

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
ПЕРМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГАОУ ВО ПГНИУ)

На правах рукописи

Голдырев Виталий Николаевич

**Минералого-геохимическая и прогнозно-поисковая модели золото-
серебряного оруденения Валунистого рудного района (Восточная Чукотка)**

Специальность 1.6.10 – геология, поиски и разведка
твёрдых полезных ископаемых, минерагения

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание учёной степени
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:
д.г.-м.н. Наумов Владимир Александрович

Пермь 2024 г

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА	9
1.1. История геологического изучения	9
1.2. Геологическое строение и полезные ископаемые	15
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА АНАЛИТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	22
ГЛАВА 3. МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОРУДЕНЕНИЯ	25
3.1. Геологические особенности месторождения Жильное.....	25
3.1.1. Геолого-структурные особенности	25
3.1.2. Минералого-геохимические особенности.....	29
3.3. Зональность и стадийность минералообразования	52
ГЛАВА 4. КРИТЕРИИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОРУДЕНЕНИЯ РАЙОНА	61
4.1. Поисковые предпосылки	61
4.2. Поисковые признаки.....	68
4.3. Геокриологические индикаторы тектонической нарушенности пород и оруденения	79
4.3.1. Температурный режим в толще пород	79
4.3.2. Геокриологические индикаторы тектонической нарушенности	81
4.3.3. Гипергенное преобразование руд в криолитозоне.....	84
4.3.4. Продукты криогенеза как косвенный поисковый признак	88
4.4. Дистанционные индикаторы оруденения.....	90
4.4.1. Методика исследования космоматериалов (обработка минеральных индексов Aster)	90
4.4.2. Аномалии минеральных индексов как поисковый признак	92
ГЛАВА 5. ЛОКАЛИЗАЦИЯ ОРУДЕНЕНИЯ	97
5.1. Прогнозно-поисковая модель.....	97
5.2. Перспективные объекты геологоразведочных работ.....	100
5.2.1. Недоизученные установленные рудные поля.....	100
5.2.2. Предполагаемые рудные узлы	106
5.3. Нетрадиционные источники золота (техногенно-минеральные образования)...	110
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	115

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Существенная часть Российской Федерации расположена в арктической зоне, в пределах которой сосредоточены значительные запасы и прогнозные ресурсы многих твердых полезных ископаемых [Бортников и др., 2015; Машковцев и др., 2019; Гермаханов и др., 2023]. Важнейшим элементом стратегии развития российской Арктики является развитие Северного морского пути [Журавель, 2019; Гриняев, Журавель, 2020]. Две «опорные точки» (порты Певек и Провидения) Северного морского пути расположены на территории Чукотского автономного округа (ЧАО). Это означает, что реализация амбициозного плана по развитию российской Арктики откроет новые возможности и для роста экономики ЧАО, основой которой является добыча полезных ископаемых, в особенности золотодобыча.

Чукотка исторически является одним из ведущих золотодобывающих регионов РФ – добыча в 2022 году составила 22 тонны. До 2007 года в структуре добычи преобладало россыпное золото, в дальнейшем, в связи с получением первого золота с месторождения Купол, доля добычи из россыпей существенно сократилась, при резком росте добычи коренного золота до 32 тонн в 2014 году [Волков и др., 2017]. К сожалению, в настоящее время по мере выработки подготовленных запасов рудного золота добыча стала сокращаться.

Одним из факторов, влияющих на спад золотодобычи в регионе, является наметившаяся в последние годы тенденция к снижению результативности поисковых работ и снижению темпов прироста прогнозных ресурсов, из-за истощения поискового задела. Основными причинами низкой результативности поисковых работ являются слабая изученность большей части ЧАО, сложные природно-климатические и инфраструктурные условия и отсутствие на территории геологических предприятий, способных выполнять поисковые работы в большом объеме [Гермаханов и др., 2023].

Таким образом, существует необходимость выработки комплекса мер для наращивания прогнозных ресурсов золота Чукотки и реализации ее золоторудного потенциала, в новые месторождения и увеличение добычи.

С учетом продолжающихся геологоразведочных работ на территории Валунистого рудного района (Восточная Чукотка) выяснение особенностей геологического строения и состава руд, выявление связи с конкретными магматическими комплексами и структурами может иметь большое значение для понимания условий образования и локализации подобных месторождений на территории всего региона.

Целью работы является разработка минералого-геохимической и прогнозно-поисковой моделей золото-серебряного оруденения Валунистого рудного района (ВРР) и выявление наиболее перспективных структур и площадей его развития.

Для этого решались следующие **задачи**:

1. Сбор, систематизация и анализ результатов работ предшественников и научных исследований.

2. Выявление геолого-структурных и минералого-геохимических особенностей месторождения Жильное;

3. Выделение минералого-геохимических типов оруденения, реконструкция палеовулканического сооружения Валунистого рудного узла, исследование стадийности и вертикальной зональности оруденения.

4. Обоснование поисковых предпосылок и признаков для обнаружения золото-серебряного оруденения;

5. Исследование температурного режима в толще пород месторождения Валунистое, рассмотрение продуктов геокриогенеза в качестве индикаторов тектонической нарушенности пород и оруденения;

6. Обоснование применения дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) по методике обработки минеральных индексов для прогнозирования золото-серебряного оруденения;

Предметом исследования являются геолого-структурные и минералого-геохимические особенности ВРР, состав золото-серебряной минерализации, руд и техногенных образований.

Объектом исследования являются месторождения и рудопроявления ВРР; эпитермальные месторождения РФ и мира.

Фактический материал и методика исследования. В основу работы положены данные, собранные автором в 2018-2019 гг. в период выполнения поисково-оценочных работ на Кремовой площади (АО «Северо-Восточное ПГО»), разведочных работ на месторождении Жильное (ООО «Канчалано-Амгуэмская площадь»), эксплуатационно-разведочных и добычных работ на месторождении Валунистое и Горное (ООО «Рудник Валунистый»).

1. *Полевые исследования.* Включали поисковые маршруты и литохимическую съемку по вторичным ореолам рассеяния масштаба 1:25 000 и 1:10 000 в пределах изучаемой площади и перспективных участков; документацию канав, траншей и керн скважин; керновое, бороздовое, сколковое, задирковое, штуфное опробование жильных и метасоматических образований, вмещающих пород; термические исследования в скважинах месторождения Валунистое.

2. Исследования в камеральный период включали:

1. *Полевые исследования.* Включали поисковые маршруты и литохимическую съемку по вторичным ореолам рассеяния масштаба 1:25 000 и 1:10 000 в пределах изучаемой площади и перспективных участков; документацию канав, траншей и керн скважин; керновое, бороздовое, сколковое, задирковое, штуфное опробование жильных и метасоматических образований, вмещающих пород; термические исследования в скважинах месторождения Валунистое.

2. Исследования в камеральный период включали:

2.1. *Пробоподготовка* (дробление образцов, гравитационное обогащение).

2.2. *Обработка и анализ аналитических исследований* (сканирующая электронная микроскопия, микрозондовый, рентгенно-флуоресцентный, масс-спектрометрический с индуктивно-связанной плазмой анализы).

2.3. *Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) по методике обработки минеральных индексов.*

2.4. *Разработка геолого-структурной, минералого-геохимической, прогнозно-поисковой моделей.*

Научная новизна. 1. Впервые произведена типизация золото-серебряного оруденения ВРР по геолого-структурным и минералого-геохимическим особенностям. В результате выделены 2 типа: золото-сульфосольный (месторождение Валунистое, сформированное в породах околожерловой группы фаций) и серебро-полисульфидный (месторождение Жильное, сформированное в породах склоновой группы фаций). 2. Модернизирован комплекс критериев прогнозирования золото-серебряного оруденения. 3. Впервые адаптирована методика обработки минеральных индексов для прогнозирования золото-серебряного оруденения. 4. Существенно уточнена стадийность минералообразования в пределах ВРР.

Практическая значимость. 1. Выполненная работа существенно расширяет перспективы металлоносности района, а предложенные геолого-структурная, минералого-геохимическая, прогнозно-поисковая модели послужат методической базой для прогнозирования Au-Ag месторождений на территории ВРР и других вулканогенных поясов. 2. Выявлены предполагаемые рудные узлы, перспективные участки развития золото-серебряной минерализации: «Белые Увалы», «Моховый», «Светлый», определены рудные поля, которые необходимо доизучить (Осеннее, Оранжевое). 3. Определено содержание, количество и характеристики благородных металлов в ТМО месторождения Валунистое и других эпитермальных месторождений золота.

Апробация результатов исследования. Основные результаты, а также отдельные ее разделы, обсуждались и докладывались на Международной

научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Геология в развивающемся мире», ПГНИУ (г. Пермь), 2019-2023; на III сессии «Промышленные типы месторождений» международной конференции платформы «Геовебинары», 2020; на Всероссийской научной конференции с международным участием: «Фундаментальные и прикладные аспекты биоинформатики, биотехнологии и недропользования», ПГНИУ (г. Пермь), 2020; на Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Геология и полезные ископаемые Западного Урала», ПГНИУ (г. Пермь), 2021-2023; на 25-ой научной конференции «Чтения памяти П.Н. Чирвинского», ПГНИУ (г. Пермь), 2022; на серии вебинаров «Рудник будущего» в рамках международной выставки «Рудник Урала», 2021; на XXVIII молодежной научной школе им. проф. В.В. Зайкова «Металлогения древних и современных океанов-2022. От вещественного состава к моделям и прогнозированию месторождений», ИМин УрО РАН (г. Миасс), 2022; на II открытой Всероссийской научно-практической конференции «Управление минеральными ресурсами. Орловские чтения», посвященной памяти В.П. Орлова. ТГУ (г. Томск), 2022; на XXVIII Всероссийской научной молодежной конференции с международным участием «Уральская минералогическая школа – 2022. Под знаком медных и благороднометалльных месторождений». ИГГ УрО РАН (г. Екатеринбург), 2022; на Рудной Школе ЦНИГРИ (IV Молодёжная научно-образовательная геологическая конференция), ЦНИГРИ (г. Москва), 2023.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 5 статьях в рецензируемых журналах по перечню ВАК, в 19 публикациях, включенных в материалы научных мероприятий.

Личный вклад автора. В 2018-2019 гг. автор в качестве геолога выполнял поисково-оценочные работы на Кремовой площади (АО «Северо-Восточное ПГО»), разведочные работы на месторождении Жильное (ООО «Канчалано-Амгуэмская площадь»), эксплуатационно-разведочные и добычные работы на

месторождении Валунистое и Горное (ООО «Рудник Валунистый»). Автором произведен анализ опубликованных и фондовых материалов по территории исследования. Автор принимал непосредственное участие в пробоподготовке, обогащении проб, минералогических исследованиях, подготовке материала для аналитических исследований, обобщении полученных результатов. Автором были разработаны минералого-геоохимическая и прогнознo-поисковая модели оруденения, а также произведено ДЗЗ территории исследования и выделение перспективных площадей.

Структура и объем работы. Состоит из введения, восьми глав, заключения, списка литературы из 161 наименования. Объем диссертации составляет 140 страниц, в том числе 63 рисунка и 11 таблиц.

Благодарности. Автор выражает искреннюю признательность научному руководителю д.г.-м.н. Наумову В.А. за руководство проведенными исследованиями и всестороннюю помощь при написании работы. Большое значение для автора имели полевые работы в геологических организациях АО «Северо-Восточное ПГО», ООО «Рудник Валунистый», ООО «Канчалано-Амгуэмская площадь». Личные наблюдения и знания, полученные во время работ в данных организациях, легли в основу настоящего исследования. Автор пользуется случаем и благодарит за переданный бесценный опыт коллег, с которыми состоялись полевые работы: Шарыпова Л.В., Неволлина Д.Н., Зарипова Р.Г., Кочкина Ф. и многих других. Автор благодарит за неоценимую помощь в проведении аналитических исследований д.г.-м.н. Осовецкого Б.М., Томилину Е.М., Пузика А.Ю., к.х.н. Волкову М.А. Автор выражает особую благодарность д.г.-м.н. Ибламинову Р.Г., д.г.-м.н. Осовецкому Б.М., к.г.-м.н. Попову А.Г., к.г.-м.н. Лебедеву Г.В. за консультации и помощь в выполнении данной работы. Искреннюю благодарность автор выражает коллективу кафедры «Поисков и разведки полезных ископаемых» геологического факультета ПГНИУ за годы, проведенные в студенчестве и аспирантуре.

ГЛАВА 1. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА

1.1. История геологического изучения

Геологоразведочные работы

По рекомендации А.Н. Легкова на данной территории были проведены геологосъемочные работы масштаба 1:100000 (Д.П. Бондарчук, 1959). В результате поисковых работ в бассейне ручья Валунистый были обнаружены жилы кварцевого и кварц-полевошпатового состава, содержащие 0,4-6,8 г/т золота и до 187,5 г/т серебра. Были выявлены шлиховые ореолы рассеяния мелкого золота с содержанием до 0,3 г/т.

Положительная оценка бассейна ручья Валунистого на нахождение в нем коренных и россыпных месторождений золота послужила основанием для организации в районе геологосъемочных и поисковых работ. Геологические съемки масштабов 1:200000 (М.В. Филимонов, 1964 г; Л.И. Середа, 1965 г; В.Г. Силкин, 1966 г.) и 1:50000-1:10000 (В.Г. Решетов, 1962; В.И. Шавель, 1964, А.Е. Махлай, 1974) подтвердили перспективность района на выявление золото-серебряного оруденения.

Систематические геохимические исследования в районе начались в 1978 году литохимическими поисками по потокам рассеяния масштаба 1:200 000, проведенными силами Канчаланского отряда Геохимической партии ЦГЭ (С.Б. Матвеев, 1981) на Канчаланской перспективной площади. Квалифицированно интерпретированные результаты опробования позволили выделить площади, перспективные на золото и серебро, оконтурить аномальные геохимические зоны, узлы и отдельные аномалии.

Материалы вышеперечисленных работ были проанализированы и обобщены в 1988-1989 г.г. Вяткиным В.В. и Соломенным А.В. Ими составлены металлогеническая и прогнозная карты на золото-серебряное оруденение масштаба 1:200 000, проведена оценка прогнозных ресурсов категории P_3

перспективных площадей. Впервые сделана типизация полезных ископаемых по формационным типам.

В 1988-1992 гг. на территории листов Q-60-55-Г;-56-Б,-В,-Г Короткой геологосъемочной партией (Павлов, 1993) была проведена литохимическая съемка масштаба 1:50 000 по вторичным ореолам рассеяния с комплексом заверочных работ. Основным результатом работ Короткой ГСП является то, что была доказана возможность выявления в пределах Канчалано-Амгуэмской рудной зоны промышленно значимых золото-серебряных месторождений.

В 1992-95 гг. в центральной части Канчалано-Амгуэмской площади (листы Q-60-55-В; -67-А,Б) ГПП «ГЕОРЕГИОН» проводились опережающие геохимические поиски по вторичным ореолам рассеяния масштаба 1:50 000 на всей площади работ (312 км²) и масштаба 1:10000 - на заверочных участках (Воронец Л.Л., 1995). В результате проведенных работ выявлено 8 комплексных аномалий Au-Ag специализации, дана прогнозная оценка территории на золото и серебро. Составлен комплект геохимических карт масштабов 1:50000 - 1:10000, а также карта прогноза с рекомендациями по проведению ГСР-50. Геохимические аномалии Шах и Жильный рекомендованы как первоочередные объекты для постановки детальных поисковых работ.

В 1992-97 гг. в западной части Канчалано-Амгуэмской площади (938 км², листы Q-60-53-Г,-54-В,-65-Б,-66-А,Б) НПП «ГЕОПОИСК» (В.Н. Васильев, 1997) проведены геохимические поиски по вторичным ореолам рассеяния масштаба 1:50000, а также масштаба 1:10000 на участках, локализованных в результате предшествующей литохимической съемки по потокам рассеяния. По итогам работ составлена карта прогноза с количественной оценкой по геохимическим данным прогнозных ресурсов категории Р₃ на золото и серебро.

В 1998-2002 гг. под руководством Н.И. Романова проводилось геологическое доизучение масштаба 1:200 000, включающее штурфовое, бороздовое и геохимическое опробование, с целью оценки перспектив района на выявление золото-серебряных объектов и определения их прогнозных ресурсов.

В 1999-2011 гг. ООО «АС Чукотка», а с 2011 года ООО «Рудник Валунистый» проводили разработку и геологоразведочные работы на месторождении Валунистое в пределах зон Главная и Новая. В 2003 г. на месторождении начата добыча руды открытым способом двумя карьерами. *Утвержденные запасы C_1+C_2 месторождения Валунистое по состоянию на 01.01.2018 составили:* руды – 3822,8 тыс. т, золота – 19,91 т, серебро – 212,13 т. Среднее содержание золота 5,21 г/т, серебра – 55,49 г/т.

В период 2007-2011 гг. в пределах Канчалано-Амгуэмской площади проводило поисковые и поисково-оценочные работы в начале ЗАО «ГДК Сибирь» (В.И. Уютов, 2009). Работы включали площадные геохимические поиски масштабов 1:25000-1:10000 на участках Горный, Осенний, Жильный, Шах; поисковые маршруты со штуфным опробованием, бороздовое опробование канав, литохимические поиски по потокам рассеяния. Результатом этих работ явилось выделение в пределах Валунистого рудного узла, помимо известного ранее Горного рудного поля (рудоносного участка), так же Огненного рудоносного участка, непосредственно примыкающего и к Горному и Валунистому рудным полям. Здесь были выделены многочисленные кварцевые, кварц-карбонатные и кварц-адуляровые жилы и их зоны. По результатам этих работ составлен промежуточный отчет (В.В. Меньшиков, 2011).

На месторождении Горное по результатам разведочных работ 2009-18 гг. был выполнен и апробирован оперативный подсчёт запасов категории C_1+C_2 составил: руды – 200,57 тыс. т, золота – 843,6 кг, серебро – 7,17 т. Средняя мощность рудных тел – 2,77 м, среднее содержание золота 4,21 г/т, серебра – 35,76 г/т.

Начиная с 2011 года и по сегодняшний момент геологическим изучением описываемой площади занимается ООО «Канчалано-Амгуэмская площадь», которая является владельцем одноименной лицензии.

В 2013-2020 гг. в пределах Канчалано-Амгуэмской площади ООО «КАП» были проведены поисково-оценочные и разведочные работы со значительными объемами горных и буровых работ на участках Шах, Жильный, Горный и Огненный. По результатам поисковых и оценочных работ, проведенных в 2012-2015 гг. на участке Жильный, был выполнен (ЗАО «Сибгеоконсалтинг») подсчет повариантный подсчет запасов категории C_2 : руды – 1756,4 тыс. т, золота – 1725,1 кг, серебро – 399,1 т. Среднее содержание золота 1,0 г/т, серебра – 227,2 г/т.

В 2017-2022 гг. АО «Росгеология» с привлечением подрядчика АО «Северо-Восточное ПГО» проводило поисковые работы на лицензионных площадях Кремовая (Тэркенейский рудный узел) и Кузьмич (Центральный рудный узел).

На участке Кремовый наиболее перспективной является расположенная на правом берегу одноименного ручья рудоносная зона Кремовая-1, в пределах которой выделена собственно рудная зона 1 и две оперяющих зоны 01 и 02. Основная зона имеет среднюю мощность по поверхности 59 м, протяженностью 1200 м с ресурсами P_2 золота 3,7 т и серебра 145 т при содержании золота 2,42 г/т, серебра 95 г/т, (3,56 г/т условного золота)

На участке Кузьмич общие прогнозные ресурсы категории P_1 по 9 рудным телам в пределах штокверков Северный, Центральный, зоны Базальтовая составили золота 3,7 т, серебра 127 т (5,2 т условного золота), количество руды – 3,9 тыс. т. Для потенциального рудного поля Центральное оценены прогнозные ресурсы категории P_2 в количестве: 12 т золота, 775 т серебра, руды 14 тыс. т руды.

Научные исследования

Анализ имеющихся материалов по Охотско-Чукотскому вулканическому поясу (ОЧВП) и его обрамлению свидетельствует о его сравнительно слабой изученности. Особенно это относится к северо-восточной части пояса. В тоже

время, имеющиеся данные позволяют выделить основные рудоконтролирующие структуры и прогнозно-поисковые признаки.

Вопросы стратиграфии и геохронологии, магматизма, геотектоники района рассматривались многими исследователями, среди которых [Обручев, 1934; Устиев, 1949; 1959; Сидоров и др., 1970; Белый, 1977; 1981; 1982; 1994; Парфенов, 1984; Лебедев, 1987; Филатова, 1988; Полин, 1990; Лейер и др., 1997; Ньюберри и др., 2000; Чехов, 2000; Филиппова, 2001; Котляр, Русакова, 2004; Жуланова и др., 2007; Сахно и др., 2010; Аникин, Миллер, 2011; Тихомиров, 2020, Полин; 2023]. Образование золото-серебряного оруденения ВРР они связывают со становлением кислых магматических комплексов, которое завершилось 76-80 млн. лет назад (леурваамский комплекс). Позднемеловые образования нунлигранского комплекса являются пострудными.

Примечательно, что оруденение месторождения Валунистое имеет относительно более молодой возраст (разница около 5 млн. лет) из подавляющего большинства аналогичных месторождений в других секторах ОЧВП (Карамкен, Эвенское, Ирбычан, Кегали, Ойра, Утесное, Дукат). Это связано [Сахно и др., 2010] с временным разрывом между становлениями аналогичных по вещественному составу и положению в разрезе окраинно-континентальных (надсубдукционных) комплексов, что отражает смещение факторов магмогенерации в восточном, юго-восточном направлениях.

Вопросы металлогенического районирования и закономерностей размещения золоторудных месторождений территории рассматривались в работах [Сидоров, 1966; 1978; Берман, 1970; Бегунов и др., 1976; Красный, 1984; Котляр, 1986; Щепотьев и др., 1989; Сидоров, Еремин, 1991; Волков, 1999; 2006; Стружков, Константинов, 2005; Горячев и др., 2010; Стружков, 2010; Константинов, 2010]. Данные материалы свидетельствуют о высокой роли рудоконтролирующих факторов, которые можно отнести к категории вулкано-структурных (приуроченность к интрузивно- и вулканокупольным

структурам, зоны глубинных разломов, жерла палеовулканов, кальдеры проседания и др.).

Одновременно, эти наблюдения, наряду с имеющимися опубликованными данными [Нарतिकоев и др., 1975; Кочнева и др., 1998; Гуревич, 2009; 2013], свидетельствуют о высокой информативности целевого структурного дешифрирования космических снимков, направленного на выявление перечисленных потенциально-рудоконтролирующих факторов. С другой стороны, опыт полевых наблюдений и камерального изучения дистанционных материалов однозначно свидетельствует о том, что основные черты рельефа данной территории определяются ее геологическим строением, что делает возможным эффективное использование палеовулканических реконструкций [Дьяконов, 2011; Дьяконов и др., 2016].

Вопросам вещественного состава руд, особенностям благороднометалльной минерализации и условиям ее образования посвящены исследования [Брызгалов, Кривицкая, 1998; Новоселов и др., 2009; Елманов и др., 2018; Савва, 2018; Волков и др., 2019; 2020; Журавкова и др., 2019; Русанов и др., 2019; Пальянова; 2020; Беляева, 2022; Бортников и др., 2022; Беляева, Пальянова, 2023; Кузнецов и др., 2023]. Данные работы свидетельствуют о том, что золото-серебряное оруденение района относится к эпитермальному типу. Низкие концентрации солей и температуры формирования руд месторождений и проявлений ВРР аналогичны флюидам эпитермальных низкосульфидизированным месторождений [Hedenquist et al., 1988; Sowkins, 1990; Simmons et al., 2005; Bodnar et al., 2014, Горячев, 2019; Кигай, 2020]. Полная гомогенизация флюидных включений в кварце на месторождении Жильное происходит при температурах 273-350°C [Елманов и др., 2018], на Валунистом – 203-284°C [Волков и др., 2020].

Развитие кальцита и флюорита в рудных жилах является особенностью месторождений и проявлений ВРР – на многих аналогичных Au-Ag

эпитермальных месторождениях [Сергиевский, 2006, Волков и др., 2012] ОЧВП они не установлены в рудных жилах.

Для руд месторождений и проявлений ВРР характерно присутствие золота, в большей степени, в виде самородных минералов системы Au-Ag, большое разнообразие Ag-содержащих минералов; значительные количества халькогенидов Au и Ag (ютенбогаардит, петровскит, акантит, науманнит, кервеллеит) и минералов пирсеит-полибазитового ряда. Кроме того, по данным [Кузнецов и др., 2023] на месторождении Валунистое развиты кристаллические не «ноль валентные» микро- и наноформы Au (AgAuTe_2 , Ag_2SO_4 , AuCuSe_4), которые доминируют над самородной формой AuAg и не диагностируются при использовании традиционных способов анализа руд.

1.2. Геологическое строение и полезные ископаемые

Геолого-структурное положение

Район исследования относится к *Амгуэмо-Канчаланскому вулканическому полю* (АКВП), которое расположено в пределах Восточно-Чукотской фланговой зоны (рис. 1) Охотско-Чукотского вулканогенного пояса, перекрывающей краевую часть Эскимосского кратонного террейна [Белый, 1977]. ВРР располагается в пределах выделенной Гуревичем Д.В. *Анадырской кольцевой мегаструктуры* (рис. 2), четко выраженной в рельефе и достигающей 500 км в поперечнике, с центром в районе Анадырского залива. Полукольцевая граница современной Анадырской мегаструктуры, проходящая по континенту, совпадает с системой глубинных дугообразных разломов [Кочнева, 2003].

ОЧВП наложен на вещественные комплексы Кони-Танюерерской складчатой системы Корякско-Камчатской складчатой области (рис. 3). Поясные вулканы слагают прогиб северо-восточного простирания, имеющего ширину 30-100 км и прослеживающегося от р. Танюер на западе, до р. Амгуэма - на востоке. Складчатым его основанием являются дислоцированные отложения палеозойского–раннемелового возраста.

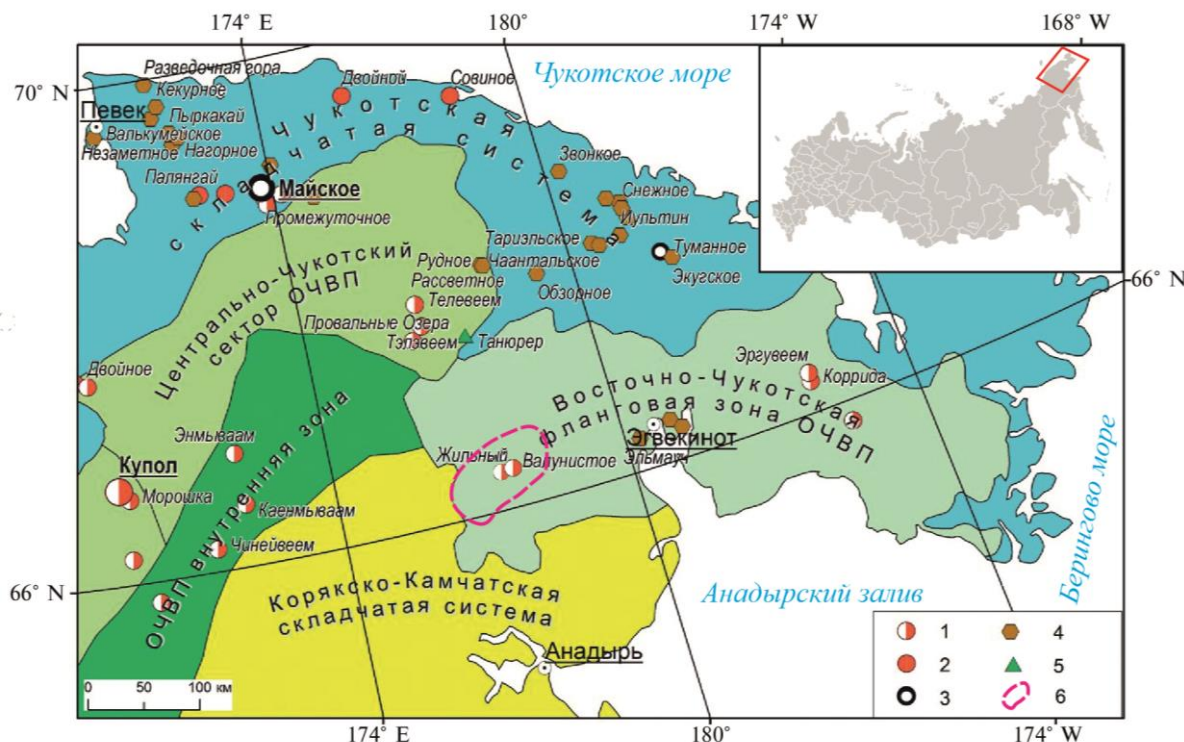


Рис. 1. Положение Валунистого рудного района в региональных структурах, на основе схемы В.Ф. Белого [1994]: 1–5 – месторождения: 1 – Au–Ag эпитермальные, 2 – Au-кварцевые, 3 – Au-сульфидные, вкрапленные, 4 – оловорудные; 5 – Cu-Мо-порфировые; 6 – Валунистый рудный район.

Геологическое строение

Выделяются пять структурно-формационных зон (СФЗ): Мургалско-Канчаланская, Амгуэмская и Танюрерская, Амгуэмская и Нижнеанадырская неотектонические впадины. Каждая СФЗ характеризуется определенными тектоническими структурами и представлена свойственными ей геологическими комплексами.

Наиболее древними стратифицированными образованиями (рис. 4) рассматриваемой территории являются в различной степени метаморфизованные вулканогенно-осадочные и осадочные породы девона (уэленейцевеемская толща) и карбона (озернинская и шумнинская толщи), которые сформировались в *Танюрерской СФЗ*.

Стратиграфически выше их в сводном геологическом разрезе площади залегают осадочные и вулканогенные породы верхней юры (пекульнейвеемская свита), нижнего (волчегорская толща) и верхнего мела (поперечнинская свита),

палеогена (танюерская и ильмынейвеемская свита), образовавшиеся в Мургальско-Канчаланской СФЗ.

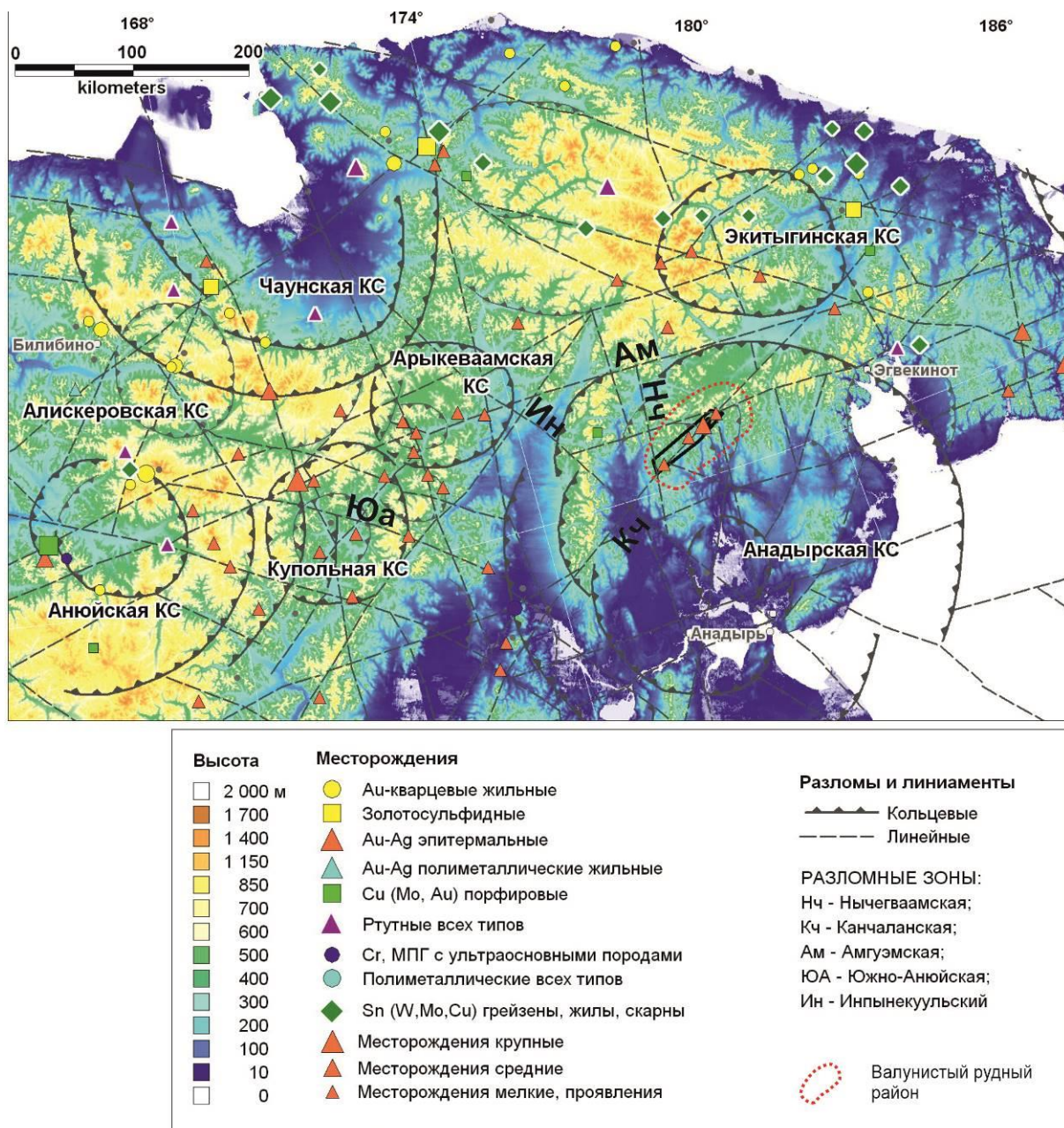


Рис. 2. Размещение месторождений полезных ископаемых северной части ОЧВП на цифровой модели рельефа с элементами структурной интерпретации (Гуревич, 2009). Схема районирования (Чехов, 2000), с использованием геологических карт м-бов 1:2 500 000 и 1:500 000; месторождений – по Mineral Resources of Eastern Siberia... Схема металлогенического... ЦНИГРИ, 2004, USGS MRDS. Тектоническая интерпретация выполнена с использованием геокарт м-ба 1:2 500 000, цифровых моделей рельефа SRTM30 и магнитного поля Земли WDMAM, композиции MrSID Landsat

На территории ВРР доминируют верхнемеловые вулканиты (амгеньская толща, экитыкинская, леурваамская и нунлигранская свиты) Амгуэмской СФЗ.

В основании вулканогенного разреза залегают покровные игнимбриты и туфы риолитов, риодацитов, дацитов, трахириолитов, трахидацитов и субвулканические дациты амгеньской толщи. Наиболее широко в районе распространены вулканыты экитыкинской свиты, состав которых очень пестрый – игнимбриты, лавы и туфы (от риолитового до базальтового состава), линзы и прослои осадочных пород, субвулканические тела и дайки андезитов, базальтов, дацитов. Амгеньскую и экитыкинскую серии рассматривается [Белый, 1981] как единая риолит-андезит-базальтовая формация. В центральной части района закартированы диориты экитыкинского интрузивного комплекса, а на правом берегу Гачагыргываам – риолиты леурваамского субвулканического комплекса.



Региональные тектонические структуры

- Охотско-Чукотский вулканогенный пояс (ОЧВП)
- Корякско-Камчатская складчатая область, Кони-Танюерская складчатая система
- Неотектонические впадины
- Месторождения и проявления золота:
1 - Осеннее, 2 - Жильное, 3 - Шах,
4 - Оранжевое, 5 - Валунистое, 6 - Горное,
7 - Лунное

Рис. 3. Схема тектонического районирования (Романов, 2003)

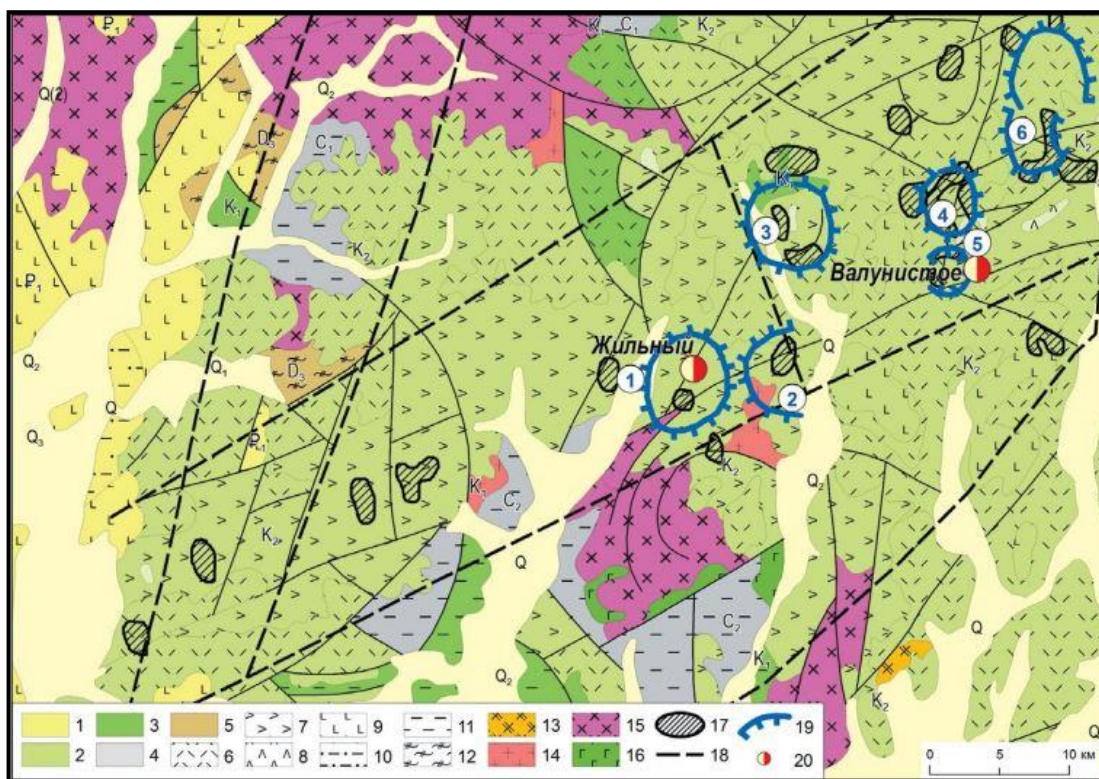


Рис. 4. Геологическая карта Валунистого рудного района [Волков и др., 2019].
 Условные обозначения: 1–5 – возраст пород: 1 – ранний палеоген, 2 – поздний мел (сеномантурон), 3 – поздний мел (коньяк), 4 – карбон, 5 – девон; 6–9 – вулканические породы: 6 – риолиты, 7 – дациты, 8 – андезиты, 9 – базальты; 10 – песчаники; 11 – глинистые сланцы; 12 – метаморфические породы; 13–16 – интрузивные породы: 13 – сиениты, граносиениты, 14 – граниты, гранодиориты, 15 – диориты, монзониты, 16 – габбро; 17 – субвулканические тела риолит-дацитового состава; 18 – крупные разломы; 19 – вулканокупольные структуры (1 – Жильнинская, 2 – Шахская, 3 – Оранжевая, 4 – Валунистая, 5 – Шалая, 6 – Правогорненская); 20 – Au–Ag эпитермальные месторождения.

