

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

Кузнецов Максим Вадимович

**Геологическое строение, комплексное использование недр и экономическая
оценка золоторудного месторождения Дяппе (Хабаровский край)**

Специальность 1.6.10. Геология, поиски и разведка твердых полезных
ископаемых, минерагения

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:
кандидат геолого-минералогических наук
Богуславский Михаил Александрович

Москва – 2026

Введение.....	4
Глава 1. Геология района месторождения Дяппе	10
1.1. Физико-географический очерк	10
1.1.1. Административное и географическое положение.....	10
1.1.2. Климат.....	10
1.1.3. Орогидрография.....	11
1.1.4. Экономическая освоенность района.....	11
1.2. Краткие сведения об изученности района.....	13
1.2.1. Геологическая изученность	13
1.2.2. Поисковая изученность	14
1.2.3. Геофизическая изученность.....	16
1.3. Геологическое строение района	18
1.3.1 Структура района месторождения	18
1.3.2. Стратиграфия	19
1.3.3. Интрузивные образования	21
1.3.4. Метаморфические и гидротермально-метасоматические образования	22
Глава 2. Геология месторождения Дяппе	24
2.1. Геологическое строение месторождения	24
2.2. Структурные особенности месторождения.....	27
2.3. Залегание рудных тел	41
2.4. Вещественный состав руд	47
2.5. Геологическая 3D модель месторождения.....	59
2.5.1. Статистический анализ.....	60
2.5.2. Геологическая 3D модель месторождения.....	64
2.5.3. Подсчёт запасов	67
2.5.4. Заверка построенной модели.....	70
Глава 3. Возможность комплексного подхода к отработке	77
3.1. Особенности нахождения сурьмы на месторождении.....	77
3.2. Оценка ресурсов сурьмы на месторождении	79

Глава 4. Рудный кластер на базе Дяппе-Спорненского рудного узла	83
4.1. Оценка параметров предполагаемого объекта.....	83
4.2. Оценка параметров затрат на транспортировку	84
4.3. Оценка экономики разработки нового объекта	87
4.4. Мартемьяновское месторождение.....	89
Глава 5. Экономическая переоценка месторождения Дяппе.....	92
Заключение	99
Список сокращений	101
Список литературы	102

Введение

Актуальность исследований

Месторождение Дяппе – крупное месторождение золота в Хабаровском крае, которое до последнего времени оставалось малоизученным: в исследованиях предыдущих лет основное внимание уделялось вещественному составу руд и вмещающих пород, тогда как структурным аспектам рудообразования не уделялось должного внимания. В частности, оставалась неясной взаимосвязь между региональным тектоническим планом и кинематикой локальных рудоконтролирующих разломов. Как следствие, не была сформирована концептуальная структурная модель, описывающая последовательность и геодинамические условия формирования рудных тел.

По результатам современных геологоразведочных работ на государственный баланс были поставлены запасы основного компонента – золота, несмотря на то, что исторически отработка велась комплексно на золото и сурьму. Проведенный анализ показал, что сурьма формирует рудные тела со специфической морфологией и условиями локализации. Как следствие, разведочная сеть и методика геологоразведочных работ, оптимизированные для подсчета запасов и установления локализации золота, не позволили объективно дать достоверную качественную и количественную оценку запасов сурьмы.

Ключевой проблемой вовлечения в отработку объектов Дяппе-Спорненского рудного узла является упорный характер руд, что делает экономически нецелесообразной разработку локальных месторождений по отдельности. В связи с этим актуальность работы также состоит и в научном обосновании рассмотрения объектов рудного поля в едином кластере. Предлагаемый кластерный подход, основанный на геологическом единстве объектов и их совместном вовлечении в отработку, позволяет рассматривать их как единую сырьевую базу для формирования рентабельного горно-обогачительного производства.

Степень разработанности

Геологическое изучение Дяппе-Спорненского рудного узла ведётся с начала XX века в связи с открытием и начавшейся отработкой россыпей золота в бассейнах рек Пильда и Лимури. В 1914 году золотопромышленником И.С. Мартемьяновым было открыто и разведывалось первое в этом районе золоторудное месторождение, названное в его честь - Мартемьяновским. С начала тридцатых годов XX века в связи с развитием поисковых работ на золото и другие полезные ископаемые начинается более систематическое геологическое изучение района.

