются и каровые лестницы, состоящие из 2-4 каров. Верхняя ступень кара отделена от нижнего ригеля, либо порогом из щебнисто-глыбового материала. Кары имеют обрывистые склоны, подножья которых

прикрыты плащом каменного материала. Днища изобилуют бараньими лбами, ваннами выпаживания и заполнены либо снежниками, либо озерами. Наиболее крупными формами ледниковой деятельности являются цирки, образованные серией сопрягающихся каров, характерные для верховий рек Ак-Суг, Кижихем, и др. Почти все цирки переходят в троговые долины. В верховьях рек Казыр, Кижихем имеются сквозные долины.

Водоразделы в пределах альпийского высокогорного рельефа представляют систему пилообразных, порой непроходимых гребней, склоны которых характеризуются значительной крутизной и приобретают характер отвесных обрывов, лишенных растительности. Склоны подвержены интенсивному выветриванию, обвальным и осыпным процессам. Южные и западные склоны, более пологие, покрыты тонким дерном и карликовой растительностью.

Экзарационно-денудационный рельеф, приуроченный к массивному высокогорью, характеризуется экзарационными формами рельефа, преобразованными денудационными процессами. Склоны крутые, умеренно крутые. Абсолютные отметки колеблются от 1500 м до 2000 м, относительные более 400 м. Основные факторы, обусловившие формирование рельефа – ледниковая экзарация, морозное выветривание, гравитационно-солифлюкционные процессы. Преобладают формы экзарационного рельефа, образованные в эпохи неоплейстоценовых оледенений. Повсеместно встречаются бараньи лбы, эрратические валуны. Широко распространены нагорные террасы (3-4 ступени) шириной в первые сотни метров, высотой до 30 м. Склоновые процессы затушевали и видоизменили ледниковый рельеф, образовав формы мезо- и микрорельефа – промоины, рытвины, конусы выноса, курумы и т.д.

Экзарационно-нивальные поверхности выравнивания (эквиплен), образованные в результате смыкания разрушающихся под действием экзарации и морозного выветривания каров и цирков, выделяются на всей площади рудного узла. Это плосковершинные водоразделы, местами заболоченные, с

многочисленными озерами ледникового происхождения, скоплениями эрратических валунов, бараньими лбами, нагорными террасами, каменными реками, курумами.

Денудационно-эрозионный тип рельефа приурочен к горно-таежной ландшафтной зоне среднегорья абсолютными отметками 1000-1700 м. Рельеф создан эрозией и существенно переработан процессами комплексной денудации. Куполовидные вершины, крутые и умеренно крутые склоны, покрыты коллювиальными, коллювиально-солифлюкционными, десерпционными, делювиально-солифлюкционными образованиями. В приводораздельных частях встречаются нагорные террасы, широко развиты каменные реки.

Аккумулятивный рельеф к формам рельефа, созданным речной и озерной аккумуляцией, относятся русла, поймы, I надпойменная терраса и озерные равнины. Пойменные террасы распространены на всех крупных реках и развиты в среднем их течении. Отмечаются высокие и низкие поймы. Последние характеризуются заболоченностью и небольшим превышением бровки над урезом воды. Первая надпойменная терраса развита по долинам реки Ак-Суг. Поверхность террасы ровная, иногда заболоченная. Высота на отдельных участках достигает 10 м

при ширине от нескольких метров до 600 м. Образования представлены песчано-галечниково-валунным материалом плохой и средней окатанности.

Водноледниковый рельеф представлен озами, камами, водноледниковыми равнинами. Озы извилистые, округло-вершинные гряды длиной от 50 до 500 м, высотой до 20 м, склоны их крутые, гребни узкие. Камы – холмы неправильной формы, высотой от первых метров до 30 м. Поверхности водноледниковых равнин представляют собой отдельные столбообразные возвышения. Они отмечаются в верховьях реки Кадыр-Ой, часто образуя уступы высотой до 30 м. На этих равнинах развит мелкосопочник с небольшими озерами и сухими ложбинами стока. Флювиогляциальные террасы высотой 5-10, 10-20 и 30-50 м представляют собой полого холмистую равнину,

слабо наклоненную к реке, сложенную хорошо промытыми, сортированными песками, гравием, галечником, супесями, суглинками и перемытыми отложениями донной морены.

Карстовые формы приурочены к тектоническим нарушениям, ослабленным трещиноватым зонам и контактам карбонатов с устойчивыми к выщелачиванию породами. Термокарстовые образования развиты незначительно и представляют западины глубиной до 5-10 м разного диаметра.

В течение палеоген-неогена сформировались основные морфоструктуры региона. В неоген-четвертичное время проявилась резкая активизация неотектонических процессов. Незначительные подвижки происходили вдоль Кандатского разлома в позднеплейстоцен-голоценовое время, на что указывают выходы минеральных источников. С голоценовой активизацией связаны V-образные глубокие до 50-60 м ущелья, врезанные в долины ручьев-притоков в верховьях рек. О современной активности говорят обвальное-осыпные шлейфы аномальной мощности, заполнившие устья рек. В формировании морфоструктур района большое значение имели древние разрывные нарушения, неоднократно подновляемые в неотектоническую стадию, СЗ, субширотной, реже СВ ориентировки, что закономерно подтверждается плановым рисунком гидросети: в пределах Кандатского разлома широтная ориентировка рек Ак-Суг, Соруг; северо-западная у рек Прямой Казыр, Левый Казыр, Вала, Уда, Кижиг-Хем, Катун и др.

О продолжающемся подъеме территории свидетельствует ее сейсмическая активность. Сеймотектонические трещины, нарушающие ледниковые формы рельефа встречены в районе оз. Дайырганныг-Холь, р. Хуннуг. О современной тектонике свидетельствуют минеральные источники по р. Кижиг-Хем, Соруг. Изучаемая территория находится в сейсмической зоне с магнитудой 6-7 баллов по шкале Рихтерах [36]

5.2. Почвенно-ландшафтная характеристика

В основу составления схемы положено ландшафтно-геохимическое районирование, проведенное на основе природного ландшафта, как участка, приуроченного к одному типу рельефа с характерными условиями миграции элементов, имеющего однообразное геологическое строение.

Выделяются две ландшафтные зоны: высокогорная тундрово-луговая и горно-таежная.

Высокогорная тундрово-луговая зона объединяет высокогорный ледниково-экзарационный с абсолютной отметкой более 2000 м, высокогорный экзарационно-денудационный рельеф. По семейству ландшафтов и подтипам почв выделяются горно-тундровые и горно-луговые ландшафты. Горные луга занимают пониженные участки с мощным снеговым покровом и приурочены к склонам южных и юго-западных экспозиций.

Горно-тундровые ландшафты характеризуются широким развитием крупнообломочных образований, многочисленными коренными выходами. Основным процессом почвообразования является первичный, примитивный, развиты и горно-тундровые фрагментарные почвы. На плоских водоразделах и пологих склонах северной экспозиции отмечаются медальоны вымораживания в виде пятен таксотропных глеевых почв. В условиях повышенного увлажнения и мерзлоты формируются горно-тундровые торфянистые почвы с мощностью торфяного горизонта до 1 м. Реакция среды колеблется от сильно кислой (рН 3,0-4,0) в гумусовом горизонте до кислой в низах разреза (рН до 6,0). Отмечается накопление подвижного железа в верхних дерново-перегнойных горизонтах горно-тундровых почв, вниз содержание его падает.

Горно-луговые ландшафты отличаются пышно развитым травостоем с богатым видовым составом. Моховой покров развит слабо. Мощный снеговой покров обеспечивает постоянное увлажнение при постепенном его стаивании. Почвы дерновые, в переувлажненных участках перегнойные, дерново-

перегнойные. Дифференциация почв на генетические горизонты проявлена слабо, с глубины 20-30 см появляются обломки коренных пород. Реакция среды кислая (рН 3,8-4,0). В поле развития карбонатных пород формируются горно-луговые, дерново-карбонатные почвы, вскипающие от соляной кислоты (рН 6,2-6,3 и 7,1-7,3) в нижней части разреза. В нижней части горно-лугового пояса формируются почвы с химическими свойствами, близкими к горно-луговым. Большое количество атмосферных осадков, высокая щебнистость пород и легкий механический состав горно-тундровых и горно-луговых почв способствуют хорошему дренажу и созданию окислительной обстановки.

Горно-таежная ландшафтная зона объединяет среднегорный денудационно-эрозионный и низкогорный эрозионно-денудационный тип рельефа. Зона распространена на гипсометрических уровнях от 1000 до 1700 м, растительность леса: кедровые, пихтово-кедровые, лиственничные. В подлеске произрастают рябина, жимолость, шиповник, можжевельник, ольха. В травяно-кустарниковом ярусе произрастают: черника, багульник, брусника, голубика. Почвы дерновые, перегнойные, дерново-перегнойные, торфянистые, подзолистые, перегнойно-подзолистые, микроподзолистые, перегнойно-глеевые. Перегнойные, дерново-перегнойные почвы развиты на различных коренных породах в условиях промывного водного режима. В условиях сезонной мерзлоты и ухудшенного дренажа проявлены торфянистые почвы, дерновые приурочены к основным и карбонатным породам. Подзолистые, микроподзолистые, перегнойно-подзолистые почвы встречаются спорадически среди дерново-перегнойных, перегнойно-глеевые почвы формируются среди дерново-перегнойных, перегнойно-глеевые почвы формируются в условиях ослабленного дренажа. Все типы горно-таежных почв характеризуются слабой дифференциацией на генетические горизонты с многочисленными обломками коренных пород, количество которых увеличивается вниз по профилю. Состав обломков зависит от состава подстилающих коренных пород. Мощность почвенного горизонта колеблется в широких пределах и зависит от экспозиции и крутизны склонов. Минимальная мощность наблюдается на крутых склонах,

максимальная – до 0,4 м у подножий и в понижениях рельефа. Горно-таежные почвы характеризуются кислой реакцией среды в верхних частях разреза (рН 3,7-3,8), увеличиваясь вниз по профилю до (рН 6,2). Наблюдается вынос подвижного железа из верхних перегнойно-дерновых горизонтов и закрепление в нижних. В поле развития карбонатных пород горно-таежные почвы характеризуются слабо кислой реакцией верхних частей разреза (рН 4,0-4,6) и щелочной реакцией нижних (рН до 8,6).

В пределах выделяемых зон развиты поверхностные и подземные воды. Как переходный тип можно выделить воды зон аэрации. Кроме того, картируются минеральные источники: радоновые, железистые, термальные.

На площади работ незначительным развитием пользуются техногенные ландшафты, обусловленные геологоразведочными работами. Это небольшие участки в верхнем течении р. Улуг-Кадыр-Ос, Биче-Кадыр-Ос, Кадыр-Ой, Ак-Суг, где были пройдены открытые горные выработки, бурение и на участке руч. Арыскан – штольни. Все вышеперечисленные участки в настоящее время закрыты, на них были проведены необходимые природоохранные мероприятия. Участки характеризуются средней степенью нарушения геологической среды.

В пределах площади отмечаются породные радиоактивные и геохимические аномалии. Радиоактивные аномалии выше 100 мкР/час – точечные, их повышенные значения отмечены в сиенитах, гранитах, кремнисто-углистых сланцах. Для оценки геохимических аномалий был рассчитан суммарный показатель загрязнения, с выделением аномалий второго и третьего класса опасности.

Все выделенные аномалии локальны, тяготеют к высокогорной тундрово-луговой ландшафтной зоне. Суммарный показатель загрязнения не превышает 8-16 единиц, то есть геохимические аномалии относятся к I категории загрязнения (низкий уровень). Территорию по рекомендуемым критериям оценки можно оценить, как удовлетворительную по эколого-геологической обстановке и выделить два участка с кризисной ситуацией, куда входит сейсмоактивная зона Кандатского разлома.

5.3. Обоснование возможности применения дистанционных методов в картировании поисковых признаков медно-порфирового оруденения (на примере Ак-Сугского месторождения)

На основании отчета о результатах разведки Ак-Сугского медно-порфирового месторождения за 2007-2009 гг.[37]. На территории лицензионной площади выделяются перспективные участки на медно-порфировое оруденение, которые были выделены в результате работ по набору прогнозно-поисковых критериев и признаков. Условно эти участки можно разделить на три группы:

1. площади с высокой плотностью поисковых критериев и признаков, первоочередные для постановки поисковых работ;

2. площади с высокой плотностью геофизических критериев и признаков, благоприятные для локализации рудоносных порфировых интрузий (площади второй очереди работ);

3. площади с незначительностью плотностью геологических критериев и признаков с неясными перспективами (площади третьей очереди работ).

К первой группе относятся два участка: участок на северо-западе лицензионной площади, который примыкает с запада к участку Холош, площадью 63 квадратных километра и участок на юго-западе, который является восточным продолжением участка Даштыг площадью 24 квадратных километра.

Границы участка оконтуривают зону правосдвигового сжатия и развитую вдоль нее биполярную магнитную аномалию. При этом зона правосдвигового сжатия непосредственно коррелирует с отрицательной ветвью этой биполярной аномалии, связанной с развитием сульфидной минерализации. Второй участок, площадью 36 квадратных километров находится в центральной части лицензионной площади и оконтуривает бимодальную магнитную аномалию, отрицательная ветвь которой находится на пересечении зон право- и левосдвигового сжатия, развитых вдоль субширотной структурной зоны,

выделенной по данным аэромагнитометрии. То есть, набор региональных геофизических критериев и признаков на этом участке аналогичен таковым на участке Ак-Суг. Третий участок, перспективный с геофизической точки зрения находится в зоне влияния Кандатского разлома и является фактическим продолжением перспективной северо-восточной части участка Холош. Участки требуют дополнительно геолого-геохимического изучения, т.к. фактическая изученность всех трех участков в рамках уже проведенных работ крайне слабая рисунке 5.1.

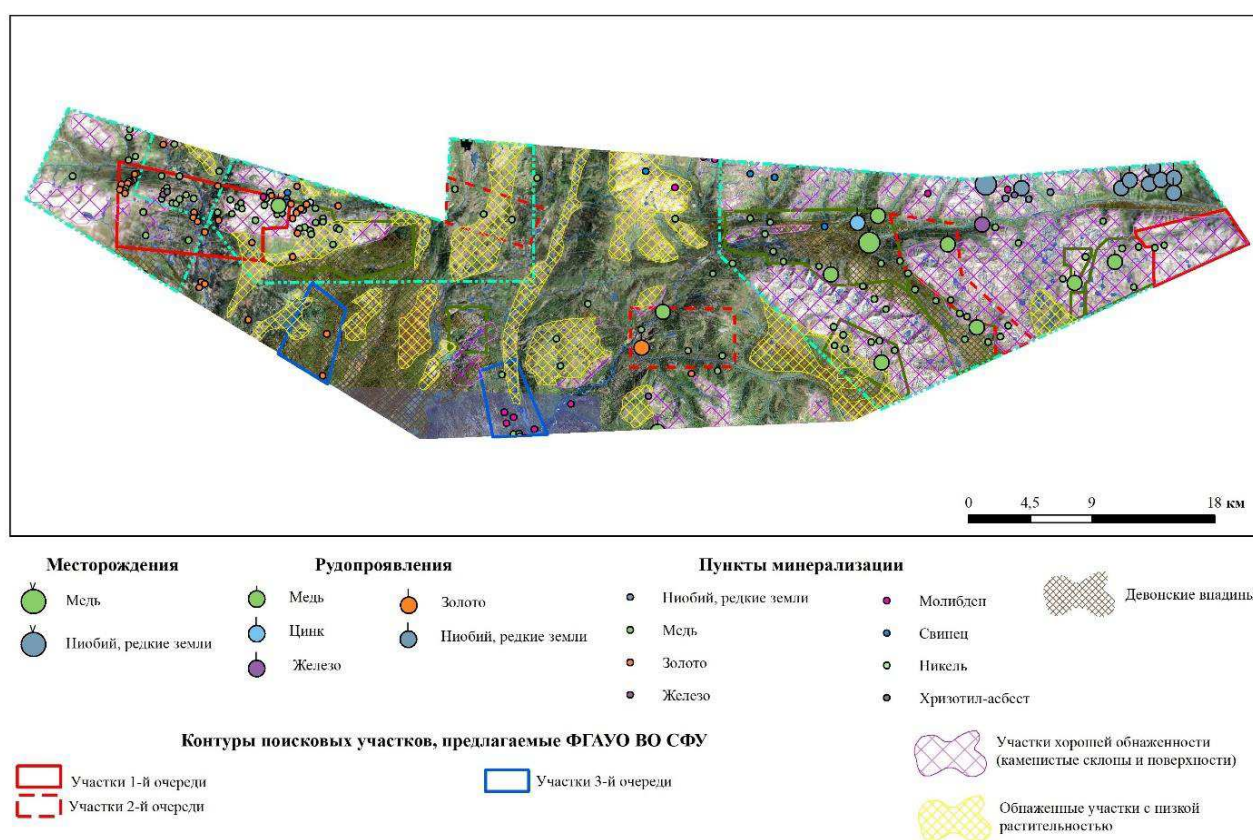


Рисунок 5.1. – Карта контуров предполагаемой гиперспектральной съёмки

К третьей группе относятся два небольших участка площадью 17 и 11 квадратных километров в юго-западной части лицензионной площади. Плотность поисковых критериев и признаков здесь невысока, поэтому эти площади скорее стоит отнести к участкам с неясными перспективами.

Эти участки были выделены традиционными методами прогнозно-поисковых работ. Задачей исследования по ДЗЗ являлось оценка возможности картирования метасоматических ореолов измененных пород, а также для выявления новых перспективных участков на изучаемой площади. Согласно информации, из раздела 5.1. территория хорошо обнажена и имеет эрозионно-денудационный тип рельефа,. Подробнее метасоматические изменения рассмотрены в главе 3.3.

6. Краткий обзор применения данных ДЗЗ для поисков полезных ископаемых

Если первая часть работы выполнялась в составе коллектива исследователей, то специальная часть носит самостоятельный характер исполнения, и хотелось бы отметить, что важнейшим элементом модели медно-порфировых объектов является характеристика гидротермально-метасоматических изменений, которые легко фиксируются как при полевых исследованиях, так и при методах ДЗЗ из космоса.

Современные системы дистанционного зондирования позволяют формировать данные, обладающие достаточными характеристиками для применения их в решении широкого спектра научных и прикладных задач в совершенно разных сферах нашей жизни от лесного и сельского хозяйства до изучения месторождений полезных ископаемых.

Важным аспектом, повышающим необходимость развития применения дистанционных методов для исследования территории Российской Федерации, является большая площадь нашего государства и труднодоступность многих областей для полевого исследования.

Существует множество научных публикаций, в которых описаны различные методы геологического исследования территорий в совершенно разных частях Земли при помощи методов ДЗЗ.

Ак-Сугское медно-порфировое месторождение, будучи хорошо изученным объектом, является эталоном для отработки методики применения ДЗЗ для поиска медно-порфирового оруденения в близких ландшафтно-климатических условиях. В виду большой площади и удалённости данной территории полевые геологические исследования затруднены и затратны, что делает востребованными попытки исследования дистанционными методами. В данной ситуации применения данных дистанционного зондирования не может полностью заменить полевых работ, однако позволяет достаточно сильно сузить области поиска и выделить предполагаемые перспективные участки,

что позволит сэкономить время и средства необходимые на изучение всей территории.

Во всём мире уже долгое время проводятся работы по картированию гидротермальных процессов на порфировых объектах, и как показывает опыт зарубежных коллег, методы ДЗЗ показывают высокую эффективность при поисках (рисунок 6.1., 6.2).