Завершают разрез вулканитов базальты, субщелочные базальты, андезитобазальты с редкими прослоями туфов. В.Ф. Белый относит эти базальты к позднемеловой базальт-трахибазальтовой формации.

На северо-востоке площади локально обнажаются палеогеновые рыхлые отложения *Амгуэмской неотектонической впадины (зоны)*. На юго-западе территории в *Нижнеанадырской неотектонической впадине (зоне)*, а также в долинах крупных рек распространены четвертичные отложения.

Интрузивные породы образуют три плутонических комплекса - мургальский, экитыкинский, леурваамский, а субвулканические и экструзивные образования, совместно со стратифицированными вулканитами, слагают шесть

вулканических комплексов - амгеньский, экитыкинский, леурваамский, нунлигранский, танюрерский, ильмынейвеемский.

Основной рудоконтролирующей структурой района является Канчаланская зона глубинных разломов северо-восточного простирания, которая прослеживается в складчатом основании вулканитов от юго-западной до северо-восточной границы исследованной территории на 300–320 км и продолжается за ее пределами. На юго-западе она перекрывается 40 палеогеновыми базальтами и фрагментарно прослеживается до р. Танюрер, а на северо-востоке трассируется до р. Амгуэма. В пределах района ширина Канчаланской зоны разломов 12–30 км, генеральное простирание СВ 65°. В пределах Канчаланской зоны глубинных разломов локализованы основные гидротермальные и метасоматические образования, приуроченные к локальным вулканоструктурам и представленные пропилитами, аргиллизитами, вторичными кварцитами, а также зонами прожилкового окварцевания и кварцевыми жилами.

Полезные ископаемые

В металлогеническом плане район исследования находится в пределах Анюйско-Чукотской металлогенической провинции, в Канчалано-Амгуэмской металлогенической зоне [Волков и др., 2006], Валунистом рудном районе [Стружков, Константинов, 2005]. В пределах района выделяются Валунистый, Ныгчекваамский, Тэркенейский [Стружков, Константинов, 2005] и Центральный рудные узлы (Н.И. Романов, 1999). В западной части прогнозировался [Стружков, Константинов, 2005] рудный узел, скрытый под четвертичными отложениями и палеогеновыми базальтами. На площади первого рудного узла расположены месторождения Валунистое, Горное и Жильное, рудопроявления Шах и Оранжевое. В контуре Ныгчекваамский узла находится рудопоявление Осеннее и Ныгчекваам. В пределах Тэркенейского узла расположены рудопоявления Тэркеней, Кремовое и Лунное, в пределах Центрального – рудопоявление Центральное (рис. 5).

За пределами отмеченных рудных полей помимо золота и серебра выявлен ряд пунктов минерализации железа, меди, свинца, цинка, молибдена, платины, мышьяка, олова, висмута, ртути.

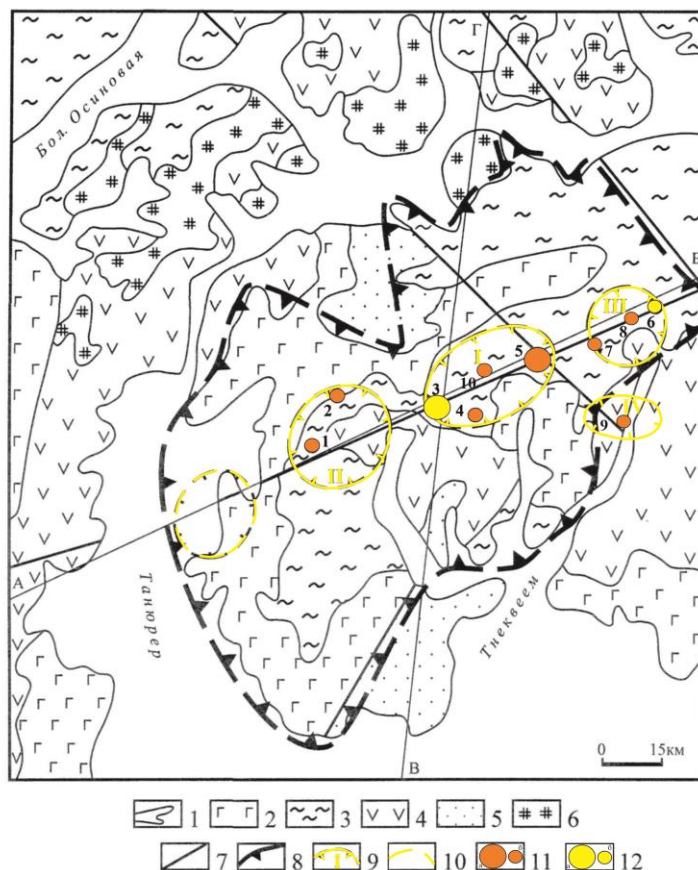


Рис. 5. Схематическая геологическая карта Валунистого рудного района (по С.Ф.Стружкову и М.М.Константинову, 2005 г., дополненная автором)

Условные обозначения к рис. 5: 1 – четвертичные аллювиальные отложения; 2 – верхнемеловые-палеогеновые (сеноман-датские) базальты, андезиты, риолиты (андезибазальтовая, риолитовая формация); 3- верхнемеловые риолиты, риодациты, их туфы и игнимбриты (риолитовая, риодацитовая формация); 4 – верхнеюрские-нижнемеловые, ниже-верхнемеловые андезиты, дациты, риолиты и их туфы (андезитовая, риодацитовая формация); 5 – терригенные нижнекарбоновые отложения и раннемеловые гранитоиды (карбонатно-терригенная и гранодиорит-гранитная формация); 6 - позднемеровые гранитоиды (гранодиорит-гранитная формация); 7 – разломы; 8 – границы рудного района; 9 – границы рудных узлов: I – Валунистого, II – Ныгчекваамского, III – Теркенейского, IV – Центральный; 10 – прогнозируемый рудный узел; 11 – золото-серебряные месторождения (а) и рудопроявления (б): 1 – Осеннее, 2 – Ныгчекваам, 4 – Шах, 5 – Валунистое, Горное, 7 – Лунное, 8 – Кремовое, 9 – Центральное, 10 - Оранжевое; 12 – серебряно-золотые месторождения (а) и рудопроявления (б): 3 – Жильное, 6 – Тэркеней.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА АНАЛИТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В ходе проведения полевых работ на территории Валунистого рудного района были отобраны образцы гидротермально-измененных пород, жильно-прожилковых образований, а также техногенно-минеральных образований.

В камеральный период были проведены аналитические исследования. Основной объем работ проводился в Лаборатории осадочных полезных ископаемых (Пермь), секторе «Наноминералогия» ПГНИУ (Пермь), НИЛ «Минералого-петрографических исследований» Естественнонаучном институте ПГНИУ (Пермь) и выполнялся по схеме, представленной на рис. 6.

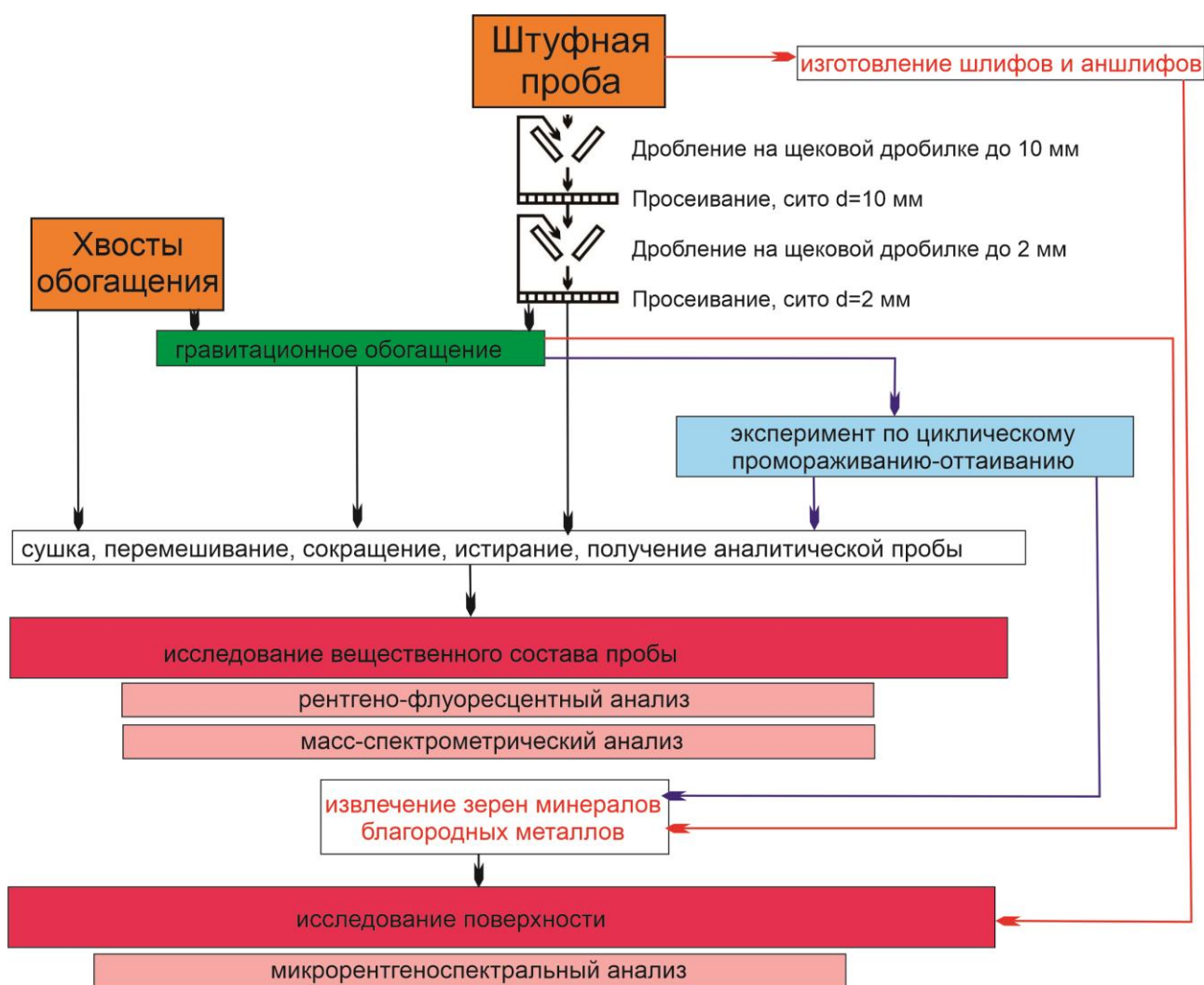


Рис. 6. Схема обработки проб и проведения аналитических работ

Пробоподготовка. Часть образцов была раздроблена до размера минус 2 мм для изучения рудных минералов. Разделения раздробленных образцов, а также техногенно-минеральных образований на легкую и тяжелую фракцию осуществлялось в лабораторных условиях гравитационным способом с использованием лотка и фарфоровых чаш. Полученный концентрат (черный шлик) доводился до суперконцентрата, с помощью домывки в бромформе. Просмотр тяжелой фракции осуществлялся под бинокулярным микроскопом Nikon SMZ-745.

Для аналитических исследований были использованы методы:

1. Рентгено-флуоресцентный (РФА) с применением рентгеновского порошкового дифрактометра D2 Phaser (фирма «Bruker», ФРГ) для определения элементного состава исходных проб (аналитик Е.М.Томилина). Порошковая проба помещалась в кювету, производилась съёмка дифрактограммы. Обработка кривых (сглаживание, поиск пиков) и качественный анализ выполнялись с помощью программы Diffrac.Eva. Для поиска минеральных фаз использовалась база данных порошковой дифрактометрии — PDF-2. Количественный анализ валового состава пробы выполнялся с помощью программного обеспечения Topas 4-2, которое реализует безэталонный анализ на основе метода Ритвельда — процедуры минимизации отклонения между экспериментальной и теоретически рассчитанной дифрактограммами.

2. Масс-спектрометрический с индуктивно-связанной плазмой (МС ИСП) для определения содержания благородных металлов в хвостах обогащения (аналитик А.Ю. Пузик).

3. Исследование шлифов с использованием поляризационного микроскопа Nikon Ekliрse LV 100 Pol (Nikon, Япония) для определения минерального состава образцов (аналитик Е.М.Томилина).

4. Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) для исследования поверхности рудных минералов и отдельных участков (аналитик Б.М. Осовецкий)

5. Локальный микрорентгеноспектральный (микронзондовый) для определения химического состава частиц (аналитик Б.М. Осовецкий) – более 200 анализов. Использован сканирующий электронный микроскоп JSM 7500F (Jeol) с холодной эмиссией и JSM 6390LV (Jeol) с энергодисперсионной приставкой INCA ENERGY 350 (Oxford Instruments).

Для понимания процессов преобразования рудных минералов месторождения Жильное был проведен *эксперимент по циклическому промораживанию-оттаиванию*, моделирующий характерные особенности климата на данной территории. Было проведено 8 циклов промораживания-оттаивания, каждый из которых является аналогом года. Диапазон колебаний температур в эксперименте составлял от +25 до -20 °C.

ГЛАВА 3. МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОРУДЕНЕНИЯ

3.1. Геологические особенности месторождения Жильное

В большинстве фондовых и опубликованных материалах существуют представления о том, что геологическое строение и минеральный состав руд месторождений и проявлений ВРР являются аналогичными. Однако месторождение Жильное имеет ряд отличительных особенностей, которые необходимо учитывать при разработке минералого-геохимической и прогностико-поисковой моделей золото-серебряного оруденения ВРР.

3.1.1. Геолого-структурные особенности

Геологическое строение

В геологическом строении месторождения принимают участие вулканогенные и вулканогенно-обломочные образования амгенской толщи, и, локально развитые, отложения экитыкинской свиты, прорванные plutоническими интрузивами, субвулканическими телами и дайками экитыкинской вулканоплутонической ассоциации (рис. 7). Породы рудовмещающей амгенской толщи представлены лавовыми покровами дацитов с прослоями лапиллиевых туфов и лавобрекчий дацитового состава, породы экитыкинской свиты – вулканитами андезит базальтового состава.

В восточной части месторождения зафиксировано субмеридиональное тело эруптивных брекчий [Елманов и др., 2018]. Основная масса брекчии имеет андезитовый состав, обломочный материал различной размерности (до 20 см) представлен дацитами и риолитами с флюидальной текстурой (рис. 8). Мощность брекчий достигает 30 м.

Как и на других месторождениях и проявлениях ВРР, предыдущими исследователями, по аналогии с наиболее детально изученным месторождением Валунистое, основная рудоконтролирующая роль приписывалась субвулканическим телам риолитов верхнемелового леурваамского комплекса. Такое тело, закартированное в центральной части участка, судя по

геологической карте (ГГК-200, 2003 г.), являлось рудовмещающим, локализуя большую часть, выделяемой на тот момент, Центральной рудной зоны.

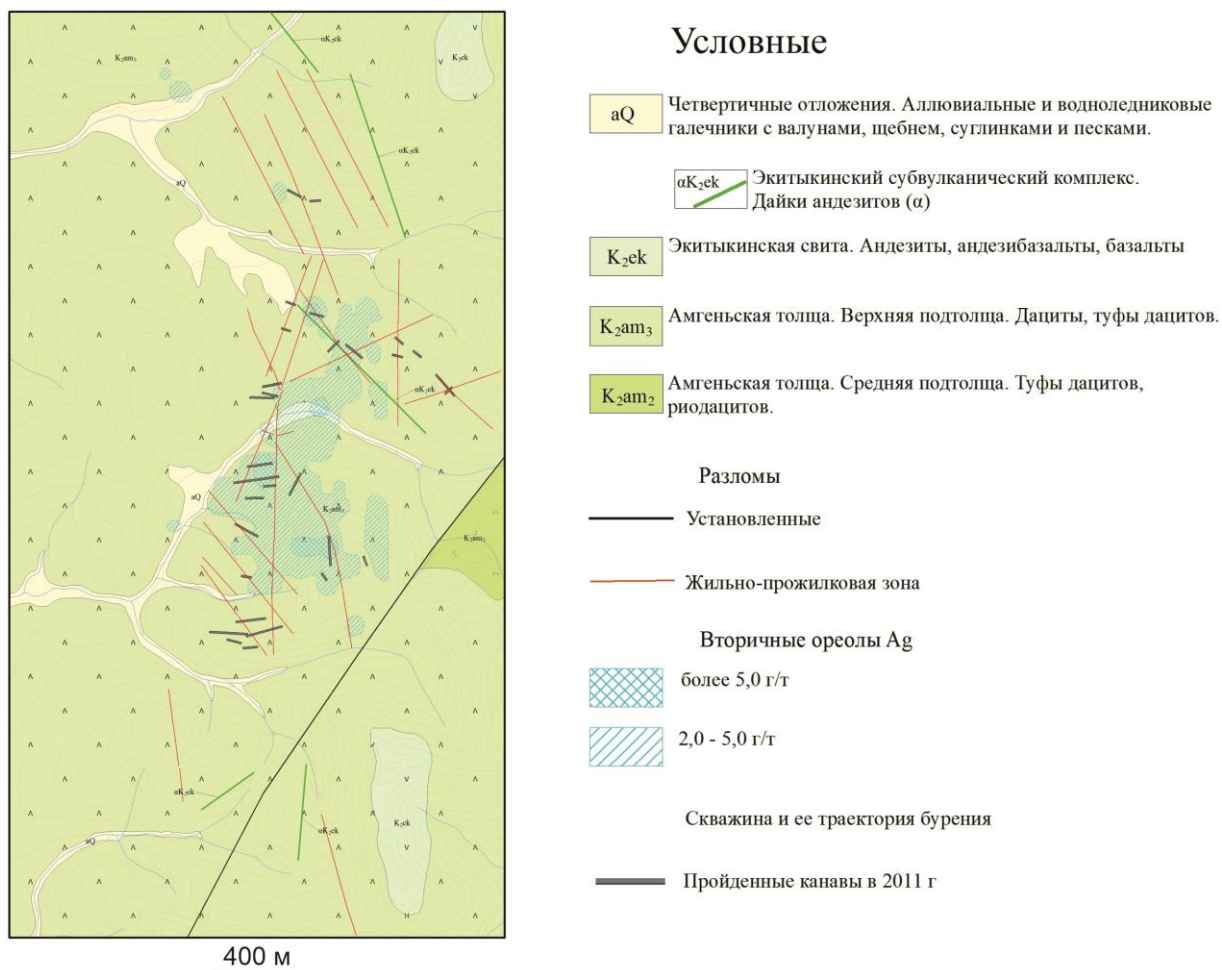


Рис. 7. Схематическая геологическая карта месторождения Жильное (Новоселов, 2012)



Рис. 8. Эруптивная брекчия, месторождение Жильное (фото автора)

Полевые наблюдения (Д.В. Гуревич, 2007), также результаты проведенных нами в 2019 г. геологоразведочных работ не подтвердили наличие специфических тел. Указанное «субвулканическое тело», по своим петрографическим особенностям, ни чем не выделяется на общем фоне лав дацитового состава, слагающих восточную часть участка.

В связи с этим, уместно отметить, что непосредственно на площади Валунистого рудного поля ранее выделялось значительное количество аналогичных субвулканических образований леурваамского комплекса, при этом контуры выходов их на поверхность периодически претерпевали, как правило, существенные изменения.

Построение системы разрезов по профилям скважин (В.П. Худоногов, 2015) в центральной части рудного поля демонстрирует, что, в большинстве случаев, обозначенные риолиты совместно с ниже вскрываемыми андезитами, предварительно расчлененные на ряд фациальных разновидностей (лавы, кластолавы, туфолавы, туфобрекчии), имеют четкое стратифицированное строение.

Из вышесказанного следует, что выделение обособленных субвулканических тел риолитов леурваамского комплекса в ряде случаев является не вполне обоснованным. В тоже время, в канавах, вскрывающих Центральную рудную зону, были обнаружены порфировидные диориты, пронизанные ветвистыми кварц-адуляровыми и кварц-сульфидными прожилками.

Геолого-структурная модель района

На зоне Главная месторождения Валунистое рудовмещающими породами являются риодациты жерловой фации леурваамского комплекса. Рудные тела быстро выклиниваются с выходом рудовмещающих структур в пирокластические фации вулканитов экитыкинской свиты. На зоне Новой рудовмещающими являются стратифицированные вулканогенные отложения

экитыкинской свиты, которые прорываются силлоподобными телами риодацитов леурваамского комплекса.

К основным геологическим особенностям месторождения [Волков и др., 2020] относятся: 1) наличие в рудных телах большого количества брекчий и мегабрекчий с кокардовыми текстурами обрастания обломков различного петрографического состава халцедон-адуляровым агрегатом, а также разнообразие брекчий, маркирующих рудные зоны; 2) локализация оруденения преимущественно контролируется субвулканическими телами риодацитов леурваамского комплекса (K2lr); 3) значительная протяженность рудоносных зон по простиранию.

Эти особенности, вероятно, обусловлены формированием оруденения в околожерловых фациях палеовулканической постройки [Усов, 1960; Кузнецов, 1960, Малеев, 1963; Авдонин, Гончарова, 1986; Дьяконов, 2011]. Аналогичные геолого-структурные особенности характерны для крупных месторождений Купол и Двойное Центрально-Чукотского сектора ОЧВП [Сергиевский, 2006; Волков и др., 2012; Волков и др., 2018].

Для месторождения Жильное, в отличие от месторождения Валунистое, характерно четкое стратифицированное строение пород, отсутствие субвулканических тел риолитов верхнемелового леурваамского комплекса (K2lr), присутствие порфировидных диоритов, в том числе и в качестве рудовмещающих, широкое развитие пострудных даек андезитов, подчиненная роль колломорфно-зональных, ритмично полосчатых, крипто- и мелкозернистых, каркасно-петельчатых текстур, редкое присутствие тел брекчий небольшой мощности. Данные особенности позволяют относить его к склоновой группе фаций.

Таким образом, в пределах палеовулканического сооружения Валунистого рудного узла (рис. 9), имеющего несколько этапов развития, золото-серебряное оруденение связано с околожерловой (месторождение Валунистое) и склоновой (месторождение Жильное) группами фаций. Аналогичное разделение Au-Ag

оруденения по группам фаций выделено [Сергиевский, 2006] в пределах Кайемравеемского рудного узла (Центральная Чукотка). Околожерловая группа фаций включает в себя жерловую, экструзивную, эффузивную и постмагматическую (интрузивные и субвулканические тела) фации. Склоновая группа фаций включает эффузивную, пирокластическую и лахаровую фации. Удаленная включает пирокластическую, тефроидную фацию.

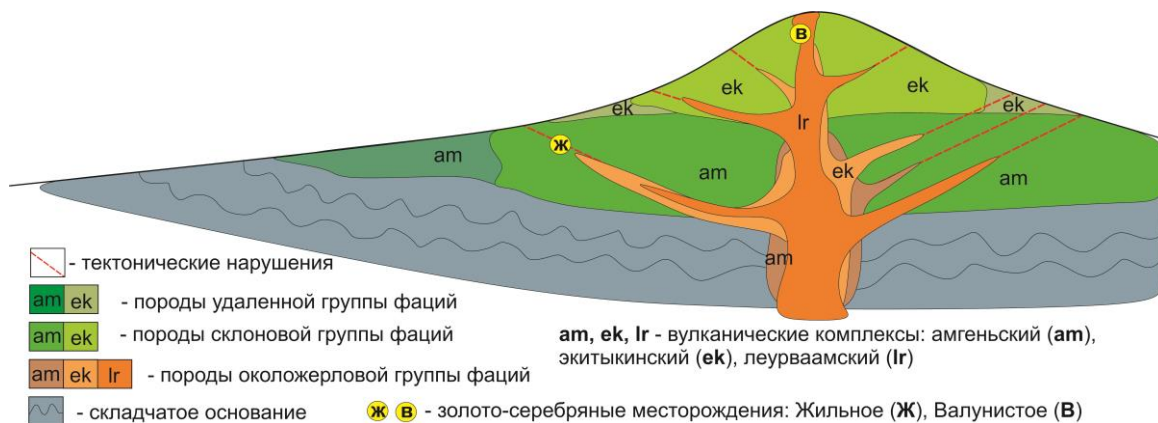


Рис. 9. Схематическая палеовулканическая реконструкция вулканического сооружения Валунистого рудного узла

3.1.2. Минералого-геохимические особенности

Гидротермально-метасоматические образования

Вмещающие породы неравномерно подвержены гидротермально-метасоматическим изменениям и превращены в пропилиты эпидот-хлоритовой фации и разнопроявленные вторичные кварциты. На отдельных участках породы подвержены аргиллизации. Подавляющий объем выявленных проявлений рудной минерализации, объединенных в зону Центральную, маркируются полем сплошного развития аргиллизитов. Наиболее широко на месторождения проявлены процессы окварцевания, карбонатизации и сульфидизации. Наиболее интенсивно метасоматические процессы проявлены в центральной части Жильного рудного поля.

Особенностями гидротермально-измененных пород месторождения Жильное, относительно других объектов ВРР, являются:

1) очень «пестрый» состав минеральных фаций, что обусловлено различным составом и физико-механическими свойствами эффузивов;

2) преимущественное развитие пропилитов при слабой распространенности аргиллизитов, что может свидетельствовать о сравнительно глубоком уровне эрозионного среза.

Оруденение

Локализуется в минерализованных участках среди кварцевых жильно-прожилковых зон (рис. 10). Зоны прожилкового окварцевания являются главной составляющей, выделяемых на месторождении, рудных тел. Кварцевые жилы, как обособленный морфологический тип рудных тел, в пределах месторождения не имеют самостоятельного промышленного значения. Фактически данные минерализованные участки представляют собой в разной степени оруденелые вмещающие породы, лишены определенных геологических границ, промышленные контуры устанавливаются только по результатам сплошного опробования.



Рис. 10. Кварц-адуляровое прожилкование по хлоритизированным дацитам, месторождение Жильное (фото автора)

Параметры рудных тел. Длина по простиранию варьирует от 170 до 716 м, мощность изменяется от 1 до 46 м. Содержание Ag в рудных телах составляет 99-391 г/т, Au – 0,5-1,4 г/т. Характерной особенностью

месторождения Жильное является резкое преобладание Ag над Au. Среднее значение Ag/Au отношения (СЗО) по результатам подсчета запасов 2015 г. составляет 237,4–244,9. Рудные тела характеризуются сложным внутренним строением, прерывистым характером оруденения, наличием частого и незакономерного чередования участков с кондиционным и некондиционным содержанием, что выражается в неравномерном распределении полезного компонента и подтверждается относительно высоким (76,4-105,2% в зависимости от варианта) значением коэффициента вариации содержаний.

По результатам разведочных работ 2019 года в центре месторождения была выявлена зона гидротермальных брекчий с сульфидно-кварцевым цементом (рис. 11-б, в). Черный цемент этих брекчий представляет собой гидротермальные образования, аналогичные таковым в прожилках (рис. 11-а). Черные кварц-сульфидные прожилки пересекают более ранние безрудные кварц-адуляровые прожилки предыдущей стадии минералообразования, а также внедряются в них (рис. 11-г, 12).

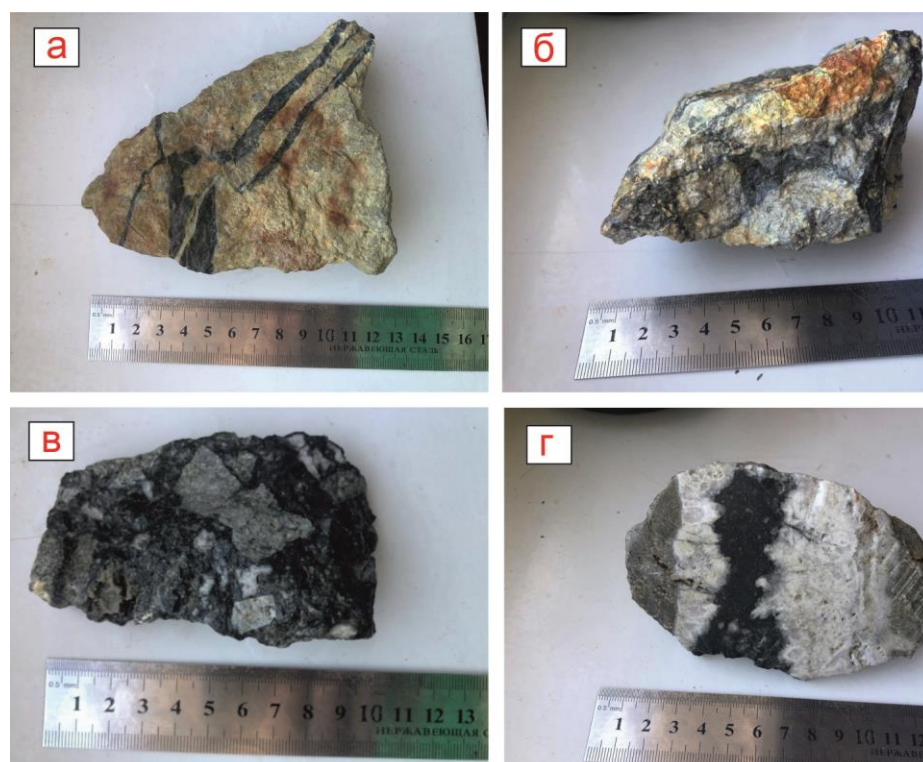


Рис. 11. Кварц-сульфидные образования (фото автора): а – кварц-сульфидные прожилки, б,в – кварц-сульфидный цемент гидротермальных брекчий, г – полосы и просечки в кварц-адуляровой жиле



Рис. 12. Зона кварц-сульфидного прожилкования, месторождение Жильное (фото автора)

По данным бороздового и кернового опробования, содержания благородных металлов в отдельных пробах составляют 10–20 г/т Au и 100–3500 г/т Ag. Мощность зон брекчий достигает 25 м. В них, начиная от дневной поверхности, увеличиваются содержания благородных металлов до максимальных значений в интервале 25–75 м, которые затем падают до практически полного отсутствия на глубине 130 м. Далее их уровень остается неизменным и сопровождается высокими значениями СЗО. Максимальные содержания ($Au_{\text{усл.}}$ 40–90 г/т) отмечаются в центральной части трубок брекчий. [Голдырев и др., 2022a].

Установлено, что зоны развития брекчий связаны с участками высокой трещиноватости пород. Часто их сопровождают жильно-прожилковые зоны, участки интенсивных метасоматических изменений (окварцевание, полнопроявленные аргиллизиты). Золотоносность брекчий не постоянна, однако при появлении брекчий происходит резкое повышение содержания благородных металлов в сопровождающих зонах интенсивных метасоматических изменений и жильно-прожилковой минерализации (рис. 13, 14). Появляется возможность оконтуривания рудных тел. В этих же зонах,

вдали (на расстоянии 30 м и более) от брекчий, Au и Ag практически отсутствуют.

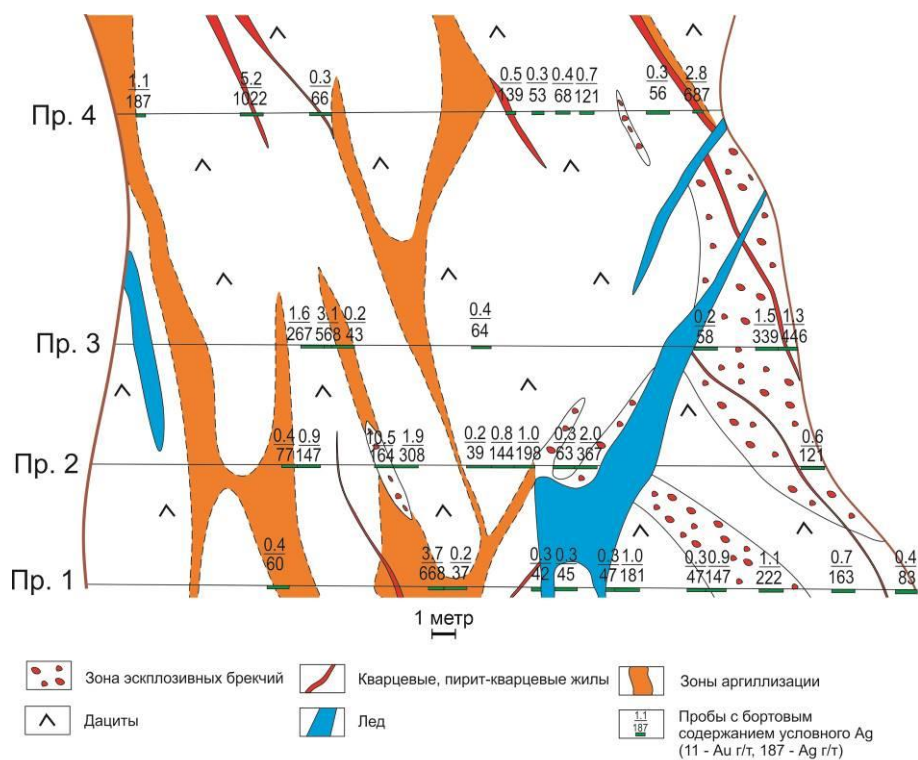


Рис. 13. Схематический геологический план участка полотна траншеи в центральной части месторождения Жильное



Рис. 14. Кварц-адуляровая жила с сульфидной минерализацией (фото автора). Au - 17 г/т, Ag – 2511 г/т

Предшественники относили данные брекчии к эскпловивным образованиям и считали, что они являются рудовмещающими. Подобные брекчии встречаются на многих вулканогенных объектах [Сидоров и др., 2010; Савва и др., 2012; Савва и др., 2016], в том числе и на соседнем месторождении Валунистое [Волков и др., 2020], однако, в отличие от Жильного, их состав может быть как пиритовым, так и гематитовым.

Эти факты позволяют сделать вывод о том, что оруденение связано с наложенными зонами интенсивных метасоматических изменений и жильно-прожилковыми зонами, а брекчии играют роль коллекторов оруденения, т. е. существует пространственная связь брекчий и благороднометалльной минерализации.

Жильные минералы

Кварц является наиболее распространенным породообразующим минералом. По данным ООО НИПИ «ТОМС» его доля составляет 60,0%. В значительном количестве в пробах присутствуют полевые шпаты, среди которых преобладают калиевые полевые шпаты – 13,0-17,0%. Доля плагиоклазов меньше – 10,0%. Глинисто-гидрослюдистые минералы – 5,0%.

Жильные образования месторождения представлены преимущественно маломощными (от нитевидных до 2-5 см, реже до 20 см) ветвящимися, разно ориентированными прожилками кварцевого и, реже, кальцит-кварцевого, адуляр-кварцевого и пирит-кварцевого состава.

Самый ранний кварц диагностируется по наличию эпидота. Часто отмечается, что в ксенолитах вмещающей породы внутри кварцевых прожилков присутствует эпидот. При этом наблюдается замещение кварцем первичных минералов, что позволяет сделать вывод о его метасоматическом происхождении. Ранний кварц нередко сечется карбонатными, кварц-серицитовыми, кварцевыми прожилками с рудной минерализацией. В некоторых шлифах наблюдается образование свежего альбита по каемке

пересечения вкрапленников плагиоклаза кварцевыми и кварц-эпидотовыми прожилками.

Кварцевые и, реже встречаемые, адуляр-кварцевые прожилки продуктивной рудной стадии с вкрапленностью сульфидов (пирит, реже халькопирит) секут вышеописанные кварцевые с эпидотом.

Редкие поздние кварцевые прожилки с цеолитом или кальцитом секут все вышеперечисленные. Местами такие прожилки состоят целиком из кальцита, возможно, отвечающего самостоятельной (последующей) стадии минералообразования.

Калиевый полевой шпат (адуляр) встречается непостоянно. Формы проявлений адуляровой минерализации очень разнообразны: тонкозернистые совместные с кварцем агрегаты в отдельных прослойках и в обломках окварцованных пород; реакционные тонкокристаллические оторочки на контактах с обломками пород, а также на границах разностадийных кварцевых агрегатов; неравномерно вкрапленные выделения в мелкозернистых кварцевых агрегатах; порфировидные мелковкрапленные зерна и сростки в тонкозернистом кварце. Адуляр образует гнездообразные скопления. Химический состав центральных зон зерен калиевого полевого шпата очень близок к стехиометрическим данным. Иногда в качестве примесей присутствуют сера и железа, что явно указывает на присутствие микровключений пирита. В небольшом количестве может присутствовать натрий [Голдырев и др., 2022a].

Хлорит представлен хлопьевидными и чешуйчатыми агрегатами с упорядоченным расположением чешуек. Хлориты заполняют прожилки в породе и иногда образуют локальные зоны интенсивной хлоритизации. Иногда в пределах этих зон образуются агрегаты пирита. Местами хлорит частично замещает адуляр. Хлориты относятся к подгруппе магнезиально-железистых разностей. Содержание MgO превышает 20 мас. %, повышенное содержание отмечено и для Al_2O_3 (около 20 мас. %). Наиболее характерным является

присутствие около 5 мас. % MnO , что свидетельствует о присутствии пеннатитового минала. Присутствие SO_3 (около 2 мас. %) указывает на насыщенность хлоритов тонкодисперсным пиритом [Голдырев и др., 2022a].

Серицит является постоянной примесью в составе разновременных минеральных образований руд. Наиболее значительные скопления серицита отмечаются в составе раннего (дорудного) минерального комплекса. Серицит образует обильные скопления тонкочешуйчатых агрегатов в обломках окварцованных пород, а также в кварцевых прожилках, пронизывающих эти обломки. Постоянное, в заметных количествах, присутствие серицита устанавливается в рудном кварце. Серицит представлен слабо гидратированной слюдой. Серицит образует довольно равномерные тонкочешуйчатые выделения в межзерновых промежутках продуктивного тонкозернистого кварца.