Особо следует отметить материалы недавних геологоразведочных работ, выполненных в рамках подготовки ТЭО постоянных кондиций. Полученные данные бурения по плотной

разведочной сети и проходки траншей послужили фактологической основой и обеспечили возможность проверки гипотез, выдвигаемых в настоящем исследовании.

Несмотря на большой объем проведённых предшественниками работ, активное вовлечение в разработку месторождений в изучаемом районе не ведётся. В этой связи в настоящей работе предлагается подход совместной разработки месторождений в виде отдельных кластеров. В советский период эта идея реализовалась через территориально-производственные комплексы, а в новом столетии активное предложение концепций выдвигалось в середине 2010-ых Райхлиным А.И., Коневым А.А., Макаровым В.А., Шульгиной К.А., Богдановской С.Ф., Мироновой Ж.В., Кузиной Л.Н. и Никифоровой В.В.

Цели и задачи

Основной целью диссертационной работы является обоснование структурного контроля оруденения месторождения Дяппе, где особое внимание уделяется морфологии рудных тел. Обновление представления о рудных телах привело к новой геолого-экономической оценке объекта.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие научные задачи:

- Формирование геолого-структурной модели, описывающей последовательность и геодинамические условия формирования структуры месторождения;
- Построение 3D моделей месторождения с учётом структурного фактора контроля золотого оруденения;
- Построение многовариантных финансово-экономических моделей Дяппе с учётом возведения собственных перерабатывающих мощностей полного цикла.
- Анализ залегания сурьмяной минерализации и оценка её ресурсной базы;
- Оценка перспективы совместного освоения объектов в рамках единого кластера на примере месторождения Дяппе и Дяппе-Спорненского рудного узла.

Объект и предмет исследования

Объектом диссертационного исследования выступает золоторудное месторождение Дяппе, расположенное в Ульчском районе Хабаровского края. В 1935 г. геологом С.А. Орешкиным было открыто золоторудное месторождение Дяппе. По результатам проведённых геологоразведочных работ в 2019 году для него были утверждены запасы по категории C1+C2 Au 62,3 т при среднем содержании 2,23 г/т. Помимо Дяппе, в охват исследования включено Мартемьяновское месторождение, входящее в Дяппе-Спорненский рудный узел. Предметом исследования являются структурные факторы локализации оруденения, определяющие геологическую модель и параметры запасов месторождения Дяппе, а также условия, влияющие на его геолого-экономическую оценку.

Научная новизна исследования

В настоящей работе предлагается уточнённое структурное положение и пространственная ориентировка золоторудных тел месторождения Дяппе. Оценены ресурсы сурьмы на месторождении Дяппе и изучена возможность совместной отработки с основным компонентом. Предложена методика оценки целесообразности вовлечения соседних объектов в совместную отработку в рамках единого кластера.

Теоретическая значимость

Установлено, что морфология и пространственное положение рудных тел месторождения Дяппе определяются структурным фактором. На этой основе построена геологическая модель с наклонным залеганием рудных тел. Также сформировано представление о сурьмяной минерализации в виде отдельных гнезд с антимонитом.

Практическая значимость

Полученное представление о морфологии рудных тел с учётом структурного фактора позволило выявить новые участки с рудными телами, потенциально соединяющие руду, выявленную в траншеях и на глубине. Полученный результат может быть использован для корректировки стратегии последующих разведочных работ и проведения дополнительного бурения для оценки новых выявленных участков.

Сформированная позиция и морфология рудных тел сурьмы, а также оценка её ресурсов позволяют принять во внимание возможность комплексной отработки руд. Расположение сурьмяной минерализации внутри проектного контура карьера даст возможность снизить объёмы отходов, направляемых в отвалы, делая недропользование рациональным, а также увеличить выручку при разработке месторождения.

Обоснование возможности совместной отработки близлежащих объектов открывает перспективы для увеличения ресурсной базы и оптимизации затрат на инфраструктуру и переработку руд. Это особенно актуально в условиях истощения запасов действующих месторождений и необходимости освоения новых объектов. Важно, что авторская методика обоснования универсальна и может быть применена на других объектах.