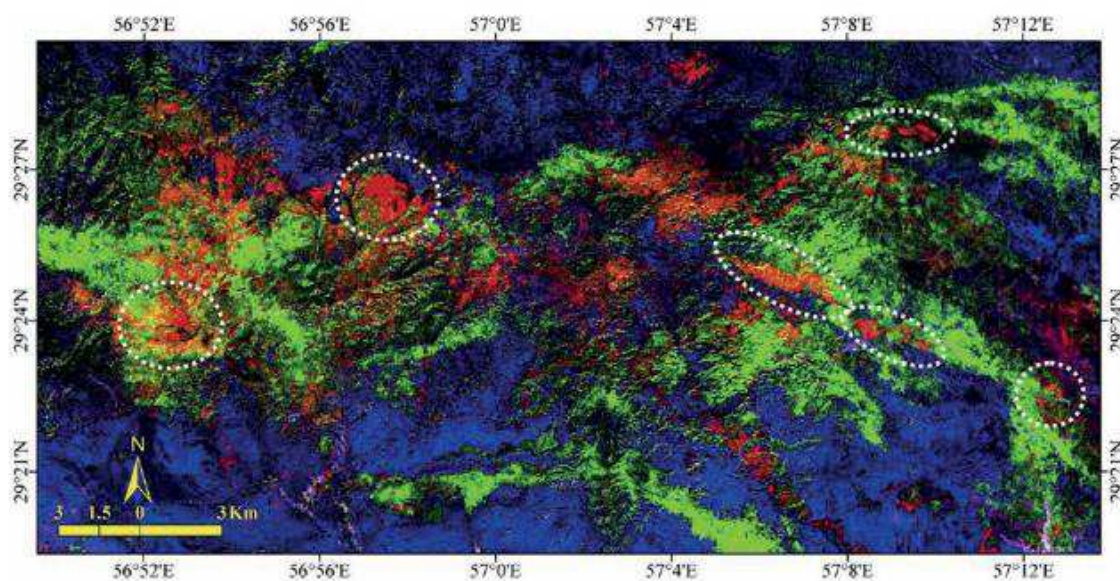


Рисунок 6.1.— Область Даралу (англ. Daraloo, медный пояс Керман, Иран). RGB-изображение результатов деления каналов ASTER D4 /D6, D5/D8, D3/D4. Красная зона с высокими значениями отношения D4/D6 указывает на наличие мушкетита и глинистых минералов; зелёная зона с высокими значениями отношения D5 /D8 — на присутствие хлорита-эпидота и кальцита; синяя зона с высокими значениями отношения D3 /D4 показывает неизменённые породы фундамента. Белыми эллипсами обозначены медно-порфировые месторождения. [38],[39].

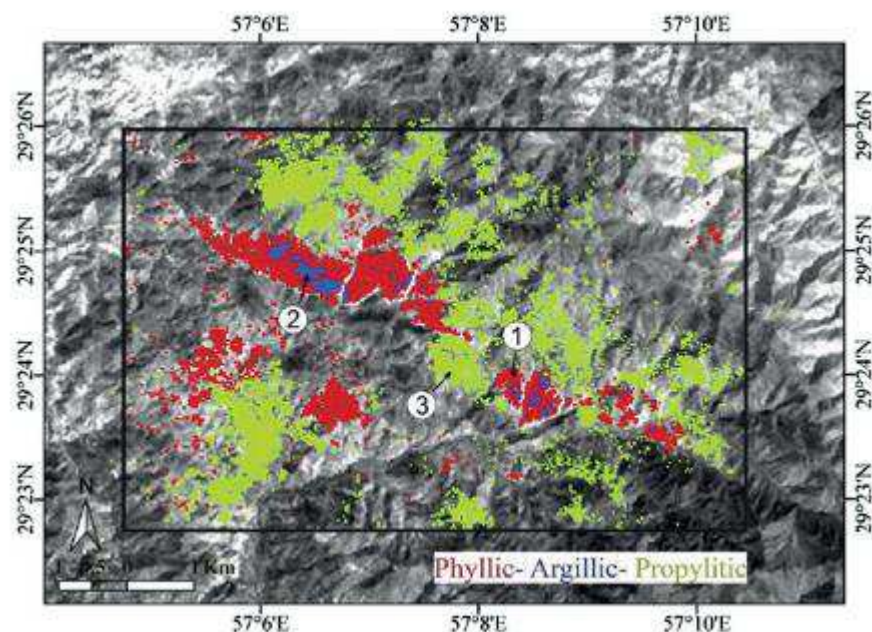


Рисунок 6.2 – Район Даралу–Сармешк (Daraloo–Sarmeshk). Карта распределения минералов, выделенных по результатам обработки данных ASTER SWIR методом согласованной фильтрации, наложенная на изображение ASTER, обработанное методом главных компонент (PCA1): красный цвет — филлиты, синий — аргиллиты, зелёный — пропилиты; цифрами 1–3 обозначены места отбора проб [38], [39].

Основой всех методов ДЗЗ для поиска полезных ископаемых является гиперспектральная съёмка, сущность которой заключается в том, что вся информация в пикселе итогового изображения отображается не в интенсивности света, а в полном разложении принятой датчиком оптической энергии в пределах диапазона съёмки. Таким образом можно достаточно чётко разделять земную поверхность на зоны с разными свойствами отражений. Основное отличие гиперспектральной (В) съёмки от мультиспектральной (А) заключается в том, что съёмка проводится в более узких узких диапазонах спектра, что позволяет составить более точную спектральную характеристику вещества (рисунок 6.3.)

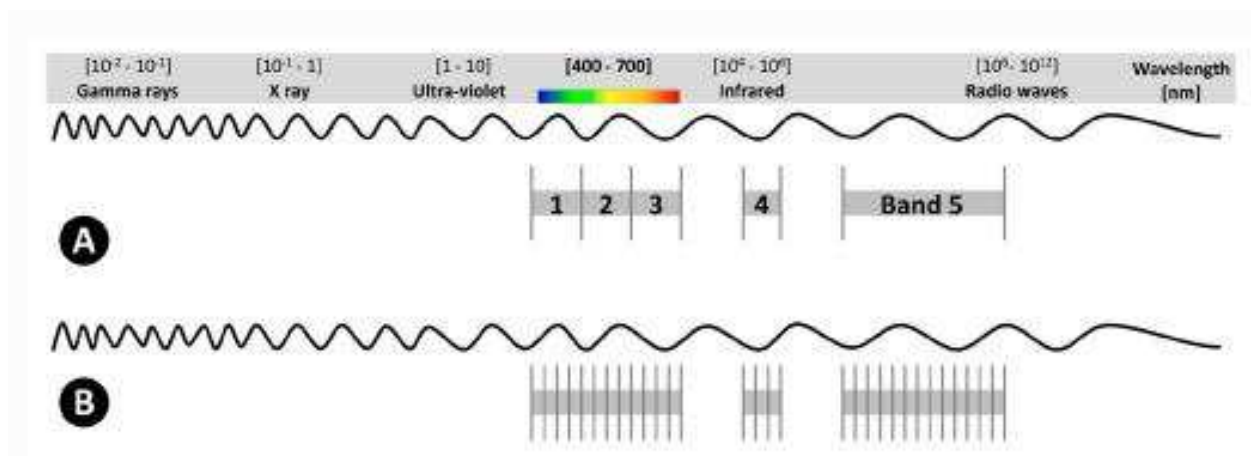


Рисунок 6.3. – Сравнение мультиспектральной и гиперспектральной съёмки. А – Мультиспектральная; В – Гиперспектральная.

В данной работе, использовался опыт прошлых исследователей, поэтому работа проводится с данными ASTERTERRA, это японский зонд, который позволяет вести съёмку из космоса в гиперспектральном излучении (0.52 – 11.65 мкм), съёмка проводится в трёх диапазонах VNIR (видимое излучение), SWIR (коротковолновое ИК излучение), TIR (тепловое ИК излучение). Для картирования в минералого-геохимическом аспекте в основном необходим SWIR диапазон, и TIR для картирования кварца.

Сущность всех методов сводится к тому, чтобы выделить спектральную характеристику группы минералов, для медно-порфировых объектов это две группы OH^- (каолинит, мусковит, серицит), и хлорит – эпидот – кальцит. (рисунок 6.4.).

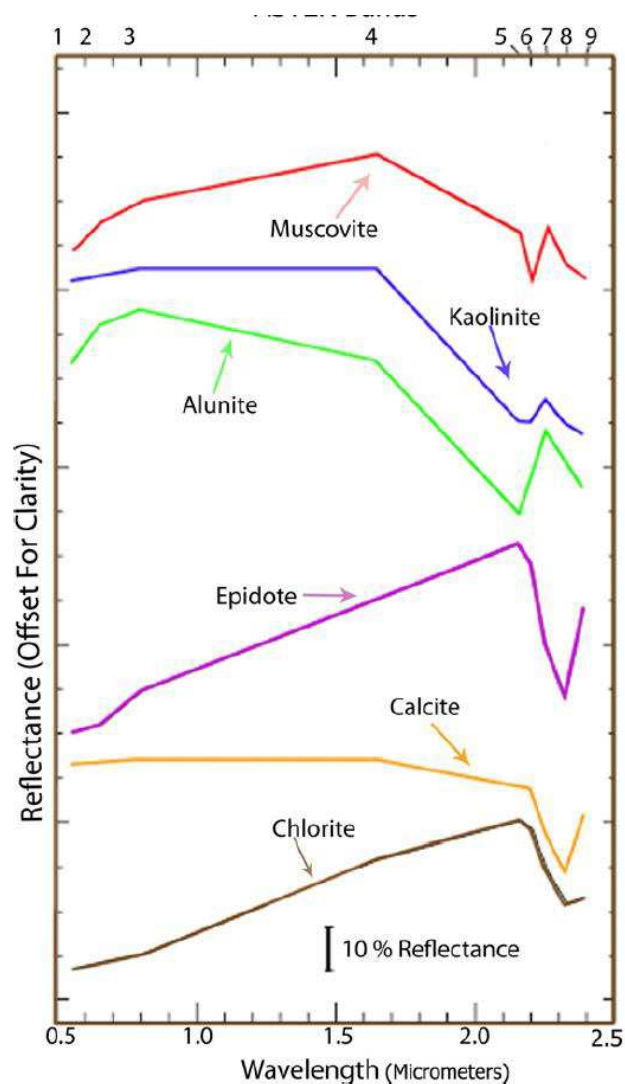


Рисунок 6.4. – Спектральные кривые групп минералов.

Для начала работ в период 03.09.2020 по 05.09.2020 автором на базе Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ), в городе Санкт-Петербург, при поддержке директора Центра дистанционных методов природоресурсных исследований Кирсанова А.А. были проведены лабораторные исследования по гиперспектральной съёмке коллекции образцов эталонного объекта. По итогу работ получены эталонные спектры отражения образцов руд и вмещающих пород, в том числе пород зоны окисления с эталонных проб месторождения Ак-Суг в условиях лабораторной и естественной освещенности (рисунок 6.5.).

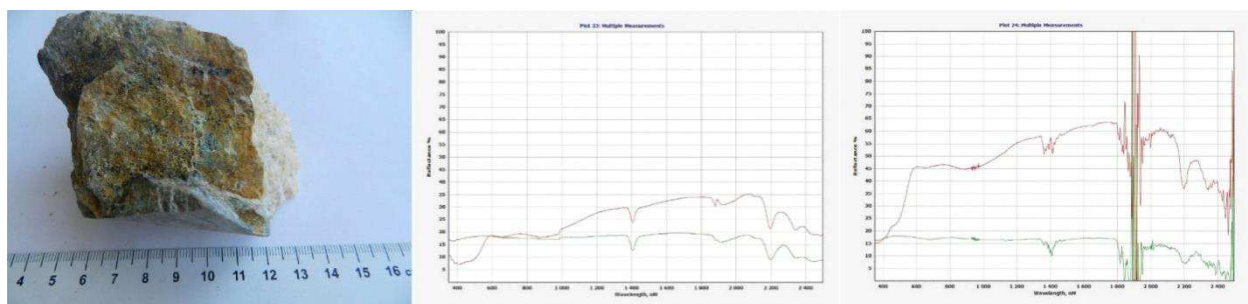


Рисунок 6.5. - Слева - Образец Скв. 6-2т – 8,8 м, тоналит – порфир измененный, слабоокисленный с прожилками и примазками малахита и кварц-карбонатными жилками. По центру- спектр отражения в лабораторных условиях при контактной гиперспектральной съёмке; Справа– спектр отражения, полученный в условиях естественной освещенности.

Существуют визуальные методы (метод искусственных цветов и метод минеральных индексов), и математические методы (метод главной компоненты, и метод спектрального угла). Рассмотрены будут только три из этих методов ниже.

6.1. Метод спектрального угла (SAM)

Согласно материалу монографии «Гиперспектральное дистанционное зондирование в Геологическом картировании» [40] метод спектрального угла относится к группе методов классификации данных ДЗЗ, основанных на сравнении спектров изображения с лабораторными спектрами.

Алгоритмы данной группы основаны на ряде базисных упрощённых предположений. Важнейшим предположением является то, что яркость каждого пикселя изображения может быть представлена как линейная комбинация яркостей, составляющая пиксель чистых компонент. То есть предполагается, что лучи при отражении взаимодействуют только с одним материалом, что на практике реализовано не всегда. Ещё одним важнейшим предположением является предположение о небольшом конечном наборе компонент, из которого состоят все материалы сцены, и взаимные независимости их расположения. На практике данное предположение выполняется крайне редко, что связано с изменением набора компонент внутри сцены от чего реальные спектры пикселей не соответствуют условиям

используемой модели. Так же имеет место предположение о независимости компонент, которое также не соответствует действительности.

Согласно информации, из научной статьи «*Spectral Angle Mapper Algorithm for Remote Sensing Image Classification*» [41] Алгоритм *Spectral Angle Mapper (SAM)* широко используется для обработки данных дистанционного зондирования. Пиксель с минимальным или нулевым спектральным углом по сравнению с эталонным спектром относится к классу, определяемому эталонным вектором. При изменении порога классификации на основе спектрального угла вероятность неправильного обнаружения объекта может возрасти. Алгоритм *SAM* является линейной моделью, которая плохо работает, когда классы перекрываются друг с другом. Гиперспектральные изображения требуют соответствующего формата данных для хранения огромного количества каналов и данных, связанных с ними.

Алгоритм *SAM* основан на измерении спектрального сходства между двумя спектрами. Спектральное подобие выявляется путём рассмотрения каждого спектра как вектора в q -мерном пространстве, где q —количество спектральных каналов. Алгоритм *SAM* определяет спектральное подобие между двумя спектрами, вычисляя угол между двумя спектрами, рассматривая их как векторы в пространстве с размерностью, равной количеству каналов. Представление эталонного угла отображено на рисунке 6.6.

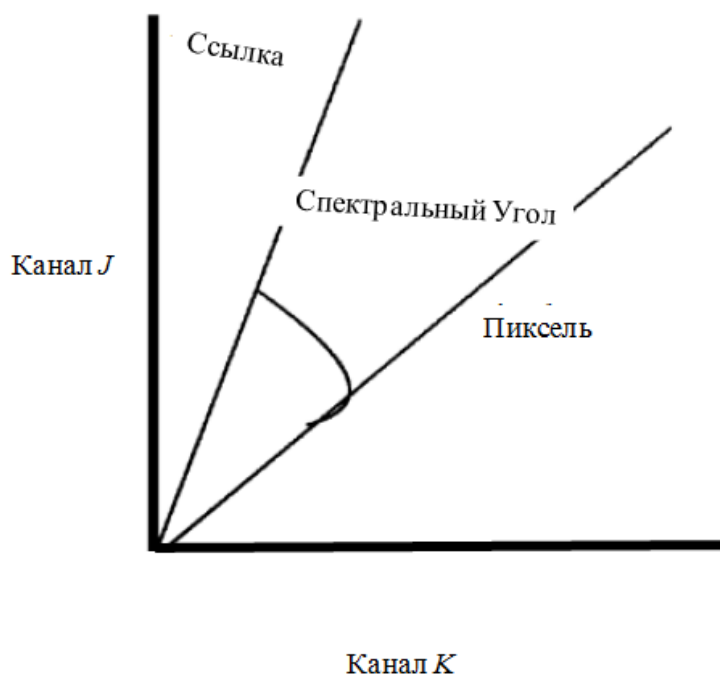


Рисунок 6.6 – Представление эталонного угла

Алгоритм *SAM* обобщает эту геометрическую интерпретацию на n -мерное пространство и определяет подобие, отображенное в формуле 6.1.

$$a = \cos^{-1} \left(\frac{\sum_{i=1}^{nb} t_i r_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^{nb} t_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{nb} r_i^2}} \right) \quad (6.1)$$

Где nb : количество полос в изображении, t : спектр пикселей, r : эталонный спектр и альфа: спектральный угол.

Согласно материалу монографии «Гиперспектральное дистанционное зондирование в Геологическом картировании» [40, с. 88] на практике выбор эталонных спектров затруднен по причине чрезвычайной изменчивости природных материалов. Для спектрального анализа геологических компонентов необходимо использовать чистые минералы для построения спектров компонент, при этом такие минералы в природе встречаются довольно редко. Даже для образцов с идентичным составом их спектры будут иметь различия в зависимости от степени кристаллизации и других характеристик. Поэтому

спектральные библиотеки, содержат спектры минералов с различной степенью кристаллизации.

Несмотря на вышеперечисленные особенности, для геологического картирования данный метод используется довольно широко, в том числе и для медно-порфировых месторождений. На пример в статье «*Extraction of hydrothermal alterations from ASTER SWIR data from east Zanjan, northern Iran*» (Извлечение гидротермальных изменений из данных *ASTER SWIR* с востока Зенджан, северный Иран) [42] описано применение различных методов обработки данных ДЗЗ для картирования медно-порфирового месторождения, в том числе применен и метод спектрального угла. Применение данного метода привело к достаточно качественным результатам. В статье «*Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina*» (Картирование гидротермальных изменений с использованием данных *ASTER* в порфировом месторождении Инфернилло, Аргентина) [43] так же применен метод спектрального угла для картирования медно-порфирового месторождения, в которой так же метод спектрального угла себя хорошо зарекомендовал, а точность была проверена и подтверждена в ходе полевых работ.

Как уже упоминалось выше для применения данного метода необходимы эталонные спектры, поскольку в рамках настоящей работы нет возможности опробовать эталонные компоненты в ходе полевых работ и построить их спектры, необходимо использование спектральных библиотек. Согласно информации, опубликованной на русскоязычном форуме посвященном тематике ГИС и ДЗЗ «*GISLAB*» [44] существует ряд спектральных библиотек, содержащих спектральные кривые различных поверхностей, в том числе и минералов. Одной из наиболее широко применяемой является библиотека американской геологической службы «*USGS Digital Spectral Library*» которая была создана в *USGS Spectroscopy Lab's* (Лаборатории спектрального анализа геологической службы США). Она включает данные о спектральной отражательной способности минералов, горных пород, грунтов, жидкостей,

летучих соединений, замороженных летучих соединений, растительности, искусственных материалов в диапазоне от 0,2 до 150 микрометров. Всего более 1300 спектральных кривых. Важной особенностью данной библиотеки является её присутствие в базовых версиях программных пакетов *Erdas Imagine* и *ENVI*. Ещё одной широко применяемой спектральной библиотекой, которая так же вшита в *Erdas Imagine* и *ENVI* является библиотека *JPL (Jet Propulsion Lab)*. Данная библиотека включает в себя кривые спектральной отражательной способности для 160 минералов в диапазоне от 0.4 до 2.5 микрометров. Для 135 минералов выполнены измерения при разных размерах зерна минерала (размер частиц минерала) – 125-500 микрометров, 45-125 микрометров и менее 45 микрометров. Основное назначение библиотеки – показать влияние размера зерна на спектрально отражательную способность минералов. Библиотека *ASTER spectral library* была создана для поддержки использования снимков *Terra/ASTER* и содержит данные из перечисленных выше спектральных библиотек. Всего в ней содержится более 2400 спектральных кривых естественных и искусственных материалов в диапазоне от 0,4 до 15,4 микрометров. Данная библиотека так же присутствует в программных пакетах *ErdasImagine* и *ENVI*.