Сфен встречается эпизодически в виде скоплений новообразованных кристаллов изометрической или удлиненной формы в кварц-полевошпатовом субстрате. Присутствие в химическом анализе кремнезема и глинозема свидетельствует о тесной взаимосвязи новообразований сфена с кварцем и полевым шпатом. В одном анализе зафиксировано высокое содержание магния, который является индикатором присутствия хлоритов [Голдырев и др., 2022a]. Кроме того, присутствуют и мелкие зерна пирита (содержание серы достигает 2% и более).

Внешний вид выделений породообразующих минералов и их химический состав представлены на рис. 15, табл. 1.

Рудные минералы

Руды месторождения являются малосульфидными – характеризуются наличием скудной рудной минерализации. Основным рудным минералом в них является пирит, количество которого в пробах составляет 3%.

Пирит является самым распространенным (> 95%) рудным минералом. Пирит имеет довольно постоянный химический состав, весьма близкий к стехиометрическому [Голдырев и др., 2022a, 2023a]. В качестве

микропримесей почти постоянно присутствует Cu, Zn, Co, реже встречаются Se, As, Pb, Cd и Bi (табл. 2), что указывает на нижнерудный уровень оруденения [Кравцова, 2005].

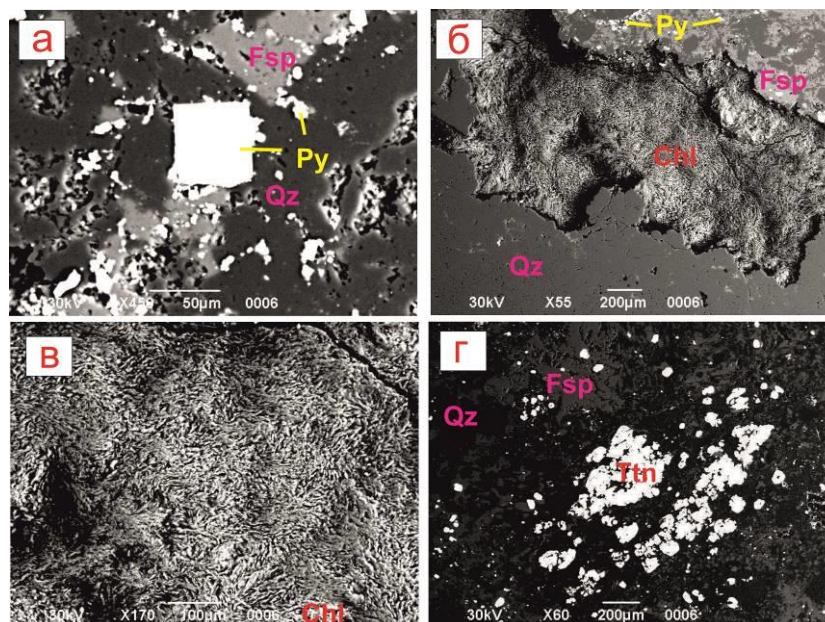


Рис. 15. Породообразующие минералы: а – пирит в кварц полевошпатовой зоне, б, в – зона интенсивной хлоритизации, г – зона интенсивной сфенизации. Условные обозначения: Py – пирит, Qz – кварц, Fsp – полево шпат, Chl – хлорит, Ttn – сфен

Таблица 1. Химический состав породообразующих минералов, мас. %

Оксид	1	2	3	4	5	6
SiO ₂	63,56	65,71	35,56	35,23	39,32	31,16
TiO ₂	-	0	0,39	0,09	19,93	28,15
Al ₂ O ₃	17,22	17,39	19,42	19,68	10,54	6,51
FeO*	1,58	0	12,84	8,03	4,84	2,77
MnO	-	-	4,20	5,24	-	0,26
MgO	0	0	21,35	24,20	5,58	-
CaO	0	-	1,27	1,99	17,15	25,19
Na ₂ O	-	0,31	0,72	0,35	-	-
K ₂ O	16,03	16,59	-	0	-	-
V ₂ O ₅	-	-	-	-	0,40	0,31
S	0,64	-	1,70	2,08	0,90	2,26
Сумма	99,03	100,00	97,45	96,89	98,66	96,61

Примечание: 1, 2 – адуляр, в т.ч. с микровключениями пирита, 3, 4 – хлорит с микровключениями пирита, 5, 6 – зоны со сфеном.

Были выделены [Голдырев и др., 2023а] следующие морфологические типы и формы нахождения пирита:

1. Одиночные кристаллы, часто кубической формы размером до 50 мкм (рис. 16-а).

Таблица 2. Химический состав пирита, мас. %

Эле- мент	Зерна									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fe	43,65	41,74	38,06	45,52	47,06	47,07	41,77	46,93	44,83	49,66
S	55,54	56,89	49,33	52,64	52,11	52,20	57,19	51,28	54,00	48,86
As				0,24						
Cu	0,32	0,44	10,99	0,70	0,32	0,26	0,43	0,55	0,35	0,61
Zn	0,30	0,32	0,48	0,52	0,28	0,16	0,35	0,44	0,32	0,49
Ni								0,07		
Co	0,19	0,27	0,27	0,26	0,24	0,13	0,25	0,27	0,26	0,21
Pb								0,46	0,24	
Se		0,10	0,19	0,12		0,19				0,16
Bi		0,21								
Cd			0,68							
Сумма	100,00	99,97	100,00	100,00	100,01	100,01	99,99	100,00	100,00	99,99

2. Мелкие кристаллики и зерна округлой формы, образующие различные скопления (рис. 16-б). Округлые, овальные формы пирита характерны для многих месторождений палеогидротермальных рудообразующих систем [Округин и др., 2014]. Им обычно приписывается метакolloидное происхождение.

3. Сплошные зернистые массы (рис. 16-в, г) в виде цепочек мелких кристалликов или на контакте породообразующих минералов (кварца и полевых шпатов).

4. Сrostки с другими минералами: галенитом, халькопиритом, сфалеритом (рис. 17-а). Наиболее часто отмечаются сrostки с галенитом.

Кроме того, пирит является формой замещения титансодержащих железистых минералов (рис. 17-б, в, г). Пирит наблюдается во вмещающих породах в виде зерен, которые расположены по краям (рис. 17-б) выделений титансодержащих минералов (анатаза). В случае более интенсивного замещения описываемый пирит образует скелетообразные зернистые агрегаты с остатками анатаза (рис. 17-в). Кроме того, встречаются овальные скопления мелких зерен (рис. 17-г).

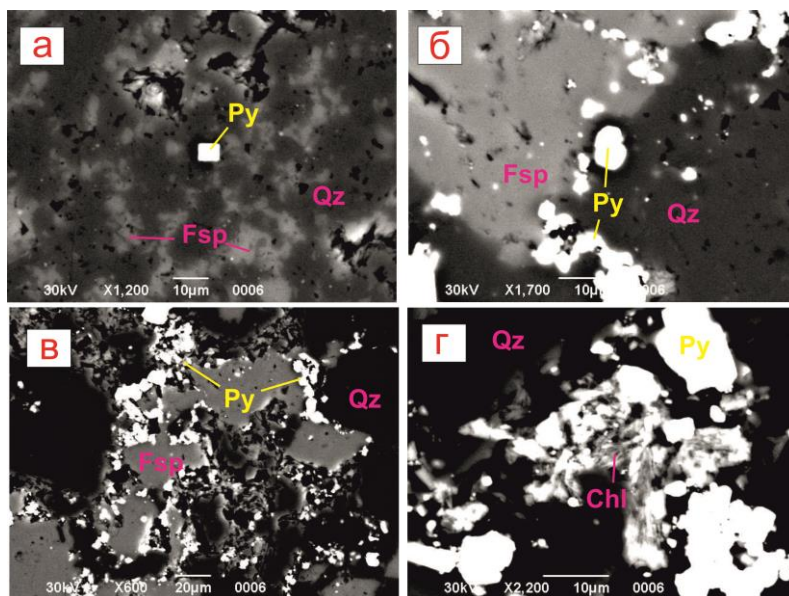


Рис. 16. Выделения пирита: а – одиночный кристалл пирита кубической формы в кварц полевошпатовой зоне, б – скопления мелких зерен пирита округлой формы на контакте кварца и полевого шпата, в – сплошная зона пиритизации на контакте кварца и полевого шпата, г – зона интенсивной пиритизации с хлоритом. Условные обозначения: Py – пирит, Qz – кварц, Fsp – адуляр, Chl – хлорит

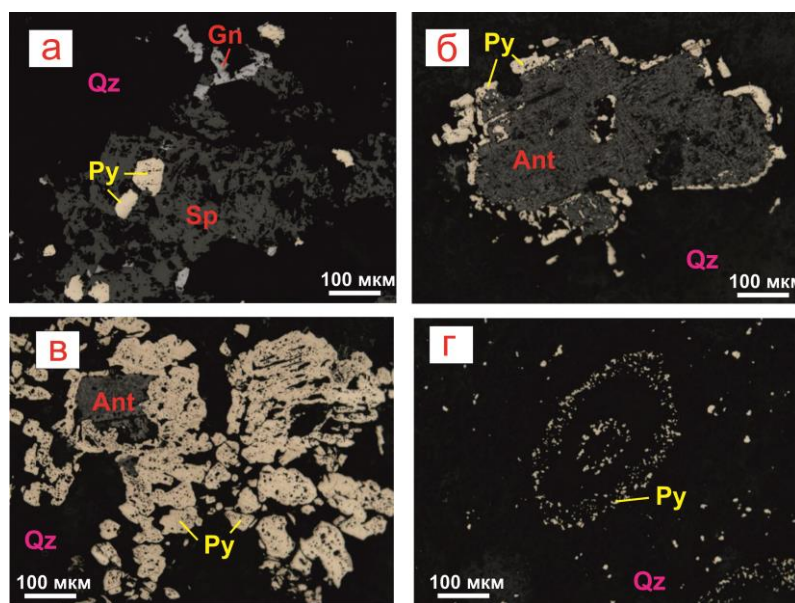


Рис. 17. Выделения пирита: а – сrostок пирита с галенитом и сфалеритом, б – пирит, расположенный по краю анатаза, в – зернистый агрегат пирита с остатками анатаза, г – тонкозернистый агрегат пирита в виде «кругов». Условные обозначения: Py – пирит, Qz – кварц, Gn – галенит, Sp – сфалерит, Ant – анатаз

Пирит часто сильно трещиноват, иногда встречаются интенсивно «раздробленные» кристаллы. Трещины в пирите нередко заполнены минералами благородных металлов, местами содержит включения и прожилковидные выделения акантита (рис 18-а), и самородного серебра.

Иногда акантит замещает пирит (рис. 18-б) и заполняет пустоты в нем (рис. 18-в). Наблюдаются признаки регенерации пирита – обрастания зерен каймой следующей генерации. Кроме того, пирит образует кристаллы корродированной кубической формы либо их сростки, а также корродированные пентагон-додекаэдры (рис. 18-г).

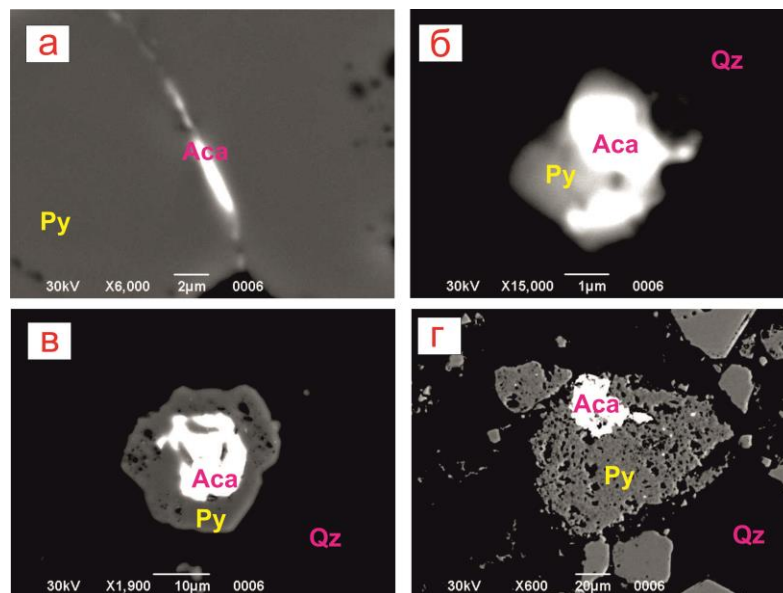


Рис. 18. Акантит в пирите: а – акантит в трещине пирита, б – замещение пирита акантитом, в – акантит в пирите, г – акантит в корродированном пирите. Условные обозначения: Py – пирит, Qz – кварц, Аса – акантит

Пирит присутствует в составе минерализации различных уровней оруденения и представлен несколькими генерациями [Голдырев, 2023].

Пирит-1 (первая генерация) представлен зернами, расположенными по краям выделений титансодержащих минералов (анатаз). Они распространены во вмещающих породах. Часто встречаются кольцообразные гнезда (рис. 19-а).

Пирит-2 (вторая генерация), относящаяся к дорудному комплексу, присутствует в виде тонко- и мелковкрапленных скоплений в обломках окварцованных пород. Пирит образует идиоморфные и гипидиоморфные зерна, вкрапленные во вмещающую породу. Они отчетливо выделяются по характерным прямоугольным и пятиугольным сечениям.

Пирит-3 (третья генерация) раннего рудного комплекса имеет разнообразные формы выделений. Как правило, представлен он бластозернами

с ситовидным сетчатым строением, расположенными по прожилкам (рис. 19-б). Характерны как мономинеральные агрегаты, так и сростки с халькопиритом, сфалеритом и галенитом (рис. 19-в). В прожилках отмечен мелкозернистый пирит и халькопирит в тесном сростании с галенитом. Прожилковидные выделения галенита вторичны по отношению к данной генерации пирита и секут его. Пустоты в пирите выполнены вмещающей породой, реже галенитом и, крайне редко, сфалеритом. Иногда пирит является цементом, заполняя трещины и пустоты во вмещающей породе (рис. 19-г).

Пирит-4 (четвертая генерация) более позднего рудного комплекса отмечается в кварцевых жилах в виде бедной, неравномерно рассеянной мелкой и тонкой вкрапленности идиоморфных и неправильных мономинеральных зерен, реже кристаллических сростков. Иногда образует быстро выклинивающиеся послойные тонковкрапленные скопления.

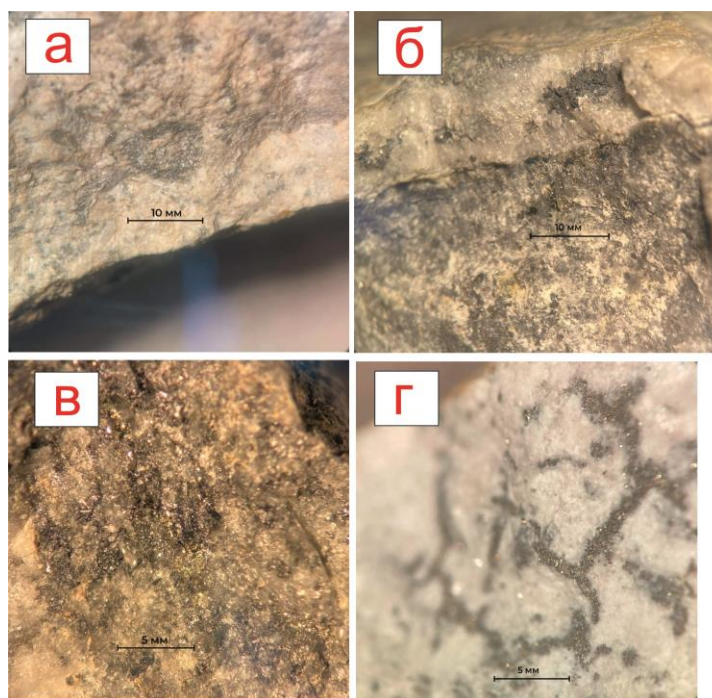


Рис. 19. Генерации пирита (фото автора): а – кольцообразные гнезда пирита, б – вкрапленники пирита и галенита в прожилке, в – сростки пирита и галенита, г – трещины, заполненные пиритом

Пирит-5 (пятая генерация) отмечается в более поздних минеральных образованиях (кварц-карбонатных жилах и брекчиях). Наряду с редкой

рассеянной, преимущественно тонкой вкрапленностью, иногда отмечаются более заметные локальные скопления пирита, в том числе в виде умеренной вкрапленности относительно более крупных кристаллов, преимущественно пентагон-додекаэдрической формы.

Сульфиды полиметаллов (сфалерит, халькопирит и галенит) относятся к наиболее распространенным после пирита рудным минералам. Самые значительные их проявления, как и пирита, связаны с ранней кварц-сульфидно-полиметаллической минерализацией. Сфалерит, халькопирит и галенит в разных количественных соотношениях сопровождают пирит, главным образом в виде мелко- тонковкрапленных скоплений в кварце и пирите [Голдырев, 2023].

Сфалерит, более ранний из сульфидов, чаще всего количественно преобладающий, представлен железистой темноокрашенной разновидностью (марматитом). Часто он наблюдается в сростаниях с другими рудными минералами и образует, нередко, обильные микровключения в пирите. Формы выделений сфалерита - изометричные, реже неправильные; размер выделений не превышает одного миллиметра в поперечнике.

Галенит чаще всего встречается в виде мелких выделений, образует самостоятельные ксеноморфные вкрапленные выделения в кварце, а также сростания с другими сульфидами. Характерны округлые включения галенита в зернах пирита [Голдырев и др., 2023б]. В химическом составе галенита всегда в качестве обязательной примеси присутствует As, содержание его повышено (иногда более 3%). В некоторых индивидах присутствуют Au и Ag. Характерны также примеси Cu (до 3% и более) и Co. Очень редко присутствуют Sn и Ge (табл. 3). Иногда встречаются сростки галенита с акантитом (рис. 20).

Халькопирит наблюдается в виде ксеноморфных выделений в кварце, в том числе в сростках с другими рудными минералами, образует интерстициальные выделения в пиритовых агрегатах. С галенитом халькопирит образует одновременные сростания типа взаимных границ, совместные

прожилково-вкрапленные выделения и микропрожилки в сфалерите, а также каемки на сфалерите. Довольно редко наблюдается тончайшая эмульсионная вкрапленность халькопирита в сфалерите, как продукт распада твердого раствора. Халькопирит встречен также в виде тонких, местами извилистой формы реликтов от замещения акантитом.

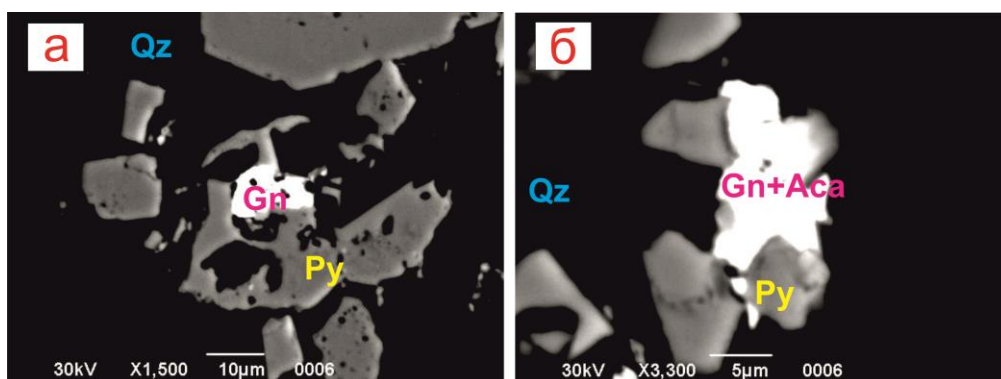


Рис. 20. Галенит: а – сросток галенита с пиритом, б – сросток галенита с акантитом на пирите. Условные обозначения: Gn – галенит, Py – пирит, Qz – кварц, Аса – акантит

Таблица 3. Химический состав галенита, мас. %

Элемент	1	2	3	4	5	6
Fe	8,16	1,33	28,46	19,52	26,99	1,73
S	25,47	21,34	41,05	33,87	39,64	14,00
As	3,64	1,92	0,94	1,46	2,09	1,43
Sb						
Ni						
Co	0,14			0,21	0,21	
Zu						
Cu		3,30	0,09		0,19	
Hg						
Bi						
Pb	61,75	71,68	29,30	44,95	30,11	33,14
Au	0,85				0,48	
Ag			0,16			49,69
Sn		0,42				
Ge					0,28	
Сумма	100,01	99,99	100,00	100,01	99,99	99,99

Примечания: 1 – в пирите, 2 – в хлорите, 3 - в пирите, 4 - в кварце, 5 - в пирите, 6 – сросток галенита с акантитом

Минералы благородных металлов

Среди минералов благородных металлов доминирует *акантит* [Голдырев и др., 2022а], который распространен повсеместно, в самых разнообразных формах, широкой гаммы размерности, в разных минералах и участках породы.

Относительно крупные (более 10 мкм) зерна акантита отличаются сложной формой и встречаются в центральных частях зерен пирита, занимая пустоты (рис. 18-в). Особенно крупными (до 100 мкм и более) являются зональные включения в кварце. Нередко акантит также присутствует в виде включений кристаллах халькопирита и галенита, обрастает их в виде каемок, а также корродирует эти минералы (рис. 18-г), иногда выполняет промежутки между зернами кварца.

Часто зерна акантита в кварце или пирите образуют скопления, нередко они сопровождаются более мелкими выделениями [Голдырев и др., 2023а]. Химический состав акантита непостоянен из-за влияния вмещающих минералов, обычно, пирита, судя по присутствию в анализе Fe (почти до 7 мас. %). Колебания в содержании S (9.5–15.5 мас. %) также обусловлены влиянием пиритовой матрицы. Наиболее характерными элементами-примесями являются Zn, Cu, Hg, Ni, Pb, Cd, As. В одном зерне (с присутствием As) обнаружено золото (табл. 4).

Таблица 4. Химический состав включений акантита, мас. %

Элемент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fe	0,60	1,14		1,05	6,69	4,40	1,81	1,03	1,14	4,32
S	9,52	9,74	11,30	10,98	15,54	13,41	12,69	14,01	9,74	14,32
As	0,63									0,29
Ni			0,08			0,09				
Zu		0,13	0,53	0,14		0,55			0,13	
Cu	0,27						0,17	1,87		
Hg		0,28				0,24			0,28	
Bi						0,54				
Pb				0,64		0,48				
Au	0,45									
Ag	88,53	88,70	88,09	87,19	77,77	76,68	84,94	83,09	88,70	81,06
Cd						3,61				
Se							0,39			
Сумма	100,00	99,99	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	99,99	99,99

Состав акантита отражает геохимические особенности территорий благодаря вхождению в него микропримесей [Савва, 2018]. По составу акантит месторождения Жильное наиболее схож с акантитом, встреченным на месторождениях Дукат, Извилистое, Аган, Утесное, Юное.

Микровключения акантита размером менее 5 мкм наиболее часто присутствуют в пирите, а также в кварце [Голдырев и др., 2022а; 2023а]. Они нередко имеют овальную форму, но обычно сложную и удлинённую. Очень характерно присутствие мелких выделений акантита на контактах зерен кварца и пирита, а также в микротрещинах в пирите (рис. 18-а).

Самородное серебро отмечается в значительно меньшем количестве, чем акантит. По цвету самородное серебро характеризуется как стально-серое, серебристо-серое (рис. 21). Некоторые зерна имеют блестящую поверхность, отмечаются зерна черные за счет окисления поверхности металла. Самородное серебро имеет нестандартный состав с наличием большого количества различных примесей Fe, Au (табл. 5), что указывает на ранние парагенезисы минерала [Савва, 2018]. Присутствие Hg в самородном серебре является не типичным для Au–Ag минерализации месторождений ОЧВП [Кравцова и др. 2017].

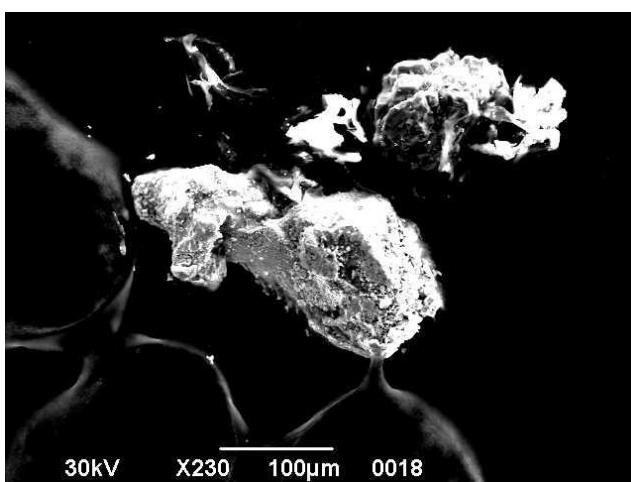


Рис. 21. Самородное серебро месторождения Жильное

Самородное золото тонкое, компактное с неровными контурами. Размер зерен достигает первых мм (рис. 22). По цвету серебристо-серое, на поверхности имеются включения гидроксидов железа. Измерения пробы благородного металла показали, что золото по составу неоднородное, весьма низкопробное (Au – 42,94-52,04 мас. %), соответствует электруму.

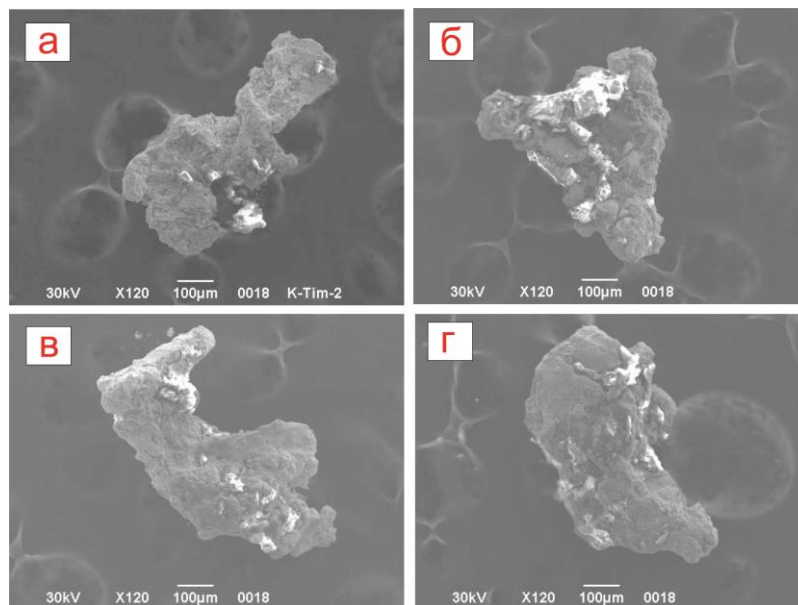


Рис. 22. Низкопробное золото месторождения Жильное

Как правило, в пирите «распылены» субмикроскопические частицы (рис. 23), в составе которых присутствуют Au и Ag [Голдырев и др., 2022а]. Соотношение Au:Ag в этих частицах в пирите составляет 1:1,4 и может быть диагностировано как электрум.

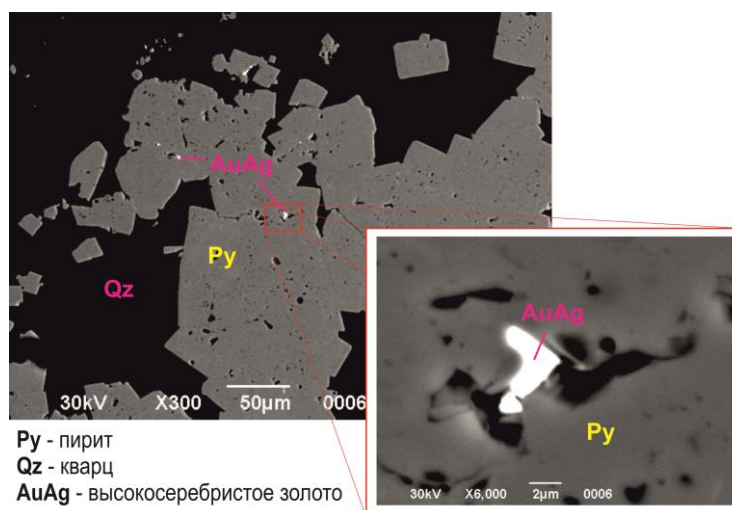


Рис. 23. Высокосеребристое золото месторождения Жильное

Характерным для месторождения является наличие значительного количества Ag (41,76-48,42 мас. %) в составе золотин [Голдырев, 2023]. Также отмечаются примеси Cu, Fe, As, Hg (табл. 5).

Таблица 5. Химический состав самородного золота, мас. %

Элемент	1 (фото 14-а)	2 (фото 14-б)	3 (фото 14-в)	4 (фото 14-г)	5 (фото 14-г)
Fe	0,76	1,44	0,44	0,75	8,00
Co					
Ni					
Cu	1,21	1,30	0,48	0,46	0,86
Zn	0,57	0,20	0,22	0,28	0,69
As	0,35	0,19	0,35		0,28
Se					
Ag	42,40	41,76	46,62	48,42	76,32
Cd	2,81	2,67	2,86	3,91	5,44
Sn					
Sb					
Au	51,42	52,04	48,54	42,94	4,74
Hg		0,37	0,49		0,20
Pb	0,49			3,22	3,16
Bi					0,31
Сумма	100,01	99,97	100,00	99,98	100,00

Основными минералого-геохимическими особенностями месторождения Жильное являются:

- интенсивное развитие процессов окварцевания, вплоть до образования полнопроявленных вторичных кварцитов (центральная и южная часть участка), карбонатизации и сульфидизации (пиритизации) вмещающих пород;
- широкое развитие слабо проявленных пропилитов на уровне среднетемпературной фации, представленной, в основном, эпидот-хлорит-альбитовой ассоциацией при практически полном отсутствии аргиллизитов;
- преобладающее развитие прожилковокварцевой минерализации при подчиненной роли маломощных кварцевых жил, в большинстве своем не несущих золото-серебряной минерализации в доступном изучению срезе;
- существенно кварцевый состав жильно-прожилковых зон при резко подчиненной роли карбонат- жил и прожилков;

- однотипность околожильных вторичных изменений во вмещающих жилы кислых вулканитах, представленных, обычно, хлорит-карбонат-кварцевыми метасоматитами с высоким (до 15-20%) содержанием тонкой вкрапленности пирита;
- подчиненная роль колломорфно-зональных, ритмично полосчатых, крипто- и мелкозернистых, каркасно-петельчатых текстур;
- наличие скудной рудной минерализации, представленной, преимущественно, пиритом (3,0%) и, в значительно меньшей степени, сфалеритом, галенитом и халькопиритом;
- резкое преобладание серебра над золотом, отношение золота к серебру колеблется от 1:70 до 1:300;
- неоднородное по составу самородное золото (от низкопробного высокосеребристого до электрума при отношении Au к Ag 1,1-1,5), отсутствие высокопробного золота;
- однообразие минеральных форм серебра при преобладающей роли сульфидов серебра (акантит) с различными примесями при низкой встречаемости самородного серебра;
- нестандартный состав самородного серебра с наличием большого количества примесей - помимо серебра (76,32%) химическим анализом в нем установлены Fe (8,00%), Cd (5,44%), Au (4,74%), Pb (3,16%);
- слабая проявленность золото-серебро-сульфосолевой минеральной ассоциации.

Минералого-геохимические типы оруденения

Основными особенностями отложения жильных и рудных месторождения Жильное, отличающими его по данным работ [Новоселов и др., 2009; Волков и др., 2019; 2020; Журавкова и др., 2019; Бортников и др., 2021; Беляева, 2022; Бортников и др., 2022; Беляева, Пальянова, 2023] от месторождений Валунистое и Горное, являются:

1. *Жильная минерализация* отличается широким развитием адуляра (21% против 6%), плагиоклаза (10%) и хлорита (2% против 0,2%). На месторождении Валунистое в жильных образованиях плагиоклаз отсутствует, зато достаточно часто присутствуют флюорит и кальцит. На Жильном кальцит развит в значительно меньшей степени, тогда как флюорит отсутствует совсем.

2. *Рудная минерализация* отличается большей распространенностью сульфидно-полиметаллической ассоциации в рудах (рис. 3): количество сульфидов (преимущественно пирита) в рудах Жильного 3,1% против 0,4% на Валунистом.

3. *Благороднометалльная минерализация*. Для руд Жильного характерно однообразие минеральных форм серебра при преобладающей роли акантита и меньшем развитии самородного серебра и полибазита. Самородное золото, как правило, низкопробное (480-650‰), характерным является наличие значительного количества Ag (41,76-48,42 мас. %) в составе золотин [Голдырев, 2023]. Также отмечаются примеси Cu, Fe, As, Hg. Тогда как в рудах Валунистого отмечаются два максимума пробности самородного золота (560-600‰ и 820-850‰), большое разнообразие Ag-содержащих минералов, значительные количества халькогенидов, амальгам Au и Ag и минералов пирсеит-полибазитового ряда. Это объясняется привнесением элементов Hg, Sb, Se, Te.

Кроме того, на Валунистом и Горном зафиксировано [Журавкова и др., 2019; Волков и др., 2020] 2 генерации акантита: первая генерация образует сростания с электрумом, галенитом, халькопиритом, а также включения в пирите, содержит примеси Se от 1.6 до 8.4 мас.%, тогда как вторая генерация обнаружена в виде кайм и прожилков в рудных минералах и содержит Se до 3.3 мас. %. В то же время на Жильном обнаружена одна генерация акантита, содержание Se в котором не превышает 1%.

Характерной особенностью месторождения Жильное является резкое преобладание серебра над золотом: Ag/Au руд месторождения Жильное

составляет более 50, руд месторождения Валунистое – 5-50. Это отношение представляется индикаторным во многих аспектах.

Характерной особенностью месторождения Жильное является резкое преобладание серебра над золотом: Ag/Au серебряно-золотых руд месторождения Жильное составляет более 50, золото-серебряных руд месторождений Валунистое, Горное – 10-50. Это отношение представляется индикаторным во многих аспектах.

Во-первых, отношение Ag/Au - важный экономический показатель, который позволяет выделять промышленные типы руд с учетом цены этих металлов на мировом рынке, различающейся практически в 100 раз. Так, руды с величиной Ag/Au до 10 являются собственно золотыми, в которых серебро служит попутным компонентом по себестоимости (до 10%) по отношению к общей стоимости руды, а соответственно с величиной Ag/Au более 1000 представляют собой серебряные руды. Большой диапазон отношений Ag/Au в остальных рудах может подразделять их по преобладанию одного из компонентов на золото-серебряные (менее 100) и серебряно-золотые (более 100).

Во-вторых, отношение Ag/Au является важным минералого-геохимическим индикатором, указывающим на определенную специфику рудной минерализации. Так, в результате проведенных исследований [Голдырев и др., 2022а; 2023а; Голдырев, 2023] установлено, что в рудных и аномальных пробах месторождения Жильное с большой величиной Ag/Au (свыше 50-70) основным рудным минералом является акантит при явно подчиненном количестве электрума. На месторождении Валунистое, в аналогичных пробах с небольшими величинами Ag/Au (от 0.6 до 15) основная рудная минерализация представлена электрумом при незначительном распространении акантита.

Результаты сопоставления (табл. 6) характеристик рудных зон, минерального состава руд, их геохимической специализации, особенностей

благороднометалльной минерализации месторождений Валунистое и Жильное позволяют сделать вывод, что золото-серебряное оруденение ВРР относится к двум минералого-геохимическим типам: золото-сульфосольному и серебро-полисульфидному.

Таблица 6. Сравнительная характеристика золото-серебряной минерализации Валунистого рудного района

Основные характеристики	Золото-серебряная формация	
	Золото-сульфосольный тип	Серебро-полисульфидный тип
Типичные объекты	Валунистое, Горное	Жильное
<i>Характеристика рудных зон</i>		
Морфология	Кварцевые жилы и кварц-гидрослюдистые метасоматиты в риодацитах	Минерализованные зоны среди кварцевых жильно-прожилковых зон в пропилитизированных дацитах
Текстуры	Ритмично-зональные, крустификационные, колломорфно-полосчатые, брекчиевые	Вкрапленная, прожилковая, массивная, пятнистая
<i>Минеральный состав руд</i>		
Жильные минералы	Кварц (87%), адуляр (6%), глинисто-гидрослюдистые минералы (5%), кальцит (0,2%), хлорит (0,2%)	Кварц (60%), адуляр (17%), плагиоклазы (10%), глинисто-гидрослюдистые минералы (5%), хлорит (4%)
Рудные минералы	Руды убогосульфидные (0,4%). Главные минералы – пирит, акантит, халькопирит, галенит, сфалерит; второстепенные – самородное Au и Ag, полибазит; редкие – пирсеит, магнетит, гематит, марказит, фрейбергит, тетраэдрит, бурнонит, гессит, матильдит	Руды малосульфидные (3,1%). Главные минералы – пирит, сфалерит, галенит, халькопирит, акантит; второстепенные – электрум, полибазит, редкие - медистый акантит.
Содержание золота и серебра (средние)	Au – 5,3 г/т Ag – 49,8 г/т	Au – 1,9 г/т Ag – 355,8 г/т
Серебряно-золотое отношение	9,4	192,3
<i>Геохимическая специализация</i>		
Главные элементы	Au, Ag	Ag, Hg, Pb
Элементы-спутники	Sb, As, Cu, Hg	Au, Ni, Mo, Zn
<i>Характеристика золота и серебра</i>		
Пробность золота	Отмечаются два максимума: Низкопробное (560-600‰) Высокопробное (820-850‰)	Низкопробное (480-650‰)

Гидротермальные образования объектов серебро-полисульфидного типа отличаются более высокой температурой формирования [Сергиевский, 2006], что находит подтверждение и для объектов ВРР. Полная гомогенизация флюидных включений в кварце на месторождении Жильное происходит при температурах 273-350°C [Елманов и др., 2018], на Валунистом – 203-284°C [Волков и др., 2020].

3.3. Зональность и стадийность минералообразования

Стадийность минералообразования в пределах ВРР рассматривалась в научных работах [Волков и др., 2019; 2020; Елманов и др., 2018; Журавкова и др., 2019], а также производственных отчетах по данной территории. Анализ результатов исследований, а также полевые наблюдения и комплексный подход к изучению минерального состава пород и руд и их взаимоотношений друг с другом [Голдырев и др., 2022а; 2023а; Голдырев, 2023] позволили модернизировать схему отложения минералов (рис. 24).