Экономическая переоценка позволяет обосновать строительство целого инфраструктурного комплекса полного цикла, мощности которого могут быть использованы при разработке не только Дяппе, но и близлежащих объектов, что сократит затраты и сроки начала реализаций новых проектов.

Фактический материал

В основе работы лежат исследования, выполненные автором во время обучения в аспирантуре на Геологическом факультете МГУ им. Ломоносова в период 2021 по 2025 год и самостоятельного посещения объекта исследования с отбором материала.

Для написания настоящей работы использован каменный материал, представленный 32-мя штуфными пробами, отобранными для минералого-петрографических исследований.

Ключевую роль сыграли разведочные данные, включающие результаты более 25 тысяч анализов ICP-AES; пробирные анализы золота (более 165 тысяч); документация с фотографиями и описанием более 30 тысяч метров траншей и канав, а также более 110 тысяч метров керна.

Методология и методы исследования

В основу работы легло построение геолого-структурной модели формирования Дяппе-Спорненского рудного узла, описывающей последовательность и геодинамические условия формирования рудных тел. Модель получена путём компиляции данных, актуальных на момент написания настоящей работы. Выявленные из модели структурные факторы контроля оруденения позволили отстроить рудные тела по собственной интерпретации, которые впоследствии были валидированы основными методами: визуальным, геостатистическим и пространственным (SWATH) анализами.

Для геологического моделирования применялись специализированные программы, включая, но не ограничиваясь tNavigator, которые позволили визуализировать структуру месторождения и построить цифровую геологическую модель. В них были оконтурены рудные тела на основе данных опробования и геологической интерпретации, а также отстроены разрывные нарушения, определяющие положения лежащих и висячих блоков и уточняющие распределение минерализации. Использование программных комплексов обеспечило высокую детализацию модели, что позволило корректно интерпретировать данные, провести подсчет запасов и оценку ресурсов.

В рамках экономической оценки была разработана детальная финансово-экономическая модель, включающая основные формы прогнозной отчетности. Особенностью модели является сценарный подход к рассмотрению вариантов по переработке концентрата: переработка у внешнего переработчика или на собственных мощностях с учётом инвестиций в возведение фабрики и газотурбинной станции как источника тепло- и электроэнергии. Модель построена в Microsoft Excel с использованием динамических формул, что позволило гибко тестировать различные условия и оценивать влияние внешних факторов на финансовые показатели.

При подготовке работы собран, переработан и проанализирован материал более чем из 70 источников, включающих книги, сборники тезисов различных конференций, журналы и фондовые материалы как на русском, так и английском языках.

Защищаемые положения

1) Формирование Дяппе-Спорненского рудного узла происходило в механической обстановке широтного простого сдвига. В этой обстановке развивалось многофазное приоткрытие систем трещин с углами падения около 45° от дневной поверхности конформно

Центральному разлому, где впоследствии развивались метасоматиты, связанные с золотым оруденением.

2) При бортовом содержании 0,2 г/т и сохранении остальных параметров кондиций переоценка запасов месторождения Дяппе с учётом новой концепции залегания рудных тел составляет более 139 т золота. По данным геолого-экономического анализа месторождения Дяппе проект промышленного освоения с вовлечением в отработку 88,5 т запасов, входящих в контур проектного карьера, является рентабельным и позволяет получить NPV (10%) около 60 млрд рублей.

3) Сурьмяная минерализация представлена гнёздами антимонита в кварцевых жилах. Проведённые предшественниками разведочные работы по буровой сети 40х40 метров не позволили достоверно оценить запасы сурьмы. Построенная геологическая модель на основе анализа фондовых материалов и данных ICP анализов дала возможность оценить ресурсы сурьмы в размере около 250 т, включая 60 т для производства дефицитного крупнокускового концентрата.

4) Предлагаемый инфраструктурный проект для Дяппе позволяет пересмотреть геолого-экономическую оценку соседних объектов, что ведёт к увеличению минерально-сырьевой базы района. По авторской методике рассчитаны минимальные средние содержания золота в товарной руде для объектов одного геолого-генетического типа с Дяппе, при которых с учётом логистических издержек сохраняется экономическая эффективность совместного проекта.

Степень достоверности

Материалы диссертации доложены автором в устных докладах на конференциях. Полученные результаты согласуются с исследованиями, представленными в независимой опубликованной литературе.