6.2. Метод главных компонент (РСА)

Согласно материалам сайта *machine learning* (машинное обучение) [45] метод главных компонент, это один из основных математических методов уменьшения размерности данных с минимальными потерями. Этот метод был изобретен Пирсоном в 1901 году. Процесс вычисления главных компонент сводится к вычислению собственных векторов и собственных значений ковариационной матрицы исходных данных или к сингулярному разложению матрицы данных. Так же метод главных компонент называют преобразованием Кархунена-Лоэва или преобразованием Хотеллинга.

Задача анализа главных компонент имеет четыре базовых версии:

1) аппроксимировать данные линейными многообразиями меньшей размерности;

2) найти подпространства меньшей размерности, в ортогональной проекции на которые разброс данных (т.е. среднеквадратичное отклонение от среднего значения) максимален;

3) найти подпространства меньшей размерности, в ортогональной проекции на которые среднеквадратичное расстояние между точками максимально;

4) для данной многомерной случайной величины построить такое ортогональное преобразование координат, что в результате корреляции между отдельными координатами обратятся в ноль.

Первые три версии оперируют конечными множествами данных. Они эквивалентны и не используют никакой гипотезы о статистическом порождении данных. Четвёртая версия оперирует случайными величинами. Конечные множества появляются здесь как выборки из данного распределения, а решение трёх первых задач как приближение к «истинному» преобразованию Кархунена-Лоэва. При этом возникает дополнительный и не вполне тривиальный вопрос о точности этого приближения.

Согласно монографии Роберта, А. Шовенгердта «Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений» [46]. В данных дистанционного зондирования каналы многоспектральных изображений часто бывают коррелированными, то есть имеют визуальное и количественное сходство. Причин у этой корреляции может быть несколько.

1) Может иметь место корреляция спектральных свойств объектов. Она может возникнуть при относительно низкой отражательной способности растительного покрова в видимой части спектра, что приводит к схожести спектральных образов объектов во всех диапазонах регистрации видимого излучения. Диапазон длин волн, соответствующий высокой корреляции, определяется спектральной отражательной способностью объектов.

2) Часто имеет место ещё уровень затенения, возникающего из-за топографических особенностей местности, можно считать одинаковым во всех диапазонах регистрации видимого излучения. Теневая компонента может доминировать при съёмке гористой местности или при съёмке на закате и восходе Солнца. В результате возникает корреляция между диапазонами, которая не зависит от объекта на земной поверхности. Однако в тепловом диапазоне спектра данное явление наблюдается иным образом.

3) Так же имеет место наложение диапазонов регистрации. В идеальном случае этот фактор должен быть исключен ещё на этапе разработки датчика, на практике это наложение редко удаётся избежать полностью. Как правило интервал наложения невелик, однако его величину необходимо знать для точной калибровки данных.

Все вышеперечисленные виды корреляции приводят к избыточности информации, из-за чего анализ данных в исходных спектральных диапазонах становится малоэффективным. Для преодоления избыточности используют метод образования к главным компонентам, которое определяется в пространстве исходных спектральных признаков и имеет вид с нулевым вектором смещения B и матрицей W_{PC} , которые определяются независимо для каждого снимка формулой 6.2.

$$PC = W_{PC} \times DN \quad (6.2)$$

Вид данного преобразования для ковариационной матрицы отображен в формуле 6.3.

$$C_{PC} = W_{PC} \times CW_{PC}^T \quad (6.3)$$

Преобразование к главным компонентам является оптимальным поскольку это единственное преобразование, которое приводит

ковариационную матрицу исходного многоспектрального снимка к диагональному виду, что отображено в формуле 6.4.

$$C_{PC} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \lambda_1 \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

Собственное значение λ_k определяется как k -й уровень характеристического уравнения, отраженного в формуле 6.5.

$$|C - \lambda I| = 0 \quad (6.5)$$

Где C – ковариационная матрица исходных данных, I – диагональная матрица тождественного преобразования.

Каждое из собственных значений матрицы равно дисперсии главной компоненты вдоль новых координатных осей. Поэтому сумма всех собственных значений должна равняться сумме дисперсий, рассчитанных для всех спектральных диапазонов исходного снимка тем самым сохраняя суммарную дисперсию данных. Поскольку матрица C_{PC} диагональная, изображения, соответствующее главным компонентам, являются некоррелированными. Такие изображения принято нумеровать в порядке убывания дисперсии, поэтому первая главная компонента соответствует наибольшей дисперсии, а главная компонента с номером k – наименьшей. Результатом преобразования снимков к главным является устранение корреляционной зависимости между исходными k – мерными данными при одновременном сжатии большей части дисперсии полного изображения до меньшей размерности.

Координатные оси в пространстве главных компонент определяются K собственными векторами E_k . Собственный вектор, соответствующий собственному значению λ_k , находится из векторно-матричного уравнения, отображенного в формуле 6.6.

$$(C - \lambda_k I)e_k = 0 \quad (6.6)$$

Собственные векторы образуют строки матрицы W_{PC} , что отображено в формуле 6.7.

$$W_{PC} = \begin{bmatrix} e_1^t \\ \dots \\ e_K^t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{11} & \dots & e_{1K} \\ \dots & \dots & \dots \\ e_{K1} & \dots & e_{KK} \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

В которой e_{ij} – j -й элемент i -го собственного вектора. Элементы собственного вектора являются направляющими косинусами между осями исходной и иной системы координат. На этом анализ собственных значений завершается и применяется преобразование, отображенное в формуле 6.2, компонента собственного вектора e_{ij} , становится весовым коэффициентом канала j исходного многоспектрального изображения при расчете компоненты i^4 .

Преобразования данных дистанционного зондирования обладают следующим рядом свойствами:

1) Преобразование к главным компонентам является жестким вращением, при котором совмещаются оси исходной системы координат k -мерного пространства с главными осями набора данных. Данные в изображении главных компонент получаются в результате проекции исходных данных на новые оси координат.

2) Хотя в k -мерном пространстве главных компонент оси системы координат ортогональны, их проекции в пространстве исходных данных могут не обладать этим свойством. Отсюда, в частности, следует, что проекции осей главных компонент, полученные из наборов данных разной размерности, не будут совпадать при проецировании на одну из координатных плоскостей исходного снимка.

3) Преобразование набора данных к главным компонентам приводит к оптимальному перераспределению дисперсий. Изображение, соответствующее первой главной компоненте, при любой линейной комбинации исходных многоспектральных данных всегда обладает наибольшей дисперсией. Следующую величину дисперсии будет иметь изображение, соответствующее второй главной компоненте и так далее. При этом суммарная дисперсия исходного набора данных будет константной. Благодаря этому свойству упорядоченности метод главных компонент используется для сжатия данных. Если значения дисперсии у главных компонент высшего порядка настолько малы, что ими можно пренебречь, это даст значительный выигрыш во времени при сохранении, передаче и обработке данных.

4) Матрица преобразования W_{PC} зависит от исходного набора данных. Например, при наличии растительности относительно большой вклад в общую дисперсию даёт второе собственное значение, что говорит о более высокой размерности пространства данных. В то же время вклад теплового канала съёмки не столь значителен и проявляется в основном в одной не первой компоненте».

Согласно ряду научных публикаций зарубежных авторов: «*Identification of hydrothermal alteration minerals for exploring of porphyry copper deposit using ASTER data, SE Iran*», (Выявление минералов гидротермальных изменений для изучения порфиров. месторождение меди по данным *Aster*, Иран) [47]. «*Detecting areas of high-potential gold mineralization using ASTER data*» (Выявление участков с высоким потенциалом золотого оруденения по данным *Aster*) [48]. «*Porphyry copper alteration mapping at the Meiduk area, Iran*» (Картирование медно-порфировых изменений на месторождении Район Мейдук, Иран) [49], «*Space-Borne Imagery and Geochemical Characters of Post-Orogenic Dyke Swarms*» (Космические снимки и геохимия Персонажи посторогенных дамб, Фатира-Абу-Заваль, Восточная пустыня Египта) [50]. «*Discussion on application of WorldView 2 satellite data in west Kunlun Metallogenic belt remote sensing geological survey*» (Обсуждение применения

спутниковых данных *WorldView 2* на западе Куньлуня. Дистанционные геологические исследования металлогенического пояса) [51]. «*Spectral indices for lithologic discrimination and mapping by using the ASTER SWIR bands*» (Спектральные индексы литологической дискриминации и отображения с использованием диапазонов *ASTER SWIR*) [52]. «*Characterization of ASTER spectral bands for mapping of alteration zones of volcanogenic massive sulphide deposits*» (Характеристика спектральных полос *ASTER* для картирования зон гидротермальных изменений вулканогенных массивных сульфидных отложений) [53]. А также публикация отечественных авторов: «Обзор зарубежных достижений за последние пять лет в области использования мульти и гиперспектральных спутниковых данных и современных методов их обработки в геологических исследованиях» [54]. Результаты обработки многоспектральных изображений методом главных компонент успешно применяются для извлечения геологической информации, в том числе и для картирования подобных месторождений, и приводят к качественным результатам. Как правило, решение задач геологического картирования с помощью метода главных компонент лежит в разложении многоспектрального изображения на компоненты, количество которых равно количеству каналов и выявлению среди этих компонент тех, в которых наиболее ярко обозначены искомые минералы. Выявление изображений интереса происходит при помощи матрицы собственных векторов, которая строится в ходе реализации метода главных компонент и спектральных кривых искомым минералов в том же диапазоне длин волн. По спектральным кривым выявляются характерные для определённого минерала максимумы и минимумы в определённых каналах, которые и обнаруживаются в матрице собственных векторов.

6.3. Метод минеральных индексов

Согласно материалу монографии «Гиперспектральное дистанционное зондирование в Геологическом картировании» [40] Индексными называют

производные изображения, в которых значение конкретного пикселя представляется в виде арифметической функции от значений этого пикселя в разных каналах исходного изображения. Как правило функции вычисления индексов вычисляются довольно просто и представляют собой частное от деления значения пикселя в канале X на значение пикселя в канале Y или, например разность значений пикселей в канале X и канале Y .

Отношения каналов, которые чаще всего используют для построения индексных изображений, строятся с целью моделировать отношение поглощение/отражение для различных интересующих поверхностей. Эти отношения зависят от свойств молекулярных связей материала, соответственно в теории индексы дают информацию о химическом составе материалов. Непосредственно для применения в геологических целях существуют минеральные индексы, эти индексы основаны на свойствах поглощение/отражение минералов и горных пород. Их можно использовать для изучения состава минералов и горных пород, поскольку способны выявлять небольшие различия, которые отображаются на снимках для пород разного состава. Во многих случаях эти различия остались бы незамеченными на исходных мультиспектральных снимках.

Согласно статье «*Spectral indices for lithologic discrimination and mapping by using the ASTER SWIR bands*» (Спектральные индексы литологической дискриминации и отображение с использованием диапазонов *ASTER SWIR*) [55] спектральные индексы по реализации напоминают метод главных компонент в том смысле, что оба являются результатом ортогональных преобразований мультиспектральных данных. Принципиальная разница заключается в том, что спектральные индексы определяют оси преобразования для представления конкретных спектральных характеристик, представляющих интерес, в то время как метод главных компонент математически определяет оси преобразования для максимального увеличения дисперсии мультиспектральных данных. Поскольку спектральные индексы используют заранее определенные коэффициенты преобразования, это позволяет до некоторой степени знать

физические значения преобразованного результата. Это означает, что легко интерпретировать результирующий спектральный индекс изображения с геологической точки зрения, если использовать спектральные индексы для различения и картографирования типов поверхностных пород.

В качестве вспомогательных при геологических исследованиях могут быть использованы и вегетационные индексы. Согласно публикации «Вегетационные индексы» [56] наиболее популярный и часто используемый вегетационный индекс — *NDVI* (*Normalized Difference Vegetation Index*), который для растительности принимает положительные значения, и чем больше зеленая фитомасса, тем он выше. На значения индекса влияет также видовой состав растительности, ее сомкнутость, состояние, экспозиция и угол наклона поверхности, цвет почвы под разреженной растительностью. Главным преимуществом вегетационных индексов является легкость их получения и широкий диапазон решаемых с их помощью задач. Так, *NDVI* часто используется как один из инструментов при проведении более сложных типов анализа, результатом которых могут являться карты продуктивности лесов и сельскохозяйственных земель, карты ландшафтов и природных зон, почвенные, аридные, фито-, гидрологические, фенологические и другие эколого-климатические карты. Формула *NDVI* имеет следующий вид:

$$NDVI = \frac{NIR - \text{Красный}}{NIR + \text{Красный}} \quad (6.8)$$

где *NIR*, данные в ближнем инфракрасном диапазоне

Кроме вегетационных индексов, существуют так же и минеральные индексы. Ниже приведен ряд индексов с кратким описанием, обозначенных в публикации «*Lithologic mapping with multispectral ASTER TIR and SWIR data*» (Литологическое картирование с использованием мультиспектральных данных *ASTER TIR* и *SWIR*) [57].

Минералы оксида железа обладают характерной спектральной характеристикой поглощения в ближней ИК-области, хотя Спектральное

расположение диапазонов *ASTER VNIR* не оптимизировано для обнаружения минералов.

Кальцит демонстрирует характерные спектральные свойства в *SWIR* диапазоне, то есть имеет неглубокое поглощение в пятом канале *ASTER* и глубокое в восьмом канале. А в шестом и девятом каналах имеет довольно высокую отражательную способность. Такие спектральные характеристики позволили определить индекс кальцита, который для *ASTER* имеет вид:

$$Cl_{swir} = \frac{\text{Канал}_6 - \text{Канал}_9}{\text{Канал}_8 + \text{Канал}_8} \quad (6.9)$$

Типичный измененный минерал, содержащий гидроксил, монтмориллонит, имеет глубокое и резкое поглощение в шестом канале *ASTER SWIR*. Слюда имеет аналогичную спектральную характеристику. Обнаружить Эта группа минералов, первый индекс измененных минералов, содержащих *OH*, OHI_a , определяется как:

$$OHI_a = \frac{\text{Канал}_4 \times \text{Канал}_7}{\text{Канал}_6 \times \text{Канал}_6} \quad (6.10)$$

Вторая группа измененных гидроксиминералов, включая пирофиллит, имеет резкую особенность поглощения в пятом спектральном канале *ASTER*. Для обнаружения этой группы минералов разработан второй *OH* индекс измененных минералов, OHI_b который определяется как:

$$OHI_b = \frac{\text{Канал}_4 \times \text{Канал}_7}{\text{Канал}_5 \times \text{Канал}_5} \quad (6.11)$$

Алунит, который является сульфатным минералом, хотя большинство других измененных гидроксиминералов являются силикатами, имеет уникальную спектральную особенность, только он имеет резкую характеристику поглощения в 8 канале. Учитывая, что коэффициент отражения

алунита уменьшается с увеличением длины волны в 9 канале и что надежность данных в 9 не высока в полосах *SWIR*, индекс алунита (*ALI*) определяется как:

$$ALI = \frac{\text{Канал}_7 \times \text{Канал}_7}{\text{Канал}_5 \times \text{Канал}_8} \quad (6.12)$$

Приблизительная оценка спектрального провала в излучательной способности *TIR* смещается в сторону большей длины волны по мере того, как объемное содержание диоксида кремния в магматической породе должно быть меньше. Это ввело определение индекса объемного содержания диоксида кремния, имеющее следующий вид:

$$SI = \frac{\text{Канал}_{12}}{\text{Канал}_{13}} \quad (6.13)$$

SI, безусловно, коррелирует с валовым содержанием диоксида кремния в силикатах, но также он в некоторой степени чувствителен к карбонатам. Индекс объемного содержания диоксида кремния (мафический индекс), разделенный для карбонатов, *SI_i*, определяется как:

$$SI_i^- = \frac{\text{Канал}_{12}}{\text{Канал}_{13} \times CI^i} = \frac{\text{Канал}_{12} \times \text{Канал}_{14}^i}{\text{Канал}_{13}^{i+1}} \quad (6.14)$$

Из спектральной излучательной способности кварца определен индекс кварца (*QI*) определяется как, который имеет вид:

$$QI = \frac{\text{Канал}_{11} \times \text{Канал}_{11}}{\text{Канал}_{10} \times \text{Канал}_{12}} \quad (6.15)$$

В таблице 6.1. представлены некоторые минеральные индексы для каналов съёмочной системы *ASTER* раскрытые в Руководстве по обработке минерального индекса «*ASTER Mineral Index Processing Manual*» [58].

Таблица 6.1 – некоторые минеральные и вегетационные индексы *ASTER*

№	Название	Формула (Номера каналов)
1	alunite / kaolinite / pyrophyllite	Канал4+ Канал6/Канал5
2	basic degree index	Канал12/Канал13
3	carbonate / chlorite / epidote	(Канал7+Канал9)/Канал8
4	epidote / chlorite / amphibole	(Канал6+Канал9)/(Канал7+Канал8)
5	kaolinite	Канал7/ Канал5
6	muscovite	Канал7/ Канал6
7	quartz rich rocks	Канал14/ Канал12
8	sericite / muscovite / illite / smectite	(Канал5+ Канал7)/Канал6
9	silica	Канал11/ Канал10
10	silica	Канал11/ Канал12
11	silica	Канал13/ Канал10
12	SiO ₂	Канал13/Канал12

7. Опыт реализации методики дистанционного картирования поисковых признаков на Ак-Сугской площади

7.1. Выбор и описание использованных входных данных ДЗЗ

Для реализации методов, описанных в предыдущей главе, стояла необходимость подбора наиболее применимых входных мультиспектральных данных. Поскольку в подавляющем большинстве публикаций, указанных в той же главе, в качестве основных входных данных для геологического картирования используются данные съёмочной системы *ASTER*. Было решено использовать данные именно этой системы ДЗЗ. Кроме того, в качестве вспомогательных были использованы данные съёмочной системы *Sentinel-2*.

Согласно руководству пользователя, данными ДЗЗ *ASTER* [63], *ASTER*— это мультиспектральный сенсор теплового излучения и отражения, который был предоставлен Министерством международной торговли и промышленности Японии и был запущен на борту Национальной системы наблюдения за Землей (*EOS Terra*) Национального управления по авиации и исследованию космического пространства (*NASA*) в 1999 году. На момент издания руководства (в 2015 году) системой *ASTER* было сформировано около 3 миллионов спутниковых изображений.

Съёмочная система *ASTER* включает четыре сенсора, которые в общей сложности несут 14 спектральных каналов. Диапазон видимого света и ближнего инфракрасного излучения (*VNIR*) включает три спектральных канала и обладает пространственным разрешением 15 метров. Диапазон коротковолнового инфракрасного излучения (*SWIR*) включает 6 спектральных каналов и обладает пространственным разрешением 30 метров. Диапазон теплового инфракрасного излучения (*TIR*) включает 5 спектральных каналов и обладает пространственным разрешением 90 метров. Четвёртый сенсор является, по сути, дублированным сенсором *VNIR*- диапазона, направленным на 55 секунд позади надира основного сенсора, сделано это для построения

стереопары. Временное разрешение *ASTER* составляет 16 суток во всех диапазонах и 5 суток во *VNIR* диапазоне.

Данные *ASTER* ДЗЗ *AST_L1T* состоит из файла научных данных *EOSDIS HDF-EOS2*, файла метаданных с расширением *XML* и файлов изображения *GeoTiff*, по одному изображению на каждый из трёх спектральных диапазонов. Создание изображений с полным разрешением *GeoTIFF* зависит от настроек захвата диапазона или условий окружающей среды датчика для любого данного спутникового наблюдения. Продукты, связанные с много файловым продуктом *AST_L1T*, включают продукт текстового отчета оценки качества (*QA*) и продукт *BROWSE*, состоящий из файлов просмотра с низким пространственным разрешением *JPEG*.

Именно данные *AST_L1T* являются наиболее подходящими данными *ASTER* для решения поставленных задач, поскольку включают все спектральные каналы этой съёмочной системы. Согласно политике доступа, к данным *ASTER*, данные *AST_L1T* с 2015 года находятся в свободном доступе и их распространение регламентировано договорными соглашениями между *NASA* и японскими владельцами датчиков *ASTER*.