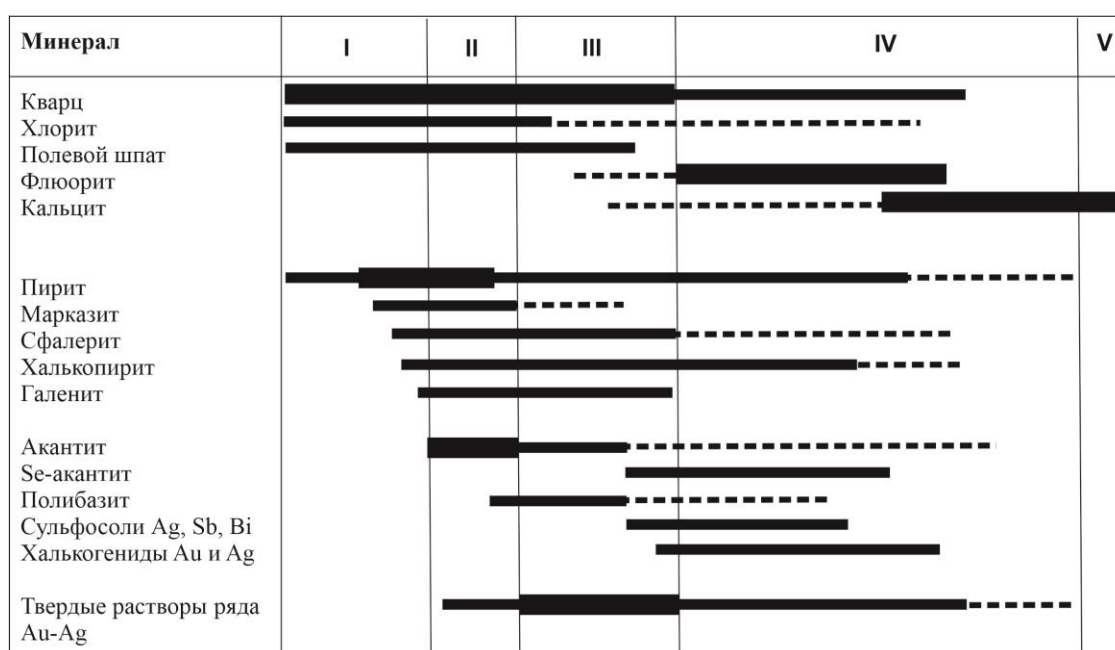


Рис. 24. Схема последовательности минералообразования Валунистого рудного района

Примечание: римские цифры сверху обозначают уровень оруденения: I – подрудный, II – нижнерудный, III – рудный, IV – верхнерудный, V – надрудный

Начало гидротермальных процессов обусловлено образованием жил и прожилков различного состава с широким распространением брекчий и сопровождающим их околожильным метасоматозом (пропиллитизация, окварцевание, серицитизация, аргиллизация). *Образование жил* включает 2 условно выделяемых этапа: кварц-полевошпатовый и кальцит-флюоритовый.

Кварц-полевошпатовый этап представлен гидротермальными образованиями 2 типов: кварц-полевошпатовые жилы и прожилки с хлоритом, «черные» пирит-кварцевые прожилки с полевым шпатом и хлоритом, иногда с

гематитом, характерные для глубоких горизонтов рудных тел, например для месторождения Жильное. В образованиях данного этапа с уменьшением глубины происходит увеличение содержания кварца и уменьшение содержаний хлорита. Полевой шпат, как правило, представлен адуляром, на глубоких горизонтах сменяется альбитом.

Кальцит-флюоритовый этап характеризуется образованием кальцитовых жил и прожилков часто с флюоритом, иногда с гипсом, цеолитами. Появление данных образований связывают [Волков и др., 2020] с очередным тектоническим импульсом. Они типичны для верхней части жильного тела и имеют широкое развитие на месторождениях Валунистое и Горное, рудопроявлении Кремовое (рис. 25-а, б, в).

Осаждение сульфидов происходило после неоднократного дробления жил различного состава. Сульфидная минерализация преимущественно представлена тонкопрожилковыми выделениями (рис. 25-в, г). Отложение осуществлялось в следующей последовательности: пирит → марказит → сфалерит → халькопирит → галенит.



Рис. 25. Гидротермальные образования района (фото автора): а, б - кварц-флюорит-кальцитовые жилы (проявление Кремовое), в - карбонат-кварцевая жила с сульфидной минерализацией (месторождение Валунистое, содержание Au – 20 г/т, Ag – 30 г/т), г - ритмично-зональная адуляр-кварцевая жила (месторождение Валунистое). Темные полосы и гнезда – сульфиды, насыщенные минералами серебра. По краям темных полос – обильные выделения золота размером от 0,1 до 1 мм.

Осаждение минералов Au и Ag происходило на поздних стадиях рудного процесса, после образования жильных минералов и сульфидов, в общем случае независимо от наличия или отсутствия жил разного типа. Жилы, очевидно, являются предпочтительными структурно-литологическими ловушками-осадителями для сульфидов и минералов Au и Ag и можно говорить лишь о парагенетической связи жил и рудной минерализации с общим гидротермально-магматическим очагом. Генетическая независимость рудной минерализации от жил подтверждается и наличием многочисленных пустых кварцевых жил, особенно на их окончаниях и на флангах месторождения (в зоне Тихая, являющейся южным окончанием зоны Новая, все кварцевые и карбонат-кварцевые жилы пустые).

Независимое поведение золота подтверждается столбовым, ленточным и бананцевым его распределением в жилах, в более поздних деформационных структурах – полостях отслоения жил в зальбандах, в флексурных перегибах жил, в осложняющих жилы трещинах.

Флексурные изгибы жил, контролирующие бананцы и крутонаклонные рудные столбы золота, имеют крутые шарниры. Это указывает на образование флексур и расщепление жил на отдельных участках в обстановке субмеридионального горизонтального сжатия в сдвиговом поле напряжений.

Рудные столбы, таким образом, имеют деформационную природу и являлись рудными каналами. Имеются предпосылки для обнаружения богатого золотого оруденения на нижних горизонтах месторождения, о чем свидетельствует тенденция увеличения содержаний золота в рудных телах и их продуктивности с глубиной.

Например, в продольном разрезе рудного тела 14 месторождения Валунистое выделяются пологие и крутонаклонные зоны высокой продуктивности, которые можно интерпретировать как рудные каналы – подводящие и распределяющие золото в жилах. Намечается пологое склонение каналов в северном направлении, что может указывать, вероятно, на

поступление золотоносных растворов в жилу снизу с севера на юг. Золотоносные гидротермы поступали в жилу из глубины по рудоподводящим каналам - зонам проницаемости (трещиноватость, флексурные изгибы, расщепление в зальбандах) и затем распределялись в субгоризонтальном направлении в жиле (преимущественно) и в обрамляющей ее зоне прожилкования и в околожильных метасоматитах (рис.26). Похожее строение характерно и для рудного тела 17, простирающегося в 250 м западнее параллельно рудного тела 14.

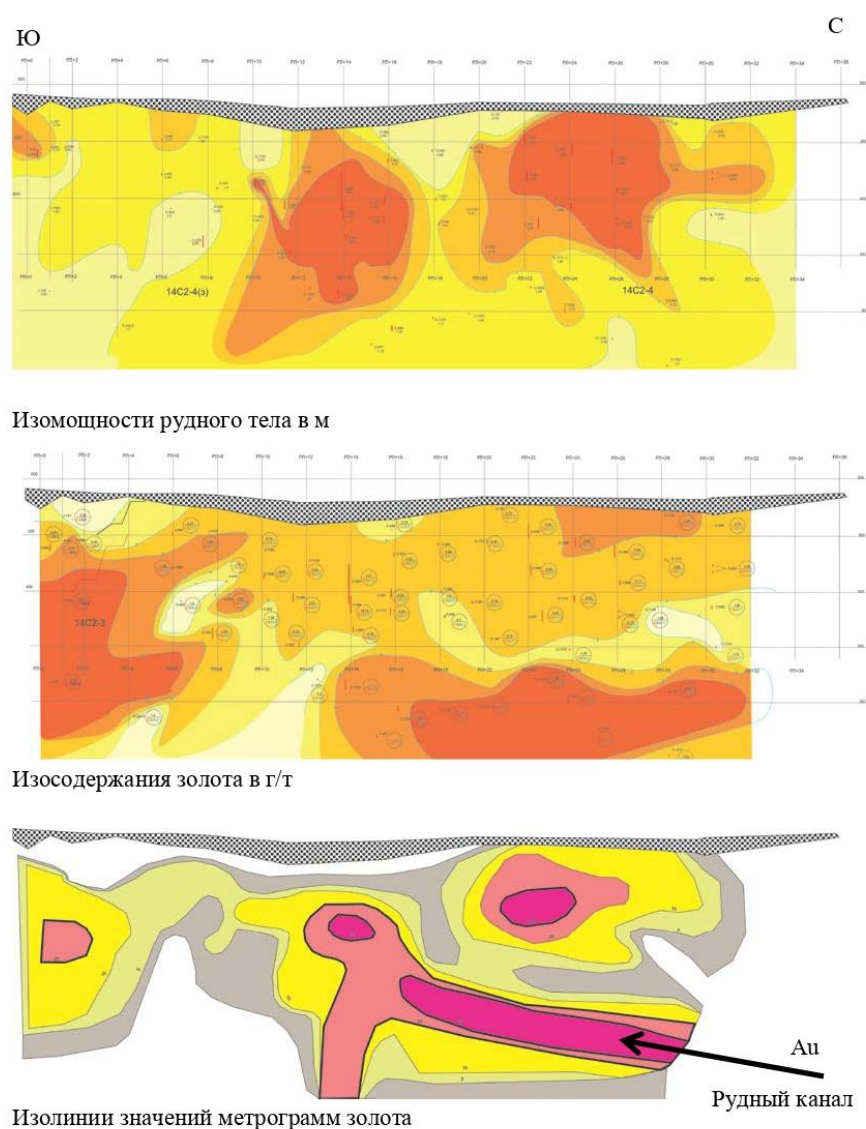


Рис. 26. Строение рудного тела 14 в продольной проекции на вертикальную плоскость (по данным Полковой, 2010)

Так как в верхней части кварцевой жилы рудного тела 17 содержания золота незначительны – 1-2 г/т (есть и пустые пересечения), и на поисковой стадии при штучном и бороздовом опробовании эта жила признана безрудной, в результате чего рудное тело 17 не было найдено и на его месте отсыпали отвал карьера. Таким образом, вероятность безрудности верхних частей жил следует учитывать при поисках кварцевых жил и первоначальной оценке их рудоносности, в случае если штучные и бороздовые пробы жильного кварца показывают низкие содержания золота.

Содержание золота не зависит от мощности кварцевой жилы. Местами намечается обратная зависимость – чем мощнее жила, тем ниже в ней содержания золота. Это связано с особенностями распределения золота в жиле. Максимальные содержания золота тяготеют к зальбандам жилы – к участкам максимальной неоднородности и проницаемости для рудных растворов. Для зальбандов характерно развитие полосчатости расщепления, деформационной полосчатости скольжения, пульсационной полосчатости раскрытия и роста жилы, внедрения поздних прожилков, милонитизации и брекчирования.

Акантит является самым ранним минералом благородных металлов. Он часто заполняет трещины и пустоты в кристаллах сульфидов, обрастает их в виде каемок, деформирует, а также замещает эти минералы. Самородное серебро отмечается в значительно меньшем количестве, чем акантит. Электрум образуется в виде самостоятельных выделений, а также каемок замещения по раннему акантиту и изометричных включений в сульфидах [Голдырев и др., 2023a].

Халькогениды Au и Ag и сульфосоли Ag, по представлениям [Sowkins, 1990], преимущественно распространены на верхнерудном уровне оруденения и образуются после вышеописанных минералов. Это связано с тем, что их формирование происходит на самых поздних стадиях рудообразующего процесса из слабокислых растворов на фоне снижения температуры от 350 до 100°C, уменьшения фугитивностей серы, теллура и селена, а также изменения

окислительно-восстановительной обстановки минералообразования [Савва и др., 2012; Журавкова и др., 2020; Пальянова, 2020].

Продуктивность кальцит-флюоритового этапа. В более ранних исследованиях [Волков и др., 2019; 2020] было предположение, что флюорит-кальцитовые жилы являются пострудными и рудная минерализация в них скорее переотложенная нежели привнесенная. Однако в данных гидротермальных образованиях сульфиды и минералы благородных металлов отлагались позднее жильных минералов (рис. 27). Таким образом, скорее всего, более поздние минералы Au и Ag (высокопробное золото, Se-акантит, халькогениды Au и Ag) имеют пространственную связь с флюорит-кальцитовыми жилами. Данное наблюдение подтверждает тот факт, что несмотря на разубоживание жил кальцитом и флюоритом, именно в кварц-флюоритовых и кварц-кальцитовых жилах содержание Au и Ag значительно выше, чем в кварц-адуляровых. Наиболее ярко этот факт демонстрирует вертикальная зональность оруденения проявления Кремовое:

1. Флюорит-кварцевые жилы и прожилки, содержание Au – до 6,0-81,9 г/т, Ag – до 150,0-5002,6 г/т.
2. Адуляр-кварцевые жилы и прожилки, содержание Au – до 1,8-10,2 г/т, Ag – до 50,0-873,0 г/т.
3. Жилы разнотекстурного кавернозного кварца с убогой сульфидной минерализацией содержание Au – до 1,2 г/т, Ag – до 106,5 г/т.

Вертикальная зональность Au-Ag оруденения. Установлена в работах [Петровская и др., 1974; Сидоров, 1978; Buchanan, 1981; Hedenquist et al., 1988; Хомич и др., 1989; Sowkins, 1990; Петренко, 1999; Simmons et al., 2005; Bodnar et al., 2014]. Опираясь на результаты данных работ и исследований вещественного состава руд ВРР [Брызгалов, Кривицкая, 1998; Кравцова, 2005; Новоселов и др., 2009; Елманов и др., 2018; Савва, 2018; Волков и др., 2019; 2020; Журавкова и др., 2019; Пальянова, 2020; Беляева, 2022; Бортников и др., 2022; Беляева, Пальянова, 2023], были выделены 3 уровня оруденения, для

которых характерны соответствующие ассоциации жильных и рудных минералов (табл. 7).

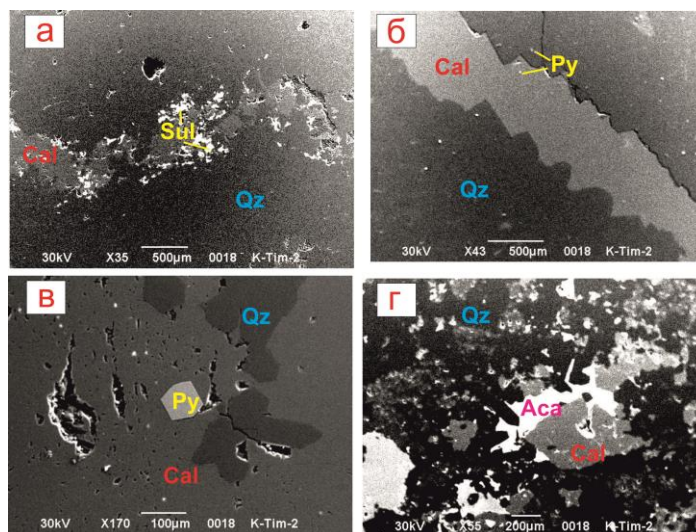


Рис. 27. Рудные выделения кальцит-флюоритовой ассоциации: а - карбонатный прожилок с сульфидами в кварце; б – прожилок кальцита в кварце; в – кристалл пирита в карбонатном веществе; г – акантит в кальците и кварцевом матриксе. Условные обозначения: Qz – кварц, Cal – кальцит, Sul – сульфиды, Py – пирит, Aca – акантит

Нижнерудный уровень характеризуется кварц-полевошпатовыми прожилками редко жилами с хлоритом, которые сопровождают метасоматические измененные участки пород (окварцевание, пропилитизация). На отдельных участках развита обильная сульфидно-полиметаллическая ассоциация минералов. Благороднометалльная минерализация представлена акантитом, самородным серебром и низкопробным золотом (электрум и кюстелит).

Рудный уровень характеризуется кварц-адуляровыми жилами, содержащими преимущественно акантит и низкопробное золото (электрум). Количество акантита и сульфидов меньше, а ЗСО выше, чем на предыдущей стадии.

Вверхнерудный уровень характеризуется флюорит-кварцевыми жилами. Минерализация данных образований представлена теллурида, селенидами, сульфидами и сульфосолями Au и Ag. Количество акантита становится минимальным. Из твердых растворов Au-Ag широко развито высокопробное золото, иногда не содержащее Ag.

Таблица 7. Распространенность минералов по уровням оруденения

Минерал	Процесс гидротермально-метасоматический				
	Внедрение жил		Осаждение сульфидов	Осаждение минералов Au-Ag	
Жильные минералы					
Кварц	Н-Р↑	Н	В		
Хлорит	↑Н-Р	Н			
Адуляр	↑Н-Р	Н			
Пирит		Н			
Флюорит			В		
Кальцит			В		
Сульфиды					
Марказит				↑Н-Р	
Пирит				↑Н-Р	
Сфалерит				↑Н-Р	
Халькопирит				↑Н-Р	
Галенит				↑Н-Р	
Простые сульфиды Ag и Ag					
Акантит					↑Н-Р
Se-акантит					↑В
Агвиларит					В
Ютенбогаардтит					В
Петровскаит					В
Твердые растворы Au-Ag*					
Серебро сам.					↑Н-Р
Золото низкопробное					↑Н-Р
Золото высокопробное					Р-↑В
Сульфосоли Ag, Cu, Bi					
Фрейбергит					Р-В↑
Полибазит					Р-В↑
Пирсеит					Р-В↑
Se-пирсеит					В
Матильдит					В
Se и Te содержащие минералы Ag					
Науманит					В
Гессит					В
Кервеллеит					В
Селенат Ag					В
Теллурад Ag					В

Примечание: Буквы в ячейках обозначают развитие минерала в пределах определенного уровня оруденения:

Н – нижнерудный, Р – рудный, В – верхнерудный.

Стрелка (↑) указывает, в пределах какого уровня оруденения концентрации минерала являются максимальными.

* – Самородное золото и серебро (‰): высокопробное золото – 1000-700, электрум – 700-250, кюстелит – 250-100, самородное серебро – 100-0.

В результате была составлена минералого-геохимическая модель оруденения ВРР (рис. 28), на которой прослеживается общая тенденция увеличения следующих параметров от нижнерудного уровня к верхнему: золото-серебряное отношение (ЗСО), пробность золота, Au и Ag содержащие теллуриды и селениды, концентрация Au, Se, As, Bi, Sb. В тоже время

происходит сокращение количества сульфидов и акантита, снижение концентрации Ag, Pb, Zn, Mo, Ni.

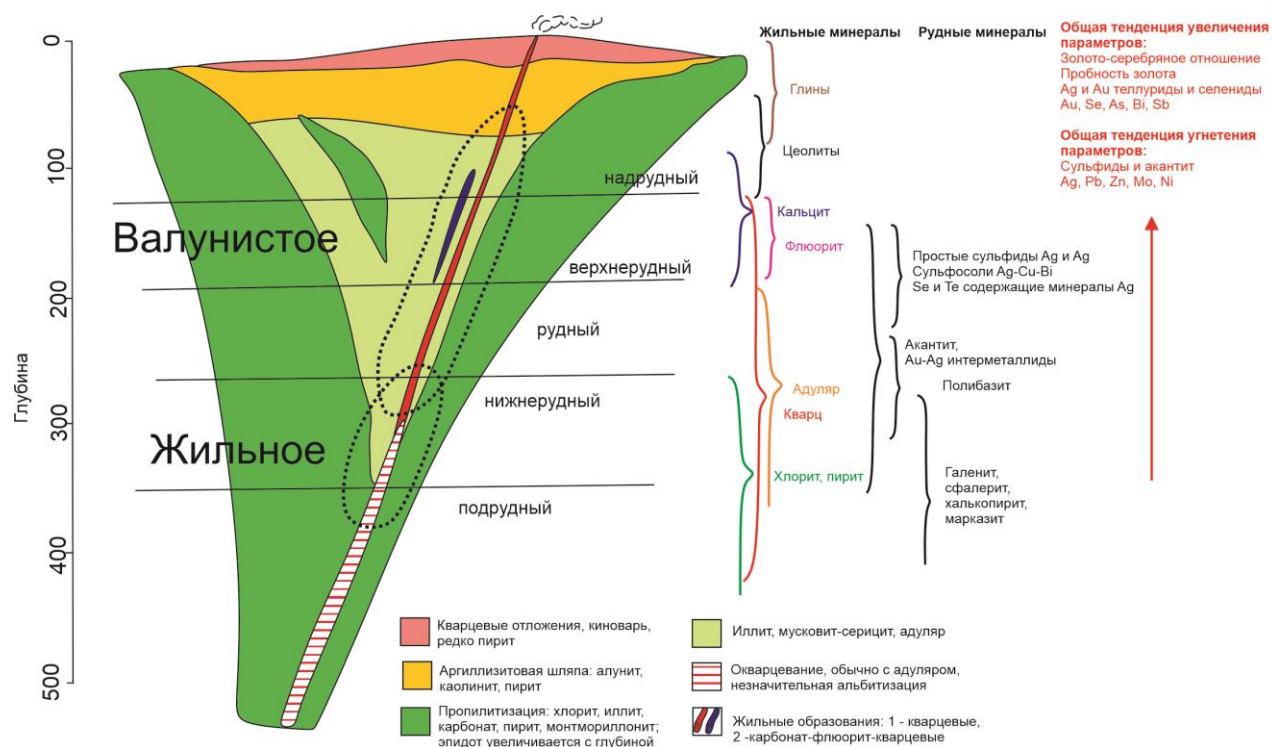


Рис. 28. Минералого-геохимическая модель золото-серебряного оруденения Валунистого рудного района

Первое защищаемое положение

Золото-серебряное оруденение Валунистого рудного района связано с околожерловой и склоновой группами фаций и относится к двум минералого-геохимическим типам: золото-сульфосольному (месторождение Валунистое) и серебро-полисульфидному (месторождение Жильное).

ГЛАВА 4. КРИТЕРИИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОРУДЕНЕНИЯ РАЙОНА

4.1. Поисковые предпосылки

Прогнозирование золотого оруденения в пределах Валунистого рудного района ведется на основе комплекса поисковых предпосылок [Лебедев, 2017; Голдырев, 2022], которые обусловлены с особенностями геологического строения территории. Залегание стратифицированных пород ВРР, как и любой древней континентальной вулканической провинции, связано с влиянием следующих факторов [Сидоров и др., 2020; Тихомиров, 2020]:

1. Накопление вулканитов в условиях расчлененного палеорельефа. Это связано с тем, что базальты и андезиты в подобных вулканических провинциях обычно слагают стратовулканы – постройки центрального типа с углами склона, достигающими 35–37°. Тела вулканических пород отражают морфологию подстилающего их субстрата. Часто крупные конусы осложнены шлаковыми, лавовыми и экструзивными постройками [Филатова, 1988]. Их комбинация способна создать сложную структурную картину, с трудом поддающуюся расшифровке, однако в пределах ВРР нередко удается реконструировать реликты отдельных стратовулканов и их групп.

2. Компенсационное погружение при истощении коровых магматических очагов. Под данной формулировкой понимается опускание кровли малоглубинных магматических камер при их разгрузке. Из всех структур этого рода морфологически наиболее выражены «*кальдеры*» – субизометричные структуры диаметром от сотен метров до десятков километров. В отечественной литературе неким аналогом данного термина являются «*вулканотектонические депрессии*» – крупных отрицательных структурах, являющихся компенсационными просадками более высокого порядка по отношению к кальдерам. Структуры такого рода упоминаются как «*major volcano-tectonic depressions*» в классическом труде, по сути представляющем первую классификацию компенсационных вулканоструктур [Williams, 1941].

Однако со временем в международных публикациях термин стал нередко использоваться для обозначения кальдероподобных структур, иногда как полный синоним термина «кальдера» [de Silva et al., 2006; Pankhurst et al., 1998].

3. Механическое воздействие формирующихся интрузивных тел проявилось прежде всего в формировании разнообразных поднятий. Формирование многих интрузивных тел и связанных с ними структурных форм контролируются кальдерной тектоникой, поэто нередко они приурочены к центральным частям кальдер [Lipman, 1997] или к разрывам на периферии просадок. Соответственно размеры таких поднятий сопоставимы с размерами кальдер и обычно не превышают первых десятков километров.

Структурно-тектонические предпосылки

Региональные рудоконтролирующие структуры. Валунистый рудный район располагается в пределах Анадырской кольцевой структуры, которую пересекают линейные региональные зоны разломов. Это разломы северо-восточного «Канчаланского» направления, разломы субмеридионального – северо-северо-восточного «Нычегваамского» направления, а также субширотные разломы «Амгуемского» направления. В своем западном и восточном продолжении Амгуемская зона разломов проходит через рудные узлы месторождений Песчанка, Купол, Арыкеваам, Пепервеемский и ряд других (рис. 3).

Особо необходимо отметить крупные кольцевые структуры диаметром от 100 до 400 км (рис. 3), которые были выделены Гуревичем Д.В. Часть из этих структур выделялись ранее, они показаны, в частности, на геологической карте СССР масштаба 1:2 500 000 (ВСЕГЕИ, 1983). Выделенные структуры, как правило, выражаются в рельефе в виде кольцевого поднятия с опущенной (денудированной) центральной частью. В пределах кольцевого поднятия обычно концентрируется наибольшее число крупных интрузивных и субвулканических образований и/или вулканокупольные поднятия, а в центральной части располагаются вулканические депрессии (кальдеры).

Линии кольцевых нарушений (разломов) обычно выражаются в рельефе также, как и линейные нарушения (локальные понижения, контроль речной сети и др.). В более крупном масштабе фрагменты кольцевых нарушений (разломов) обычно «разваливаются» на серии сближенных линейных нарушений. Предположительно, формирование этих структур связано с формированием глубинных магматических очагов и их последующим развитием. С прогнозно-поисковой точки зрения существенно то, что описанные структуры контролируют расположение рудных узлов и/или отдельных месторождений. Те и другие зачастую располагаются вдоль основных кольцевых нарушений, часто – вдоль внутренней и внешней границ кольцевого поднятия, в местах пересечения кольцевых и линейных. Указанная закономерность (контроль оруденения разломами, ограничивающим вулканотектонические структуры) повторяет, в более мелком масштабе, закономерности, установленные в регионе в пределах отдельных рудных узлов и полей.

Таким образом, проявления золота и серебра приурочены к интрузивно- и вулканокупольным структурам на участках их пересечения крупными разломами и зонами разломов.

Локальные рудоконтролирующие структуры. Среди таких факторов можно отметить: зоны интенсивной гидротермальной проработки; разломы, кольцом окаймляющие крупные палеовулканические структуры; жерла палеовулканов; зоны глубинных разломов; кальдеры проседания и др. Рудоносные жильно-прожилковые зоны сосредоточены в зонах сближенных разрывных нарушений на участках интенсивной трещиноватости и брекчирования.

Большую роль играют также кольцевые структуры, окаймляющие купольные поднятия, а также отрицательные структуры, которые являются кратерами стратовулканов (рис. 29). Так, рудопроявление Оранжевое представляет собой остатки мелового стратовулкана, сложенного

игнимбритами и эруптивными брекчиями риодацитов и дацитов, лавами андезитов. Подковообразная гряда скал у вершины горы - остатки зоны интенсивного окварцевания, сформированной по краю кратера (рис. 30).

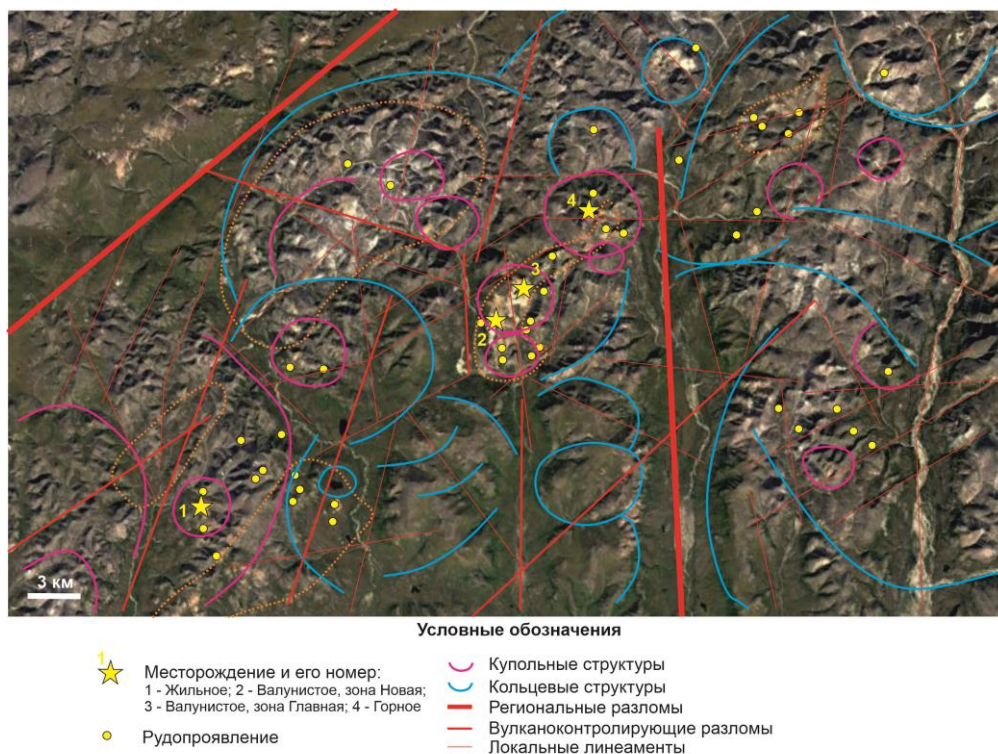


Рис. 29. Центральная часть Валунистого рудного района (снимок ESRI.ArcGIS.Imagery)

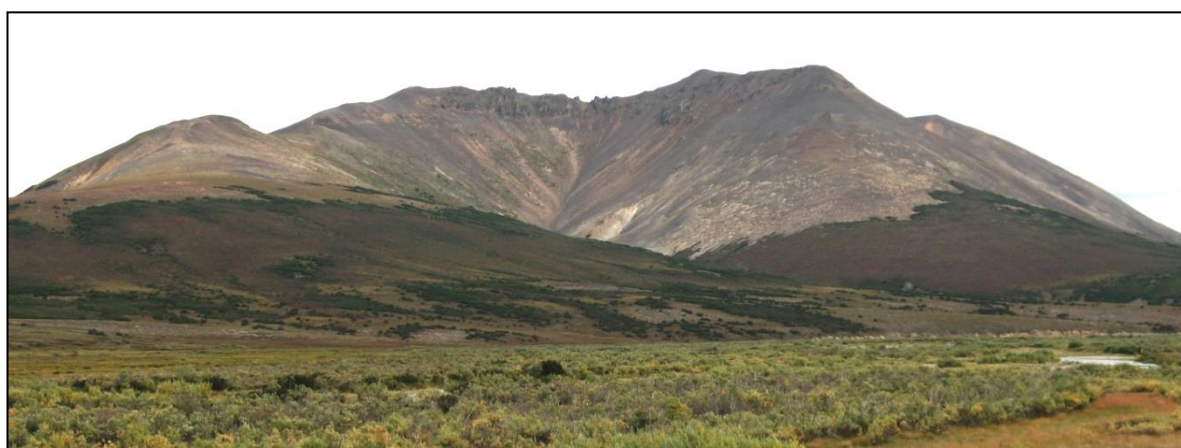


Рис. 30. Гора Оранжевая, вид с северо-запада; на переднем плане – р. Илмынейвеем.

На месторождении Горное, расположенном в пределах Правогорненской вулканокупольной структуры, большую роль играют кольцевые структуры, окаймляющие купольные поднятия и две отрицательные структуры, одна из

которых располагается в центре участка (предположительно – центральный кратер стратовулкана), а другая – в его юго-восточной части (рис. 31).

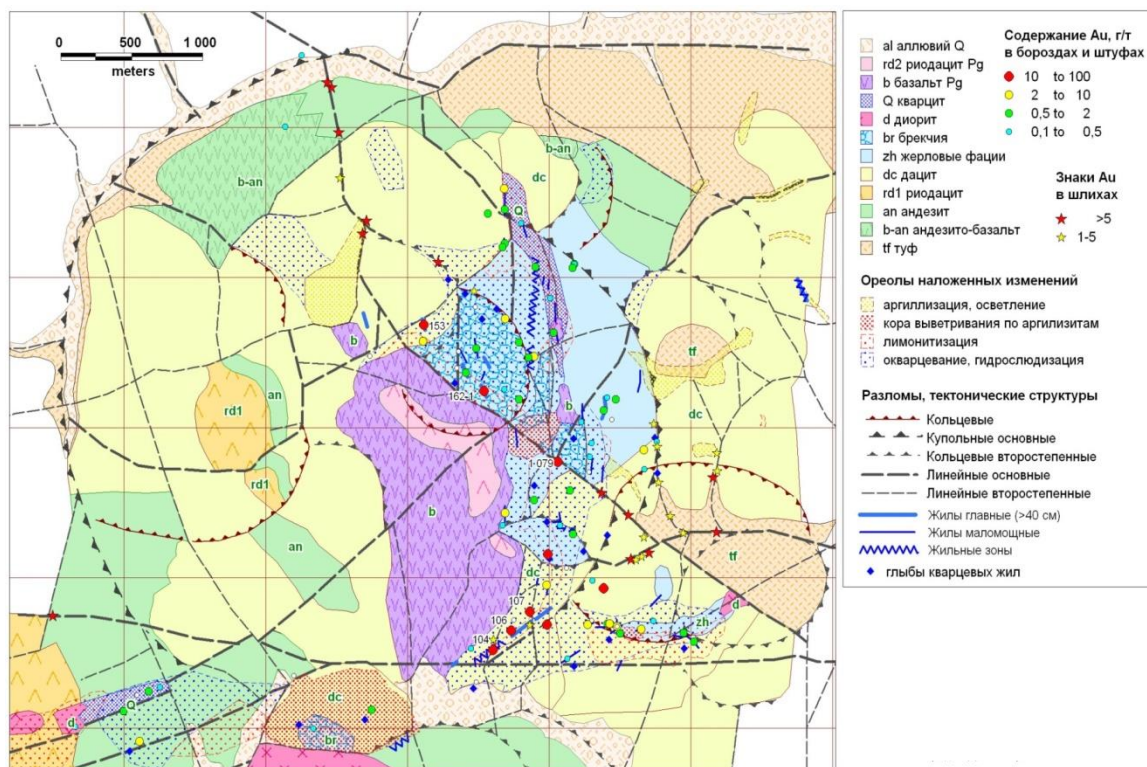


Рис. 31. Геологическая карта месторождения Горное с результатами опробования на золото (Гуревич, Новоселов, 2009)

Стратиграфические предпосылки

Возраст оруденения, определенный методом $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования, приходится на поздний мел: 72 млн. лет – “плитный” возраст [Лейер и др., 1997], 75-80 млн. лет – возраст по высокотемпературной фракции [Ньюберри и др., 2000]. Размах датировок [Сахно и др., 2010] субвулканических пород составил от 69,2-70,9 млн. лет (нунлигранский комплекс) до 79,9 млн. лет (леурваамский комплекс). Датировки уран-свинцового изотопного возраста [Сахно и др., 2010] имеют аналогичные значения: 67.0 ± 0.5 млн. лет (нунлигранский комплекс), 76-80 млн. лет (леурваамский комплекс).

Таким образом, верхней границей золото-серебряного оруденения является кровля леурваамской свиты. Образования нунлигранского субвулканического комплекса (рис. 32) – пострудные.



Рис. 32. Позднемеловые платобазальты месторождения Валунистое

Магматические предпосылки

Золото-серебряное оруденение и сопровождающие его метасоматиты парагенетически связаны с субвулканическими, экструзивными, жерловыми образованиями леурваамского и амгеньского вулканических комплексов.

Например, месторождение Горное сложено кислыми вулканитами амгеньской толщи, андезитами экитыкинской свиты и кислыми вулканитами леурваамской свиты, прорванными рудоносными субвулканическими трахириолитами леурваамского вулканического комплекса. Разрез может быть представлен следующим образом:

- в основании (амгеньский комплекс) – туфы смешанного и кислого состава;
- в средней части разреза (экитынский комплекс) – два или три ритма, образованные чередованием лав дацитов (возможно также риодацитов и трахидацитов), и андезитов (андезито-базальтов);
- в верхней части разреза (нунлигранский комплекс) – пологозалегающие лавы порфировых базальтов, согласно перекрытые лавами риодацит-порфиров.

Средней толще соответствуют субвулканические тела дацитовых (возможно – трахидацитовых) порфиров и породы жерловых фаций – эруптивные и эксплозивные брекчии, лавы «такситовых» риодацитов; небольшие тела порфировых диоритов также предположительно относятся к данному этапу формирования вулканоструктуры.

Верхней толще предположительно соответствуют маломощные дайки андезито-базальтов и диабазов порфировой структуры. На геологической карте месторождения Горное (рис. 31) заметно, что наиболее богатые участки приурочены к жерловой, околожерловой, а также к поствулканической фациям, которые связаны с радиальным разломом, пересекающим вулкано-купольную структуру.

Литолого-петрографические предпосылки

Золотопродуктивные ассоциации локализуются в пределах субвулканических тел риодацитов или в непосредственной близости от них. Риодациты образуют линейные тела, приуроченные к главным рудоконтролирующим структурам. В близповерхностных условиях эти тела имеют раздувы, иногда они слагают экструзивные купола в поперечном сечении имеющие грибообразную форму, при этом экструзивная «шляпка» гриба обычно не содержит проявлений золото-серебряных руд, руды обычно локализуются в «ножке» гриба параллельно главной магмо- и рудоконтролирующей структуре. Особенностью риодацитов является наличие «теневых» - бескорневых флюидно-эксплозивных брекчий кварц-пирит-гематитового состава. Кроме риодацитов к этим же структурам приурочены дайки базальтов и андезитов, которые могут как дорудные, так и пострудные, но в контакте с ними идет резкое обогащение жил золотом.

Кислые вулканы нижней, средней, реже верхней подтолщ амгенской толщи, нижней и средней подбит леурваамской свиты благоприятны для образования аргиллизитов, вторичных кварцитов, окварцованных и

пиритизированных пород, вмещающих золото-серебряное оруденение. Эффузивы среднего состава, экструзивные, жерловые, субвулканические и плутонические образования экитыкинской вулканоплутонической ассоциации благоприятны для образования пропилитизированных пород и локализации жильных проявлений золото-серебряного оруденения.