Апробация результатов

Результаты настоящей работы опубликованы в трёх научных статьях, а также докладывались на международных и российских конференциях:

- 6-я Молодежная научно-образовательная конференция «Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов – от прогноза к добыче», Рудная школа ЦНИГРИ – 2025 г;
- 32-я Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов 2025» – 2025 г.;
- 33-я Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов 2026» – 2026 г.

Публикации

Основные положения, результаты и выводы диссертации отражены в 3 научных статьях, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук.

Личный вклад

Автором лично выполнен весь цикл диссертационного исследования, начиная от постановки задач и разработки теоретических основ их решения, заканчивая анализом полученных результатов. Основой работы являлось проведение геолого-структурного моделирования рудного узла с выявлением структурных факторов контроля рудных тел на месторождении Дяппе. На основе структурной модели была построена многовариантная 3D модель месторождения с различными бортовыми содержаниями; была проведена валидация построенной модели основными методами заверки. На основе полученных горно-геологических параметров была оценена экономика разработки месторождения с построением финансово-экономических моделей. Был проведён анализ сурьмяной минерализации с последующим построением её объемной модели и оценкой ресурсов. Автором предложена собственная методика оценки целесообразности вовлечения соседнего объекта в совместную отработку, основанная на геологическом единстве объектов и экономической обоснованности их вовлечения в отработку.

Автор самостоятельно и вместе с соавторами участвовал в подготовке публикаций по теме проведенного диссертационного исследования. В них вклад автора является определяющим – автор принимал непосредственное участие в постановке научных задач, разработке методик, интерпретации результатов, формулировке выводов, а также в непосредственной подготовке текстов статей.

Объём и структура работы

Диссертационная работа включает введение, 5 глав, заключение и библиографический список. Работа изложена на 107 страницах, содержит 11 таблиц и 61 рисунок. Библиографический список содержит 76 наименований.

Глава 1. Геология района месторождения Дяппе

1.1. Физико-географический очерк

1.1.1. Административное и географическое положение

Золоторудное месторождение Дяппе расположено в Ульчском муниципальном районе Хабаровского края России (Рисунок 1). Участок месторождения находится на левом берегу Амура, в междуречье его притоков: рек Пильда и Лимури. Месторождение приурочено к верховьям ручья Дяппе. Согласно топографической карте, данный район относится к номенклатурному листу М-54-II масштаба 1:200 000.