Согласно публикации «Новейшие и перспективные спутники дистанционного зондирования Земли», опубликованной в журнале «Геоматика» в 2013 году [64]. Пара спутников *Sentinel-2* сконструирована для непрерывной поставки снимков высокого разрешения на всю поверхность Земли. Сенсоры данной съёмочной системы включают 10 спектральных каналов *VNIR*-диапазона и 3 канала *SWIR*-диапазона. Каналы обладают различным пространственным разрешением от 10 до 60 метров на пиксель. Временное разрешение составляет от двух до пяти суток в зависимости от географического положения снимаемой точки местности. Особенностью системы *Sentinel-2* является сочетание большого территориального охвата, большой частоте съёмки и, как следствие, получением полного покрытия всей Земли мультиспектральной съёмкой высокого разрешения.

7.2 Поиск и предварительная обработка исходных данных

Для дальнейшей обработки было необходимо скачать данные исследуемого района, при этом они должны включать минимальное количество облаков и теней, а также съёмка должна быть произведена в месяцы, когда отсутствует снежный покров. Территория исследования с привязкой по координатам в системе WGS-84, с наложением на слой *Google Maps* отображена на (рисунке 7.1)

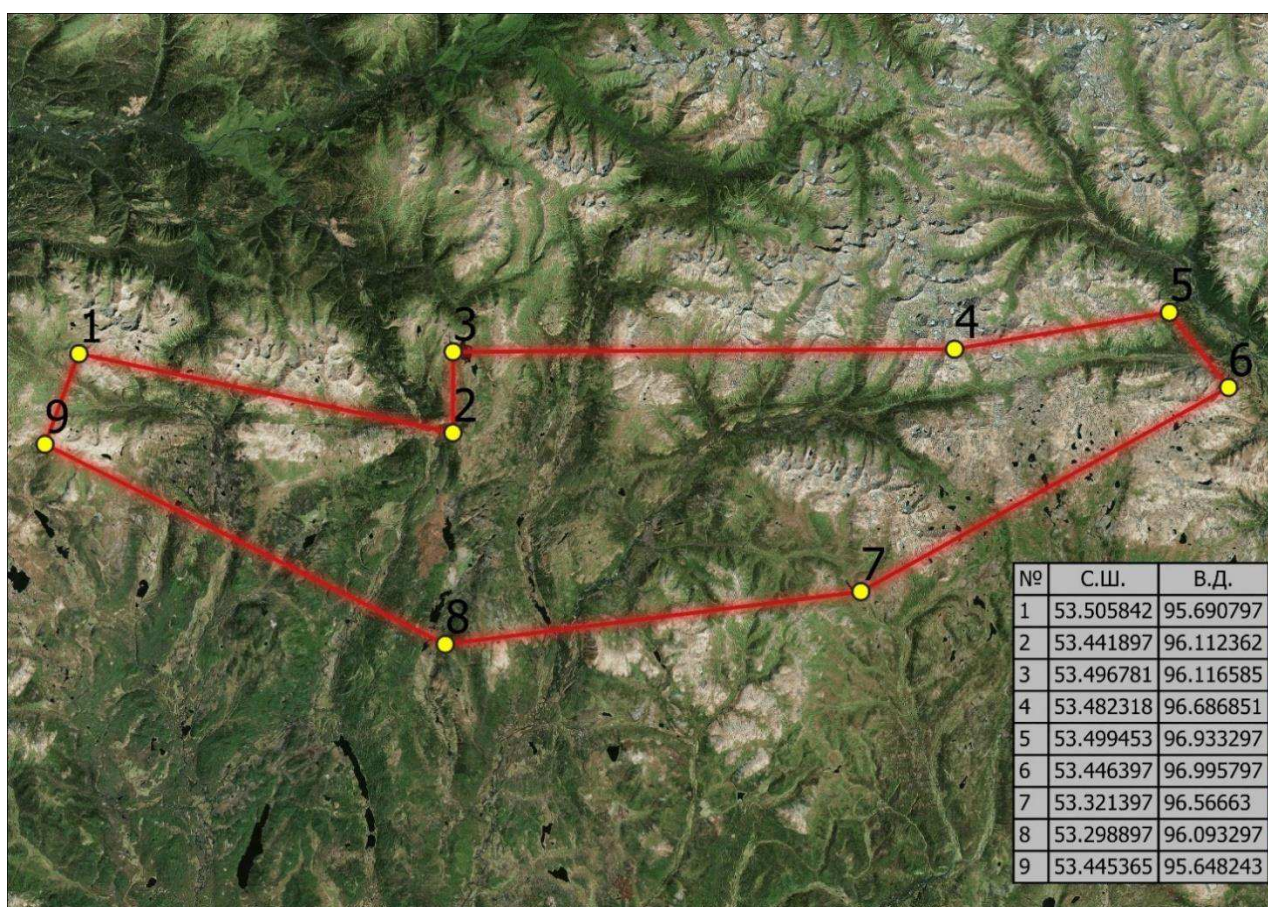


Рисунок 7.1. – Расположение исследуемой территории в Google Maps

С помощью координат, отображенных на рисунке 7.1., с сайта геологической службы США (*USGS*) [65]. Были подобраны и скачаны данные ДЗЗ *ASTER* и *Sentinel-2*.

В ходе поиска выяснилось, что исследуемая территория фрагментарно находится в различных сценах *ASTER*, что привело к необходимости скачивания сразу трёх сцен, с целью покрытия всей исследуемой территории.

Были скачены данные *ASTER* с датами съёмки 21.07.2007, 21.09.2003 и 26.10.2001, что касается последнего, он мало подходил для последующей обработки в виду полного отсутствия растительности и наличия незначительных участков снежного и ледяного покрова, однако более подходящих снимков данного фрагмента исследуемого участка найти не удалось. Что касается системы *Sentinel-2* для отображения исследуемой территории был скачен один снимок с датой съёмки 11.08.2018.

Данные *ASTER* соответствовали типу данных *AST_L1T*, упомянутому в разделе 3.1 и представляли собой архивы иерархического формата «*.hdf*», которые были распакованы с помощью инструмента «*Import*» программного пакета *ErdasImagine*, в котором изначально реализована возможность экспорта данных *ASTER* из формата *.hdf* в растровые форматы. В результате было получено шесть многоканальных растровых изображений (по три на снимок каждого фрагмента местности) в формате *img*. Каждое из трёх изображений одной территории соответствовало своему спектральному диапазону (*VNIR*, *SWIR*, *TIR*).

В ходе просмотра изображений в разных каналах, было выявлено смещение в их пространственной привязке относительно друг друга, для ликвидации данного явления с помощью инструмента «Привязка растров» программного пакета *QGIS* была выполнена коррекция пространственной привязки. Коррекция проводилась для *SWIR* и *TIR* диапазонов, а диапазон *VNIR* использовался как опорный, поскольку согласно информации, упомянутой в разделе 3.1, именно данные в этом диапазоне обладают самым высоким пространственным разрешением. При коррекции был использован метод полиномиальной трансформации первого порядка, требующий для реализации не менее трёх контрольных точек. В исходной для данных проекции (*WGS-84*) изображение имело вид, не благоприятный для визуального восприятия. По этой причине опорные *VNIR* изображения были преобразованы в проекцию «*WGS-84 UTM zone 46N*», и к ней же были привязаны корректируемые изображения. На рисунке 7.2. показан фрагмент изображения *VNIR* диапазона

2003 года съёмки до (слева) и после (справа) приведения его к проекции «WGS-84 UTM zone 46N».

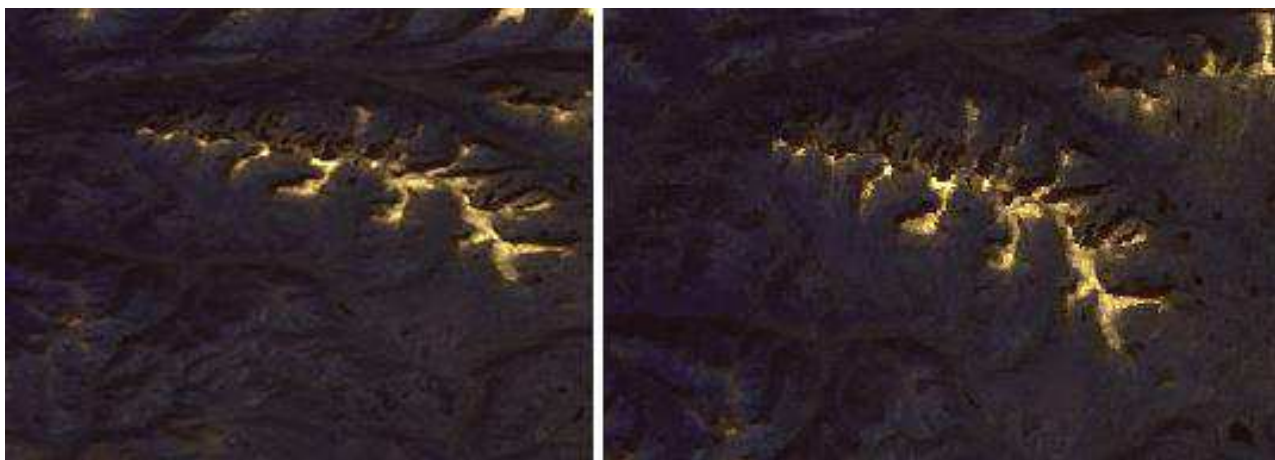


Рисунок 7.2. – Сравнение фрагмента снимка до приведения к проекции «WGS-84 UTM zone 46N» и после

Для сокращения времени, необходимого на дальнейшую обработку изображений, было решено произвести вырезание исследуемой территории из цельных изображений, поскольку исследуемая территория занимает незначительную (менее одной четверти) часть всей сцены. Данная операция была выполнена с помощью инструмента «Обрезать растр по маске» программного пакета *QGIS* для чего по координатам, отображенным на рисунке 7.1, был построен полигональный объект, который и был использован в качестве маски для вырезания.

Согласно руководству пользователя, данными ДЗЗ *ASTER* [63], данные типа *AST_L1T*, являются данными *AST_L1A*, прошедшими геометрическую и радиометрическую коррекцию, из этого следует, что в дальнейшей предобработке они не нуждаются.

Что касается *Sentinel-2*, для покрытия исследуемой территории выяснилось, что достаточно двух сцен. Были скачаны две сцены с датой съёмки 27.06.2018. Скачанные данные были в архивированном формате *.rar*, после разархивирования выяснилось, что растровые изображения в формате *jpeg2000* (всего по 13 изображений для каждой сцены, что соответствует числу

спектральных каналов данной съёмочной системы), кроме того, в архиве находился файл метаданных в формате *.xml*.

Для дальнейшей работы снимки были сшиты в цельные многоканальные изображения формата *.img* с помощью инструмента «*LayerStrack...*» программного пакета «*ErdasImagine*». В результате чего было получено два многоканальных снимка соответствующе количеству сцен на территории исследования.

Для дальнейшей работы стояла необходимость выделения на обрабатываемых данных растительности, а также водных объектов, поскольку данные территории на снимках могли отрицательно повлиять на дальнейшие результаты. Для выделения растительности с помощью инструмента «Калькулятор растров» в программном пакете *QGIS* были построены индексные изображения *NDVI* по данным *Sentinel-2*. Использование для построения индексного изображения именно данных *Sentinel-2* обусловлено тем, что для построения были необходимы восьмой и четвертый каналы, которые согласно публикации: «Новейшие и перспективные спутники дистанционного зондирования Земли», опубликованной в журнале «Геоматика» в 2013 году [64] имеют пространственное разрешение 10 метров. А для построения по данным *ASTER* необходимы второй и третий каналы, согласно информации, из раздела 3.2 пространственное разрешение которых 30 метров. Формула построения *NDVI* по данным *Sentinel-2* имеет следующий вид:

$$NDVI(Sentinel2) = \frac{\text{Канал8} - \text{Канал4}}{\text{Канал8} + \text{Канал4}} \quad (7.1)$$

В результате было получено два индексированных изображения, из которых так же с помощью инструмента «Калькулятор растров» в программном пакете *QGIS* были исключены все пиксели, имеющие значения более 0,20 (значения определяющего наличие растительности) [56]. В результате чего было получено два логических (имеющих всего два значения пикселей) растровых изображения, на которых значение пикселя 1 обозначало отсутствие

растительности, значение 0 обозначало наличие растительности. Изображения были соединены между собой с помощью инструмента «Совместить растры» в программном пакете *QGIS*, результате чего было получено цельное изображение, состоящее из двух сцен. Затем выполнено вырезание области интереса с помощью маски, точно так же как это было сделано с данными *ASTER*. Завершающим этапом создания слоя растительности являлся перевод растрового изображения в векторный формат, что выполнено с помощью инструмента «Создание полигонов (Растр в вектор)» *QGIS*. В результате чего был получен растровый слой, в формате *.shp* покрывающий области с отсутствием растительности. Фрагмент этого векторного слоя, наложенного на слой онлайн карт *Google Maps* отображен на 7.3.



Рисунок 7.3 – Фрагмент векторного слоя растительности

Слой водных объектов так же был сформирован с помощью данных *Sentinel-2* путём визуального дешифрирования и ручного создания полигонов, так же в программном пакете *QGIS*. Фрагмент результирующего изображения в формате *.shp* отображен на рисунке 7.4.

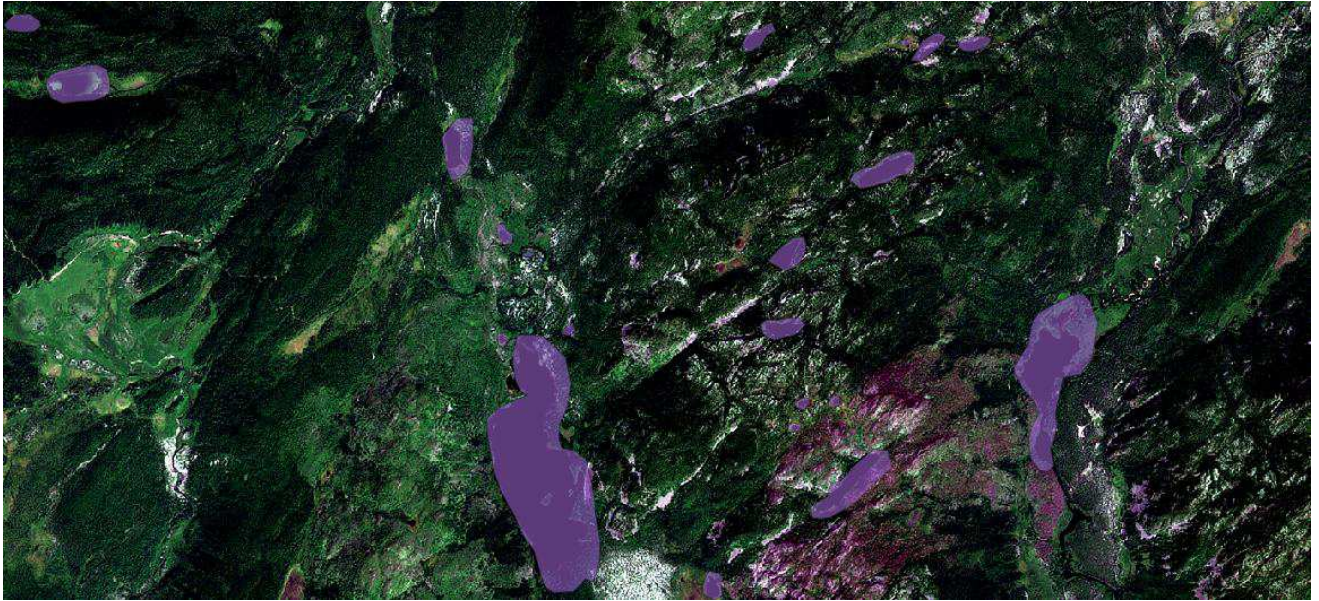


Рисунок 7.4. – Фрагмент векторного слоя водных объектов

7.3 Картирование методом спектрального угла

Картирование методом спектрального угла было реализовано с помощью инструмента «*Spectral Analysis Workstation*» в программном пакете *ErdasImagine*. Данный инструмент позволяет просматривать спектральные кривые в различных пикселях изображения, а также содержит библиотеки эталонных спектров, о которых упоминалось в разделе 1.1, реализована возможность построения изображений методом *SAM* по эталонному спектру и визуального сравнения кривой в пикселе изображения с кривой из библиотеки. Для дальнейшего анализа была использована библиотека *Aster* поскольку она изначально предназначалась именно для данных *ASTER*. На (рисунках 7.5 – 7.10.) отображены спектральные кривые искомым минералов примечательно, что из имеющихся в библиотеке спектров для каждого минерала было выбрано по 2-3 спектра, которые имели наибольшие отличия друг от друга. В ходе работы выяснилось, что в библиотеке *Aster* хранятся спектральные кривые, которые соответствуют *SWIR* диапазону данных ДЗЗ *ASTER*, при этом некоторые кривые включают все каналы этого диапазона.