Таким образом, продуктивная формация – риолит-трахириолитовая (леурваамский вулканический комплекс); дацит-риолитовая (амгеньский вулканический комплекс). Рудовмещающими образованиями являются образования продуктивной дацит-риолитовой формации (амгеньский вулканический комплекс); образования андезит-трахиандезитовой формации (экитыкинский вулканический комплекс).

4.2. Поисковые признаки

Главные прямые поисковые признаки – это геохимические ореолы и потоки. Из косвенных признаков наибольшее значение имеют геофизические данные и гидротермально измененные породы [Голдырев, 2022].

Геохимические ореолы и потоки

Золотоносные зоны Валунистого рудного поля были выявлены по высококонтрастным аномалиям золота, серебра и других элементов-спутников золота в результате проведенных литохимических поисков по вторичным ореолам рассеяния масштаба 1:25 000 (С.Б. Матвеев, 1981).

Анализ структуры геохимического поля (рис. 33), а также сопоставление почвенных аномалий золота и элементов-спутников с распределением рудных тел и концентраций золота в штуфных пробах и с продуктивностью скважин позволяет сделать следующие выводы:

- Проявления золото-серебряной формации в геохимическом поле проявляются вторичными ореолами средней и высокой концентрации. Для серебра – это ореолы интенсивностью более 0,3 г/т, золота более 0,005 г/т, мышьяка более 0,003 %, молибдена более 0,0005%, висмута более 0,0006%.

- Простираание большинства аномалий северо-восточное.

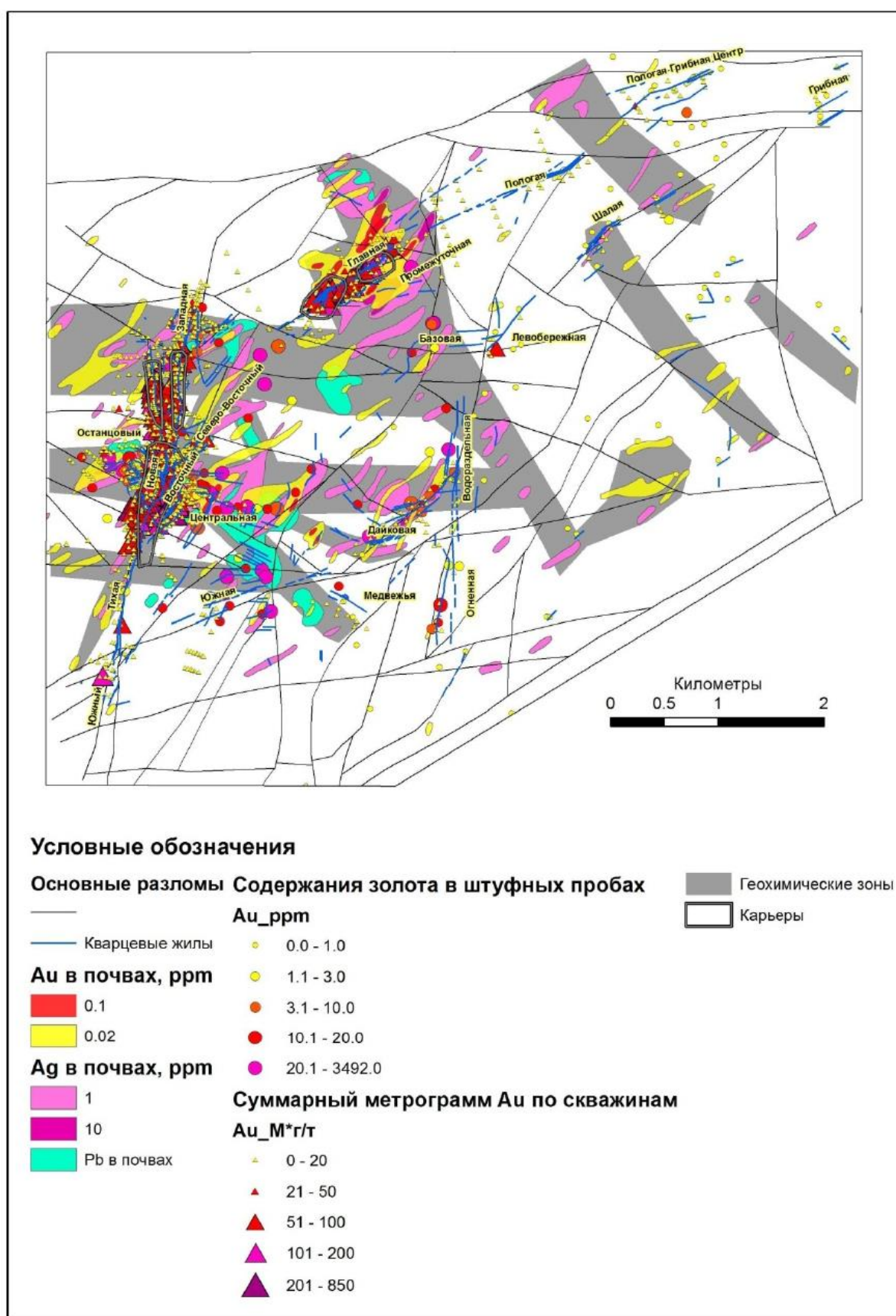


Рис. 33. Вторичные (почвенные) аномалии золота, серебра, свинца и геохимические зоны Валунистого рудного узла (по данным Матвеев С.Б. и др., 1981; Читалин А.Ф. и др., 2014)

- Простираание многих рудных тел и кварцевых жил в контурах отдельных крупных аномалий часто не совпадает с простираание локальных аномалий. Жилы занимают продольное или секущее положение к аномалиям. Это указывает на несоответствие в целом структурных планов собственно кварцевых жил и собственно золоторудной минерализации, на их относительную разновозрастность.

- Кварцевые жилы или их фрагменты, не содержащие золота или слабо золотосные по данным разведки, находятся, как правило, за пределами геохимических аномалий (зона Тихая, Пологая-Грибная, Левобережная, южные фланги рудных тел зоны Новая). Однако, по ряду геологических и геохимических признаков в некоторых жилах, пустых с поверхности, прогнозируется золото на глубине.

- Все поисковые скважины, пробуренные за пределами геохимических аномалий, оказались пустыми или не выявили значимой рудной минерализации.

- В контурах отдельных комплексных аномалий на дневной поверхности не выявлены золотосные жилы, но по геологическим и геохимическим данным на глубине прогнозируется слепая Au-Ag рудная минерализация.

- Геохимические аномалии концентрируются в пределах линейных геохимических зон, которые, вероятно, отражают структурный план рудного этапа – направление зон тектонической проницаемости. Простираание геохимических зон совпадает с простираанием некоторых сдвигов [Читалин и др., 2016]. Геохимические зоны имеют северо-восточное, северо-западное и субширотное простираание. По отношению к осям геохимических зон локальные аномалии являются продольными, поперечными и диагональными, часто кулисными.

- Почти все штучные пробы с высокими содержаниями золота и наиболее продуктивные скважины располагаются в пределах геохимических аномалий.

- Выделенные геохимические зоны можно рассматривать как поисковые коридоры, в пределах которых наиболее вероятно обнаружение золото-серебряной минерализации в кварцевых жилах и штокверках - как на дневной поверхности, так и в слепом залегании на глубине.

Геофизические данные

В геофизических полях рудные зоны выделяются зонами повышенных сопротивлений, слабо выраженными аномалиями ЕП. В поле кажущихся сопротивлений выделяются многочисленные линейные аномалии высоких сопротивлений северо-восточного простирания. Они интерпретируются как жильно-прожилковые зоны и (или) участки метасоматического окварцевания.

Более представительны данные магниторазведки, крупные разрывные нарушения обычно выражены четкими зонами градиентов. Многие локальные отрицательные аномалии магнитного поля соответствуют участкам кварц-серицитового метасоматоза и аргиллизации. Линейные магнитные минимумы сопровождают некоторые разломы. Валунистый рудный узел выделяется площадной отрицательной аномалией магнитного поля низкой интенсивности (рис. 34).

Наличие даек андезитов и базальтов в рудных зонах позволяет выделять рудоконтролирующие структуры как по четко выраженным пикам в магнитном поле, так и визуально по наличию темных обломков в поле светлых метасоматитов. Исторический факт – рудное тело № 1 на Валунистом рудном поле выделено именно по наличию развалов базальтов в поле метасоматитов.

Для заверки геофизических аномалий канавами или бурением в первую очередь нужно выбирать те аномалии, которые совпадают с геохимическими аномалиями и (или) с участками видимого метасоматоза и развития жильно-прожилковой минерализации. Однако, некоторые аномалии высоких сопротивлений могут отражать кварцевые жилы и штокверки, не выходящие на дневную поверхность.

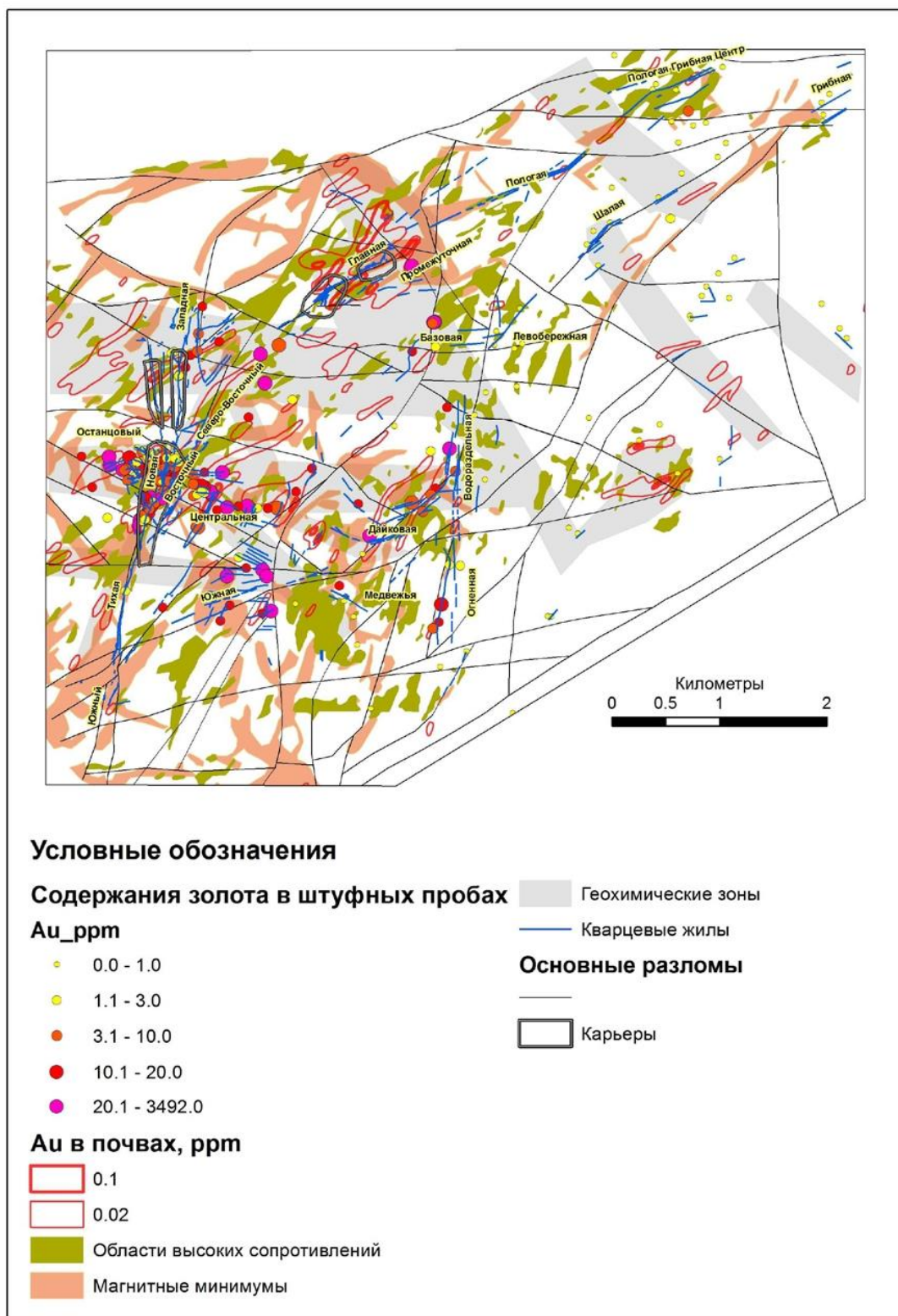


Рис. 34. Карта геофизических аномалий Валунистого рудного поля и их соотношения с геохимическими аномалиями и участками высоких содержаний золота в штучных пробах (по данным ООО «Северо-Запад», 2010; Читалин А.Ф. и др., 2014)

Гидротермально измененные породы

Косвенным поисковым признаком золото-серебряного оруденения служат гидротермально измененные породы – пропилиты, аргиллизиты, вторичные кварциты, в которых локализованы жилы различного состава. Наиболее продуктивные рудные тела локализованы в верхней части метасоматической колонки – среди вторичных кварцитов и аргиллизитов.

По составу жилы кварцевые и адуляр-кварцевые, полевошпат-хлорит-кварцевые и карбонат-кварцевые. Полевошпат-хлорит-кварцевые жилы распространены на более глубоких горизонтах рудных тел, а карбонат-кварцевые жилы с гипсом, цеолитами и флюоритом типичны для верхней части жильного тела и являются показателем уровня эрозионного среза. Золото-серебряное оруденение, в большей части, концентрируется в жилах. В меньшей мере отмечается в околожильных метасоматитах, хотя в отдельных случаях интенсивность оруденения значительно выше, чем в жилах. Рудоносные метасоматиты чаще встречаются на более глубоких горизонтах отработки месторождения, на уровне развития полевошпат-хлорит-кварцевых жил. Вертикальный размах оруденения в пределах Валунистого рудного поля более 300 м.

Аргиллизитовые «шляпы». Особое место среди наложенных изменений занимают хорошо заметные при полевых наблюдениях, так и на космических снимках участки развития сильно ожелезненных (алых) глинистых почв (рис. 35, 36).



Рис. 35. Аргиллизитовые шляпы, рудопроявление Шах. Вид на восточную часть с северо-востока. На переднем плане – озеро «Сердце»



Рис. 36. Космоснимок (ESRI.ArcGIS.Imagery) на восточную часть рудопоявления Шах. Рыжее (общий вид на рис. 36) – аргиллизитовые шляпы.

Они встречаются на многих слабоэродированных месторождениях вулканогенных поясов, которые представлены надрудными зонами аргиллизированных пород [Cook et. al., 2005, Silito, 2010]. Эти зоны имеют гидрослюдисто-каолинитовый состав. На формирование «шляп» оказывают влияние экзогенные и эндогенные факторы, поэтому вопрос различия каолинитов кор выветривания от гидротермальных образований является дискуссионным и не имеет единого подхода. Актуальным является и вопрос связи «шляп» и оруденения вулканогенных поясов [Белоусов и др., 2020; Волков и др., 2020б; Волосатых, Михайлова, 2011; Голдырев и др., 2022в].

«Шляпы» соответствуют участкам выровненного, сглаженного рельефа; занимают среднее положение по высоте, отсутствуя как в глубоких врезках, так и на вершинах, сложенных базальтами. Основной этап формирования кор выветривания района мог приходиться на конец мелового периода – начало палеогена, когда в регионе господствовал теплый, близкий к субтропическому

климат [Красный и др., 1984]. Это означает, что позднемеловые платобазальты являются не только пострудными, но и «постденудационными».

Разрез «шляп» (рис. 37-в) типичен для кор выветривания по сульфидизированным вулканитам. Слой зоны окисления имеет мощность не более первых десятков сантиметров, ниже располагаются глинисто-щебенистые белые каолинизированные породы с частично окисленным пиритом. Количество глины вниз по разрезу убывает, породы переходят в плотные аргиллизированные вулканиты. Все эти особенности свидетельствуют о том, что описанные образования являются корами выветривания, сформированными по ранее аргиллизированным вулканитам в период частичной пенеппленизации территории.

Аргиллизитовые «шляпы» развиты на месторождениях Валунистое и Горное [Голдырев, 2022; Голдырев и др., 2022б], а также на многих рудопроявлениях (рис. 37). Так, на рудопоявлении Кремовое они залегают в приконтактной зоне рудоносных субвулканических образований леурваамского комплекса. Результаты полевых работ (В.В. Лебедев, 2021) демонстрируют, что в местах развития ожелезненных пород находятся геохимические аномалии золота и серебра, значительное количество штучных проб с высокими содержаниями благородных металлов, а также выходы гидротермальных образований. Несмотря на это, «шляпы» не являются рудными образованиями.

Минералогические исследования, проведенные нами [Голдырев и др., 2022в] на эпитермальном месторождении Кумроч [Калинин и др., 2023] демонстрируют, что золото аргиллизитовых «шляп» имеет отличия от золота неизмененных пород (рис. 38): 1) форма выделений – находится в виде сростков, покрыто пленками, заключено в агрегаты других минералов; 2) размер – 0,1-0,5 мм, крупнее золотинок неизмененных пород, так как образуют агрегаты; 3) пробоность – 505-818‰, меньше, чем у золотинок неизмененных пород (более 814‰, как правило, 970-990‰); 4) химический состав – постоянно

присутствуют примеси Cu (до 61,15%), Zn (до 14,83%), Ag (до 17,52%), Hg (до 1,22%), Pb (до 1,71%); 5) содержание золота в породе – аргиллизированные вмещающие породы содержат золото в незначительном количестве (0,01 – 0,5 г/т), в кварцевых жилах содержание может достигать 728,8 г/т.

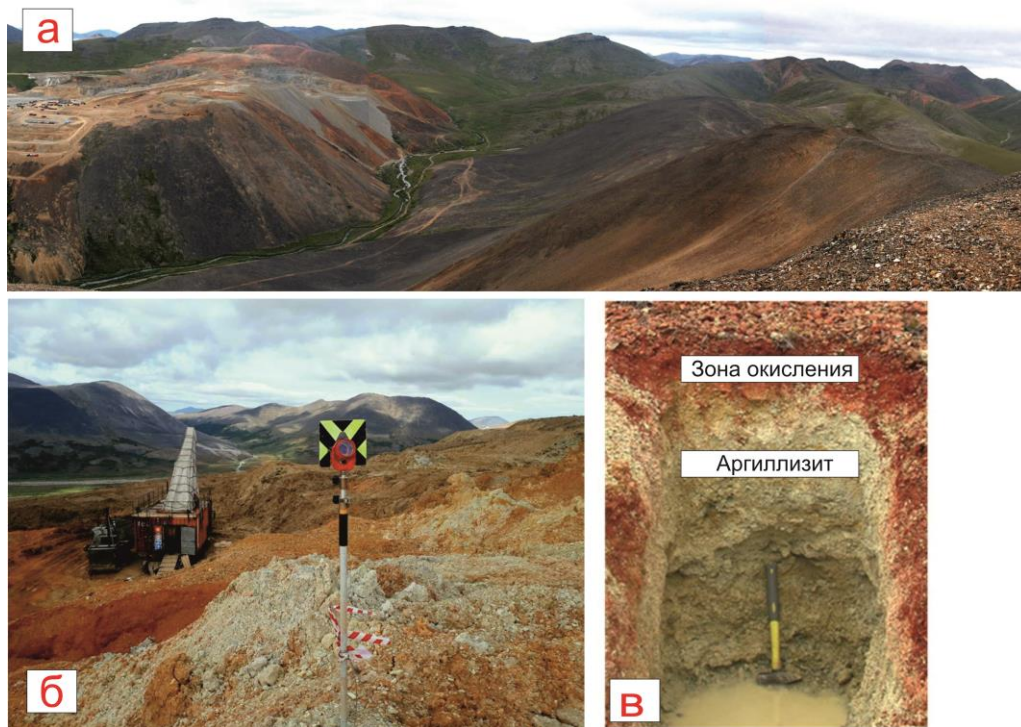


Рис. 37. Аргиллизитовые «шляпы» Валунистого рудного поля: а, б – месторождение Валунистое, в – разрез (месторождение Горное)

Отличие золота аргиллизированных пород обусловлено как эндогенными, так и экзогенными факторами. Вхождение макропримесей в состав золота может быть обусловлено захватом других элементов, не успевших сформировать собственные минеральные фазы, по причине резко градиентного режима формирования рудной минерализации в приповерхностных условиях [Савва, 2018]. Однако образование пленок и кайм других минералов на поверхности золотин и изменение их состава вызвано гипергенными процессами преобразования первичных минералов [Наумов и др., 2020].

Все эти особенности свидетельствуют о том, что описанные образования являются корами выветривания, сформированными по ранее аргиллизированным вулканитам в период частичной пенеппенизации

территории. «Шляпы» свидетельствуют о наличии мощной гидротермальной системы, которая может быть как рудной, так и безрудной. Данные наблюдения позволяют сделать вывод, что аргиллизитовые «шляпы» являются косвенным поисковым признаком золото-серебряного оруденения. Кроме того, они хорошо заметны при полевых наблюдениях, так и на космических снимках, что обуславливает эффективное использование ДЗЗ на территории ВРР.

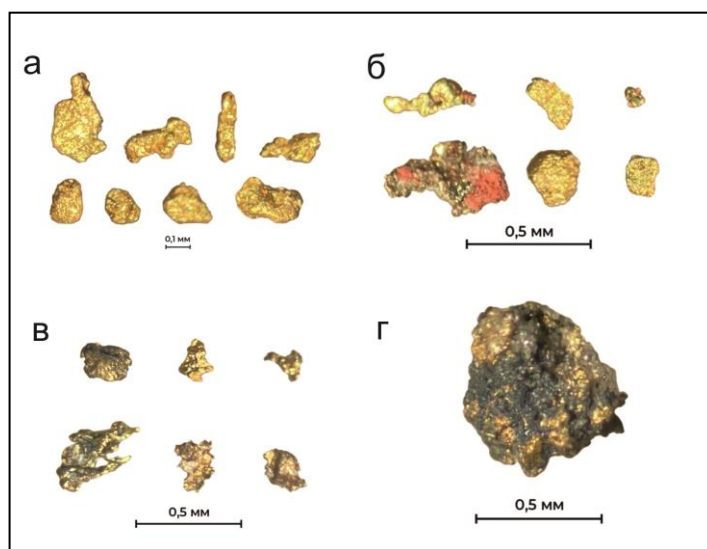


Рис. 38. Золото эпитермального месторождения Кумроч, Камчатка (фото автора):
а – золотины из диорит-порфиров, б – золотины из кварцевых жил, в и г – золотины из аргиллизитовых «шляп»

Шлиховые и механические ореолы

Ореолы золота. Тонкодисперсное самородное золото, доминирующее в рудах месторождений и проявлений ВРР, в экзогенных условиях легко переходит в раствор или мигрирует в коллоидной форме [Aylmore, Muir, 2001]. Особенности минерального состава мало- и убогосульфидных руд обуславливают формирование в зоне гипергенеза преимущественно нейтрально-щелочных инфильтрационных вод. В данных условиях золото в основной своей массе остается инертным, образуя лишь подчиненное количество растворимых комплексных соединений типа AuS^- . В связи с этим для зоны гипергенеза мало- и убогосульфидных руд главенствующую роль в переносе золота приобретают механические взвеси и коллоидные формы [Полякова и

др., 2018]. В такой форме золото может мигрировать на значительные расстояния, не образуя локальных повышенных концентраций.

Более крупные золотины (тонкозернистые и крупнее), образующиеся в результате размыва коренного источника, мигрируют в виде взвеси и осаждаются на механических барьерах. Золото-серебряные оруденения относятся к нероссыпеобразующей формации [Шилов, 2000]. Несмотря на данный факт, в пределах ВРР были выделены 12 шлиховых ореолов и непромышленная россыпь.

Россыпь руч. Валунистый. По результатам работ Павлова А.А. и др. (1992 г.) были определены параметры россыпи. Длина россыпи составляет 6,7 км, ширина – 25-80 м. Золотоносный пласт был вскрыт четырьмя шурфовочными линиями. Мощность пустых пород (торфов) колеблется от нуля до 1 м, мощность золотоносного пласта (песков) от 0,4 до 1,6 м. Содержание золота в пласте изменяется от 0,1 г/м³ до 0,42 г/м³. Плотик россыпи сложен туфами кислого состава. Золото мелкое и пылевидное преимущественно слабоокатанное. Цвет золота обычно соломенно-желтый, от светлого до темного оттенков. По результатам ситового анализа фракция мельче 0,25 мм составляет 46,2%, 0,25-0,5 мм – 48,9%, крупнее 0,5 мм – 4,9%. Пробность золота составляет 573,8‰. Химическим анализом шлихового золота из россыпи установлены следующие соотношения благородных элементов: Au – 52,85%, Ag – 44,1%, что в целом не отличается от химического состава рудного золота.

Ореолы золота были обнаружены (Куканов и др., 1981; Романов и др., 2002) в бассейнах р. Тнэквеем, руч. Кремовый, руч. Раздольный. Золото в ореолах мелкое, неокатанное или слабоокатанное, содержится в количестве 1-5 знаков на пробу, редко достигает 0,2-0,5 г/м³.

Таким образом, ввиду достаточно хорошей транспортировки тонкого золота, обнаруженные его ореолы и потоки, указывают на близкое присутствие относительно крупных рудных зон, находящихся под аллювиальными наносами.

4.3. Геокриологические индикаторы тектонической нарушенности пород и оруденения

4.3.1. Температурный режим в толще пород

Район исследования расположен в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород (ММП) неравномерной мощности. Среднегодовая температура варьирует от -5 до -7°C, мощность сезонной оттайки зависит от экспозиции склонов и составляет 0,2-0,6 м [Романовский и др., 1989].

В 2018-2019 гг. нами проводились термометрические наблюдения в скважинах. Согласно данным с термокос, подошва ММП на водоразделах находится на глубинах 200-370 метров (в зависимости от скважины), что соответствует абсолютным отметкам +128+140 метров (рис. 39, 40). На склонах и под днищами долин ММП уменьшается до 50-60 м.

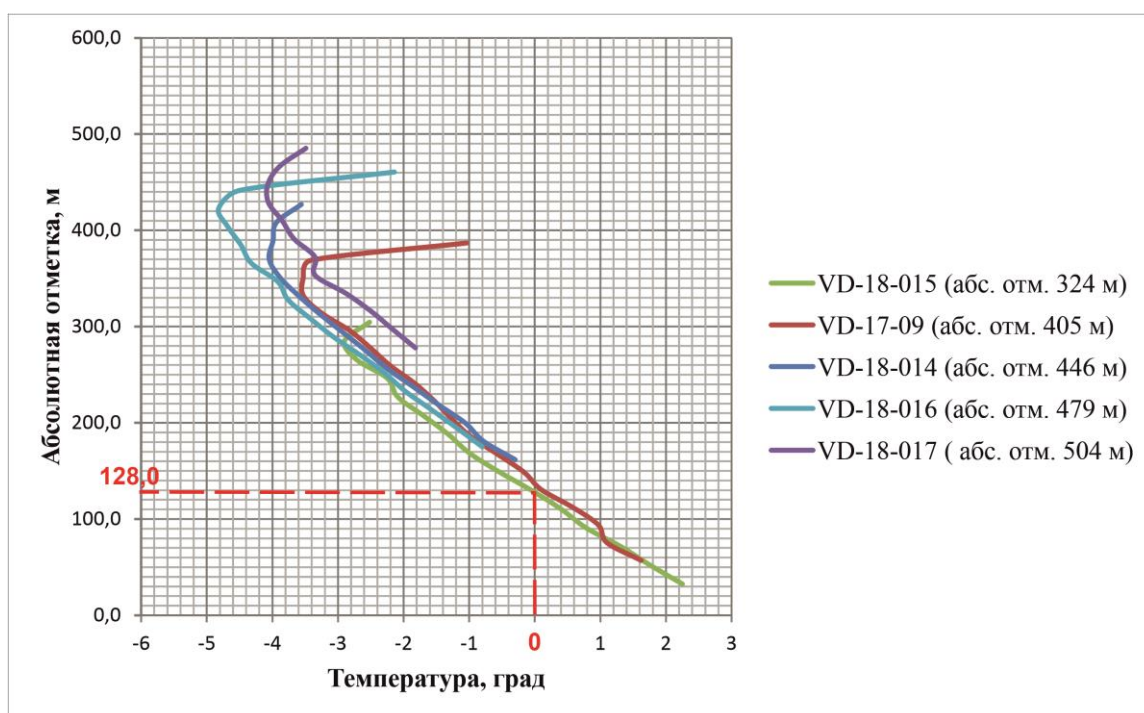


Рис. 39. Изменение температуры с изменением абсолютной отметки датчика в скважинах месторождения Валунистое (дата проведения замера – 25.12.2018)

Стоит заметить, что данные отметки расположены вблизи от проектных подземных горных выработок (отм. +155+150 метров), поэтому существует риск вскрытия выработками подмерзлотного водоносного горизонта и стихийного прорыва подземных вод.

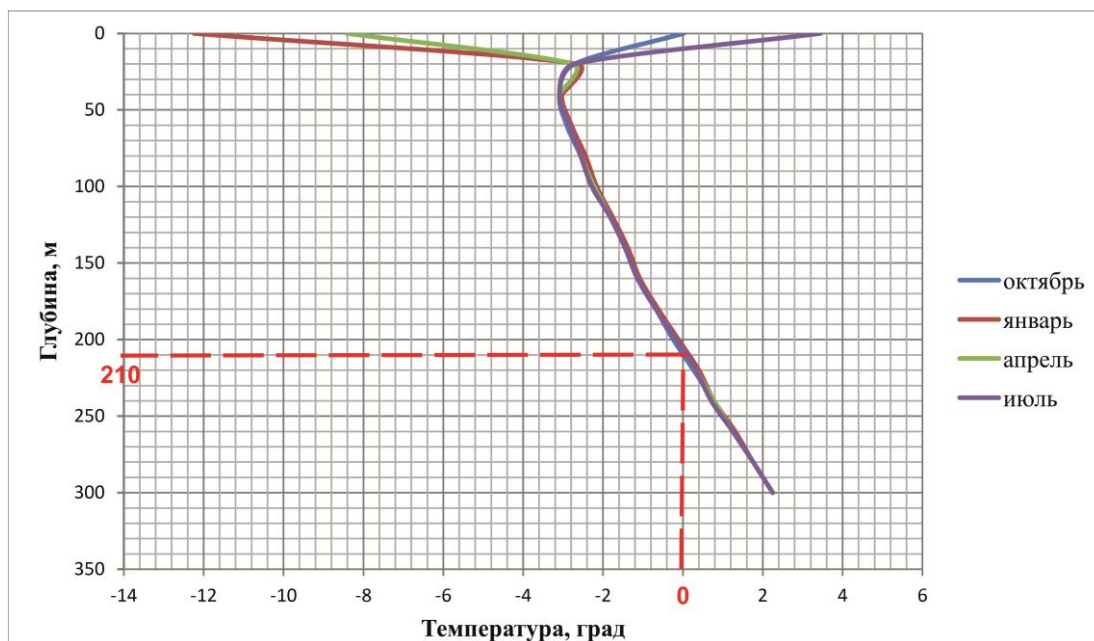


Рис. 40. Изменение температуры с глубиной в скважине VD-18-016 месторождения Валунистое

На глубинах 20-40 метров температура становится постоянной и составляет от $-2,5$ до $-4,1^{\circ}$ (в зависимости от скважины). Колебание температуры на этих и более глубоких отметках в течение года не превышает 1°C (рис. 41).

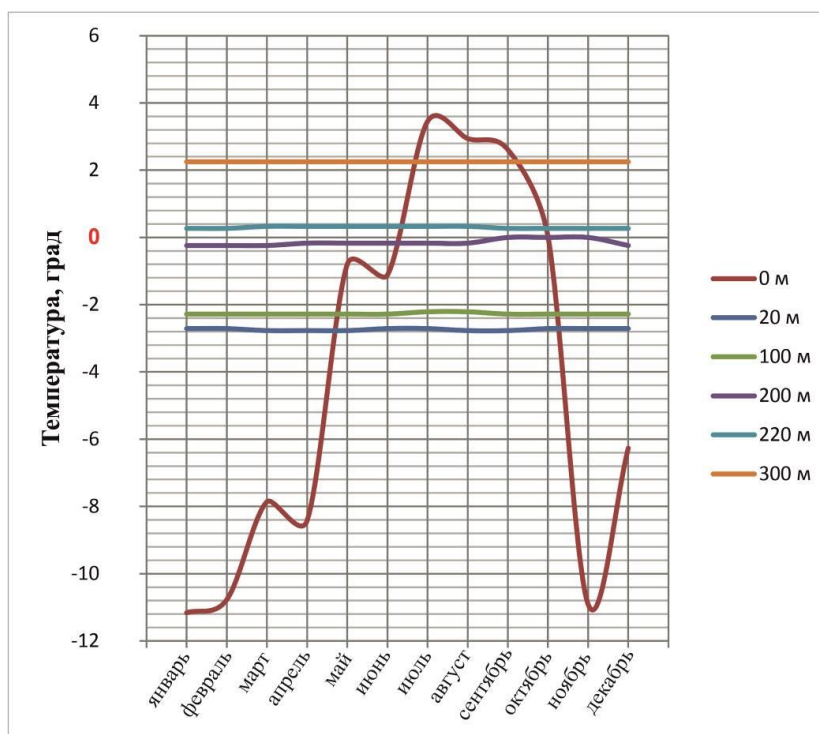


Рис. 41. Изменение температуры в течение года на различных глубинах в скважине VD-18-016 месторождения Валунистое

4.3.2. Геокриологические индикаторы тектонической нарушенности

Наличие ММП обуславливает широкое развитие криогенных процессов: пучения, морозобойного трещинообразования, термокарста, наледей, солифлюкции. Местами возможно формирование и сход ложковых лавин. ВРР характеризуется широким развитием пластовых, линзовидных и жильных льдов.

Пластовые и линзовидные льды залегают ниже сезонно-талого слоя и непосредственно на коренных породах (рис. 42). Их генезис может трактоваться как процесс, протекающий путем постепенного наращивания льда при просачивании атмосферных осадков и конденсата через рыхлые отложения и сильнотрещиноватые породы, лишенные суглинистых образований сверху. При таком явлении наращивание мощности пластового льда наиболее интенсивно происходит в период положительных температур и выпадения атмосферных осадков в виде дождя. Пластовые льды отмечены на разных глубинах в буровых скважинах, канавах.



Рис. 42. Пластовые льды месторождения Валунистое (фото автора)

Мощность тел колеблется от первых десятков сантиметров до 1,5-5,0 м, а иногда и более 10,5 м. Протяженность составляет обычно 1-5 м, иногда

достигает 25 м, в отдельных случаях – свыше 80 м. При профильном разбурировании в центральной части месторождения установлены мощности льда в 15-17 м при протяженности в десятки и сотни метров. Глубина залегания свыше 6 м. Отдельные мелкие линзы льда встречены на глубине 20, 50 м и в интервале 89- 95 м. Подчас трудно провести какую-либо границу между льдом и сильно льдистым грунтом (ледогрунтом). Лед имеет включения в виде суглинка, супеси, дресвяника с пологоволнистой или полосчато-прерывистой текстурой субпараллельной палеорельефу.

Полигональные жильные льды были вскрыты в горных выработках. Зачастую жильные льды распространяются не только в рыхлых четвертичных отложениях, но и в древних коренных породах, проникая на различную глубину по тектоническим трещинам. Протяженность, морфология жильных льдов разнообразна и зависит от конфигурации и протяженности тектонических трещин, длительности времени заполнения и роста жилы и целого ряда других причин.

При бурении наблюдаются провалы бурового снаряда и на больших глубинах, в связи с зияющими тектоническими трещинами в толще ММП. В коренных породах распространение крутых жильных льдов не ограничивается разнообразием морфологии и условий его залегания, так как отмечается сочетание жильных и пластовых льдов. Последние широко используют пологие трещины по флюидальности и трещинам напластования. Способность льда течь под действием сил тяжести приводит к отрыву целых блоков коренных пород от субстрата с их транспортировкой на различное расстояние даже при незначительных углах склона.

По данным эксплуатационной разведки установлено, что рудные тела пересекаются и смещаются диагональными и поперечными сдвигами (рис. 43-а), а также горизонтальными и субгоризонтальными сколами (рис. 43-б,в,г). Сместители пологих сколов «залечены» ледяными жилами. Смещения по ним фиксируются до глубины 30-40 м.

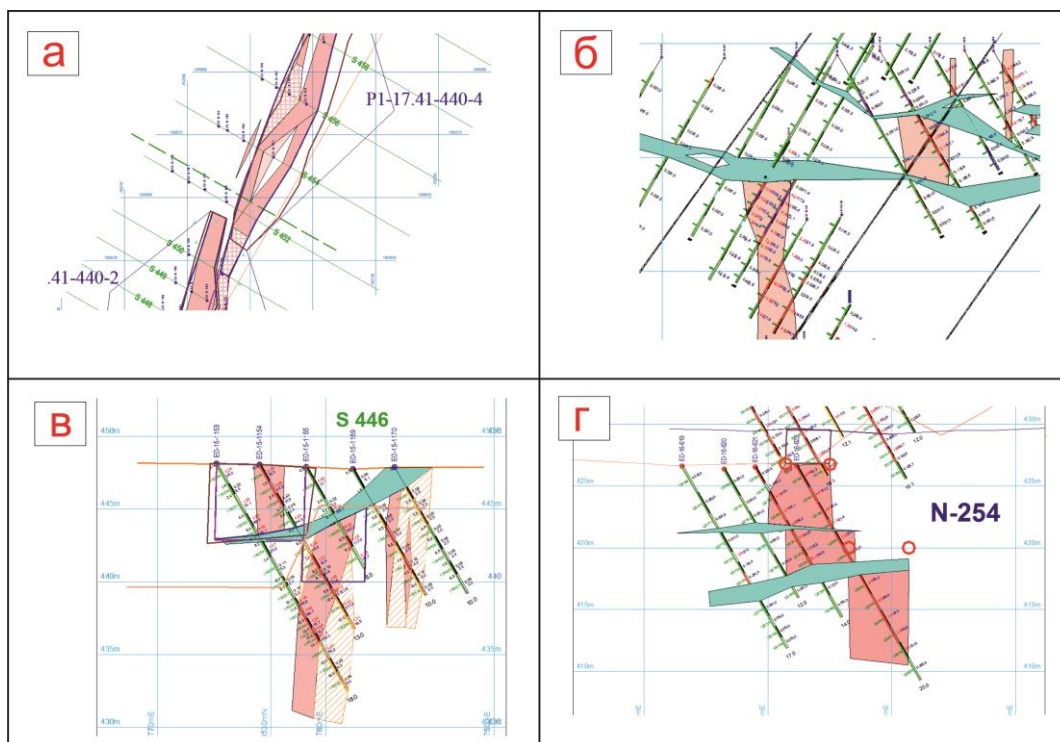


Рис. 43. Фрагменты строения рудного тела, в плане (а) и разрезах (б,в,г) по данным эксплуатационной разведки. Рудное тело разорвано и смещено пологими сколами, унаследованными ледяными жилами. Синим цветом показаны жилы льда, розовым цветом – рудное тело.