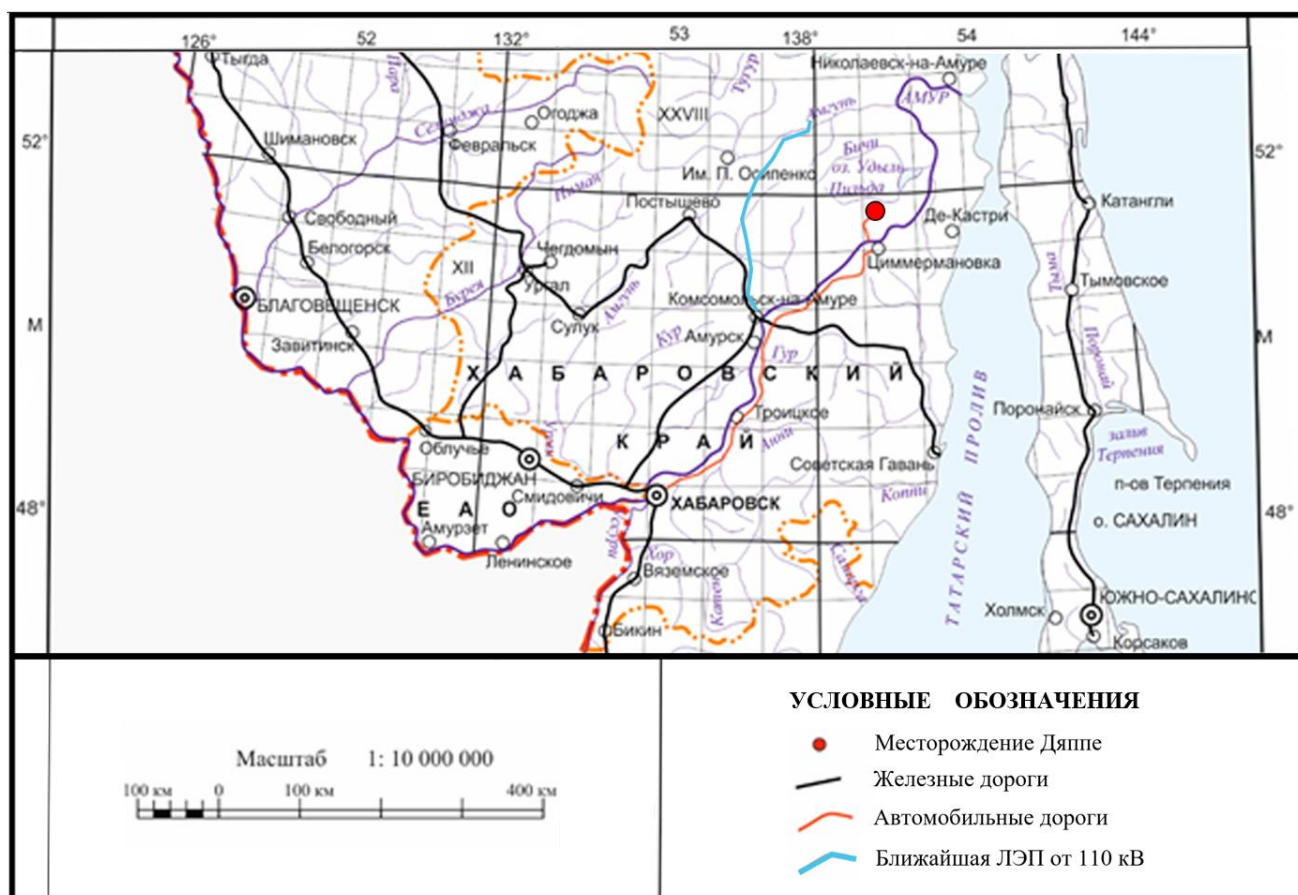


Рисунок 1 – Схема географического расположения месторождения Дяппе

1.1.2. Климат

Климат района муссонный, характеризуется холодной сухой зимой и тёплым влажным летом. Наиболее холодным зимним месяцем является январь, средняя температура -22.0°C . Летом средняя температура составляет $+17.5^{\circ}\text{C}$.

В условиях муссонной циркуляции количество выпадающих осадков за тёплый период почти в два с половиной раза превосходит их количество за холодный. Снежный покров на

рассматриваемой территории, как правило, появляется в ноябре. Средняя высота снежного покрова за зиму составляет 15 см. На май приходится сход снежного покрова.

1.1.3. Орогидрография

Рельеф района представляет собой горно-таежное сильно расчлененное низкогорье с абсолютными отметками от 60.0 до 436.6 м (г. Дяппе). Вершины сопков имеют куполообразную форму с крутизной склонов 5° - 30° (Рисунок 2). Склоны в основном покрыты смешанным лесом с преобладанием лиственницы, ели и берёзы.



Рисунок 2 – Общий вид района месторождения Дяппе

Гидросеть района разветвленная. Все водотоки на площади принадлежат бассейну р. Амур. Главные водные артерии района реки Лимури и Пильда. В районе месторождения основными водотоками являются р. Дали и ее левый приток р. Дяппе, в верховьях которой расположено одноимённое золоторудное месторождение.

1.1.4. Экономическая освоенность района

Месторождение Дяппе находится на территории Ульчского муниципального района Хабаровского края Российской Федерации на левом берегу р. Амур в 600 км от г. Хабаровск. С месторождением имеется автотранспортная связь по маршруту: г. Хабаровск – пос. Селихино –

340 км асфальтированная автодорога; пос. Селихино – пос. Циммермановка – 175 км улучшенная грунтовая дорога; пос. Циммермановка – пос. Киселёвка – 17 км паром по р. Амур в летний период или по льду в зимний период; пос. Киселёвка – месторождение Дяппе – 69 км грунтовая дорога. Затруднения в транспортном сообщении возникают в период ледостава и ледохода. Суммарная протяжённость такого периода составляет порядка двух месяцев в году. Ближайшая от месторождения железнодорожная станция г. Комсомольск-на-Амуре находится в 230 км по автодороге г. Комсомольск-на-Амуре – пос. Циммермановка. Возможна доставка грузов судами речного флота и судами класса «река-море» по р. Амур до причала пос. Киселёвка.