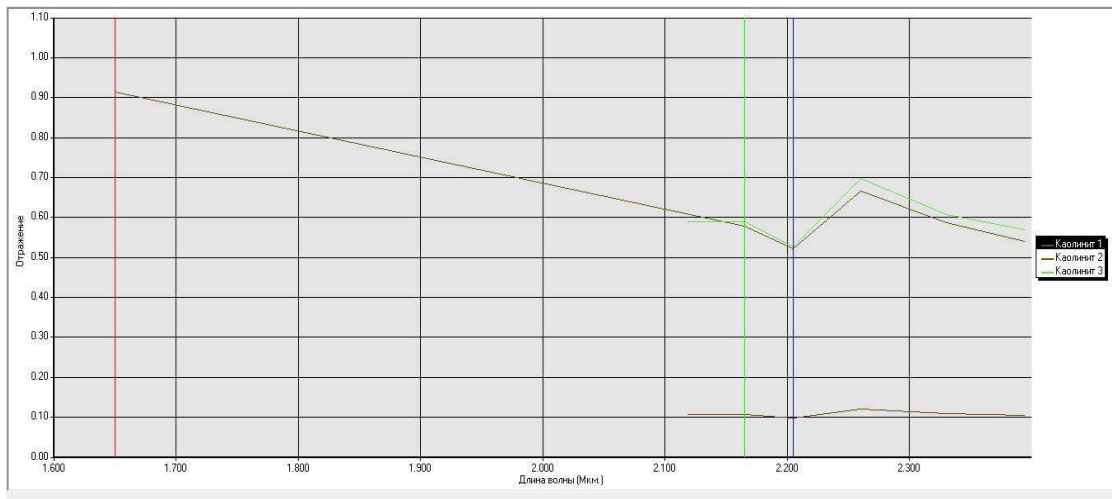


Рисунок 7.5. – Спектральные кривые каолинита библиотеки Aster

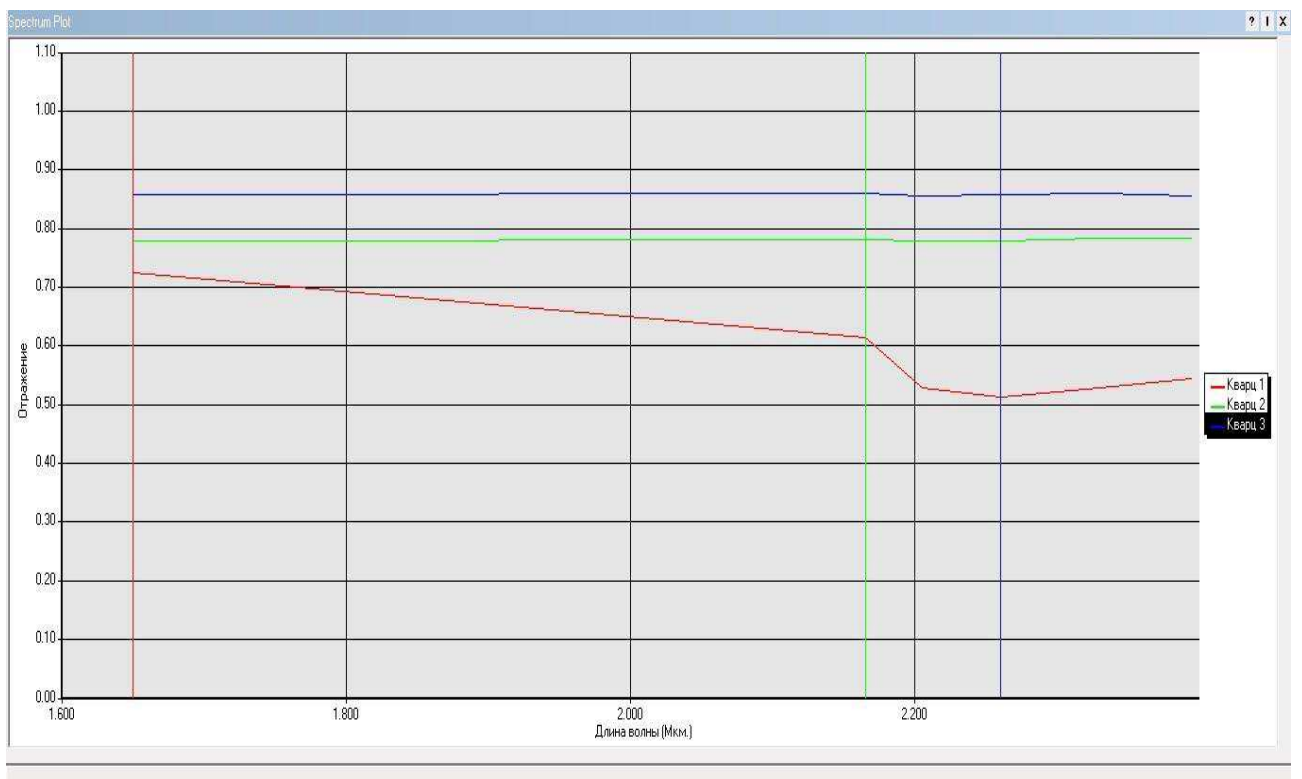


Рисунок 7.6. – Спектральные кривые кварца библиотеки Aster

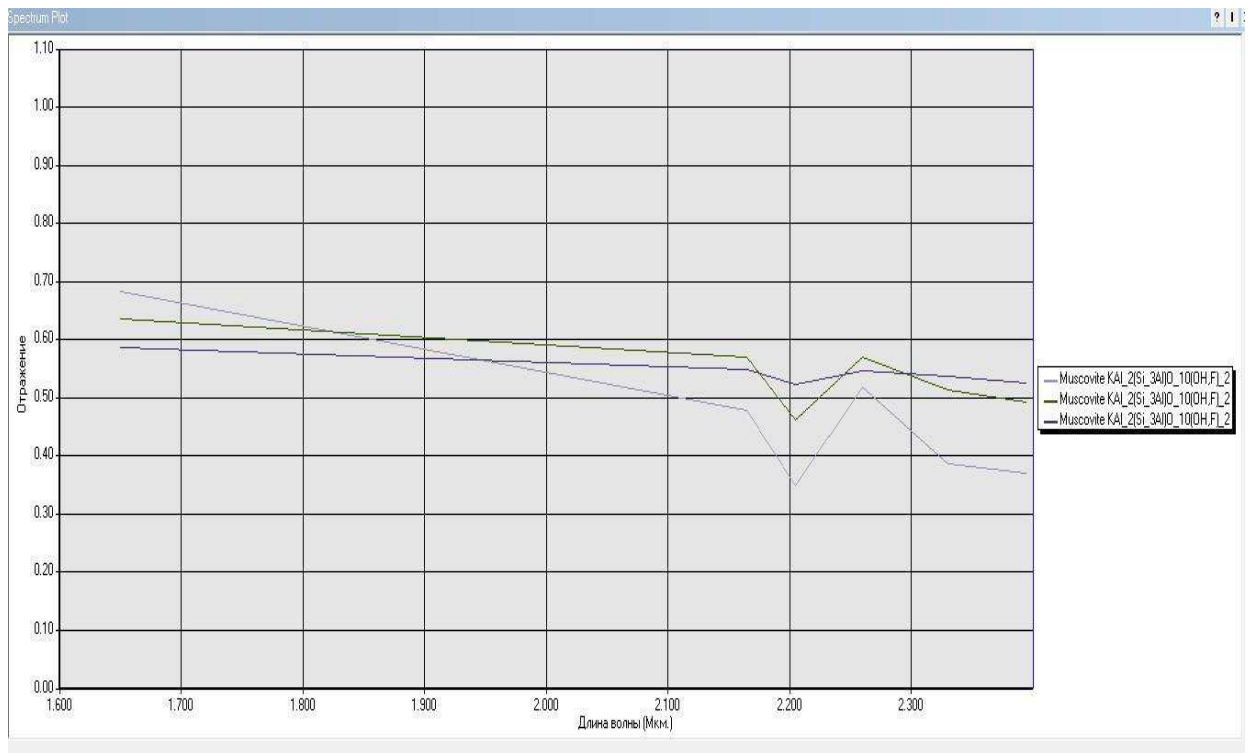


Рисунок 7.7. – Спектральные кривые мусковита библиотеки Aster

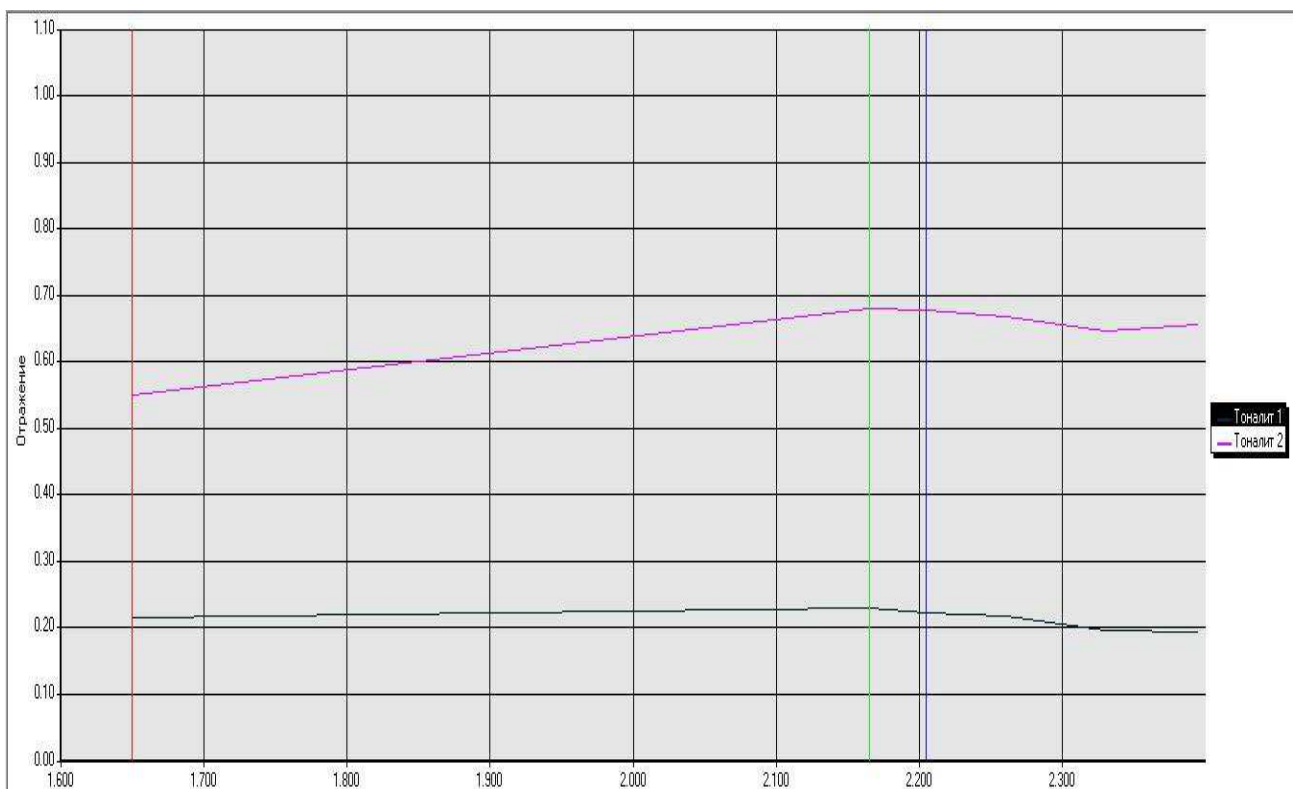


Рисунок 7.8 – Спектральные кривые тоналита библиотеки Aster

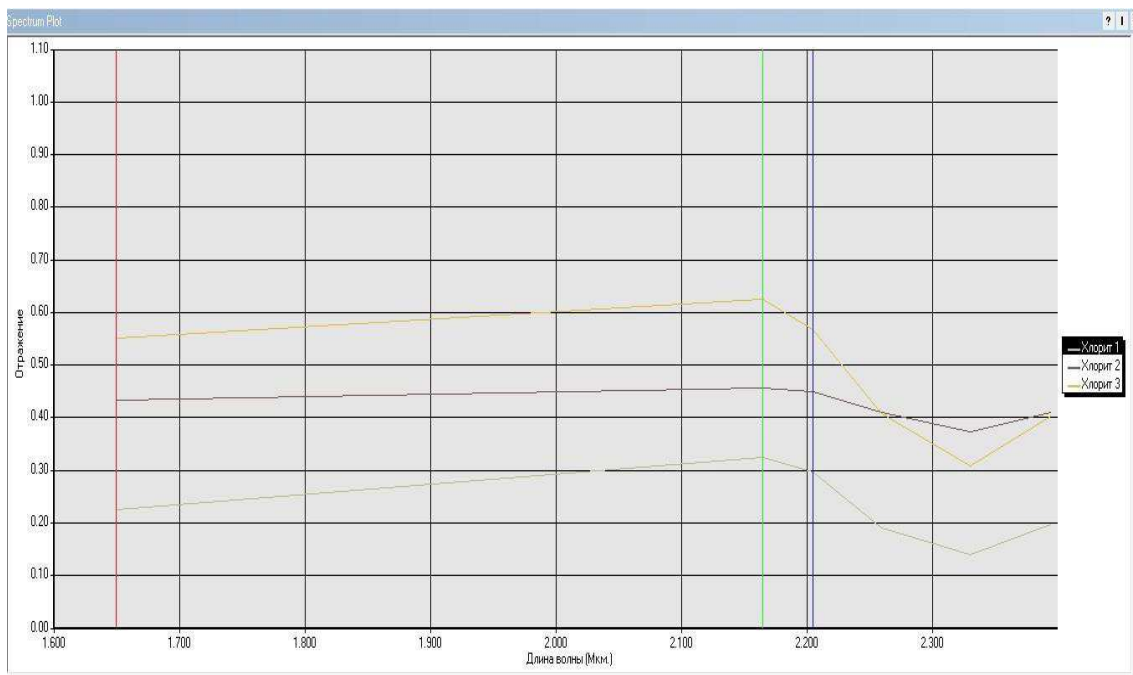


Рисунок 7.9. – Спектральные кривые хлорита библиотеки Aster

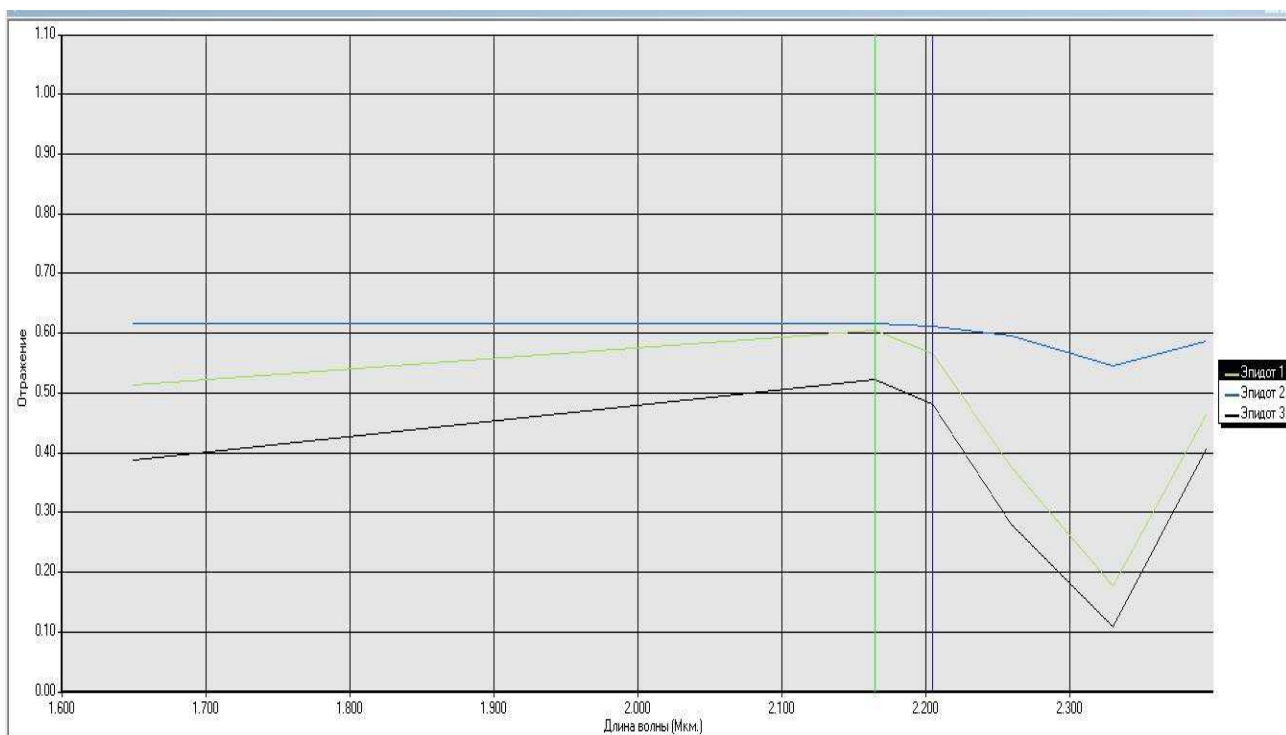


Рисунок 7.10 – Спектральные кривые эпидота библиотеки Aster

С помощью функции «*Material Mapping*», входящей в инструмент «*Spectral Analysis Workstation*», было построено по 3 (по количеству эталонных кривых) для каждого минерала изображения, содержащего косинус спектрального угла (степень сходства эталонного спектра со спектром в каждом пикселе). Изображения строились по данным *SWIRASTER* для всех трёх

обрабатываемых сцен с целью анализа всей исследуемой территории. Для дальнейшей обработки были необходимы пиксели, в которых сходство с эталоном достаточно высокое, поэтому было необходимо выделить из изображений только пиксели, значение которых (косинус) не менее 0,999 затем объединить сначала все пиксели с такими значениями из разных сцен, затем объединить и результаты по сценам (отдельно для каждого минерала). Эта задача была решена с помощью растрового калькулятора *QGIS*, было задано условие, что если хотя бы в одном изображении (внутри одной сцены и для одного минерала) значение пикселя больше 0,999 то в новом изображении этому пикселю присвоено значение 1, всем остальным пикселям присваивалось значение 0. Соответственно был получен массив растровых логических изображений, которые сначала были преобразованы в векторный формат (.shp) с помощью инструмента «Создание полигонов (Растр в вектор)» *QGIS*, а затем результаты по сценам отдельно для каждого минерала были объединены с помощью инструмента «Объединить векторные слои» *QGIS*. В результате чего было получено шесть векторных слоёв (по количеству минералов), которые содержали пиксели с наибольшим сходством с эталонной кривой. В качестве примера полученного на данном этапе результата, на рисунке 7.11 показан фрагмент исследуемой территории, на которую наложены полученные векторные слои.

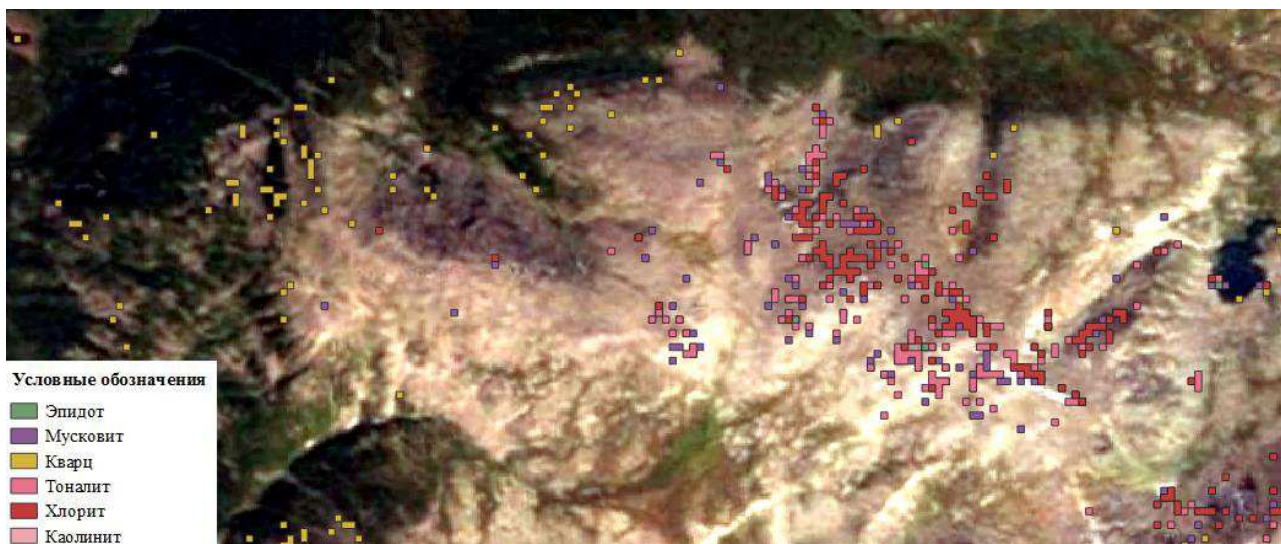


Рисунок 7.11 – Векторные слои, полученные в результате обработки данных *ASTER* методом спектрального угла

Для наглядности на основании полученных полигональных слоёв были построены точечные, каждый из которых характеризовал предполагаемые области распространения минералов, построение производилось по принципу постановки точек в областях сгустков полигональных объектов. Полигоны размером 1-2 пикселя не учитывались. При этом хлорит и эпидот были объединены в один класс, поскольку выяснилось, что их распространение характерно для одних областей. Результат отражен в (Прил. А)

7.4. Картирование методом главных компонент

Картирование методом главных компонент было выполнено в соответствии с материалами научных работ, упомянутых в разделе 6.2. Для обработки использовались данные *ASTER SWIR* диапазона.

С помощью программного инструмента «Метод главных компонент» программного пакета *ArcGIS* было построено шесть (по количеству каналов в этом диапазоне) изображений-компонент, так же в ходе работы этого алгоритма были построены ковариационные и корреляционные матрицы, а так же матрицы собственных векторов.

Согласно материалам публикации «Identification of hydrothermal alteration minerals for exploring of porphyry copper deposit using ASTER data, SE Iran» (Выявление минералов гидротермальных изменений для изучения порфиров. месторождение меди по данным *Aster*, Иран) [47]. При геологическом картировании методом главных компонент минералы разделяют на группы по спектральному признаку. Среди искомым, были выделены следующие группы:

- 1) Мусковит, серицит, Каолинит;
- 2) Хлорит/Эпидот, /Карбонат

Для определения минералов первой группы характерны высокие значения нагрузок собственных векторов для пятого и седьмого спектральных каналов (в виду характерного перегиба спектральных кривых в этих каналах), в то же время низкие нагрузки для шестого канала. Для минералов второй группы характерны высокие значения нагрузок собственных векторов для седьмого и девятого спектральных каналов, в то же время низкие нагрузки для восьмого канала. По данным признакам выделяются компоненты, при визуальном рассмотрении которых определяются зоны распространения минералов каждой из групп. При этом важно заметить, что *SWIR* диапазон — это каналы с 4 по 9. В (таблице 7.1 – 7.3) представлены матрицы собственных векторов *PCA* для каждого из обрабатываемых изображений.