Предполагается, что пологие сколы являются криогенными и связаны с гравитационным оползанием блоков по ледяным жилам. Однако, есть основания предполагать, что происхождение субгоризонтальных сколов не криогенное, а тектоническое. Доказательством этому является развитие пологих сколов не только на склонах сопков и не параллельно их склонам но и на вершинах сопков, где оползания не могло быть. Ледяные жилы развивались по тектоническим сколам и по жилам, конечно, могли происходить и вторичные экзогенные оползания блоков.

Таким образом, верхний слой толщи пород подвержен циклическому (ежегодному) промораживанию и оттаиванию. Мощность данного слоя, как правило, не превышает 0,6 метров, однако на участках развития рыхлых отложений и сильнотрещиноватых пород его мощность увеличивается, наблюдаются криогенные процессы. При проведении горных выработок и горно-подготовительных работ происходит вскрытие многочисленных ледяных тел, которые в летний период времени начинают интенсивно протаивать с

образованием просадок, термокарстовых воронок, рытвин, что приводит к деградации естественных ландшафтов.

Стоит учесть, что для прогнозирования и поисков месторождений данные наблюдения малоэффективны, тем более наличие или отсутствие льда на поверхности визуально определить практически невозможно. Однако при разведке и эксплуатации месторождений, в случае необходимости оконтуривания зон тектонической нерешённости пород, построения геомеханической модели, увязки рудных тел и подсчета запасов, картирование жильных льдов может иметь определяющее значение.

4.3.3. Гипергенное преобразование руд в криолитозоне

На территории ВРР, расположенной в криолитозоне, в современное время физическое выветривание и денудация резко преобладают над химическим, последнее проявлено слабо. Однако приповерхностная зона вечной мерзлоты не является геохимически нейтральным объектом [Глотов, 2009; Глотов, Глотова; 2014] – интенсивность процессов химического выветривания, миграции и переотложения вещества, и, соответственно, подвижность ряда химических элементов существенно повышаются. Особенно интенсивно в криолитозоне происходит окисление сульфидов [Питулько и др., 1985; Птицын, 1992; Птицын и др., 2009].

Для понимания процессов преобразования рудных минералов месторождения Жильное был проведен эксперимент [Голдырев и др., 2023а; 2023в]. В результате длительного воздействия агентов выветривания минеральный состав концентрата по данным РФА значительно изменился (табл. 8) – процентное содержание сульфидов заметно сократилось, количество магнетита осталось неизменным. Произошло массовое образование гидроксидов железа, содержание которых составило более 50%. Образованные гидроксиды железа были представлены следующими разностями (рис. 44): псевдоморфозы по сульфидным минералам, агрегаты темно-бурого цвета, железистые пленки и налеты. Результаты эксперимента подтверждают, что в

условиях циклического промораживания-оттаивания происходит существенное изменение вещественного состава сульфидных руд.

Таблица 8. Преобразование минерального состава рудного концентрата в результате циклического промораживания-оттаивания

Минерал	Содержание, масс %		
	Исходный состав	Состав в результате промораживания-оттаивания	Разница
Пирит	77	28	-49
Сфалерит	2	1	-1
Марказит	10	3	-7
Халькопирит	3	1	-2
Магнетит	8	8	0
Гидроксиды	0	59	+59
Сумма	100	100	

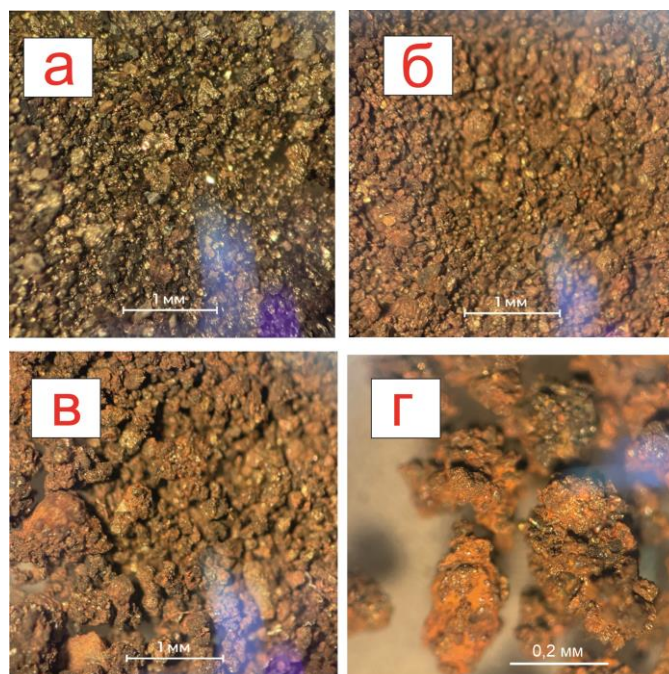


Рис. 44. Внешний вид исходных и преобразованных концентратов сульфидов (фото автора): а – исходный состав концентрата, б – измененный состав, в, г – сцементированные железистым цементом сульфиды

Преобразование сульфидов. По представлениям [Смирнов, 1952; Яхонтова, Зверева, 2000] сульфиды, изначально замещаясь сульфатами и частично оксидами, затем карбонатами и силикатами, в конце процесса переходят в оксиды и гидроксиды. Однако в криолитозоне, в виду низкой миграционной способности растворов и протекания реакций «на месте», имеются некоторые

особенности в формировании вертикального профиля зоны гипергенеза [Двуреченская, 2022]:

1. Возникновение сульфатных зон гипергенеза. Это объясняется длительным существованием сульфатных фаз из группы кристаллогидратных соединений, ярозитового семейства и группы брошантита [Глотов, Глотова, 2014; Наумов, Хусаинова, 2017; Хусаинова, 2020].

2. Совмещение минеральных ассоциаций, развивающихся в обычных условиях пространственно отдельно.

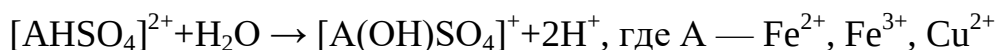
3. Многократное отложение минералов, преобладание замещенных разновидностей гипергенных минералов над переотложенными.

Согласно экспериментальным данным [Двуреченская, 2022], гипергенные преобразования сульфидов начинаются с разрушения галенита, имеющего наименьший электродный потенциал, затем окисляется акантит, в самом конце халькопирит и пирит. Акантит и самородное серебро, из-за большой разницы в электродных потенциалах с пиритом, легко разрушаются, контактируя с ним. В результате этого процесса в высококислой среде образуются сульфатный $[\text{AgHSO}_4]^0$ или тиосульфатный $[\text{AgHS}_2\text{O}_3]^0$ комплексы серебра [Webster, 1986].

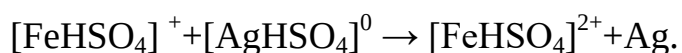
Возникший малоустойчивый кислый комплекс серебра легко разрушается на восстановительном барьере, которым является любой сульфид. Как правило, это галенит — легко окисляющийся минерал [Двуреченская, 2022]:



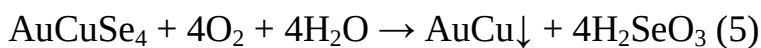
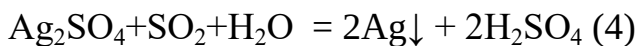
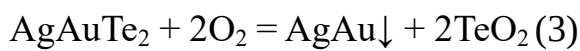
Их взаимодействие приводит к образованию акантита и труднорастворимого англезита. При дальнейшем развитии процесса окисления создается более окислительная обстановка, способствующая интенсивной деструкции пирита и халькопирита и образованию подвижных сульфатных комплексов Fe и Cu — $[\text{FeHSO}_4]^+$, $[\text{FeHSO}_4]^{2+}$, $[\text{CuHSO}_4]^+$, которые при разбавлении растворов могут испытывать гидролизные превращения [Двуреченская, 2022]:



Соответственно будут выделяться сульфатные фазы. В этом процессе фиксируются [Schippers et. al, 1999; Balci et. al, 2007] промежуточные продукты окисления серы, в частности: SO_3^{2-} , $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$, $\text{S}_4\text{O}_6^{2-}$, $\text{S}_3\text{O}_3^{2-}$, SO_4^{2-} , а также различные формы гидратов и гидроокисей железа, которые как и сульфатный комплекс Fe^{2+} , является сильнейшим восстановителем и способствует восстановлению серебра из его комплексных соединений [Яхонтова и др., 1988]:



Кроме того, коллоидные отрицательно заряженные частицы (AgAuTe_2 , Ag_2SO_4 , AuCuSe_4), зафиксированные [Кузнецов и др., 2023] образовавшиеся из субмикроскопических выделений коренного золота [Полякова и др., 2018], в присутствии вышеуказанных сильных восстановителей, концентрируются как в сорбированном виде, так и в форме самостоятельных вторичных выделений (гипергенное самородное золото):



В дальнейшем, вследствие увеличения рН, кислая-слабокислая обстановка сменяется слабощелочной (до щелочной), что обуславливает образование арсенатов, фосфатов и карбонатов. Вышеуказанные сильные восстановители, возникающие локально, активно участвуют в гидролизно-окислительных реакциях и продолжают восстанавливать Au и Ag из его подвижных форм [Двуреченская, 2022].

Таким образом, в пределах ВРР в результате окисления сульфидов, а также сульфосолей происходит многократное отложение минералов серебра (акантита и самородного серебра) и самородного золота.

4.3.4. Продукты криогенеза как косвенный поисковый признак

В ходе поисковых работ на рудное золото, серебро, медь, молибден на различных участках недр в пределах ВРР и на других объектах автором были встречены различные *проявления гидроксидов железа* [Голдырев и др., 2021а; 2022б; 2022в; 2022г; Журавлев, Голдырев, 2023], такие как ржавые выделения в водотоках. Кроме того, рудопроявления и водные объекты изучаемой территории имеют маркерные названия – «Ржавое», «Оранжевое», «Огненное», «Огонек», «Бурый».

«*Ржавые ручьи*». На рудопроявлении Донное присутствует ржавый ручей (рис. 45-а). На его дне и берегах отложились гидроксиды железа, которые представлены коллоидным железом, агрегатами, цементом и стяжениями лимонита, гетита и гидрогетита.



Рис. 45. Ржавые ручьи Чукотки (фото автора): а – Кремовая площадь, б – Амгуэмская площадь, в, г – Чаантальская площадь.

Результаты геологоразведочных работ (Лебедев, 2021; Казинский, 1997) демонстрируют, что ручей пересекает рудную зону, представленную гидротермально-измененными породами и жильно-прожилковыми образованиями (рис. 46). Результаты шлихового и донного опробования подтверждают, что в «ржавом ручье» присутствует свободное золото.

Содержание шлихового золота изменяется от единичных знаков до 0,5 г/м³. В отдельных пробах отмечаются знаки электрума и акантита. Донные пробы ручья отмечаются высоким содержанием золота (до 33 г/т) и серебра (до 12,5 г/т).



Рис. 46. Геологическая схема рудопроявления Донное с элементами прогноза

Долина «ржавого ручья» прямолинейна и явно заложена по ослабленным зонам разломов, по которым развита сульфидизация. Условия образования гидроксидов железа ручья обусловлены движением над- и межмерзлотных вод в склоновых и аллювиальных отложениях, вместе с которыми происходит вынос Fe и S, образовавшихся в результате криодезинтеграции пирита. Эти

водные горизонты выходят на поверхность в виде ключей, пропитывая рыхлые отложения и придавая им бурую окраску.

Таким образом, продукты криогенеза (гидроксиды, сульфатные фазы из группы кристаллогидратных соединений, ярозитового семейства и группы брошантита) на территории ВРР указывают на зоны повышенной сульфидизации. А в зонах развития данных минеральных ассоциаций в благоприятных условиях возможно образование концентраций минералов Au и Ag в водотоках. Совмещением двух условий (наличие продуктов криогенеза и относительно богатых рудных зон) объясняются повышенные концентрации золота в аллювиальных отложениях ржавого ручья и образование россыпи руч. Валунистый и ореолов шлихового золота ВРР из руд нероссыпеобразующей золото-серебряной формации.

4.4. Дистанционные индикаторы оруденения

4.4.1. Методика исследования космоматериалов (обработка минеральных индексов Aster)

Индикация геологического строения с помощью ДЗЗ базируется на спектрах отраженного и поглощенного излучения наиболее распространенных классов минералов. Спектры горных пород весьма разнообразны и зависят от минерального состава, особенностей кристаллической решетки, размера зерен, степени цементации, пористости и трещиноватости.

В основу исследований положены материалы мультиспектральных космических съемок среднего пространственного разрешения спутниковой системы Aster level 1T V3, которая имеет 14 спектральных диапазонов (рис. 47). Комбинации (отношения) данных диапазонов образуют информативный композит (минеральный индекс), присущий для спектра определенного класса минералов [Kalinowski, Oliver, 2004; Mars, Rowan, 2006; Di Tommaso, Rubinstein, 2007; Rajendren, Nasir, 2017].

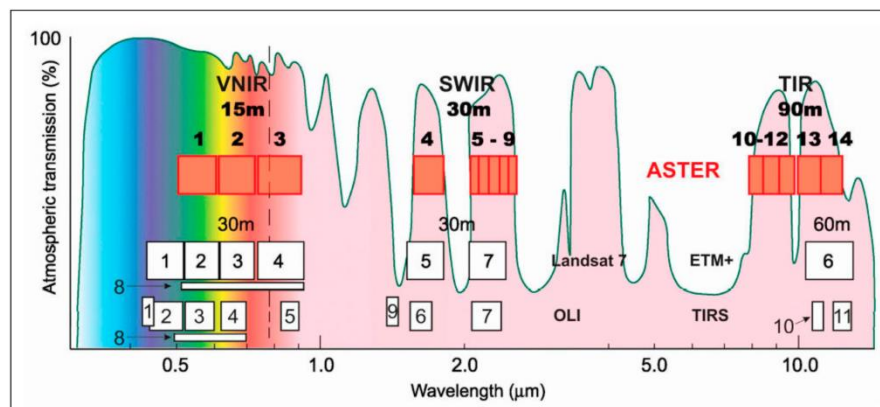


Рис. 47. Спектральные диапазоны ASTER на графике длина волны/пропускание атмосферы [Abrams, Yamaguchi, 2019]

Исследование космоматериалов осуществлялось по методике обработки минеральных индексов [Kalinowski, Oliver, 2004] и включала в себя следующие этапы:

1. Подбор исходных космических данных на ресурсах NASA (Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства, США) и EarthExplorer USGS (Геологическая служба США) с учетом времени суток, облачности, снежного покрова и др. Всего было проанализировано 11 снимков общей площадью 38 тыс. км² (рис. 48).



Рис. 48. Область исследования

2. Разбивка снимков в программном продукте Erdas Imagine на каналы (рис. 42): VNIR (видимое и ближнее инфракрасное излучение, размер раstra 15x15 м), SWIR (коротковолновое инфракрасное излучение, размер раstra 30x30 м), TIR (тепловое инфракрасное излучение, размер раstra 90x90 м) и подклассы в виде растровых изображений, изменение системы их координат.

3. Производство радиометрической калибровки в программном продукте ArcGis через модуль Spatial Analyst, инструмент «Калькулятор раstra», объединение каналов с помощью инструмента «Объединить каналы».

4. Оконтуривание болотистой местности и участков леса в виду их не информативности путем применения минерального индекса Vegetation (Растительность). Для выбора зоны распространения индекса Vegetation производилось сопоставление этих участков на снимках высокого разрешения ESRI.

5. Составление канальных отношений для расчета минеральных индексов (рис. 49) с помощью инструмента «Калькулятор раstra». Выбор наиболее информативных для территории минеральных индексов.

6. Классификация полученных спектральных изображений. Интерпретация полученных данных.

4.4.2. Аномалии минеральных индексов как поисковый признак

Проведенное нами изучение геологических материалов позволяет сделать вывод, что наиболее характерными для ВРР индикаторами оруденения являются окварцевание (жильно-прожилковые зоны, метасоматическое окварцевание пород) и ожелезнение (аргиллизитовые «шляпы», продукты гипергенеза). Это заключение, а также опыт работ по дистанционному зондированию территории позволил выделить минеральные индексы, аномалии которых соответствуют данным индикаторам (рис. 50):

1. «Quartz rich rocks» (породы богатые кварцем) соответствует крупным жильно-прожилковым и метасоматически измененным зонам кварцевого состава.

Feature	Band or Ratio	Comments	Reference
Iron			
Ferric iron, Fe ³⁺	2/1		Rowan; CSIRO
Ferrous iron, Fe ²⁺	5/3 + 1/2		Rowan
Laterite	4/5		Bierwith
Gossan	4/2		Volesky
Ferrous silicates (biot, chl, amph)	5/4	Fe oxide Cu-Au alteration	CSIRO
Ferric oxides	4/3	Can be ambiguous*	CSIRO
Carbonates / Mafic Minerals			
Carbonate / chlorite / epidote	(7+9)/8		Rowan
Epidote / chlorite / amphibole	(6+9)/(7+8)	Endoskarn	CSIRO
Amphibole / MgOH	(6+9)/8	Can be either MgOH or carbonate*	Hewson
Amphibole	6/8		Bierwith
Dolomite	(6+8)/7		Rowan, USGS
Carbonate	13/14	Exoskarn (cal/dolom)	Bierwith, Nimoyima, CSIRO
Silicates			
Sericite / muscovite / illite / smectite	(5+7)/6	Phyllic alteration	Rowan (USGS); Hewson (CSIRO)
Alunite / kaolinite / pyrophyllite	(4+6)/5		Rowan (USGS)
Phengitic	5/6		Hewson
Muscovite	7/6		Hewson
Kaolinite	7/5	Approximate only*	Hewson
Clay	(5+7)/6 ²		Bierwith
Alteration	4/5		Volesky
Host rock	5/6		Volesky
Silica			
Quartz rich rocks	14/12		Rowan
Silica	(11+11)/10/12		Bierwith
Basic degree index (gnt, cpx, epi, chl)	12/13	Exoskarn (gnt, px)	Bierwith, CSIRO
SiO ₂	13/12	Same as 14/12	Palomera
SiO ₂	12/13		Nimoyima
Siliceous rocks	(11+11)/(10+12)		Nimoyima
Silica	11/10		CSIRO
Silica	11/12		CSIRO
Silica	13/10		CSIRO
Other			
Vegetation	3/2		
NDVI	(3-2)/(3+2)	Normalised difference vegetation index	

Рис. 49. Информативные композиты (минеральные индексы) спутниковой системы ASTER [Kalinowski, Oliver, 2004]

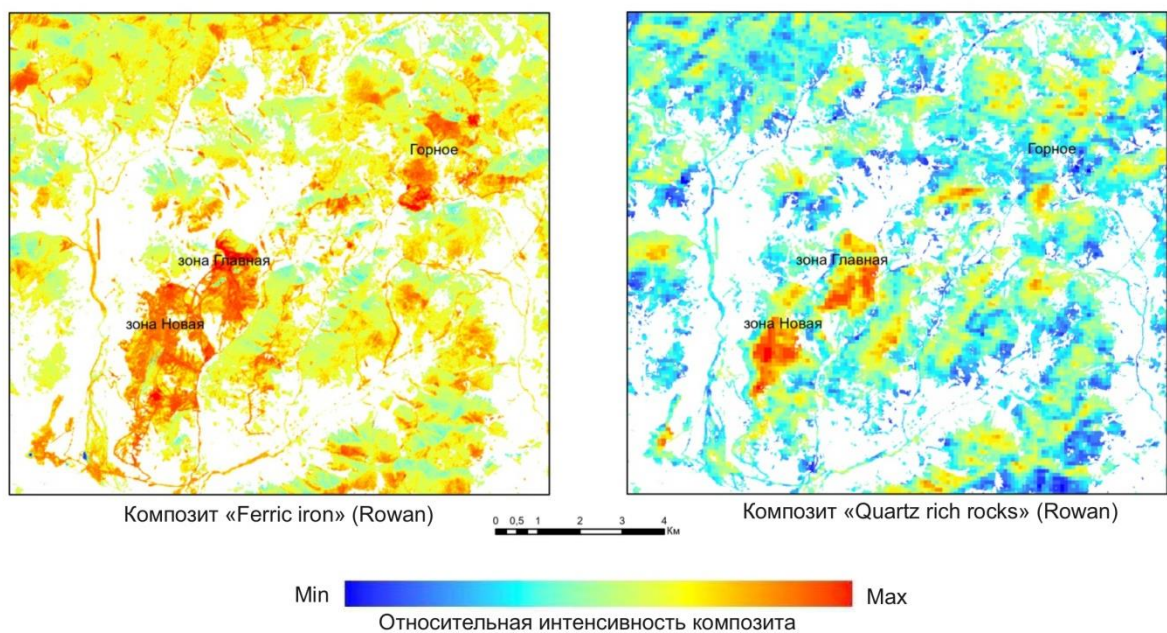


Рис. 50. Мультиспектральные изображения Валунистого рудного поля: композит «Ferric iron» (слева) и композит «Quartz rich rocks» (справа)

2. «Ferric iron» (трехвалентное железо) соответствует крупным площадным зонам ожелезненных пород. Такие зоны, как правило, являются участками развития метасоматически измененных глинистых пород (алунит, каолинит, иллит, мусковит-серицит), в том числе аргиллизитовыми «шляпами». Часто они связаны с выходами субвулканических образований леурваамского комплекса.

Как правило, «аномалии железа» окаймляют «аномалии кварца», а также находятся ниже их по склону, что определяется эталонным строением золото-серебряных эпитермальных месторождений: кварцевые жилы расположены в центре ореола метасоматических изменений.

Результаты сопоставления геологической карты месторождения Валунистое и карты аномалий минеральных индексов «Quartz rich rocks» и «Ferric iron» подтверждают сходимость результатов дешифрирования мульти спектральных снимков (рис. 51).

Выявленные закономерности позволяют локализовать наиболее перспективные рудные поля в более мелком масштабе. Так, например, в пределах Тэркенейского рудного узла (рис. 52), где были проведены поисково-оценочные работы 2017-2021 гг. (В.В. Лебедев, 2021), по аномалиям минеральных индексов выделяется наиболее перспективный участок для дальнейших работ в северной части карты, который соответствует участку «Кремовый», выявленному в результате геологосъемочных (А.А. Павлов, 1995) и поисковых работ (В.А. Казинский, 1996).

Заметно, что аномалии «Quartz rich rocks» достаточно точно оконтурили кварцевые зоны гидротермально-метасоматических пород, выделенные на карте полезных ископаемых. Некоторые линейно вытянутые аномалии совпадают с разрывными нарушениями. Зона овальной формы, в которой отсутствуют аномалии минеральных индексов, в центре участка «Кремовой» соответствует штоку диоритов экитынского комплекса. Изометричные в плане, находящиеся на вершинах, аномалии «Ferric iron», часто являются выходами субвулканических образований леурваамского комплекса.

Многие аномалии «Quartz rich rocks» к «Ferric iron» совпадают с аномалиями по вторичным ореолам рассеяния золота. Их простирание также имеет общее направление. Наиболее высокие концентрации золота в этом случае соответствуют аномалии «Quartz rich rocks».

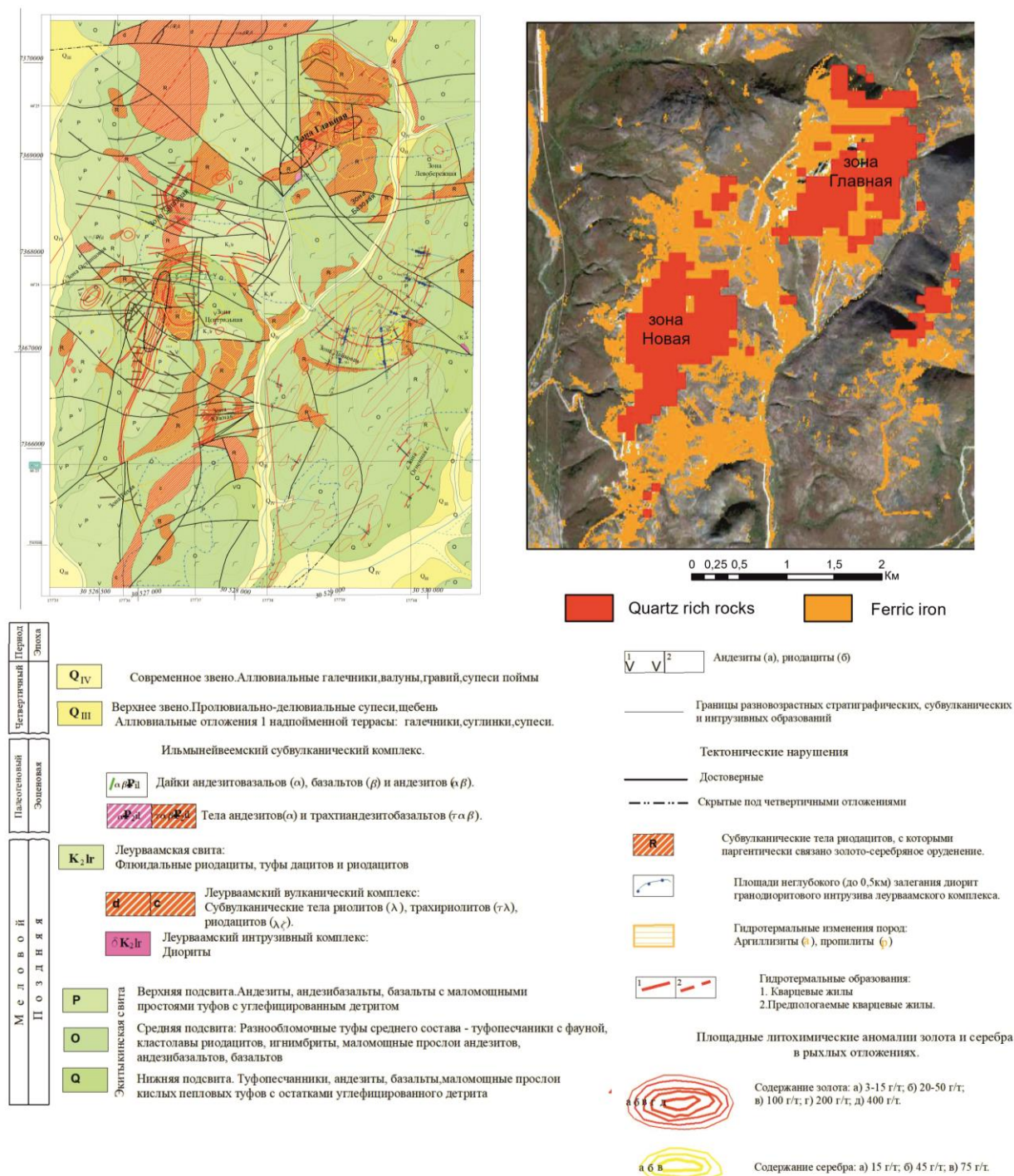


Рис. 51. Месторождение Валунистое. Сопоставление геологической карты (Уютов, 2009) и карты аномалий минеральных индексов (выполнена автором)

ГЛАВА 5. ЛОКАЛИЗАЦИЯ ОРУДЕНЕНИЯ

В настоящее время на территории Валунистого рудного района в промышленную эксплуатацию вовлечены мелкое по запасам золота месторождение Горное и среднее – Валунистое. Их освоение ведет ООО «Рудник Валунистый» (холдинг Highland Gold Mining), срок окончания эксплуатации которого, по данным компании, запланирован на 2028 год.

Приоритетным путем решения проблемы ограниченной ресурсной базы является локализация и освоение потенциальных золоторудных полей, отвечающих комплексу критериев прогнозирования, подобных золото-серебряному месторождению Валунистое и расположенным на сопредельной Канчалано-Амгуэмской лицензионной площади. Помимо этого, АО «Северо-Восточное производственно-геологическое объединение (ПГО)» проводит поисково-оценочные работы на Кремовой и Центральной перспективных площадях.

Кроме того, интерес представляет рассмотрение техногенно-минеральных образований района в качестве потенциального месторождения [Агошков, 1984; Емлин, 1993; Наумов, 2010; Наумов и др., 2021; 2022].

5.1. Прогнозно-поисковая модель

Проведенное изучение геологических и дистанционных материалов уточнить и систематизировать комплекс критериев прогнозирования золото-серебряного оруденения ВРР (табл. 9). Стоит заметить, что ряд признаков и предпосылок имеет различия в зависимости от минералого-геохимического типа оруденения (рис. 53). Однако в виду более благоприятных геологических и экономико-технологических условий целесообразно проводить геологоразведочные работы только на объектах золото-сульфосольного типа.

Таблица 9. Критерии прогнозирования золото-серебряного оруденения Валунистого рудного района

Прогнозно-поисковые критерии	Содержание критериев
<i>Поисковые предпосылки</i>	
1. Структурно-тектонические	
1.1. Региональные рудоконтролирующие структуры	1. Расположение в пределах кольцевого поднятия кольцевой мегаструктуры (Анадырская). 2. Пересечения кольцевых (дугообразных) нарушений с региональными зонами разломов: Канчаланская, Амгуэмская, Нычегваамская
1.2. Локальные рудоконтролирующие структуры	1. Разломы северо-восточной и субмеридиональной ориентировки: Канчаланская, Тнеквеемская зоны разломов. 2. Вулкано-купольные структуры: Кытэмнайваамская вулкано-тектоническая депрессия
2. Магматические	Субвулканические, экструзивные, жерловые образования (околожерловая группа фаций)
3. Литолого-петрографические	
3.1. Рудоносная формация	1. Риолит-трахириолитовая (леурваамский вулканический комплекс); 2. Дациит-риолитовая (амгенский вулканический комплекс)
3.2. Рудовмещающая формация	1. Дациит-риолитовая (амгенский вулканический комплекс); 2. Андезит-трахиандезитовая (экитыкинский вулканический комплекс); 3. Риолит-трахириолитовая (леурваамский вулканический комплекс)
4. Стратиграфические	Верхняя граница оруденения - кровля леурваамской свиты. Образования нунлигранского субвулканического комплекса – послерудные.
<i>Поисковые признаки</i>	
1. Геохимические	Вторичные ореолы средней и высокой концентрации. ▪ Для золото-сульфосольного типа: Au, Ag, Sb, As, Cu, Hg. ▪ Для серебро-полисульфидного типа: Ag, Hg, Pb, Au, Ni, Mo, Zn
2. Геофизические	Зоны градиентов магнитного поля и локальных аномалий сопротивления методом естественного электрического поля (ЕП)
3. Гидротермально измененные породы	1. Пропилиты, аргиллизиты, вторичные кварциты. 2. Кварцевые, адуляр-кварцевые, пирит-кварцевые, карбонат-кварцевые, флюорит-кварцевые жилы с характерными текстурами – колломорфной, ритмично-полосчатой, друзоподобной. 3. Коры выветривания по аргиллизитам («Аргиллизитовые шляпы»)

Прогнозно-поисковые критерии	Содержание критериев
4. Шлиховые и механические ореолы	1. Шлиховые и механические ореолы золота со знаковым, редко весовым (до 0,5 г/м ³) содержанием. Реже встречаются ореолы минералов серебра, преимущественно акантита. 2. Зоны развития продуктов гипергенеза (гидроксиды железа, сульфатные фазы из группы кристаллогидратных соединений, ярозитового семейства и группы брошантита)
5. Дистанционные	Аномалии минеральных индексов «Ferric iron» и «Quartz rich rocks»

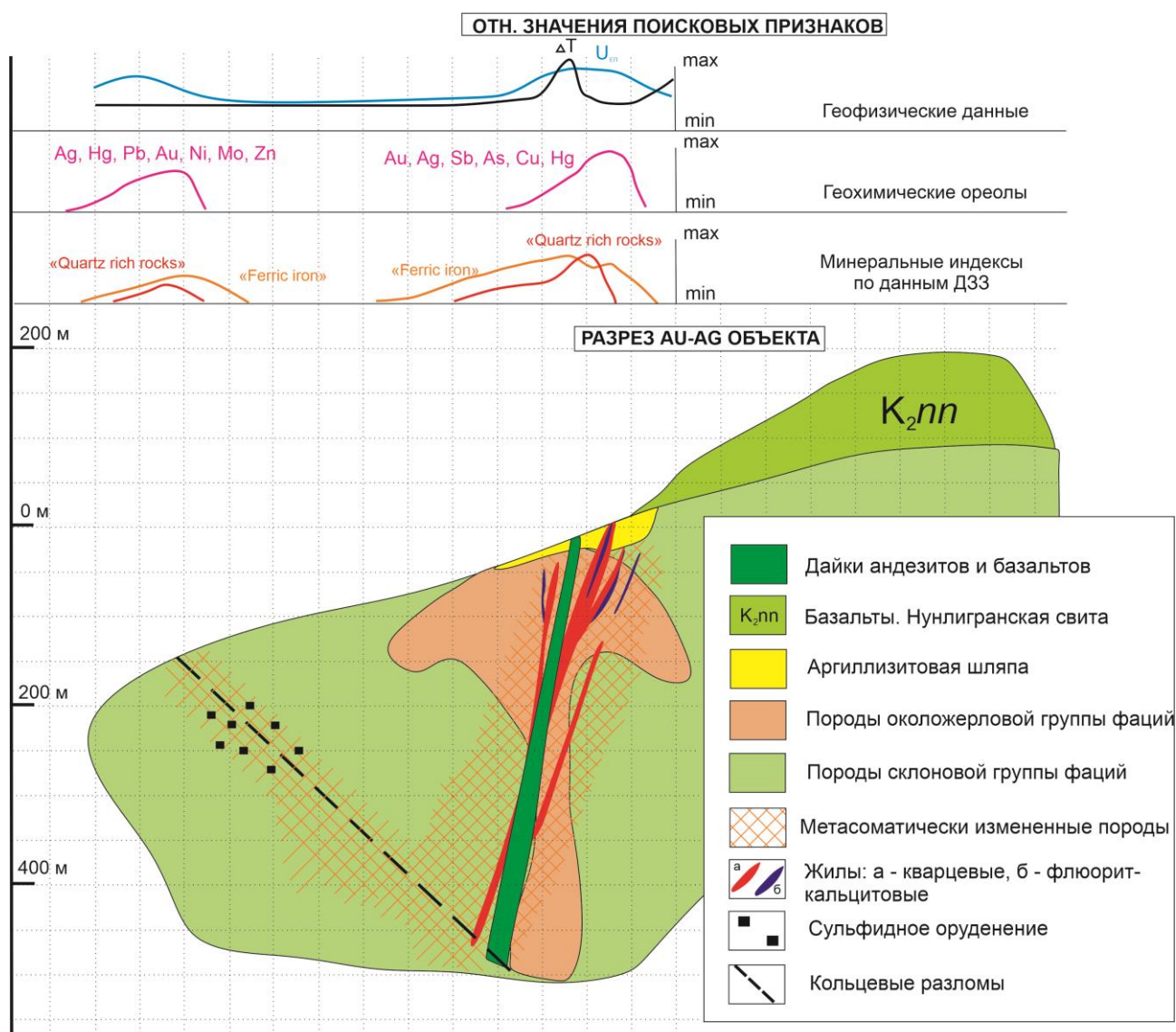


Рис. 53. Прогнозно-поисковая модель золото-серебряного оруденения Валунистого рудного района

Наиболее золотопродуктивные объекты локализуются в пределах пород жерловой группы фаций или в непосредственной близости от них. Как правило,

они представлены субвулканическими линейными телами риодацитов, которые приурочены к главным рудоконтролирующим структурам. В близповерхностных условиях эти тела имеют раздувы, иногда они слагают экструзивные купола в поперечном сечении, имеющие грибообразную форму, при этом экструзивная «шляпка» гриба обычно не содержит проявлений золото-серебряных руд, руды обычно локализуются в «ножке» гриба параллельно главной магмо- и рудоконтролирующей структуре. Кроме риодацитов к этим же структурам приурочены дайки базальтов и андезитов, которые могут рассматриваться как синрудные или пострудные, но в контакте с ними идет резкое обогащение жил золотом.

Гидротермальные и метасоматические образования наиболее проявлены в риодацитах, реже во вмещающих их кислыми вулканитами и представлены кварц-гидрослюдистыми метасоматитами различной степени изменений. В андезитах и их туфах на этом же уровне гидротермальных и метасоматических изменений соответствуют пропилиты.

В пределах объекта широко развиты аргиллизитовые шляпы, наблюдается большое число кварцевых, кварц-карбонатных, кварц-флюоритовых и кварц-адуляровых жил. Данные образования фиксируются на мультиспектральных снимках как контрастные аномалии минеральных индексов «Ferric iron» и «Quartz rich rocks».

5.2. Перспективные объекты геологоразведочных работ

5.2.1. Недоизученные установленные рудные поля

Прогнозные ресурсы объектов ВРР согласно ГГК-200 листов Q-60-XVI, XVII, XVII и результатам ГРР составляют:

- Рудные поля Валунистое и Горное – Au – 142 т, Ag – 1118,8 т, категории P_1+P_2 .
- Рудные поля Жильное и Шах – Au – 58,3 т, Ag – 3124 т, категории P_2+P_3 .
- Осеннее рудное поле – Au – 35 т, Ag – 2237 т, категории P_2 .

- Оранжевое рудное поле – Au – 0,7 т, Ag – 300 т, категории P₃.
- Тэркенейский рудный узел – Au – 13,4 т, Ag – 2032 т, категории P₂+P₃.
- Центральный рудный узел – Au – 12 т, Ag – 775 т, категории P₂.
- Водораздельное рудное поле – Au – 2,66 т, Ag – 320 т, категории P₂.

В настоящее время отмеченные металлогенические подразделения в различной степени опоискованы, однако систематические геологоразведочных работы были проведены исключительно на рудных полях Валунистое, Горное, Жильное, Шах, рудных узлах Тэркенейский и Центральный. Месторождение Жильное, рудопроявление Шах, а также рудных узлы Тэркенейский и Центральный по результатам проведенных работ оказались мало перспективными. Таким образом, промышленный потенциал некоторых объектов ВРР до конца еще не определен. Наиболее перспективными из недоизученных площадей являются следующие участки:

Осеннее рудное поле расположено в западной части ВРР, на междуречье Ныгчекваам–Чумэвеем.

Участок, являющийся частью Канчаланской аномальной геохимической зоны, был выделен в ходе геохимических поисков по вторичным ореолам рассеяния масштаба 1:50 000 (В.Н. Васильев, 1997). Результаты данных работ нельзя считать удовлетворительными – в связи с прекращением финансирования часть проб не была проанализирована, работы остались незавершенными, качество проходки и документации горных выработок не позволяют даже приблизительно их интерпретировать, а результаты анализа бороздовых проб являются некорректными.

В результате проведения ГДП-200 (Н.И. Романов, 2002) были получены результаты анализов недостающих геохимических проб, проведено дополнительное штучное опробование рудных тел и оценены прогнозные

ресурсы. В пределах участка прогнозируется выявление крупного золото-серебряного объекта.

Расположено на пересечении Канчаланской и Ныгчекваамской зоны разломов. Оно находится в контуре шлихового ореола золота, в геохимическом поле отражается контрастными вторичными ореолами рассеяния золота и серебра интенсивностью соответственно до 4,72 г/т и до 30 г/т. Включает золото-серебряное проявление Осеннее и 4 пункта минерализации золота и серебра.

Сложено кислыми вулканитами амгеньской толщи, прорванными мелкими субвулканическими телами риолитов рудоносного леурваамского комплекса, а также мелкими интрузивами кварцевых монцонит-порфиров эkitыкинского комплекса. Субвулканические риолиты и стратифицированные вулканиты неравномерно гидротермально изменены и превращены в разнопроявленные аргиллизиты, вторичные кварциты и пропилиты. Многочисленные разрывные нарушения разных направлений контролируют размещение интрузивных и субвулканических образований, метасоматитов, гидротермальных жил и определяют структуру рудного поля. В метасоматитах залегают кварцевые, адуляр-кварцевые, карбонат-кварцевые и гематит-кварцевые жилы и прожилки, сгруппированные в жильные и жильно-прожилковые зоны или локализованные индивидуально. Изучение имеющихся геологических материалов показывает высокую степень подобия геологического строения Осеннего рудного поля и месторождения Купол (рис. 54, 55).

Наиболее продуктивны в отношении золото-серебряного оруденения зоны мелких кварцевых и адуляр-кварцевых прожилков близмеридионального простирания с единичными кварцевыми жилами. Выявлено несколько таких зон различной длины и мощности. Более богатое оруденение в зоне Основной выявлено штучным опробованием и составляет в центральной части зоны 18,3 и 49,8 г/т золота, 2096,6 и 4099,7 г/т серебра.

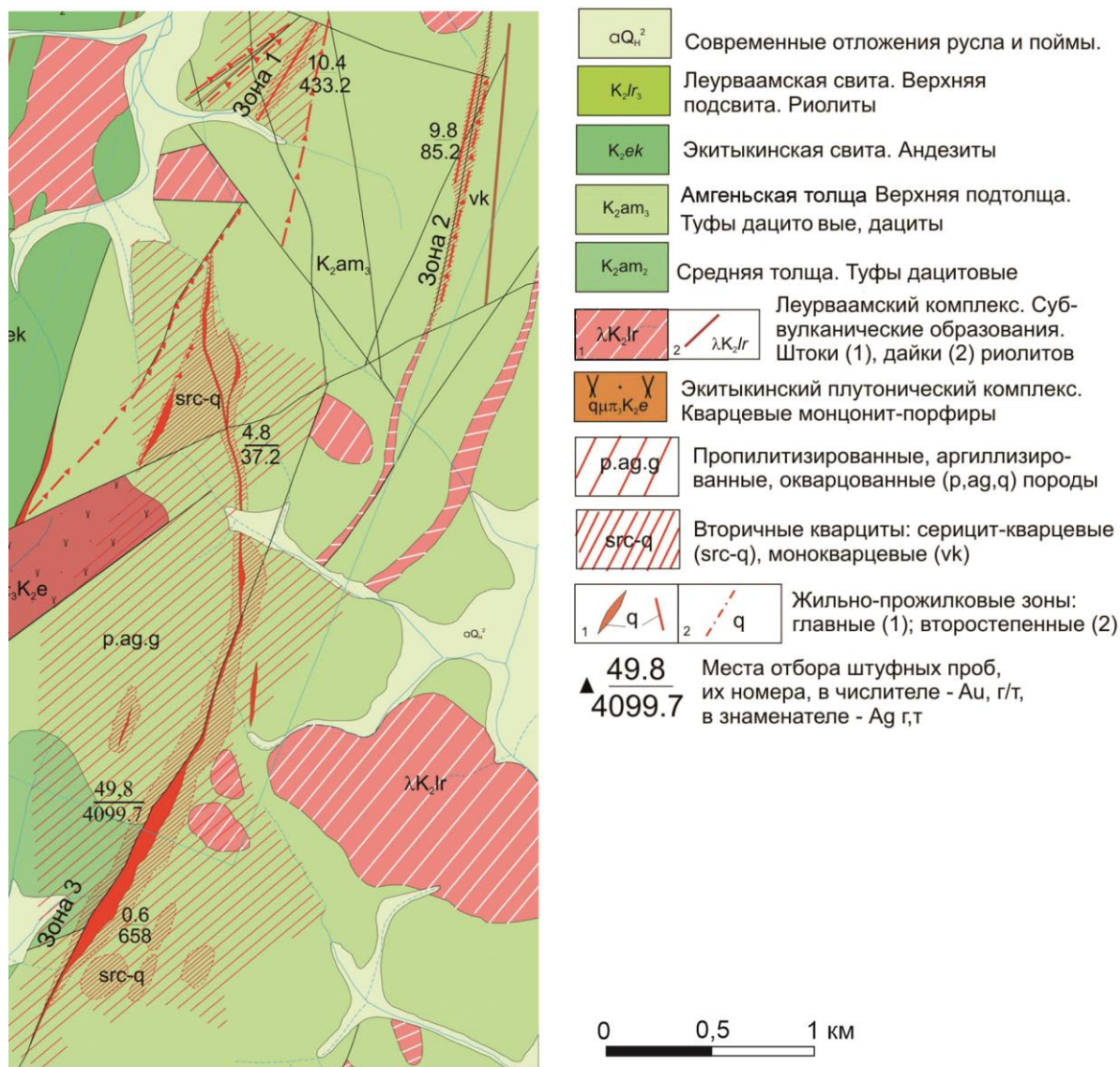


Рис. 54. Фрагмент геологической карты, Осеннее рудное поле (Романов, 2002)

Среди рудных минералов преобладает пирит (составляет до 90% тяжелой фракции, нередко окислен) самородное золото, в том числе электрум, акантит. Самородное золото мелкое (0,1–0,8 мм) бледно-желтое и желтое, до соломенно-

желтого. Встречается в сростках с акантитом и пиритом. Электрум встречается совместно с самородным золотом более высокой пробы и акантитом. Цвет серый, свинцово-серый или желтоватый. Иногда наблюдается переход от серого электрума к желтому золоту более высокой пробы.



Рис. 55. Схематическая геологическая карта месторождения Купол [Глухов, 2008]: 1, 2 – лавы (1) и грубообломочные туфы (2) андезитов и андезибазальтов вилковской толщи; 3 – игнимбриты и туфы риолитов еропольской толщи; 4 – дайки позднемеловых риолитов; 5 – рудные тела; 6 – разломы. Римские цифры: I – Главная рудная зона, II – Вторая рудная зона

Оранжевое рудное поле расположено в центральной части ВРР, на левобережье р. Ильмынейвеем. Приурочено к центру купольной структуры, сложенной кислыми вулканитами амгенской толщи, прорванными субвулканом риолитов леурваамского комплекса. Вмещающие породы подвергнуты площадной пропилитизации, с образованием аргиллизитов и вторичных кварцитов.

В 2013 г. ООО «Северо-Восточная поисковая компания» (А.Д. Демин, 2014) на его площади выполнила литохимические поиски по вторичным

ореолам рассеяния масштаба 1:50 000, в результате которых были установлены вторичные ореолы средней и высокой интенсивности золота, серебра, молибдена и мышьяка с максимальными содержаниями 0,03; 9; 32 и 90 г/т соответственно.

В ядерной части поисковыми маршрутами обнаружена кварцево-жильная зона с богатой золото-серебряной минерализацией, соответствующей промышленным кондициям. Зона прослежена по обломкам жильного кварца на 200 м по простиранию в северо-восточном направлении при мощности по развалам от 10 до 100 м. Содержания золота и серебра в штучных пробах кварца достигают 12 и >2000 г/т (рис. 56).

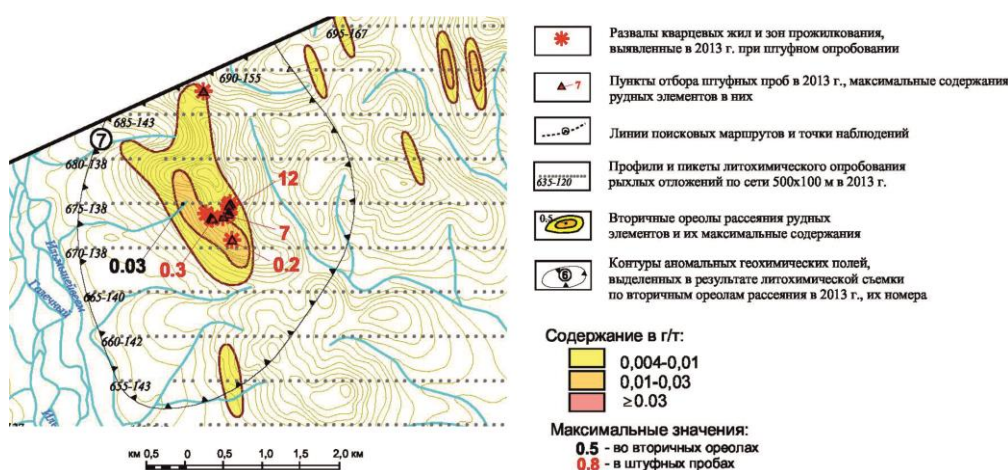


Рис. 56. Фрагмент карты вторичных ореолов рассеяния золота, Оранжевое рудное поле (Демин, 2014)

Жильные минералы представлены кварцем, адуляром, в меньшем количестве отмечаются карбонаты и хлорит. Продуктивную минеральную ассоциацию составляют акантит, минералы ряда пирсеит-полибазит, минералы системы Au-Ag. Пробность минералов системы Au-Ag в рудах варьирует в широком интервале от 729 до 320, наиболее распространена – 420-520. По химическому, минеральному составу и условиям рудоотложения золото-серебряная минерализация схожа с месторождением Жильное [Голдырев и др., 2022а; 2023а]. Вероятно, оруденение относится к серебро-полисульфидному минералого-геохимическому типу.

5.2.2. Предполагаемые рудные узлы

Валунистый рудный район располагается в пределах Анадырской кольцевой структуры, которую пересекают линейные региональные зоны разломов. Это разломы северо-восточного «Канчаланского» направления, разломы субмеридионального – северо-северо-восточного «Нычегваамского» направления, а также субширотные разломы «Амгуемского» направления. В своем западном и восточном продолжении Амгуемская зона разломов проходит через рудные узлы месторождений Песчанка, Купол, Арыкеваам, Пепервеемский и ряд других (рис. 57). С прогнозно-поисковой точки зрения интерес представляют все пересечения указанных зон разломов, которые являются предполагаемыми рудными узлами:

1. Северо-восточное продолжение Нычегваамской зоны разломов от рудопоявления Осеннее – вплоть до пересечения с Амгуемской зоной разломов. В пределах данной зоны выявлено множество пунктов минерализации и геохимические потоки Au.

2. Продолжение Канчаланской зоны на северо-восток от месторождения Горное вплоть до пересечения с кольцевым ограничением Анадырской кольцевой структуры и южным краем Амгуемской зоны разломов (включая рудопоявления Кремовое и Тэркенейское).

3. Южное продолжение разломов Тнэквеемского-Нычегваамского направления от месторождения Валунистое – вплоть до центральной части Анадырской кольцевой структуры.

На территории данных предполагаемых рудных узлов присутствуют и другие благоприятные факторы, такие как наличие вулкано-купольных структур, ранее установленных кварцевых жил, проявлений и аномалий золота и серебра, наличие ореолов осветления и ожелезнения. В непосредственной близости от месторождения Валунистое можно выделить следующие наиболее перспективные участки для локализации золото-серебряного оруденения:

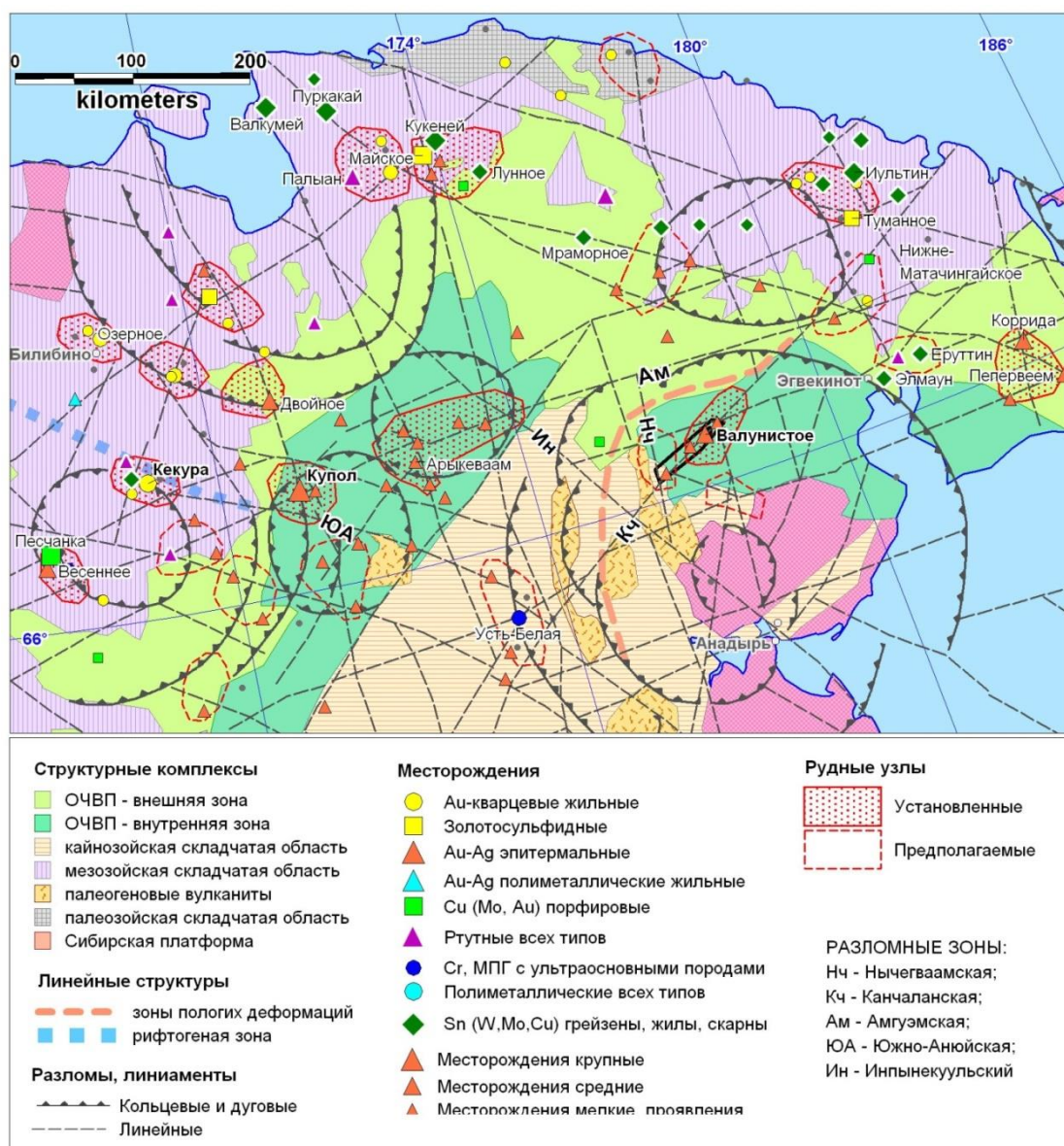


Рис. 57. Размещение месторождений металлических полезных ископаемых северо-восточной части ОЧВП на карте геолого-структурного районирования (Гуревич, 2009). Схема районирования (Чехов, 2000), с использованием геологических карт м-бов 1:2 500 000 и 1:500 000; месторождений – по Mineral Resources of Eastern Siberia... Схема металлогенического... ЦНИГРИ, 2004, USGS MRDS. Тектоническая интерпретация выполнена с использованием геокарт м-ба 1:2 500 000, цифровых моделей рельефа SRTM30 и магнитного поля Земли WDMAM, композиции MrSID Landsat

Участок «Урочище Белые Увалы». Расположен в 30 км на северо-восток от месторождения Валунистое и, вероятно, представляет собой крупнейшую в районе зону интенсивной аргиллизации пород, размерами около 30х9 км, частично перекрытую флювиогляциальными отложениями. На территории участка имеются субвулканические образования леурваамского комплекса, расположенные в контуре геохимического ореола Аи, выходы ожелезненных

пород (рис. 58). Урочище Белые Увалы на гиперспектральных снимках выделяется по аномалиям «Quartz rich rock» и «Ferric iron» (рис. 59), что также подтверждает перспективность данной зоны.



Рис. 58. Урочище Белые Увалы

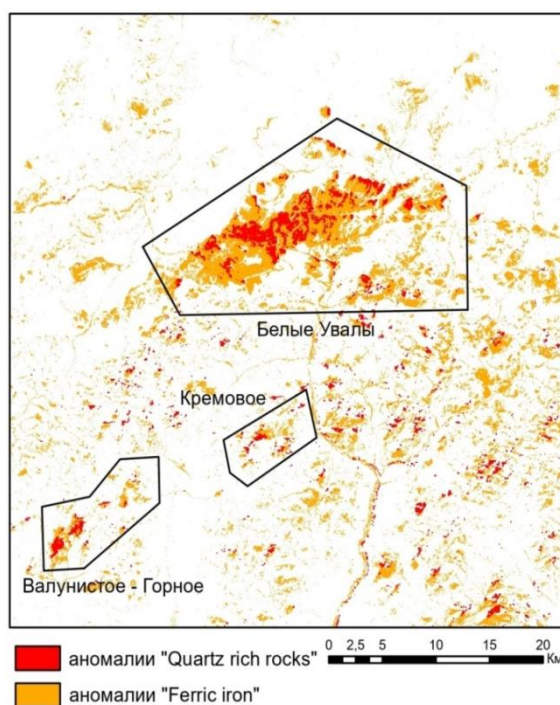


Рис. 59. Карта аномалий минеральных индексов северо-восточной части Валунистого рудного района. Использованы космоснимки космоснимков ASTER level 1T V3

Участок «Моховый». Расположен в восточной части ВРР, в 35 км от месторождения Валунистое. Выделяется по аномалиям минеральных индексов (рис. 60), которые простираются вдоль рудоконтролирующего разлома Моховый, направленного аналогично с Канчаланским и упирающегося в Тнэквеемский и Тадлеонский разломы. На территории участка расположено

множество вулкано-купольных структур с выходами субвулканических тел леурваамского комплекса, а также несколько крупных ореолов гидротермально измененных пород, сопровождаемых пунктами минерализации золота и серебра.

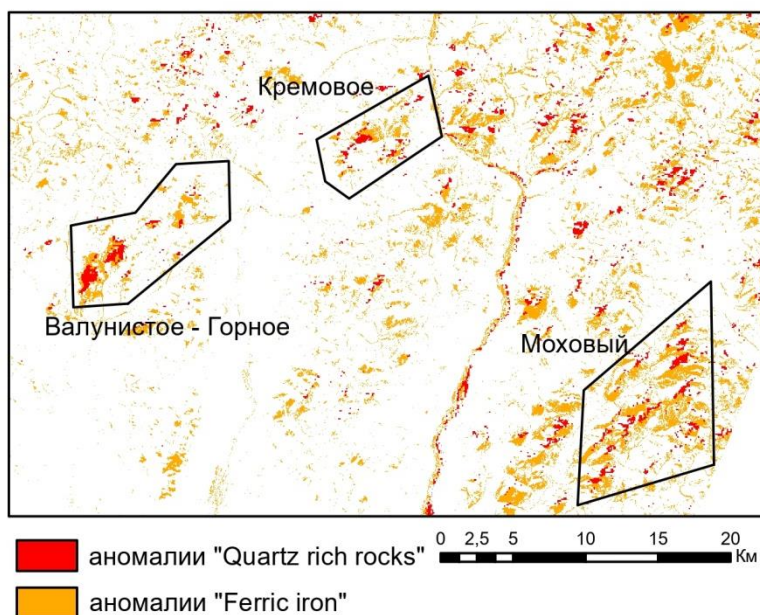


Рис. 60. Карта аномалий минеральных индексов восточной части Валунистого рудного района. Использованы космоснимки космоснимков ASTER level 1T V3

Участок «Светлый». Расположен в юго-западной части ВРР, вблизи от месторождения Жильное. Участок пересекает зона разломов «Канчаланского» направления, прослеживающаяся от участка Шах на юго-запад. Вдоль зоны разломов выражена широкая полоса интенсивного осветления пород размерами около 20х4 км, которая выделяется как аномалия «Ferric iron» на гиперспектральных изображениях (рис. 61). В пределах участка ранее были установлено несколько точек золото-серебряной минерализации. В 2007 в восточной части участка был проведен маршрут отрядом Гуревича Д.В., который подтвердил широкое развитие метасоматитов (включая аргиллизиты, окварцованные породы, ожелезненные коры выветривания).

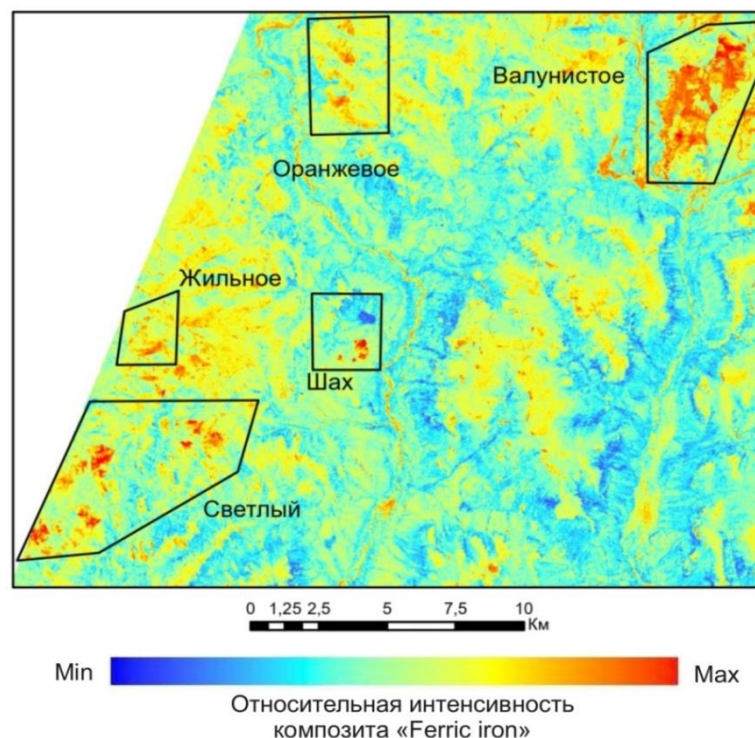


Рис. 61. Карта минерального индекса «Ferric iron», центральная часть Валунистого рудного района. Использованы космоснимки ASTER level 1T V3

5.3. Нетрадиционные источники золота (техногенно-минеральные образования)

В процессе отработки месторождения Валунистое образуются многочисленные технологические продукты или ТМО, которые являются неоцененным минеральным ресурсом [Голдырев и др., 2021б; 2023в].

Отвалы кеков. Благородные металлы извлекали по методике выщелачивания цианидными растворами, с последующей сорбцией на углях. При гидрометаллургической переработке руды в качестве отходов образуется кек цианирования. После фильтрации он вывозится в отвал и замораживается. Суточный объем кека составляет 602,95 м³. Размер частиц в кеке не превышает 0,4 мм (рис. 62).

Вещественный состав кека. По данным дифрактометрического анализа [Голдырев, Хусаинова, 2021] практически аналогичен вещественному составу руд – состоит из кварца (55,7 мас. %), калиевого полевого шпата (18,8 мас. %), плагиоклазов (альбит) (3,7 мас. %), слюды (2,3 мас. %), хлорита (2,1 мас. %) и

кальцита (17,4 мас. %). Доля минералов тяжелой фракции составляет 2,5 % массы кека, в ее составе преобладает пирит, магнетит.



Рис. 62. Отвалы кека цианирования, месторождение Валунистое

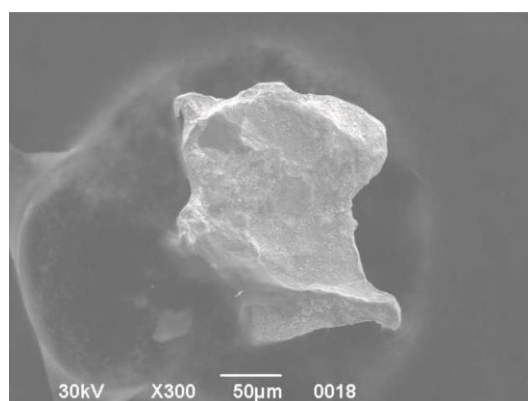
Благороднометалльная минерализация. Дополнительно состав кека был проанализирован МС ИСП методом (табл. 10). Содержание Au в кеке составляет 0,13 г/т. После доводки материала кека лотком до концентрата (2,5 масс.%) содержание Au увеличилось до 264,17 г/т. Обнаруженное золото (рис. 63) кека ярко-желтого цвета, достигает размера 0,3 мм, имеет нехарактерный для руд месторождения Валунистое уплощенный облик с неровными, сглаженными, местами «острыми» краями. Вероятно, такой облик золотины получила в результате дробления или истирания, и из-за крупного размера не подверглась цианированию. По химическому составу относится к высокопробному золоту: Au – 87,16%, Ag – 11,35%, Cd – 1,04%, As – 0,36%, Ni – 0,08%. Кроме того, в кеке месторождения Валунистое присутствуют металлы платиновой группы. Наиболее значимыми являются содержания Pd, достигающие 0,53 г/т.

По результатам исследования методом атомно-абсорбционной спектрометрии [Русанов и др., 2019], содержания платины в рудах месторождения составляют от 0,21 до 25,9 г/т. Повышенные содержания (11,8-

25,9 г/т) фиксируются в метасоматитах, тогда как в кварцевых жилах содержание минимально. Данные рентгенофазовой дифрактометрии [Кузнецов и др., 2023] также подтверждают присутствие платиноидов в рудах месторождения Валунистое в виде кристаллических не «ноль валентных» микро- и наночастиц, которые образуют соединения PdF, PtO₂, PdAs₂, PdTe₂. Кроме того, минеральные формы металлов платиновой группы были обнаружены [Сахно, Кузнецов, 2020; Сахно и др., 2019] и на других эпиптермальных месторождениях ОЧВП: Купол, Сентябрьское, Двойное.

Таблица 10. Благороднометалльная минерализация кека цианирования, г/т

Проба	Ru	Rh	Pd	Ag	Re	Os	Ir	Pt	Au
Исходный состав кека	0,00	0,02	0,53	11,08	0,01	0,02	0,01	0,02	0,13
Гравиконцентрат (2,5 масс.%)	0,00	0,06	0,53	181,33	0,01	0,02	0,01	0,03	264,17



Au	87,16 %
Ag	11,35 %
Cd	1,04 %
As	0,36 %
Ni	0,08 %

Рис. 63. Самородное золото кека цианирования, месторождение Валунистое

Количество и содержание золота в техногенно-минеральных образованиях эпиптермальных месторождениях. Для оценки количества золота, накопленного в ТМО за год эксплуатации, было приравнено к технологическим потерям:

$$П_t = Q \cdot c \cdot (1 - И)$$

где $П_t$ – технологические потери полезного компонента, т

Q – количество переработанной руды, тыс. т

c – содержание полезного компонента в переработанной руде, г/т

$И$ – извлечение полезного компонента.

Данные, используемые в формуле, были взяты из годовых отчетов компаний-недропользователей: Highland Gold Mining, АО «Полиметалл», ООО «Северные прииски», ООО «Курилгео», ОАО «ЮГК», Dundee Precious Metals.

Содержание золота в ТМО было определено как деление суммы технологических потерь на сумму количества переработанной руды за срок эксплуатации рудника. Однако корректность такого подхода, основанного только на результатах первичного определения содержания золота в рудах и обобщения первичных данных, не всегда оправдана. Неравномерное распределение металла в рудах и неучтенные в процессе поисков и разведки иные формы нахождения золота внесут коррективы в конечный показатель содержания золота и его распределение в ТМО. Но могут служить принципиальным ориентиром ожидаемых ресурсов золота в ТМО.

Содержание золота в кеках месторождения Валунистое, по данным недропользователя, колеблется от 0,15 до 0,8 г/т (среднее – 0,22 г/т), серебра – от 5 до 27 г/т (среднее – 12,22 г/т). На него приходится 4,41% золота и 15,18% серебра, добываемого на месторождении. В 2017 г. это составило 46,0 кг золота и 1646,8 кг серебра. К 2020 году было накоплено 5,2 млн. т хвостов обогащения, в которых содержится 1,1 т золота (табл. 11).

Таким образом, наличие не менее 1,1 т золота в кеке месторождении Валунистое и повышение его содержания в 2000 раз (в кеке – 0,13 г/т, в концентрате – 264,17 г/т) в результате гравитационного обогащения демонстрируют возможность переработки данных хвостов обогащения. Опыт использования винтовых сепараторов на хвостохранилище аналогичного эпитепмального месторождения Джульетта подтверждает экономическую эффективность работ – 50-60 кг золота получено дополнительно за год. Извлечение металлов в концентрат составило: Au – 45-60%, Ag – 20-40%.

Таблица 11. Количество и содержание золота в техногенно-минеральных образованиях эпитеpmальных месторождений на 2020 г по данным работ [Голдырев, 2020; Голдырев, Наумов, 2020; Голдырев и др., 2021б; 2023г; Goldyrev, Naumov, 2020a; 2020b].

Предприятие		Золото		Накопленный Объем хвостов, млн т.
Обогатительное предприятие	Месторождения (тип)	Содержание, г/т	Количество, т	
Чукотский АО				
ЗИФ «Валунистое»	Валунистое (НС), Горное (НС)	0,22	1,1	5,2
ЗИФ «Купол»	Купол (НС), Двойное (НС), Сентябрьское (НС), Морошка (НС)	0,6	10,3	18,7
Магаданская обл.				
Карамкенский ГМК	Карамкенское (НС)	1,0	5,0	5,0
ЗИФ «Джультта»	Джультта (НС)	1,1	2,75	2,5
Хабаровский край				
Хаканджинская ЗИФ	Хаканджа (НС), Озерное (НС)	0,4	3,9	9,8
ЗИФ-КВ ООО «Светлое»	Светлое (ВС)	0,8	4,8	6,0
ЗИФ «Многовершинное»	Многовершинное (НС, ПС)	0,4	8,0	20,0
ЗИФ «Белая Гора»	Белая Гора (ВС)	0,35	4,0	11,7
Сахалинская обл.				
УКВ ООО «Курилгео»	Айнское (ВС), Данченковское (ВС)	0,8	3,3	4,1
Забайкальский край				
Ново-Широкинский ГОК	Ново-Широкинское (ПС)	0,9	5,4	5,9
Челябинская обл.				
ЗИФ-КВ «Березняковская»	Березняковское (ВС)	0,9	2,7	3,0
Болгария				
ГОК «Chelopes»	Челопеч (ВС)	1,7	14,2	8,4
ГОК «Ada Tere»	Ада Тепе (НС)	1,1	1,0	0,9

Примечание: НС – низкосульфидизированный, ПС – промежуточносульфидизированный, ВС – высокосульфидизированный

Третье защищаемое положение

Золото-серебряное оруденение приурочено к интрузивно- и вулканокупольным структурам на участках их пересечения зонами разломов. Для наиболее продуктивных Au-Ag объектов Валунистого рудного района прогнозируются геохимические ореолы Ag, Au, Sb, As, Hg, Cu, аномалии минеральных индексов «Quartz rich rocks» и «Ferric iron», широкое развитие пород околожерловой группы фаций, аргиллизитов и флюорит-кальцитовых жил. Согласно прогнозно-поисковой модели, наиболее перспективные участки золото-серебряной минерализации: «Белые Увалы», «Моховый», «Светлый», рудные поля Осеннее и Оранжевое.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В пределах Валунистого рудного района месторождения и проявления золота и серебра приурочены к интрузивно- и вулканокупольным структурам на участках их пересечения крупными разломами и зонами разломов. Рудоносные жильно-прожилковые зоны сосредоточены в зонах сближенных разрывных нарушений на участках интенсивной трещиноватости и брекчирования. Верхней границей золото-серебряного оруденения является кровля леурваамской свиты. Образования нунлигранского комплекса – послерудные. Оруденение связано с субвулканическими, экструзивными, жерловыми образованиями. Продуктивная формация – риолит-трахириолитовая (леурваамский вулканический комплекс); дацит-риолитовая (амгенский вулканический комплекс). Рудовмещающими образованиями являются образования продуктивной дацит-риолитовой формации (амгенский вулканический комплекс); образования андезит-трахиандезитовой формации (экитыкинский вулканический комплекс).

В пределах палеовулканического сооружения Валунистого рудного узла, имеющего несколько этапов развития, золото-серебряное оруденение связано с околержловой и склоновой группами фаций и относится к 2 минералогеохимическим типам: золото-сульфосольному (месторождения Валунистое и Горное) и серебро-полисульфидному (месторождение Жильное).

Выделяются 2 этапа минералообразования: кварц-полевошпатовый и кальцитовый. Руды месторождения Жильное, для которых характерно Ag/Au более 50, однообразие минеральных форм серебра при преобладающей роли акантита и меньшем развитии самородного серебра, полибазита и низкопробного золота (480-650‰), сформированы исключительно на кварц-полевошпатовом этапе. Месторождения Валунистое, для руд которого характерно Ag/Au 5-10, большое разнообразие Ag-содержащих минералов, значительные количества сульфосолей, халькогенидов, амальгам Au и Ag, два

максимума пробности самородного золота (560-600‰ и 820-850‰), имеет широкий вертикальных размах оруденения и приурочено к 2 этапам минералообразования.

Вертикальная зональность оруденения заключается в тенденции увеличения следующих параметров от нижнерудного уровня к верхнему: золото-серебряное отношение (ЗСО), пробность золота, Au и Ag теллуриды и селениды, концентрация Au, Se, As, Bi, Sb. В тоже время происходит сокращения количества сульфидов и акантита, снижение концентрации Ag, Pb, Zn, Mo, Ni. Месторождение Жильное преимущественно относится к нижнерудному уровню, Валунистое – к рудному и верхнерудному.

Аномалии минеральных индексов, которые отвечают зонам окварцевания и ожелезнения, являются косвенным поисковым признаком. Аномалии минерального индекса «Quartz rich rocks» (породы богатые кварцем) соответствует крупным жильно-прожилковым и метасоматически измененным зонам кварцевого состава, «Ferric iron» (трехвалентное железо) – крупным площадным зонам ожелезненных пород. Такие зоны, как правило, являются участками развития метасоматически измененных глинистых пород (алунит, каолинит, иллит, мусковит-серицит), в том числе аргиллизитовыми «шляпами». Часто они связаны с выходами субвулканических образований леурваамского комплекса. Многие аномалии «Quartz rich rocks» к «Ferric iron» совпадают с аномалиями по вторичным ореолам рассеяния золота. Их простираие также имеет общее направление. Наиболее высокие концентрации золота в этом случае соответствуют аномалии «Quartz rich rocks».

Прогнозные ресурсы ($P_1+P_2+P_3$) объектов ВРР согласно ГГК-200 листов Q-60-XVI, XVII, XVII и результатам ГРР составляют 264 т золота и 9906,8 т серебра. Промышленный потенциал некоторых объектов ВРР до конца еще не определен – Осеннее и Оранжевое рудное поле являются наиболее перспективными из недоизученных площадей. Имеющиеся геологические материалы подтверждают высокую степень подобия геологического строения

Осеннего рудного поля и месторождения Купол. В пределах Осеннего рудного поля прогнозируется выявление крупного золото-серебряного объекта (Au – 35 т, Ag – 2237 т, категории P₂).

С прогнозно-поисковой точки зрения интерес представляют пересечения следующих зон разломов, которые являются предполагаемыми рудными узлами: северо-восточное продолжение Нычегваамской зоны разломов от рудопоявления Осеннее – вплоть до пересечения с Амгуемской зоной разломов; продолжение Канчаланской зоны на северо-восток от месторождения Горное вплоть до пересечения с кольцевым ограничением Анадырской кольцевой структуры и южным краем Амгуемской зоны разломов; южное продолжение разломов Тнэквеемского-Нычегваамского направления от месторождения Валунистое – вплоть до центральной части Анадырской кольцевой структуры.

Участки «Урочище Белые Увалы», «Моховый», «Светлый», которые выделяются на мультиспектральных снимках по аномалиям «Quartz rich rock» и «Ferric iron» в совокупности с другими критериями прогнозирования, являются предполагаемыми рудными полями.

В процессе отработки месторождения Валунистое образуются техногенноминеральные образования, которые являются неocenенным минеральным ресурсом. Содержание золота в кеках цианирования составляет 0,13 г/т. После доводки материала кека до концентрата (2,5 масс.%) содержание Au увеличивается до 264,17 г/т, что подтверждает возможность извлечения золота гравитационным способом обогащения. К 2020 году было накоплено 5,2 млн. т хвостов обогащения (кека), в которых содержится 1,1 т золота.