Таблица 7.1. – Матрицы собственных векторов 2001г

2001 г.	Канал4	Канал5	Канал6	Канал7	Канал8	Канал9	Собственные значения векторов
Рс 1	0,41011	0,38312	0,44105	0,42620	0,38901	0,39689	452,15493
Рс 2	0,29389	0,33164	0,53987	-0,50705	-0,43995	-0,24804	2,73016
Рс 3	0,17541	-0,17786	0,14747	0,65351	-0,21386	-0,66561	1,47414
Рс 4	0,75232	0,02407	-0,59163	-0,01634	-0,25849	0,12776	0,99809
Рс 5	-0,38543	0,60978	-0,19749	0,33652	-0,53791	0,19496	0,52327
Рс 6	0,01110	-0,58239	0,32131	0,14373	-0,50320	0,53253	0,45971

Таблица 7.2.– Матрицы собственных векторов 2003г

2003 г.	Канал 4	Канал 5	Канал 6	Канал 7	Канал 8	Канал 9	Собственные значения векторов
Рс 1	0,52704	0,38732	0,42919	0,36655	0,35919	0,35303	1062,58298
Рс 2	0,77744	0,00944	-0,06511	-0,39982	-0,39430	-0,27555	6,72018
Рс 3	0,32695	-0,39203	-0,69623	0,41736	0,27296	0,07737	2,72228
Рс 4	-0,02324	0,22180	-0,35620	-0,54281	0,06244	0,72446	1,77873
Рс 5	-0,09654	0,65039	-0,36807	0,41239	-0,51110	-0,03014	0,88703
Рс 6	0,03245	-0,47329	0,25391	0,25862	-0,61309	0,51740	0,54856

Таблица 7.3. – Матрицы собственных векторов 2007г

2007 г.	Канал 4	Канал 5	Канал 6	Канал 7	Канал 8	Канал 9	Собственные значения векторов
Рс 1	0,57006	0,41307	0,40575	0,34871	0,32850	0,33204	1067,47062
Рс 2	0,76057	-0,01106	-0,17790	-0,32542	-0,44566	-0,29197	12,37221
Рс 3	0,25877	-0,45640	-0,63543	0,47946	0,27496	0,12444	4,08441
Рс 4	-0,07643	0,41443	-0,48377	-0,26724	-0,20413	0,68941	2,20379
Рс 5	-0,15150	0,57465	-0,26538	0,55723	-0,29813	-0,42073	1,01449
Рс 6	-0,02833	-0,34492	0,30903	0,40087	-0,69808	0,36975	0,72682

По матрице собственных векторов для фрагмента съёмки 2001 года определено, что для картирования зон распространения минералов обеих групп подходит пятая компонента, в виду высокого значения собственных векторов для пятого (0,60978), седьмого (0,33652) и девятого (0,19496) каналов, и низкого значения для шестого (-0,19749) и восьмого каналов (-0,53791).

Для фрагмента съёмки 2003 года определено, что для картирования зон распространения минералов обеих групп подходит так же пятая компонента, в виду высокого значения собственных векторов для пятого (0,65039), седьмого (0,41239) и девятого (-0,03014) каналов, и низкого для шестого (-0,36807) и восьмого каналов (-0,51110).

Для фрагмента съёмки 2007 года определено, что для картирования минералов группы Мусковит, Кварц, Каолинит подходит пятая компонента, в виду высокого значения собственных векторов для пятого (0,57465) и седьмого (0,55723) каналов и низкого значения для шестого (-0,26538) канала. А для картирования минералов группы Хлорит/Эпидот, Тоналит/Серицит подходит шестая компонента в виду высокого значения собственных векторов для седьмого (0,40087) и девятого (0,36975) каналов и низкого значения для восьмого (-0,69808) канала.

На выбранных для дальнейшего анализа компонентных изображениях предполагаемые зоны распространения выделяются пикселями с высокими значениями (светлые пиксели) фрагменты компонентных изображений для каждой сцены представлены на (рисунках 7.12 – 7.15.). В ходе визуального дешифрирования компонент с использованием маски растительности (для исключения зон с отсутствием обнаженных участков), и водных объектов сформированной в ходе выполнения раздела 6.2 была сформирована карта распространения минералов с обозначением зон в виде точечных объектов (аналогичная той, что была сформирована по результате реализации метода спектрального угла). В данном случае для большинства сцен для картирования обеих групп минералов подходили одни и те же компоненты, поэтому были

выделены зоны предполагаемого распространения всех искомым минералов, а не каждого вида по отдельности.



Рисунок 7.12 – Фрагмент пятой компоненты снимка 2001 года



Рисунок 7.13– Фрагмент пятой компоненты снимка 2003 года

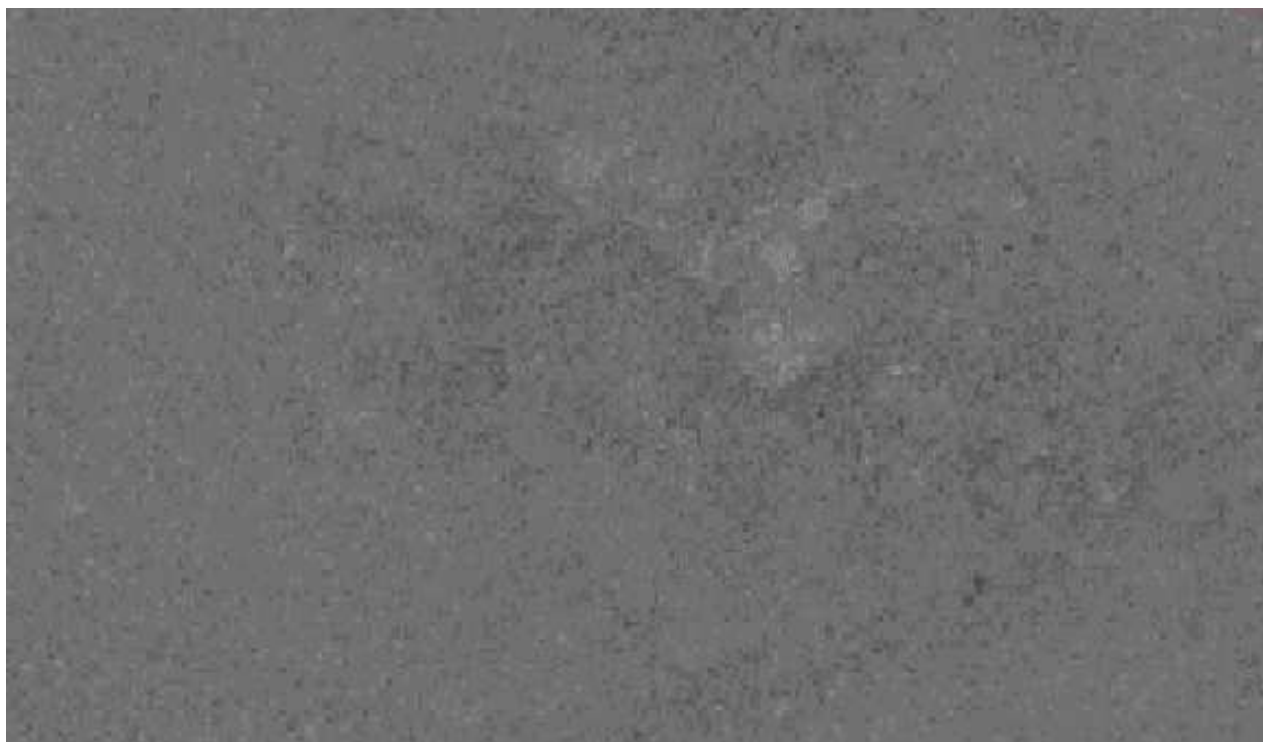


Рисунок 7.14 – Фрагмент пятой компоненты снимка 2007 года

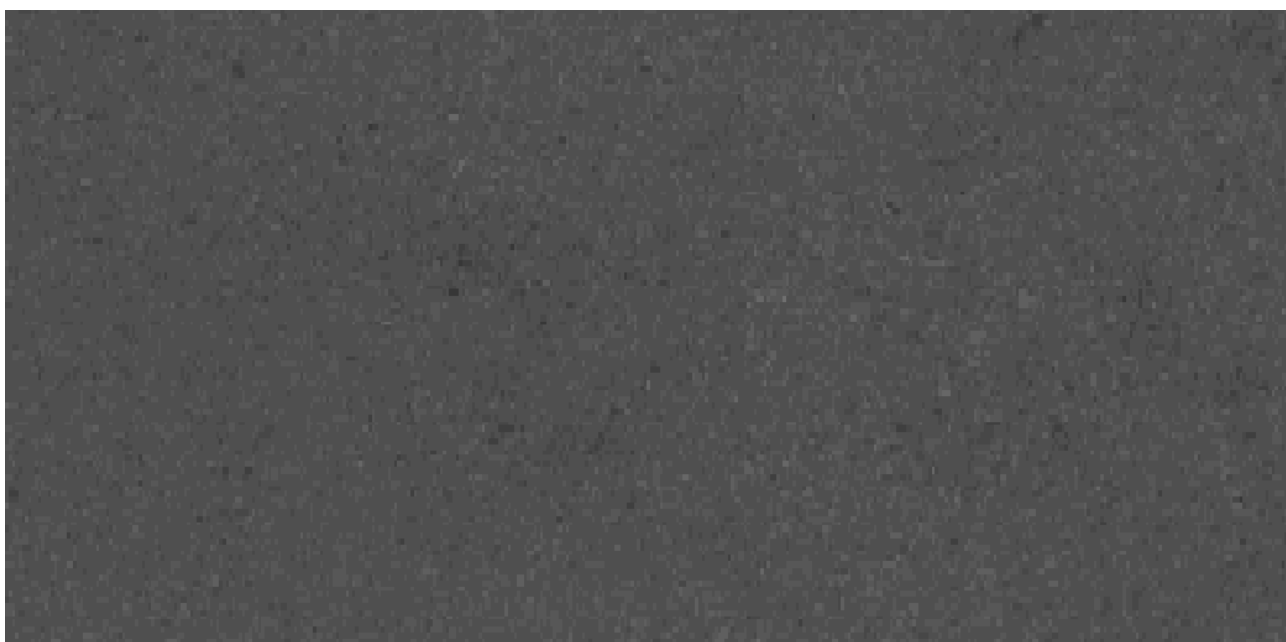


Рисунок 7.15 – Фрагмент шестой компоненты снимка 2007 года

Карта предполагаемого распространения искомым минералов, полученная в результате дешифрирования компонентных изображений, отображена в (Прил.А). Примечательно, что картирование по отдельным группам минералов выполнено только для восточной части исследуемой территории, поскольку только этот участок покрывала сцена 2007 года. В остальных участках территории картирование выполнено для минералов обеих групп как одной

группы в виду соответствия требований для картирования разных групп минералов одних и тех же компонент.

7.5. Картирование методом минеральных индексов

Картирование методом минеральных индексов было выполнено в соответствии с информацией из раздела 4.3. При обработке были использованы все имеющиеся данные ДЗЗ по исследуемой территории и все спектральные каналы *ASTER*. Основным инструментом при картировании был уже ранее упомянутый в данной работе «Калькулятор растров» в программном пакете *QGIS*. Картирование производилось по искомым минералам согласно, для чего были использованы минеральные индексы, обозначенные формулами 6.14.,6.15,6.16, а также в таблице 6.1. Всего было использовано 15 минеральных индексов.

В соответствии с имеющимися минеральными индексами картирование выполнено по следующим минералам/группам минералов:

- 1) Хлорит/Эпидот (таблица 6.1 строки № 3, 4);
- 2) Каолинит (таблица 6.1 строки № 1, 5);
- 3) Мусковит (таблица 6.1. строка № 6);
- 4) Серицит, Мусковит (таблица 6.1 строка № 8);
- 5) Кварц (таблица 6.1. строки № 2, 7, 9, 10, 11, 12, формулы 14,16);
- 6) Кислые породы (формула 15)

Согласно руководству по обработке минеральных индексов «*ASTER Mineral Index Processing Manual*» [58]. Для построения индексированных изображений помимо предобработки, описанной в разделе 3.2 необходимо выполнение калибровки яркости. Калибровка яркости представляет собой вычитание единицы из значения пикселя с последующим умножением на определённый коэффициент. Данная операция выполняется по отдельности для каждого канала. Коэффициенты калибровки для значений всех каналов *ASTER* представлены на рисунке 7.16.

```

VNIR1(Incl, Offset) : { 0.676000, -
VNIR2(Incl, Offset) : { 0.708000, -
VNIR3N(Incl, Offset) : { 0.862000,
VNIR3B(Incl, Offset) : { 0.862000,
SWIR4(Incl, Offset) : { 0.217400,
SWIR5(Incl, Offset) : { 0.069600,
SWIR6(Incl, Offset) : { 0.062500,
SWIR7(Incl, Offset) : { 0.059700,
SWIR8(Incl, Offset) : { 0.041700,
SWIR9(Incl, Offset) : { 0.031800,
TIR10(Incl, Offset) : { 0.006882, -
TIR11(Incl, Offset) : { 0.006780, -
TIR12(Incl, Offset) : { 0.006590, -
TIR13(Incl, Offset) : { 0.005693, -
TIR14(Incl, Offset) : { 0.005225, -

```

Рисунок 7.16 – Коэффициенты калибровки яркости для построения индексированных изображений

Калибровка была выполнена для каждого канала и каждой сцены при помощи инструмента «Калькулятор растров». Затем с помощью того-же инструмента и с использованием необходимых, в соответствии с формулами, спектральных каналов было выполнено построение и минеральных индексов. Фрагменты некоторых полученных в результате индексированных изображений отображены на рисунках 7.17-7.22.