Кроме того, в кеке присутствуют платиноиды, которые преимущественно представлены минералами Pd (содержание достигает 0,53 г/т). Вероятно, их отложение происходило с золотом в ходе единого гидротермального (эпитеpмального) процесса. Наиболее предпочтительными ловушками для их осаждения были зоны метасоматитов, а не кварцевые жилы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Авдонин В.В., Гончарова Т.Я. Фацции колчеданосных вулканогенных комплексов. М.: МГУ, 1986. 163 с.
2. Агошков М. И. Развитие идей и практики комплексного освоения недр // Горный журнал. 1984. № 3. С. 2–6.
3. Азовскова О.Б., Ровнушкин М.Ю., Халилова А.Ф. Характерные черты аргиллизитового метасоматоза в продуктивных гранитоидах Михеевского Си-порфирового месторождения, Южный Урал // Граниты и эволюция земли: мантия и кора в гранитообразовании: Матер. III междунар. геол. конф. Екатеринбург, 2017. С. 6-8.
4. Азовскова О.Б., Ровнушкин М.Ю., Главатских С.П. Особенности минералогии аргиллизитов Михеевского меднопорфирового месторождения, Южный Урал // Металлогения древних и современных океанов-2015. Месторождения океанических структур: геология, минералогия, геохимия и условия образования. Миасс: ИМин УрО РАН, 2015. С. 116-120.
5. Акинин В.В., Миллер Э.Л. Эволюция известково-щелочных магм Охотско-Чукотского вулканогенного пояса // Петрология. 2011. № 3. С. 249-290. DOI: [10.1134/S0869591111020020](https://doi.org/10.1134/S0869591111020020)
6. Бегунов С.Ф., Ларионов Я.С., Тибилев И.В. Кольцевые структуры в мезозоидах Центральной Чукотки // Колыма, 1976. № 2. С. 42–44.
7. Белоусов П.Е., Вольфсон А.А., Волков А.В., Сидоров А.А., Мурашов К.Ю., Галямов А.Л., Сидорова Н.В. Аргиллизитовые "шляпы" рудопроявления "Комплексное", Кайэнмываамское вулканическое поднятие (Центральная Чукотка) // Вулканонология и сейсмология, 2020, № 5, с. 3-12.

8. Белый В.Ф. Стратиграфия и структуры Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. М.: Наука, 1977. 171 с.
9. Белый В.Ф. Структурно-формационная карта Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (Объяснительная записка). Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1981. 85 с.
10. Белый В.Ф. К проблеме возраста Охотско-Чукотского вулканогенного пояса // Тихоокеан. геология. 1982. № 3. С. 101-109.
11. Белый В.Ф. Геология Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1994. 76 с.
12. Беляева Т.В., Пальянова Г.А. Сульфиды и селениды серебра в рудах Au–Ag эпитермальных месторождений Охотско-Чукотского вулканогенного пояса // Геология рудных месторождений. 2023. Т. 65. № 1. С. 74-108.
13. Беляева Т.В. Условия образования халькогенидов серебра на эпитермальных месторождениях северо-востока России. Дис. ... канд. геол.-мин. наук, 2022. 136 с. https://www.nsu.ru/n/research/dissertation-committee/nsu/dissertatsii_11103/#3213938.
14. Берман, Ю. С. Типы, условия формирования и поисковые признаки золотосеребряного оруденения северо-восточной части Охотско-Чукотского вулканогенного пояса: Автореферат дис. на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / Центр. науч.-исслед. горноразвед. ин-т цвет., редких и благородных металлов. - Москва : 1970. - 26 с.
15. Бортников Н.С., Лобанов К.В., Волков А.В., Галямов А.Л., Мурашов К.Ю. Арктические ресурсы цветных и благородных металлов в глобальной перспективе // Арктика: экология и экономика. 2015. № 1(17). С. 38-46.
16. Бортников Н.С., Волков А.В., Савва Н.Е., Прокофьев В.Ю., Колова Е.Е., Долманова-Тополь А.А., Мурашов К.Ю. Эпитермальные Au-

Ag-Te-Se месторождения Чукотки (арктическая зона России): металлогения, минеральные парагенезисы, флюидный режим // Геология и геофизика, 2022, т. 63 (4), с. 522-549.

17. Бортников Н.С., Толстых Н.Д. Эпитермальные месторождения Камчатки, Россия // *Геология рудных месторождений*. - 2023. - Т. 65. - №7. - С. 722-752. doi: 10.31857/S001677702307002X

18. Волков А.В. Рудоносные интрузивно-купольные структуры Центральной Чукотки // *Изв. вузов. Геология и разведка*, 1999. № 1. С. 50–59.

19. Волков А.В., Гончаров В.И., Сидоров А.А. Месторождения золота и серебра Чукотки. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2006.

20. Волков А. В., Прокофьев В.Ю., Савва Н.Е. и др. Рудообразование на Au-Ag месторождении Купол, по данным изучения флюидных включений (Северо-Восток России) // *Геология рудных месторождений*, 2012. Т. 54. № 4. С. 350–359.

21. Волков А.В., Сидоров А.А. Экономическое значение эпитермальных золотосеребряных месторождений // *Вестник РАН*. 2013. Т. 83. № 8. С. 27-37.

22. Волков А. В., Галямов А. Л., Сидоров А. А. Перспективы развития добычи золота в Чукотском автономном округе // *Арктика: экология и экономика*. 2017. № 4 (28). С. 83-97.

23. Волков А.В., Савва Н.Е., Колова Е.Е. и др. Au-Ag эпитермальное месторождение Двойное (Чукотка) // *Геология рудных месторождений*. 2018. Т. 60. № 6. С. 590-609.

24. Волков А.В., Прокофьев В.Ю., Сидоров А.А. и др. Условия формирования эпитермальной Au– Ag минерализации Амгуэмо-Канчаланского вулканического поля (Восточная Чукотка) // *Вулканология и сейсмология*, 2019. № 5. С. 68–80.

25. Волков А.В., Прокофьев В.Ю., Винокуров С.Ф. и др. *Эпитермальное Au-Ag месторождение Валунистое (Восточная Чукотка, Россия): геологическое строение, минералого-геохимические особенности и условия рудообразования* // Геология рудных месторождений. 2020. Т. 62. № 2.
26. Волков А. В., Галямов А. Л., Белоусов П. Е., Вольфсон А. А. *Применение космических технологий в металлогеническом анализе территории Арктической зоны России* // Арктика: экология и экономика. – 2020б. - № 2 (38). - С. 77-85. -. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-2-77-85
27. Волостных Г. Г., Михайлова И. С. *Прогнозные свойства аргиллизированных пород* // Записки РМО, 2011. Ч. СХХХХ, № 4. С. 27-37.
28. Гермаханов А.А., Черных А.И., Танин Е.В., Казанов О.В., Бурдин Д.Б. *Новые горизонты. Минерально-сырьевой потенциал Чукотского автономного округа* // Недропользование XXI век. 2023. № 3-4 (100). С. 8-14.
29. Глотов В.Е. *Хвостохранилище - качественно новый геологически активный элемент долин горных рек криолитозоны (на примере Северо-Востока России)* // Экологическая геология: науч.-практ., медицинские и экономико-правовые аспекты: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Воронеж, 6-10.10.2009 г. Воронеж: ВГУ, 2009. С. 18-21.
30. Глотов В.Е., Савва Н.Е., Смирнова О.К., Филенко Р.А., Юргенсон Г.А. *Особенности геохимии Карамкенского хвостохранилища* // В сборнике: Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий. Современное минералообразование. Материалы IV Всероссийского симпозиума с международным участием и X Всероссийских чтений памяти академика А.Е. Ферсмана. 2012. С. 2730.

31. Глов В.Е., Гллова Л.П. Преобразования рудных отходов на Северо-Востоке России: геохимические и геоэкологические аспекты // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2014. Т. 16. № 1-3. С. 906-909.
32. Глухов А.Н. Региональная геологическая позиция, структура и минералого-геохимическая зональность золото-серебряного месторождения Купол // Вестник СВНЦ ДВО РАН. - 2008. - № 3. - С. 34-45.
33. Голдырев В.Н. Техногенно-минеральные образования Ново-Широкинского полиметаллического эпитеpмального месторождения (Забайкальский край) // В сборнике: Геология в развивающемся мире. Сборник научных трудов по материалам XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Пермь, 2020. С. 48-53.
34. Голдырев В.Н. Наумов В.А. Геологический анализ техногенно-минеральных образований Au-Ag эпитеpмального месторождения Купол (Чукотский АО) // Сборник трудов конференции «наука и инновации - современные концепции» (г. Москва, 22 мая 2020 г.). Т. 2. М., 2020. С. 117-133.
35. Голдырев В.Н. Полезные компоненты из техногенно-минеральных образований (хемогенно-биогенные способы выделения) // В сборнике: Фундаментальные и прикладные аспекты биоинформатики, биотехнологии и недропользования. сборник статей всероссийской научной конференции с международным участием. Пермь, 2021. С. 33-35.
36. Голдырев В.Н., Наумов В.А. Особенности формирования техногенно-минеральных образований разных типов эпитеpмальных месторождений золота // В сборнике: Геоэкология, инженерная геодинамика, геологическая безопасность. Печеркинские чтения. Сборник научных статей по материалам Международной научно-

практической конференции. Гл. редактор И.С. Копылов. Пермь, 2021. С. 363-372.

37. Голдырев В.Н., Хусаинова А.Ш. Преобразование Au-содержащих техногенно-минеральных образований в зоне криогенеза // В сборнике: Геология в развивающемся мире. Сборник научных трудов по материалам XIV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Отв. редактор И.С. Зорин. Пермь, 2021. С. 22-26.

38. Голдырев В.Н., Коротаев В.С., Наумов В.А., Кислицын Т.В. Минералы-индикаторы золотоносности россыпей в бассейне р. Берелех (Магаданская область) / / Известия Уральского государственного горного университета. 2021а. № 3 (63). С. 44-52.

39. Голдырев В.Н., Наумов В.А., Наумова О.Б. Минерагеническая позиция и геологический потенциал техногенно-минеральных образований золото-серебряного месторождения Валунистое (Чукотский АО) // Вестник Пермского университета. Геология. 2021б. Т. 20. № 2. С. 172-191.

40. Голдырев В.Н., Наумов В.А., Коврижных С.Б., Ощепкова И.В., Макаров К.С. Ресурсный потенциал золота Полуденской техногенной россыпи (Западный Урал) // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. 2021в. № 4 (41). С. 37-45.

41. Голдырев В.Н. Прогнозирование и поиск золотого оруденения в Амгуэмо-Канчаланской металлогенической зоне (Чукотка) // Вестник Пермского университета. Геология. - 2022. - Т. 21, № 1. - С. 72-89.

42. Голдырев В.Н., Осовецкий Б.М., Наумов В.А. Золотоносные взрывные брекчии месторождения Жильное (Чукотка) // Металлогения древних и современных океанов. – 2022а. - Т. 28. - С. 129-133.

43. Голдырев В.Н., Наумов В.А., Хусаинова А.Ш. Бурожелезняковые образования - косвенный поисковый признак золотой эпитермальной минерализации // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского. 2022б. № 25. С. 46-54.
44. Голдырев В.Н., Артемов А.Л., Заводов А.В., Коротаев В.С. Аргиллизированные породы как критерий прогнозирования золотого орудения в пределах рудного поля Кумроч (Центральная Камчатка) // В сборнике: Аэрокосмические методы в геологии. Сборник научных статей IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Под общей редакцией И. С. Копылова. Пермь, 2022в. С. 103-111.
45. Голдырев В.Н., Наумов В.А., Зобачев А.В., Калина К.Н., Пушин К.А. Потаповские проявления золота (Средний Урал) // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. 2022г. № 5 (42). С. 100-109.
46. Голдырев В.Н. Серебро-сульфидно-полиметаллическая стадия минералообразования Амгуэмо-Канчаланской металлогенической зоны (Центральная Чукотка) // В сборнике: Геология в развивающемся мире. Сборник научных трудов по материалам XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых Пермь. Отв. редактор Н.В. Кулакова. Пермь, 2023. С. 20-25.
47. Голдырев В.Н., Осовецкий Б.М., Наумов В.А., Артемов А.Л., Заводов А.В. Пирит эпитермального Au-Ag месторождения Жильное (Чукотский АО): морфология, стадийность образования, продукты преобразования // Отечественная геология. 2023а. № 3. С. 42-56.
48. Голдырев В.Н., Артёмов А.Л., Заводов А.В. Галенит эпитермального Au-Ag месторождения Жильное (Чукотский АО) // В сборнике: Азимут геонаук. Материалы Всероссийской

междисциплинарной молодежной научной конференции. Томск, 2023б. С. 22-27.

49. *Голдырев В.Н., Артёмов А.Л., Заводов А.В. Преобразование сульфидов эпитеpmального Au-Ag месторождения Жильное в условиях криогенеза // В сборнике: Азимут геонаук. Материалы Всероссийской междисциплинарной молодежной научной конференции. Томск, 2023г. С. 27-30.*

50. *Голдырев В.Н., Баландин Е.Д., Наумов В.А. Геолого-экономический потенциал горнопромышленных отходов эпитеpmальных месторождений золота Чукотского АО // В книге: Управление минеральными ресурсами. Орловские чтения. Сборник тезисов II открытой Всероссийской научно-практической конференции, посвященной памяти В.П. Орлова. Томск, 2023д. С. 12-16.*

51. *Горячев Н.А., Волков А.В., Сидоров А.А. и др. Au-Ag оруденение вулканогенных поясов Северо-Востока Азии // Литосфера. 2010. № 3. С. 36-50.*

52. *Горячев Н.А. Месторождения золота в истории Земли // Геология руд. месторождений. 2019. Т. 61, № 6. С. 3-18.*

53. *Гриняев С.Н., Журавель В.П. Вопросы комплексной безопасности в Основах государственной политики России в Арктической зоне до 2035 г.: предыдущий опыт и перспективы реализации // Арктика и Север. - 2020. - № 39. - С. 52-74.*

54. *Гуревич Д.В. Кольцевые структуры: важнейшие механизмы образования // Регион. Геология и металлогения, 2009. № 39. С. 14–23.*

55. *Гуревич Д.В. Картирование купольнокольцевых структур при поисках и разведке порфировых и эпитеpmальных месторождений. Матер. конфер. «Вулканизм и связанные с ним процессы». Петропавловск-Камчатский ИВиС ДВО РАН, 2013. С. 280–290.*

56. Двуреченская С.С. Гипергенные минералы серебряных месторождений. Издание второе, дополненное. – М.: ЦНИГРИ, 2022. – 246 с.
57. Дистлер В.В., Юдовская М.А., Прокофьев В.А. и др. Гидротермальное платиновое оруденение месторождения Ватерберг (Трансвааль, Республика Южная Африка) // Геология рудных месторождений. 2000. Т. 42, № 4. С. 363–376
58. Дьяконов В.В. Фанерозойские палеовулканические сооружения и рудная минерализация медно-молибден-порфирового типа: Автореф. докт. геол.-минер. наук. М., 2011. 78 с.
59. Дьяконов В. В., Котельников А. Е., Усова В. М. Эндогенные оруденения палеовулканических сооружений. Разведка и охрана недр. 2016. № 6. С. 25 - 27.
60. Елманов А.А., Прокофьев В.Ю., Волков А.В., Сидоров А.А., Воскресенский К.И. Первые данные об условиях формирования Ag-Ag эпитермальной минерализации месторождения Жильное (Восточная Чукотка) Россия // ДАН. 2018. Т. 480. № 6. С. 693-697.
61. Емлин Э.Ф. Техногенез - новейший этап геологической истории рудных месторождений Урала // Известия вузов. Горный журнал 1993. №5. С. 23-146 с.
62. Жуланова И.Л., Русакова Т.Б., Котляр И.Н. Геохронология и геохронометрия эндогенных событий в мезозойской истории Северо-Востока Азии. М.: Наука, 2007. 358 с.
63. Журавель В.П. Развитие Северного морского пути: национальный и международный аспект. Научно-аналитический вестник Института Европы РАН, №2, 2019 С. 119-124.
64. Журавкова Т.В., Пальянова Г.А., Калинин Ю.А., Горячев Н.А., Зинина В.Ю. Физико-химические условия образования минеральных

парагенезисов золота и серебра на месторождении Валунистое (Чукотка) // Геология и геофизика. 2019. Т. 60. № 11. С. 1565-1576.

65. Журавлев Г.М., Голдырев В.Н. Гидроксиды железа в алмазоносных отложениях Западного Урала как результат преобразования первичных железистых и сульфидных фаз // В сборнике: Азимут геонаук. Материалы Всероссийской междисциплинарной молодежной научной конференции. Томск, 2023. С. 34-39.

66. Калинин Ю.А., Шелепаев Р.А., Жимулёв Ф.И., Томиленко А.А., Куйбида М.Л., Хусаинова А.Ш., Греку Е.Д., Яковлев В.А., Шаповалова М.О., Затолокина К.И. К минералого-геохимической модели формирования оруденения «Кумрочского типа» (Камчатка) // в книге: научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов. Сборник тезисов докладов XII Международной научно-практической конференции. Москва, 2023. С. 188-192.

67. Кизай И.Н. Условия формирования метасоматитов и оруденения эпитермальных золото-серебрянных месторождений // Геология рудных месторождений. - 2020. - V. 62. - № 5. - Р. 475-480.

68. Козлов А.В., Корзников В.Д. Позиция Au-Pd месторождения Худное в минерагенической схеме Приполярного Урала // Металлогения древних и современных океанов. 2023. Т. 29. С. 98-101.

69. Константинов М.М. Золоторудные месторождения России. М.: Акварель, 2010, 349 с.

70. Котляр И.Н. Золото-серебряная рудоносность вулканоструктур Охотско-Чукотского пояса / И. Н. Котляр; Отв. ред. В. И. Гончаров; АН СССР, Дальневост. науч. центр, Сев.-Вост. комплекс. НИИ. - Москва : Наука, 1986. – 261 с.

71. Котляр И.Н., Русакова Т.Б. Меловой магматизм и рудоносность Охотско-Чукотской области: геолого-геохронологическая корреляция. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2004. 152 с.
72. Кочнева Н.Т., Томсон И.Н., Белов Р.Р. Структура Дальнегорского рудного района по данным компьютерного дешифрирования космических снимков // Руды и металлы, 1998. № 5. С. 26–34.
73. Кочнева Н.Т. Позиция крупных рудных районов в орогенных структурах Центральной Чукотки (по данным морфоструктурного анализа) // Тихоокеанская геология, 2003. Т. 22. № 2. С. 49-56.
74. Кравцова Р.Г. Геохимия и условия формирования золото-серебряных рудно-магматических систем северного Приохотья: автореф. докт. дис. Иркутск, 2005. 23 с.
75. Кравцова Р.Г. Особенности состава самородного серебра золото-серебряного месторождения Роговик (Северо-Восток России) / Р.Г. Кравцова, В.Л. Таусон, Г.А. Пальянова, А.С. Макшаков, Л.А. Павлова // Геология рудных месторождений. - 2017. - Т. 59. - № 5. - С. 385-400. DOI: 10.7868/S0016777017050045
76. Красный Л.И. Геологическое строение СССР и закономерности размещения полезных ископаемых. Том 8. Восток СССР / Л.И. Красный, Г.Ф. Уфимцев, И.В. Беляев [и др.]; Под ред. Л.И. Красного, В.К. Путинцева. 1984. 560 с.
77. Крейтер В.М., Аристов В.В., Волынский И.С. и др. Поведение золота в зоне окисления золото-сульфидных месторождений. – М.: Госгеолтехиздат, 1958. – 266 с.
78. Кузнецов Ю.А. О принципах выделения и классификации фаций магматических пород / Основные идеи М. А. Усова в геологии: сб. Алма-Ата: Изд-во АН КазССР, 1960. 542 с.

79. Кузнецов Ю.А., Дубков А.А., Калиниченко В.Н., Жабин А.В., Варфоломеев С.Д. Исследования микроформ кристаллических соединений благородных металлов в золоторудных месторождениях Евразии // Недра Поволжья и Прикаспия. 2023. № 111. С. 27-37.

80. Лебедев Г.В. Поиски и разведка месторождения полезных ископаемых: учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров "Геология" и специальности "Прикладная геология" / Г. В. Лебедев; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Пермский государственный национальный исследовательский университет". - Пермь : ПГНИУ, 2017 - Т. 1: Прогнозирование и поиски месторождений. Т. 1. - 2017. - 219 с.

81. Лебедев Е.Л. Стратиграфия и возраст Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. М.: Наука, 1987. 175 с. (Тр. ГИН АН СССР; вып. 421).

82. Лейер П.В., Иванов В.В., Раткин В.В., Бундцен Т.К. Эпитермальные золото-серебряные месторождения Северо-Востока России: первые 40Ar – 39Ar -определения возраста руд // ДАН. 1997. Т. 356. № 5. С. 665–668.

83. Малеев Е. Ф. Вулканокластические горные породы. М.: Госгеолтехиздат, 1963. 168 с.

84. Машковцев Г.А., Спорыхина Л.В., Быховский Л.З. Состояние, перспективы использования и развития сырьевой базы твердых полезных ископаемых Арктической зоны России // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2019. № 3. С. 34-45.

85. Нарतिकоев В.Д., Лепешев М.Н., Кочнева Н.Т. Структура и металлогения Иультинского рудного района // Изв. АН СССР. Сер. Геол., 1975. № 2. С. 15–20.

86. Наумов В.А. Минерагения, техногенез и перспективы комплексного освоения золотоносного аллювия. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук / Пермский государственный университет. Пермь, 2010. 42 с.

87. Наумов В.А., Хусаинова А.Ш. Влияние сезонного промораживания и прогрева сульфидов на частицы золота в техногенно-минеральных образованиях// Цветные металлы и минералы. Сборник докладов Девятого международного конгресса. Красноярск, 2017. С. 942-951.

88. Наумов В. А., Наумова О.Б., Фиоруччи А. Гипергенные и техногеогенные преобразования золота в россыпях и техногенно-минеральных образованиях // Породо-, минерало- и рудообразование: достижения и перспективы исследований: труды к 90-летию ИГЕМ РАН. М.: ИГЕМ РАН, 2020. С. 874-877.

89. Наумов В.А., Наумова О.Б., Голдырев В.Н. Алгоритм прогнозной оценки перспектив использования и управления составом техногенно-минеральных образований месторождений золота // В сборнике: Россыпи и месторождения кор выветривания XXI века: задачи, проблемы, решения. Материалы XVI Международного совещания по геологии россыпей и месторождений кор выветривания. Воронеж, 2021. С. 235-236.

90. Новоселов К.А., Котляров В.А., Белогуб Е.В. Сульфоселенид серебра из руд Валунистого золото-серебряного месторождения (Чукотка) // Зап. РМО. 2009. Часть 138. Вып. 6. С. 56–61.

91. Ньюберри Р.Дж., Лейер П.У., Ганз П.Б. и др. Предварительный анализ хронологии мезозойского магматизма и оруденения на Северо-Востоке России с учетом датировок $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ и данных по рассеянным элементам изверженных и оруденелых пород //

Золотое оруденение и гранитоидный магматизм Северной Пацифики. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2000. Т. 1. С. 181–205.

92. Обручев С.В. Материалы для тектоники Северо-Восточной Азии // *Проблемы советской геологии*. 1934. Т. 2, № 6. С. 182-200; Т. 3, № 7. С. 3-16.

93. Округин В.М., Яблокова Д.А., Андреева Е.Д. Новые данные о пирите современных и палеогидротермальных систем Камчатского края // *Материалы ежегодной конференции, посвящённой Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы»*. Петропавловск-Камчатский, ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 324-329.

94. Онищенко С.А., Кузнецов С.К. (2019) Палладий-золотосульфидная минерализация в андезитах на месторождении Чудное (Приполярный Урал). *Вестн. ИГ Коми НЦ УрО РАН*, (6), 20-27.

95. Осовецкий Б.М., Голдырев В.Н. Золото в пирите Ново-Широкинского месторождения (Забайкальский край) // *Геология и полезные ископаемые Западного Урала*. 2023. № 6 (43). С. 57-64.

96. Пальянова Г.А. Минералы золота и серебра в сульфидных рудах // *Геология рудных месторождений*, 2020. Т. 62. № 5. С. 426-449.

97. Парфенов Л.М. Континентальные окраины и островные дуги в мезозоидах Северо-Востока Азии. Новосибирск: Наука, 1984. 192 с.

98. Петровская Н.В. Самородное золото: Общая характеристика, типоморфизм, вопросы генезиса. - Москва : Наука, 1974. - 347 с.

99. Петренко И.Д. Золото-серебряная формация Камчатки : автореферат дис. ... кандидата геолого-минералогических наук : 25.00.11 / Центр. науч.-исслед. геологоразведоч. ин-т цв. и благород. металлов (ЦНИГРИ). - Петропавловск-Камчатский, 2004. - 25 с.

100. Питулько В. М. Влияние криогенеза на формирование вторичных геохимических полей месторождений полезных ископаемых //

Миграция химических элементов в криогенезе / Под. Ред. В. Н. Макарова. Новосибирск: Наука, 1985. С. 21–40.

101. Полин В.Ф. Петрология контрастной серии Амгуэмо-Канчаланского вулканического поля Чукотки. Владивосток: ДВО АН СССР, 1990. 228 с.

102. Полин В.Ф. Проблема возраста Охотско-Чукотского вулканогенного пояса в свете данных о разновременности формирования его звеньев // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2023. № 4 (230). С. 5-19.

103. Полякова Т. Н., Пилицин А. Е., Кременецкий А. А. Фазовые формы золота в системе коренной источник - вторичный ореол при формировании аномальных геохимических полей // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2018. № 1. с. 77-91.

104. Птицын А. Б. Геохимические основы геотехнологии металлов в условиях мерзлоты. Новосибирск: Наука, 1992. 118 с.

105. Птицын А.Б., Абрамова В.А., Маркович Т.И., Эпова Э.С. Геохимия криогенных зон окисления. - Новосибирск: Изд-во «Наука», 2009. 88 с.

106. Романовский Н.Н. и др. Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток. - М.: Недра, 1989. - 514 с.

107. Русанов Р.В., Янникова Ю.Ю., Янникова Л.Ю. Платиноносность Au-Ag формации на примере месторождения Валунистое (Чукотский автономный округ) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2019 – № 4 – С. 71–78.

108. Савва Н.Е., Пальянова Г.А., Бянкин М.А. К проблеме генезиса сульфидов и селенидов золота и серебра на месторождении Купол (Чукотка, Россия) // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (5), с. 597-609.

109. Савва Н.Е., Колова Е.Е., Фомина М.И. и др. Золото-полиметаллическое оруденение в эксплозивных брекчиях: минералогогенетические аспекты (месторождение Сентябрьское, СВ, Чукотка) // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2016. № 1. С. 16-36.

110. Савва Н.Е. Минералогия серебра Северо-Востока России / науч. ред. А.А. Сидоров; СВК-НИИ ДВО РАН. М.: Издательство Триумф, 2018.. 544 с.

111. Сахно В.Г., Полин В.Ф., Акинин В.В., Сергеев С.А., Аленичева А.А., Тихомиров П.Л., Молл-Столкан Е.Дж. Разновременность формирования Амгуэмо-Канчаланского и Энмываамского вулканических полей ОЧВП по данным изотопного датирования//Докл. АН, 2010, Т. 343 № 3. С.365-371.

112. Сахно В.Г., Кузнецов Ю.А., Дубков А.А., Ненахова Е.В. О находках платиноидов в первичных рудах золото-серебряных месторождений Северной Чукотки // Вестник ВГУ. Серия: Геология. 2019. № 3. С. 111-117.

113. Сахно В.Г., Кузнецов Ю.Д. Платиноиды золото-серебряных месторождений и рудопроявлений Охотско-Чукотского и Восточно-Сихотэ-Алинского вулcano-плутонических поясов Дальнего Востока (Россия) // В сборнике: Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России. материалы X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Академия наук Республики Саха (Якутия), Якутское отделение Российского минералогического общества. 2020. С. 293-297.

114. Сергиевский А.П. Геология Кайемравеемского рудного узла и условия локализации золото-серебряного оруденения: автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. М., 2006. 27 с.

115. Сидоров А.А. Золото-серебряное оруденение Центральной Чукотки. М.: Наука, 1966. 146 с.
116. Сидоров А.А., Берман Ю.С., Найборodin В.И. К проблеме возраста субвулканического золотосеребряного оруденения Северо-Востока СССР // Сов. геология. 1970. № 8. С. 77-85.
117. Сидоров А. А. Золото-серебряная формация Восточно-Азиатских вулканогенных поясов. Магадан : СВКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1978. 85 с.
118. Сидоров А.А., Еремин Р.Х. Рудноформационный анализ при прогнозе и поисках рудных месторождений // Общие проблемы геологии и металлогении юга Дальнего Востока СССР. Благовещенск, 1991. С. 93-100.
119. Сидоров А.А., Белый В.Ф., Волков А.В. и др. Золото-серебряносный Охотско-Чукотский вулканогенный пояс//Геология рудных месторождений. 2009. Т. 51, № 6. С. 512-527.
120. Сидоров А.А., Сидоров В.А., Волков А.В. Золотоносные эксплозивные брекчии штока Ванин - новый тип оруденения на Северо-Востоке России // ДАН. 2010. Т. 435. № 6. С. 780-785.
121. Смирнов С.С. Зона окисления сульфидных месторождений. — М.: Изд-во АН СССР, 1951.
122. Стружков С.Ф., Константинов М.М. Металлогения золота и серебра Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. М.: Научный мир, 2005. 320 с.
123. Стружков С.Ф. Провинция Охотско-Чукотского вулканогенного пояса // Золоторудные месторождения России. М.: Акварель, 2010. С. 213–242.
124. Тихомиров П. Л. Меловой окраинно-континентальный магматизм Северо-Востока Азии и вопросы генезиса крупнейших

фанерозойских провинций кремнекислого вулканизма. Москва: ГЕОС, 2020. 376 с.

125. Усов М. А. Фашии и фазы пород эффузивного облика / Основные идеи М. А. Усова в геологии. Алма-Ата: Изд-во АН КазССР, 1960. 542 с.

126. Устиев Е.К. Мезозойский и кайнозойский магматизм Северо-Востока СССР // Материалы по геологии и полезным ископаемым Северо-Востока СССР. Магадан, 1949. Вып. 4. С. 30-51.

127. Устиев Е.К. Охотский тектоно-магматический пояс и некоторые связанные с ним проблемы // Сов. геология. 1959. № 3. С. 3-26.

128. Филатова Н.И. Периокеанические вулканогенные пояса. М.: Недра, 1988. 264 с.

129. Филиппова Г.Г. Стратиграфия и возраст континентальных отложений Центральной и Восточной Чукотки // Тихоокеан. геология. 2001. Т. 20, № 1. С. 85-99.

130. Хомич В.Г., Иванов В.В., Фатьянов В.В. Типизация золото-серебряного оруденения. Владивосток: ДВО АН СССР, 1989. 289 с.

131. Хусаинова А.Ш. Поведение золота в техногенно-минеральных образованиях месторождений золото-сульфидного типа. Автореф. дис.. канд. геол.-мин. н., Новосибирск: ИГМ СО РАН, 2020, 19 с.

132. Чехов А.Д. Тектоническая эволюция Северо-Востока: (океаномор. модель) / А.Д. Чехов; Российская акад. наук, Дальневосточное отд-ние, Северо-восточный науч. центр. Северо-восточный комплекс. науч.-исслед. ин-т. Москва: Науч. мир, 2000. 203 с.

133. Читалин А.Ф., Агапитов Д.Д., Штенгелов А.Р., Усенко В.В., Фомичев Е.В., Гришин Е.М., Воскресенский К.И. Сдвиговая тектоника и золотоносность Колымско-Чукотского региона // Конференция Майнекс Дальний Восток, 2016. (г. Магадан, 14–15 июля 2016). <https://>

minexforum.com/wp-content/uploads/2016/07/4.CHitalin-i-dr_Sdvigovaya-tektonika-izolotonosnost-KolymskoCHukotskogoregiona_2016.pdf.

134. Шило, Н. А. Учение о россыпях / Н. А. Шило - М.: Изд-во Акад. горных наук, 2000. 632 с.

135. Щепетов С.В. Стратиграфия континентального мела Северо-Востока России. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1995. 122 с.

136. Щепотьев Ю.М., Вартамян С.С., Орешин В.Ю., Гузман Б.В. Золоторудные месторождения островных дуг Тихого Океана. М.: Недра. 1989. 244 с.

137. Яхонтова Л.К., Нестерович Л.Г., Двуреченская С.С. Характер окисления серебряных сульфосолей // Докл. АН СССР. 1988. Т. 302. № 4. С. 949–951.

138. Яхонтова Л.К., Зверева В.П. Основы минералогии гипергенеза / Отв. ред. С.А. Щека. - Владивосток: Дальнаука. 2000. - 336 с.

139. Abrams M., Yamaguchi Y., Twenty Years of ASTER Contributions to Lithologic Mapping and Mineral Exploration, Remote Sensing, 2019, Vol. 11(11), 1394, 28 p., DOI: 10.3390/rs11111394.

140. Aylmore, M. G., D. M. Muir (2001), Thiosulfate leaching of gold, Minerals Engineering, 14, 135–174. [http://dx.doi.org/10.1016/S0892-6875\(00\)00172-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0892-6875(00)00172-2)

141. Balci, N., Shanks III, W.C., Mayer, B., Mandernack, K.W., 2007. Oxygen and sulfur isotope systematics of sulfate produced by bacterial and abiotic oxidation of pyrite. Geochim. Cosmochim. Acta 71, 3796–3811.

142. Bodnar R.J., Lecumberri-Sanchez P., Moncada D., Steele-MacInnes P. Fluid Inclusions in Hydrothermal Ore Deposits // Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Treatise on Geochemistry / 2nd Edition. Amsterdam; San Diego, CA, USA: Elsevier, 2014. P. 119-142.

143. Buchanan L (1981) *Precious metal deposits associated with volcanic environments in the Southwest. Ariz Geol Soc Dig XIV: 237-262.*
144. Cook D.R., Hollings P., Walshe J.L. *Giant Porphyry Deposits: Characteristics, Distribution, and Tectonic Controls // Econ. Geol. 2005. V. 100. P. 801–818.*
145. De Silva S., Zandt G., Trumbull R., Viramonte J.G., Salas G., Jiménez N. *Large ignimbrite eruptions and volcano-tectonic depressions in the Central Andes: a thermomechanical perspective // Geological Society, London. Special Publ. 2006. Vol. 269. P. 47–63*
146. Di Tommaso I., Rubinstein N. *Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina // Ore Geology Reviews. - 2007. - V. 32. - P. 275-290.*
147. Goldyrev V. N., Naumov V. A. *Technogenic-mineral resources "High Sulfidation" of the epithermal Cu-Au-Ag deposit Chelopech (Bulgaria). Part 1. Geological features and technogenesis // Science. Education. Practice : proceedings of the International University Science Forum (Canada, Toronto), July 8, 2020a. Part 2. P. 151-163.*
148. Goldyrev V. N., Naumov V. A. *Technogenic-mineral resources "High Sulfidation" of the epithermal Cu-Au-Ag deposit Chelopech (Bulgaria). Part 2. Technogenic mineral formations, technogeogenesis and technogenic ore genesis // Science. Education. Practice : proceedings of the International University Science Forum (Canada, Toronto), July 8, 2020b. Part 2. P. 164-175.*
149. Goldyrev, V., Naumov, V., Kovyryzina, U. (2023). *Resource Potential of Technogenic-Mineral Formations of Santo Tomas II Gold-Copper-Porphyry Deposit (Philippines). In: Isaeva, E., Rocha, Á. (eds) Science and Global Challenges of the 21st Century – Innovations and Technologies in Interdisciplinary Applications. Perm Forum 2022. Lecture Notes in Networks*

and Systems, vol 622. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-28086-3_31

150. Hedenquist J.W., Browne P.R. Allis R.G. *Epithermal gold mineralization. Wairakei, New Zealand*. 1988. 169 p.

151. Kalinowski A., Oliver S. (2004) *Aster Mineral Index Processing, Manual. Remote Sensing Application Geosciense*, 36 p.

152. Lipman P.W. *Subsidence of ash-flow calderas: relation to caldera size and magma chamber geometry* // *Bul. Volcanol.* 1997. Vol. 59. P. 198–218.

153. Mars J.C., Rowan L.C. *Regional mapping of phyllic- and argillic-altered rocks in the Zagros magmatic arc, Iran, using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data and logical operator algorithms* // *Geosphere*. - 2006. - V. 2 (3). - P. 161-186.

154. McDonough W.F., Sun S. *The composition of the Earth* // *Chemical Geology*. 1995. Vol. 120. P. 223-253.

155. McDonald, I. and Vaughan, D.J., (1995) *Platinum mineralization in quartz veins near Naboomspruit, central Transvaal*. *South African Journal of Geology*: 98: 168-175.

156. Pankhurst R.J., Leat P.T., Sruoga P., Rapela C.W., Marques M., Storey B.C., Riley T.R. *Chon Aike silicic igneous province of Patagonia and related rocks in Antarctica: a silicic LIP* // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 1998. Vol. 81. P. 113–136.

157. Rajendran S., Nasir S. *Characterization of ASTER spectral bands for mapping of alteration zones of volcanogenic massive sulphide deposits* // *Ore Geology Reviews*. - 2017. - V. 88. - P. 317-335.

158. Savva, N.E., Kolova, E.E., Fomina, M.I. et al. *Gold mineralization in explosive breccia bodies: mineralogical characterization and genetic aspects (Sentyabrsky NE Deposit, Chukotka Region, Arctic Russia)*. *Arktos* 3, 6 (2017). <https://doi.org/10.1007/s41063-017-0033-8>

159. Schippers, A., Rohwerder, T., Sand, W., 1999. Intermediary sulfur compounds in pyrite oxidation: implications for bioleaching and biodepyritization of coal. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 52, 104–110.
160. Sillitoe R.H. Porphyry-copper systems // *Econ. Geol.* 2010. Vol. 105. P. 3-41.
161. Simmons S.F., White N.C., John D.A. Geological characteristics of epithermal precious metal and base metal deposits // *Econ. Geol.* 2005. V. 100. P. 485–522.
162. Sowkins F. J. *Metal Deposits in Relation to Plate Tectonics*. 2-d Revised. Springer Verlag. Berlin. 1990. 461 p.
163. Webster J.G. The solubility of gold and silver in the system Au-Ag-S-O₂-H₂O at 250 C and 1 atm // *Geochim. et cosmochim. acta.* 1986. Vol. 50. № 9. P.1837–1845.
164. Williams H. *Calderas and their origin* // *Bul. Dep. Geol. Sci. University of California Publications*. 1941. Vol. 25. P. 239–346.