Рисунок 7.17. – Фрагмент изображения по мафическому индексу 2003 год съёмки

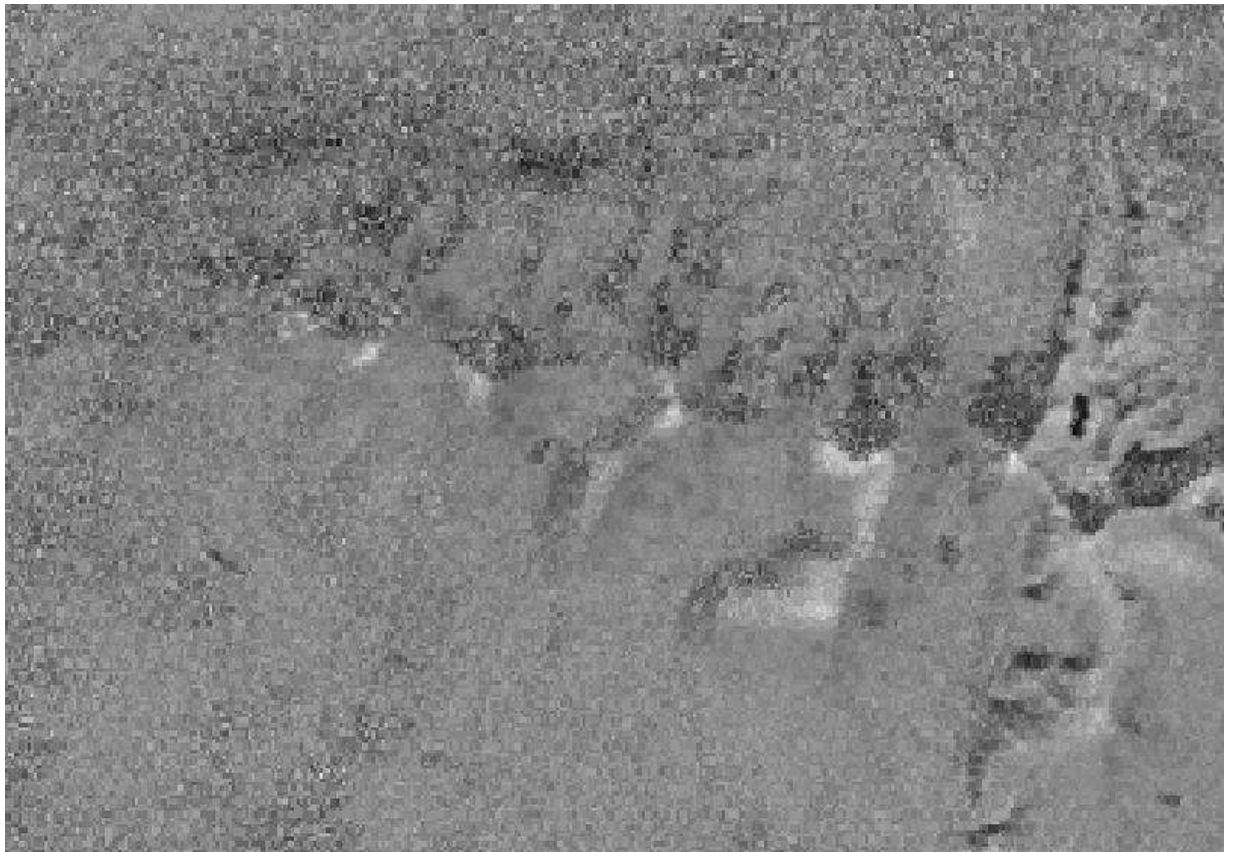


Рисунок 7.18. – Фрагмент изображения по kaolinite индексу 2003 год съёмки

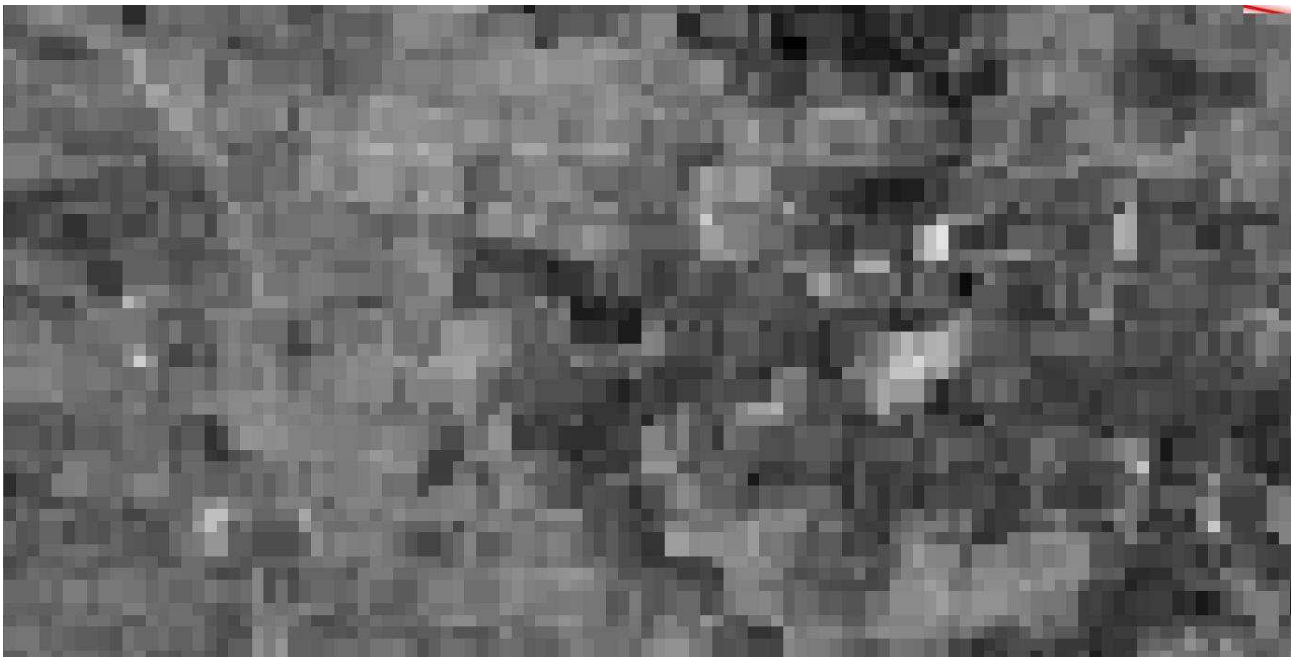


Рисунок 7.19 – Фрагмент изображения по quartz rich rocks индексу 2007 год съёмки

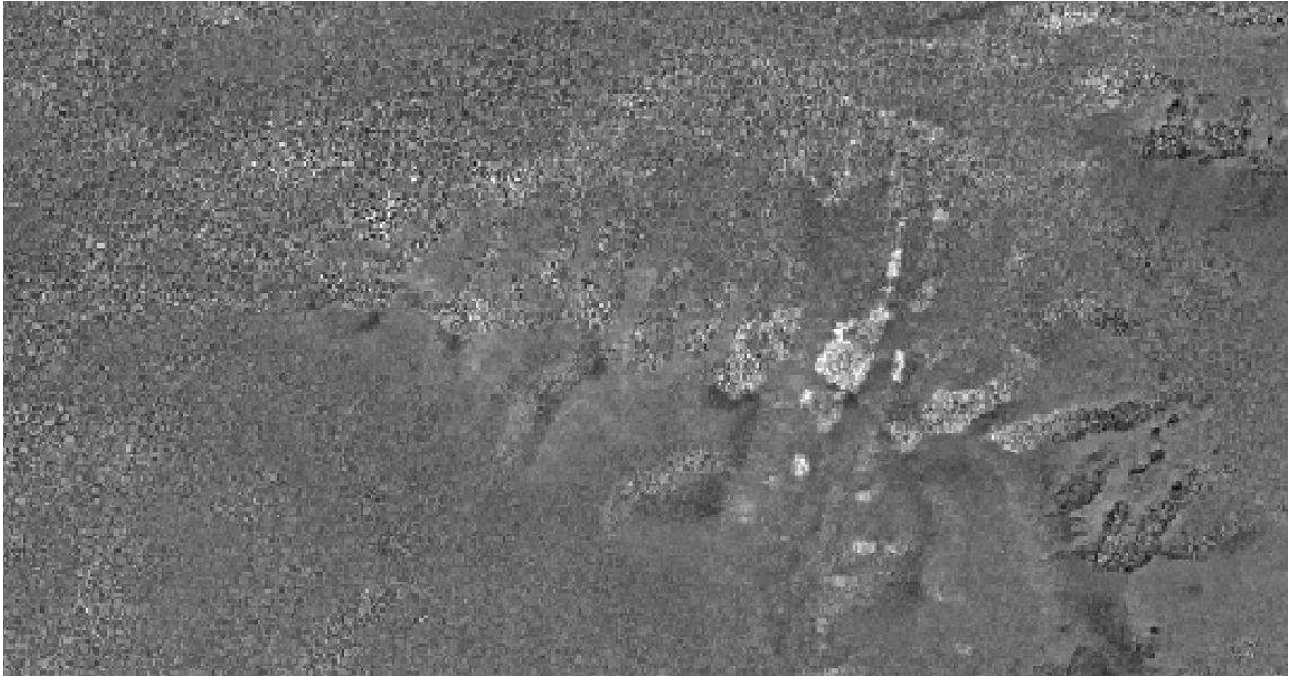


Рисунок 7.20– Фрагмент изображения по epidote / chlorite / amphibole индексу 2003 год съёмки

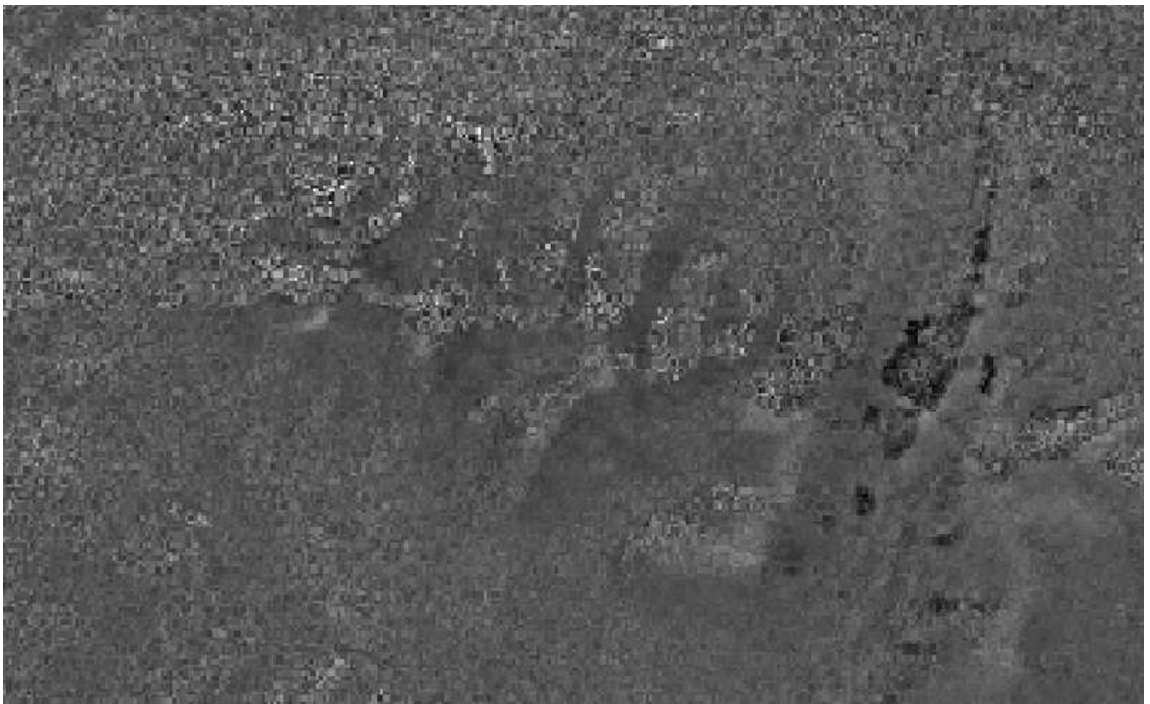


Рисунок 7.21. –Фрагмент изображения по muscovite индексу 2003 год съёмки

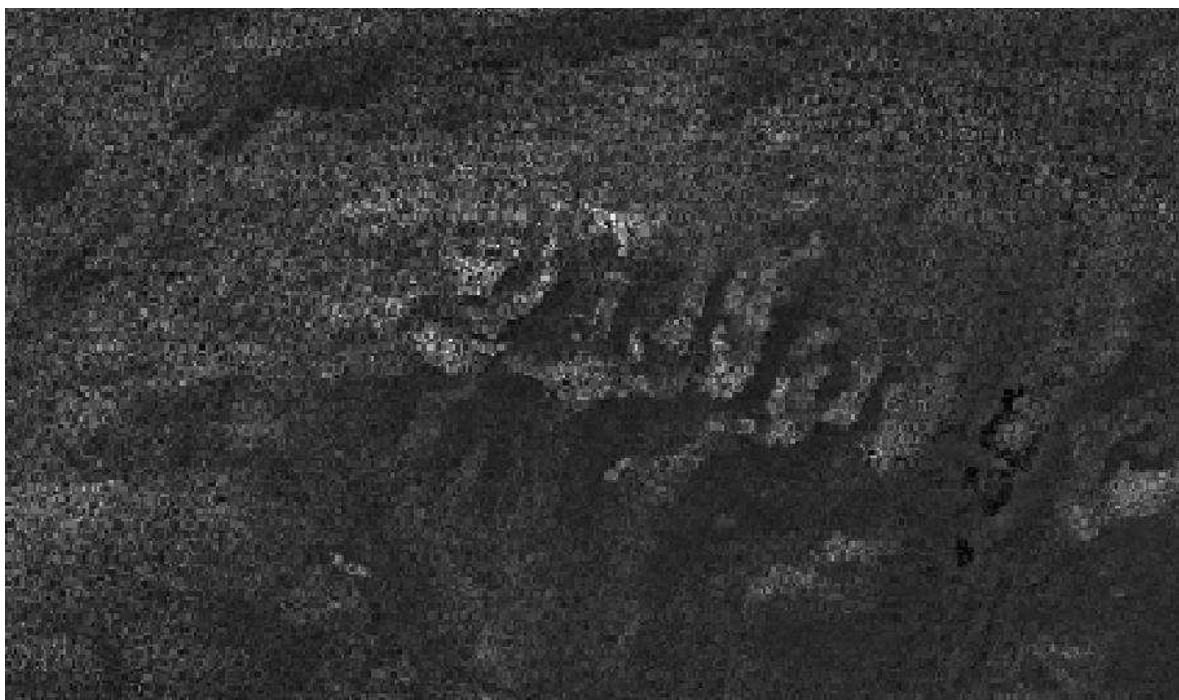


Рисунок 7.22. – Фрагмент изображения по sericite / muscovite / illite / smectite индексу 2003 год съёмки

Все полученные изображения были визуально проанализированы, для чего были использованы, сформированные в рамках выполнения раздела 7.1 векторные слои растительности и водных объектов. Для каждого изображения определялось какие (высокие или низкие) значения указывают на области интереса для определения наличия спектральных признаков минерала или группы минералов. В результате чего, с помощью программного пакета *QGIS* были сформированы точечные векторные слои и построена карта предполагаемого распространения искомым минералов, отображенная в (Прил. А).

7.6. Анализ результатов

Результаты определения перспективных областей распространения минералов и горных пород различными методами получились весьма неоднозначные.

Выполним сравнение результатов картирования методом спектрального угла и методом минеральных индексов по каждому минералу/группе

минералов. Сравнение для наглядности выполнено в виде изображений с контуром исследуемой территории внутри которого находятся точки, которые указывают на зоны предполагаемого распространения. Светлые точки указывают на результат обработки данных методом спектрального угла, тёмные на результат работы методом минеральных индексов. Результаты сравнения представлены на рисунках 7.23. -7.27. Примечательно, что сравнение результатов картирования методом главных компонент с другими результатами не имеет смысла в виду не делимости минералов/групп минералов для большей части исследуемой территории и уже на этом этапе можно сделать вывод что для геологического картирования данной территории метод главных компонент не подходит.

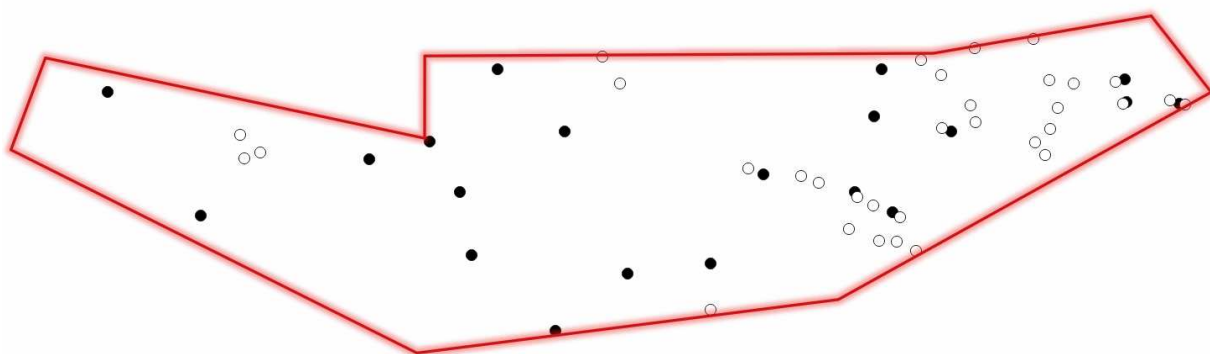


Рисунок 7.23 – Сравнение результатов картирования зон распространения хлорита/эпидота методом спектрального угла с методом минеральных индексов

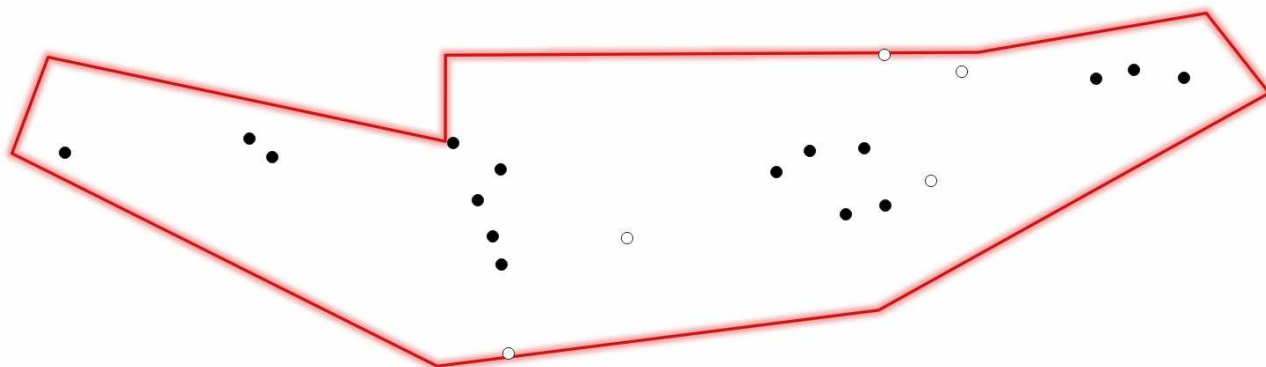


Рисунок 7.24. – Сравнение результатов картирования зон распространения каолинита методом спектрального угла с методом минеральных индексов

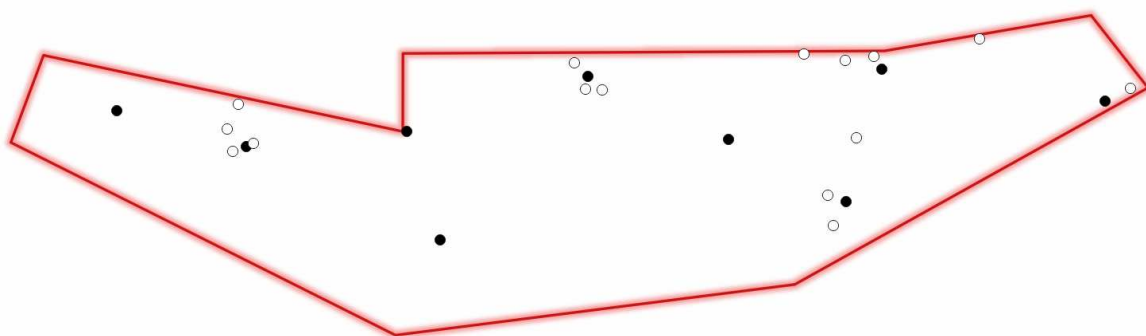


Рисунок 7.25. – Сравнение результатов картирования зон распространения мусковита методом спектрального угла с методом минеральных индексов

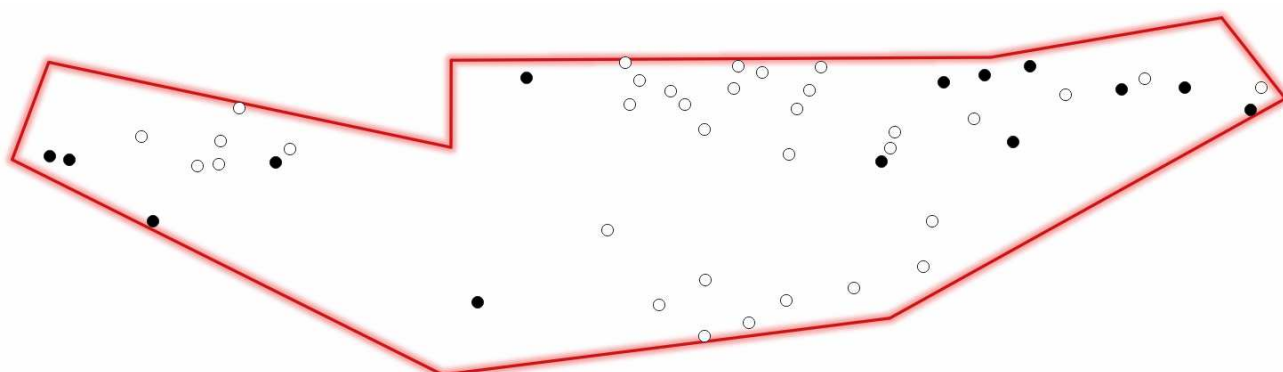


Рисунок 7.26 – Сравнение результатов картирования зон распространения кварца методом спектрального угла с методом минеральных индексов

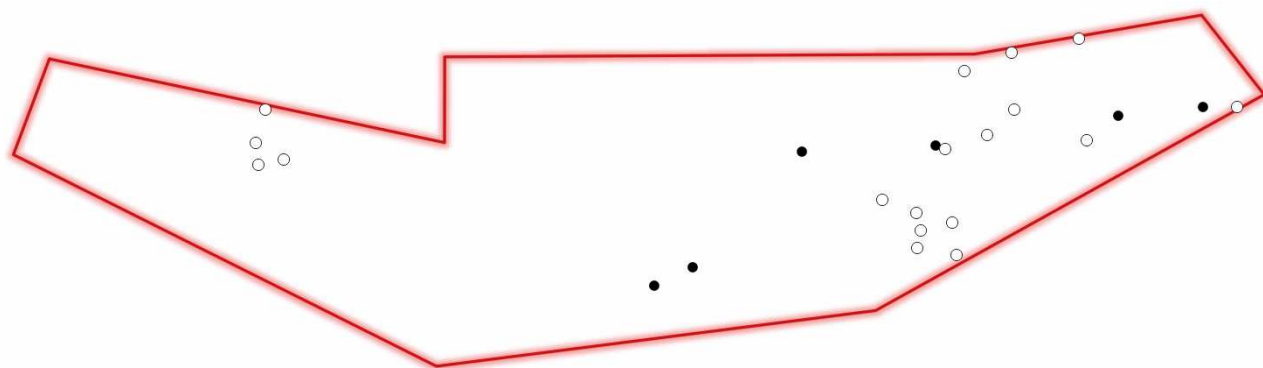


Рисунок 7.27 – Сравнение результатов картирования зон распространения серицит/тоналита методом спектрального угла с методом минеральных индексов

Из рисунков 7.23-7.25 можно сделать вывод, что корреляции между результатами минимальны. Причиной этому может быть не только не корректность работы одного из методов, а ошибка при визуальном дешифрировании результатов работы метода минеральных индексов. Что касается метода спектрального угла, он является более числовым что значительно снижает вероятность ошибки человека при его реализации.

На данный момент сеть буровых скважин существует и отлично просматривается на используемом снимке *Sentinel-2*. В центре разбуренной площади находится кварцевое ядро, которое отображается на результатах картирования методом спектрального угла. Что показано на рисунке 7.28.

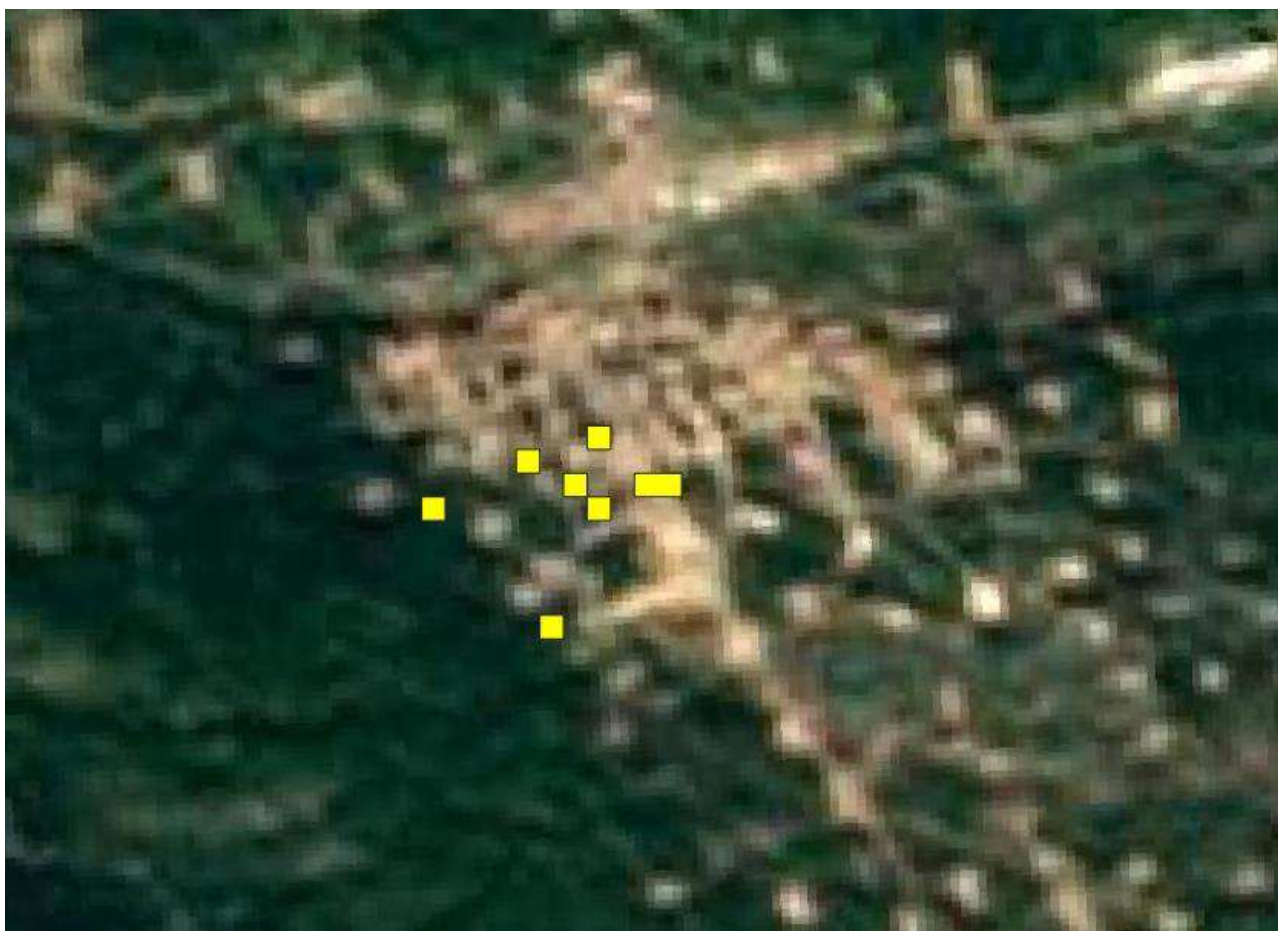


Рисунок 7.28 – Действующая буровая площадка, отображенная на снимке *Sentinel-2* на которую наложен полигональный результат картирования методом спектрального угла

При этом кварцевое ядро на момент съёмки этого участка (в 2003 году) было закрыто растительностью, несмотря на это, данный участок отмечился как зона возможного распространения Кварца. Этот участок не был отличным от окружающей территории ни на одном из индексных изображений, предназначенных для картирования Кварца. Его не было заметно ни на одной из компонентных изображений, полученных в результате реализации метода главных компонент. Такой результат выступает в пользу преимущества метода спектрального угла в сравнении с другими методами (применительно к данной

территории), при этом данный метод реализуется с меньшим участием оператора, что снижает вероятность ошибки. Несмотря на это, провести качественную оценку точности результатов, сравнив их с данными полевых работ не представляется возможным, поскольку в настоящее время геологические полевые исследования только планируются и полученные результаты будут проверены в ходе проведения этих работ и только после проведения полевых работ можно будет сделать вывод о преимущественной точности одного из выбранных методов картирования для территории Ак-Сугского месторождения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Месторождение Ак-Суг и Ак-Сугский рудный узел являются уникальными для России объектами. В процессе исследования проведены сбор, систематизация и экспертная оценка достоверности и пригодности для дальнейшей обработки всего комплекса опубликованных, фондовых и архивных материалов по геологическому строению, металлогении, геофизическим и геохимическим исследованиям территории Ак-Сугского рудного узла и самого месторождения.

В процессе исследования изучено большого литературного материала, привлечены новые методы исследования, проанализирован авторский фактический аналитический материал.

Предложенные поисковые критерии и признаки (структурные, литологические, магматические, геофизические, геохимические и др.) медно-порфирового оруденения, которые были ранжированы и разбракованы по степени значимости методом экспертной оценки. Проведено металлогеническое районирование территории Ак-Сугского рудного узла с выделением разноранговых участков перспективных на медно-порфировое оруденение.

В ходе оценки возможностей применения методики космической гиперспектральной съёмки были проведены опытные работы по и интерпретации открытых данных ДЗЗ. Оценены методы: спектрального угла, главных компонент и минерального индекса

Результаты, полученные разными методами, слабо коррелируют между собой, что возможно связано с ошибкой оператора. Несмотря на то, что на данном этапе возможности провести точную оценку результатов возможности нет, был выявлен метод, обладающий определённым преимуществом в виду меньшей вероятности ошибки оператора и большему сходству результата с данными, которые имеются на данный момент. Это метод спектрального угла.

Применение ДЗЗ даёт положительный результат для поиска медно-порфириковых объектов, а значит надо продолжать дальнейшие исследования в этом направлении.

На основе проведенных исследований для ООО «Тывамедь» даны рекомендации по проведению детальной космической съёмки с использованием спутника WorldView-3, который имеет хорошее пространственное разрешение и достаточное количество каналов в SWIR диапазоне, который необходим для картирования минералов и горных пород, в пределах рудного узла выделены площади (700 кв.км) с достаточной обнаженностью, благоприятные для применения методов ДЗЗ.

По результатам специальной части работы планируется проведение полевых исследований, в ходе которых будет проведена заверка выделенных дистанционными методами областей распространения минералов индикаторов оруденения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. 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.
2. Попов В.С. Геология и генезис медно- и молибден-порфировых месторождений. - М.: Наука, 1977. - 203 с.
3. Павлова Н.Г. Медно-порфировые месторождения (закономерности размещения и критерии прогнозирования). - М.: Недра, 1978. - 275 с.
4. Кривцов А.И. Геологические основы прогнозирования и поисков медно-порфировых месторождений. - М.: Недра, 1983. - 256 с.
5. Кривцов А.И., Мигачев И.Ф., Попов В.С. Медно-порфировые месторождения мира. - М.: Недра, 1986. - 236 с.
6. 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, 2001. – 232 с.
7. Richards J. P., Boyce A.J., Pringle M.S. Geologic evolution of the Escondida area, northern Chile: A model for spatial and temporal localization of porphyry Cu mineralization // Economic Geology. – 2001. - V. 96. - P.271–305.
8. Cook D.R., Hollings P., Walshe J.L. Giant porphyry deposits: characteristics, distribution, and tectonic controls // Economic Geology. – 2005. - V. 100. P. 801–818.
9. Sillitoe R.H., Perelló J. Andean copper province: Tectonomagmatic settings, deposit types, metallogeny, exploration, and discovery // Economic Geology 100th ANNIVERSARY VOLUME. – 2005. - P. 845–890.
10. Sillitoe R.H. Porphyry copper systems // Economic Geology. – 2010. - V.105. - P. 3–41.

11. Sillitoe R.H. Copper provinces // *Economic Geology*, Special Publication 16. – 2012. - P. 1–18.
12. Singer D.A., Menzie W.D., Berger B.R. Porphyry copper deposit density // *Economic Geology*. – 2005. -V. 100. - P. 491–514.
13. Sinclair W.D. Porphyry deposits, in Goodfellow, W.D., ed. *Mineral Deposits of Canada: A synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods* // Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division. – 2007. - Special Publication No. 5. - P. 223-243
14. Бескин С.М., Алексеева А.К. Медно-порфировое оруденение России: перспективные регионы и площади. - М.: Научный мир, 2016. - 78с.
15. Gustafson, L.B., and Hunt, J.P. The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile // *Economic Geology*. – 1975. - V. 70. - P. 857–912.
16. Звездов В.С. Обстановки формирования крупных и сверхкрупных медно-порфировых месторождений // *Отечественная геология*. – 2019. - № 5. - С. 16-35.
17. Porphyry Copper Assessment of the Central Asian Orogenic Belt and Eastern Tethysides—China, Mongolia, Russia, Pakistan, Kazakhstan, Tajikistan, and India // *Scientific Investigations Report 2010–5090–X*. Global Mineral Resource Assessment. USGS. – 2010. – 122 p.
18. 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.
19. 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.
20. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист N-46 — Абакан. - С.-Пб.: ВСЕГЕИ, 2008. - 391 с.

21. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Ангаро--Енисейская. Лист N-47 – Нижнеудинск. - СПб.: ВСЕГЕИ, 2012. - 652 с.
22. Woodcock N.H., Fischer M. 1986 Strike-slip duplexes // *Journal of Structural Geology*/ - V. 8 (7). – P. 725–735. [http://dx.doi.org/10.1016/0191-8141\(86\)90021-0](http://dx.doi.org/10.1016/0191-8141(86)90021-0).
23. 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.
24. Данилов В. Ф., Зашихин Ю. П. Геологическое строение и полезные ископаемые междуречья Ии и Хойто-Оки. Окончательный отчет Верхне-Ийской партии. Листы N-47– 104-А, Б, В (а, б). - 1970.
25. Дробот Д. И. Геолого-геохимические условия нефтеобразования и миграции нефти и газа в Непско-Ботуобинском, Братском и других районах юга Сибирской платформы по работам 1973–1976 гг. - 1965.
26. Алтухов Е.Н. и др. Тектоническое районирование и металлогения Саяно-Тувинского региона. Отчет по научно-исследовательским работам за 1980-1983 гг. -Москва: Фонды ИМГРЭ, 1984.
27. Глушков Ю.В. Информационный отчет о поисковых работах на площади Ак-Сугского рудного узла за 2010-2013 гг. – Кызыл, 2014.
28. Габеев В.А., Митус А.И., Чудин А.В. и др. Геологическое строение и полезные ископаемые района Ак-Сугского медно-порфинового 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.
29. 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.

30. Забелин В.И. Элементы геолого-генетической модели Ак-Сугского медно-молибденового месторождения // Магматизм и металлогения рудных районов Тувы. - Новосибирск: Наука, 1992. – С. 92–103.
31. Соловов А.П., Архипов А.Я., Бугров В.А. и др. Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых. - М.: Недра, 1990. - 335 с.
32. Макаров В.А. и др. Отчёт РФФИ «Геолого-генетическая модель Ак-Сугского месторождения, как эталонного медно-порфирового объекта Восточно-Саянской металлогенической провинции»
33. Мышьяковистая самородная медь золото-медно-порфирового месторождения Ак-Суг (Восточная Тыва) / Шведов Г. И., Самородский П. Н., Макаров В. А., Муромцев Е. А., Шадчин М. В., Лобастов Б. М., Глушков Ю. В. // (в печати)
34. Геохимическая зональность рудного тела золото-медно-порфирового месторождения Ак-Суг / Муромцев Е.А., Лосев В.И.
35. Макеев С.М. Решение двух задач геодинамики гравиструктурным методом // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2016. № 4. С. 63-74.
36. Ружич В.В., Кореневский А.Г. и др. Геолого-геофизическое изучение восточной части Алтае-Саянской сейсмической зоны с целью оценки сейсмобезопасности особо значимых объектов (ГЭС, ГХК, промышленных агломераций). Сейсмологические исследования в районе Дивногорска–Красноярска для уточнения карты сейсмического районирования. Отчет. Красноярск, КНИИГиМС, 2001, 617 с.
37. Птицын А.М., Дюдин Ю.К., Поляков А.И. Отчёт о результатах разведки Ак-Сугского медно-порфирового месторождения за 2007-2009 гг., 2009, 394 с.
38. Alimohammadi M., Alirezai S., Kontak D. J. Application of ASTER data for exploration of porphyry copper deposits: A case study of Daraloo–Sarmeshk area, southern part of the Kerman copper belt, Iran // OreGeology Reviews. 2015. V. 70. P. 290–304.

39. И. О. Смирнова, А. А. Кирсанов, Н. В. Камышникова Обзор зарубежных достижений за последние пять лет в области использования мультиспектральных и гиперспектральных спутниковых данных и современных методов их обработки

в геологических исследованиях

40. Гиперспектральное дистанционное зондирование в геологическом картировании/ Г.Г. Райкунова, В.Л. Щербаков, С.И. Турченко, Н.А. Брусничкина – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2014.-136 с.

41. Rashmi, S. Spectral Angle Mapper Algorithm for Remote Sensing Image Classification/ S. Rashmi, S. Ravikiran // International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology. – 2014. – №1. С. 201-205.

42. Azizi, H. Extraction of hydrothermal alterations from ASTER SWIR data from east Zanzjan, northern Iran/ H. Azizi, M.A. Tarverdi, A. Akbarpour // Advances in Space Research. – 2010. – №46. С. 99-109.

43. Di Tommaso, I. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina/ I. Di Tommaso, N. Rubinstein // Ore Geology Reviews. – 2007.– № 32. С. 275-290.

44. Черепанов, А. Спектральные библиотеки – источники данных по спектрам [Электронный ресурс]: Интернет-публикация / А. Черепанов // Форум посвященный географическим информационным системам и дистанционному зондированию «GISLAB». 2009. – Режим доступа: <https://gislab.info/qa/spectrum-lib.html>.

45. Метод главных компонент [Электронный ресурс]: Интернет-публикация // Информационный сайт machinelearning.ru – Режим доступа: http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=Метод_главных_компонент.

46. Шовендгердт, Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений: Учебное пособие / Р.А. Шовендгердт. Москва : Техносфера, 2010. – 560 с.

47. Beiranvand Pour, A. Identification of hydrothermal alteration minerals for exploring of porphyry copper deposit using ASTER data, SE Iran / A. Beiranvand Pour, M. Hashim // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2011. – № 42. С. 1309-1323.
48. Gabr, S. Detecting areas of high-potential gold mineralization using ASTER data / S. Gabr, A. Ghulam, T. Kusky // *Ore Geology Reviews*. – 2010. – № 38. С. 59-69.
49. Tangestani, M.H. Porphyry copper alteration mapping at the Meiduk area, Iran / M.H. Tangestani, F. Moore // *Remote Sensing*. – 2002. – №. 22. С. 4815–4825.
50. Rahman, E. A. Space-Borne Imagery and Geochemical Characters of Post-Orogenic Dyke Swarms, Fatirah-Abu Zawal District, Eastern Desert of Egypt / E. A. Rahman, Emam A. // *Open Journal of Geology*. – 2014. № 4. С. 228-248.
51. Xiao-peng, W. Discussion on application of WorldView 2 satellite data in west Kunlun Metallogenic belt remote sensing geological survey / W. Xiao-peng, Y. Zhi-qiang, K. Gao-feng, W. Jun-feng, J. Mou-shun // *National Symposium on Remote Sensing of China*. №18. – 2014.
52. Yamaguchi, Y. Spectral indices for lithologic discrimination and mapping by using the ASTER SWIR bands / Y. Yamaguchi, C. Naito // *Remote Sensing*. – 2002. – №. 20. С. 4311–4323.
53. Rajendran, S. Characterization of ASTER spectral bands for mapping of alteration zones of volcanogenic massive sulphide deposits / S. Rajendran, S. Nasir // *Ore Geology Reviews* – 2017. – №. 88. С. 317–335.
54. Смирнова, И. О. Обзор зарубежных достижений за последние пять лет в области использования мульти- и гиперспектральных спутниковых данных и современных методов их обработки в геологических исследованиях / И. О. Смирнова, А. А. Кирсанов, Н. В. Камышникова // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса* – 2020. №1. С. 9-27.
55. Yamaguchi, Y. Spectral indices for lithologic discrimination and mapping by using the ASTER SWIR bands / Y. Yamaguchi, C. Naito // *International Journal of Remote Sensing* 2003. – №. 22. С. 4311-4323.

56. Черепанов, А.С. Вегетационные индексы / А.С. Черепанов // Геоматика – 2011. №2. С. 98-102.
57. Ninomiya, Y. Lithologic mapping with multispectral ASTER TIR and SWIR data / Y. Ninomiya // Geological Survey of Japan, AIST 2016. С. 180-190.
58. Kalinowski, A. ASTER Mineral Index Processing Manual : Учебное пособие / A. Kalinowski, S. Oliver. – Remote Sensing Applications Geoscience Australia, 2004. – 36 с.
59. Птицын А.М., Дюдин Ю.К., Поляков А.И. Отчёт о результатах разведки Ак-Сугского медно-порфирикового месторождения за 2007-2009 гг., 2009, 394 с.
60. Ружич В.В., Кореневский А.Г. и др. Геолого-геофизическое изучение восточной части Алтае-Саянской сейсмической зоны с целью оценки сейсмобезопасности особо значимых объектов (ГЭС, ГХК, промышленных агломераций). Сейсмологические исследования в районе Дивногорска–Красноярска для уточнения карты сейсмического районирования. Отчет. Красноярск, КНИИГиМС, 2001, 617 с.
61. Александровский Ю.С., Бармин В.А., Лисицын В.И. Геологическое доизучение масштаба 1:200 000 на Казырской площади (листы N-46-XXIV – Минусинская, N-47-XIX Восточно-Саянская серии). ФГУГП Красноярскгеолсъёмка, 1997.
62. Забелин В.И., Блинников В.В., Шевцова Н.Н. и др. Предварительная разведка Ак-Сугского медно-порфирикового месторождения (Отчёт Ак-Сугской партии за 1982-85 гг.), 1985.
63. Duda K. Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Level 1 Precision Terrain Corrected Registered At-Sensor Radiance Product (AST_L1T): Руководство пользователя / K. Duda, J. Daucsavage, D. Siemonsma, B. Brooks, R. Oleson, D. Meyer, C. Doescher. – Department of the Interior U.S. Geological Survey, 2015. – 68 с.

64. Дворкин, Б.А. Новейшие и перспективные спутники дистанционного зондирования Земли / Б.А. Дворкин, С.А. Дудкин // Геоматика – 2013. №2. С. 16-36.

65. EarthExplorer [Электронный ресурс]: Электронная база данных ДЗЗ // Информационный сайт USGS – Режим доступа: <https://earthexplorer.usgs.gov>

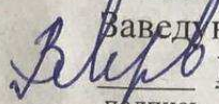
66. Им С.Т. Автоматизация исследований природных ресурсов средствами дистанционного зондирования и геоинформационных систем: Учебно-Практическое издание, 1 часть/ С.Т. Им.– Красноярск: Редакционно-издательский отдел Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та. 2014. – 164с.

67. Им С.Т. Автоматизация исследований природных ресурсов средствами дистанционного зондирования и геоинформационных систем: Учебно-Практическое издание, 2 часть/ С.Т. Им.– Красноярск: Редакционно-издательский отдел Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та., 2014. – 132с.

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт горного дела, геологии и геотехнологий
(институт)
Геологии месторождений и методики разведки
(кафедра)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой



В.А. Макаров

подпись инициалы, фамилия

« ____ » _____ 2021 г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

21.05.02. Прикладная геология

(код и наименование специальности)

21.05.02.01 Геологическая съёмка, поиски и разведка месторождений полезных
ископаемых

(код и наименование специализации)

Составление прогнозно-металлогенической карты Ак-Сугского рудного узла
масштаба 1: 50 000 (респ. Тыва)

(тема)

Пояснительная записка

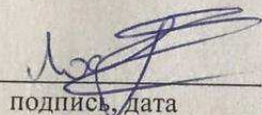
Руководитель


подпись, дата

В.А. Макаров

инициалы, фамилия

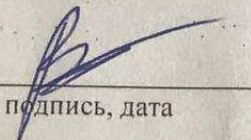
Выпускник


подпись, дата

В.И. Лосев

инициалы, фамилия

Нормоконтролер


подпись, дата

Д.А. Внуков

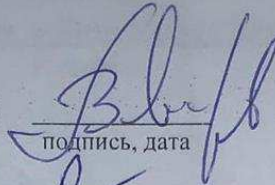
инициалы, фамилия

Красноярск 2021

Продолжение титульного листа ВКР по теме: «Составление прогнозно-металлогенической карты Ак-Сугского рудного узла масштаба 1: 50 000 (респ. Тыва)».

Консультанты по
разделам:

Геологическая часть
наименование раздела


подпись, дата

В.А. Макаров
инициалы, фамилия

Нормоконтролер


подпись, дата

Д.А. Внуков
инициалы, фамилия