Ближайшим населённым пунктом вблизи месторождения на левом берегу Амура является сельское поселение Киселевка и входящий в него посёлок сельского типа Ключевой с общей численностью населения 742 человека (2012 год). На правом берегу р. Амур в 17 км ниже по течению находится пос. Циммермановка с численностью населения 1203 человека (2017 год). Во всех поселениях есть сотовая связь, однако в районе месторождения она отсутствует.

Экономически район освоен довольно слабо. Ресурсный потенциал района предопределяет развитие традиционных сфер хозяйствования: лесопромышленного комплекса, горнодобывающей и рыбной промышленности. В районе работают лесозаготовительные предприятия. Несколько мелких предприятий занимаются добычей россыпного золота. Местное население в основном работает на лесозаготовительных предприятиях, в местных бюджетных организациях, в период хода лососевых занимается рыбной ловлей. Свободной квалифицированной рабочей силы в районе нет. Энергетическая база отсутствует.

1.2. Краткие сведения об изученности района

1.2.1. Геологическая изученность

В начале XX века в связи с открытием и начавшейся отработкой россыпей золота в бассейнах рек Пильда и Лимури были проведены первые геологические исследования района. В 1914 году золотопромышленником И. С. Мартемьяновым было открыто и разведано первое в этом районе золоторудное месторождение, названное Мартемьяновским. В 1923 г. И. А. Преображенский прошел маршрутом от деревни Киселевка до Агние-Афанасьевской группы россыпных месторождений на р. Пильда. Кварцевые жилы Мартемьяновского золоторудного месторождения И. А. Преображенский оценил отрицательно и высказал предположение, что основным источником россыпного золота являются не эти жилы, а пиритизированные сланцы, пронизанные кварцевыми прожилками и впоследствии названные им «мартемьяновскими».

С начала тридцатых годов XX века в связи с развитием поисковых работ на золото и другие полезные ископаемые начинается более систематическое геологическое изучение района.

В 1954-60 гг. силами ДВГУ и ВСЕГЕИ проводится государственная геологическая съёмка масштаба 1:200 000 Удыльского золотоносного района. Геологическая карта листа М-54-II стала первой утверждённой НРС ВСЕГЕИ и изданной геологической картой масштаба 1:200 000, охватывающей район месторождения [Абрамсон, 1959].

Все интрузивные образования отнесены к двум интрузивным комплексам: верхнемеловому интрузивному комплексу, представленному штокообразными телами кварцевых диоритов и гранодиоритов, сопровождающихся многочисленными дайками умеренно-кислого состава. С кварцевыми диоритами и гранодиоритами верхнемелового интрузивного комплекса, впоследствии объединёнными в нижнеамурский интрузивный комплекс, предполагалась генетическая связь золоторудных месторождений и проявлений.

В период 1984-1989 гг. М. К. Дьячковым были проведены геологосъёмочные работы масштаба 1:50 000 в восточной части листа М-54-I и западной части листа М-54-II [Дьячков, 1989]. В районе месторождения Дяппе им были выделены песчаниковая, алевролитовая и туфопесчаниковая толщи альб-сеноманского возраста. Все интрузивные образования были объединены в позднемеловой нижнеамурский габбро-гранитовый комплекс.

1.2.2. Поисковая изученность

Поисковые работы в Пильдо-Лимурийском районе начались в начале XX века с приходом первых русских поселенцев и появлением вольных старателей, вслед за которыми пришли золотопромышленные компании, искавшие новые золотоносные площади.

В 1935 г. геологом С. А. Орешкиным при проведении поисков россыпного золота было открыто золоторудное месторождение Дяппе. В периоды 1935-1941 гг. и 1947-1948 гг. на месторождении Дяппе и ряде других близлежащих объектов (рудопоявление Дорожное и месторождение Мартемьяновское) силами треста «Приморзолото» были проведены геологоразведочные работы, включающие проходку канав, штолен и отдельных шурфов. Этими работами было установлено, что рудные тела месторождения Дяппе представлены системой кварцевых жил и жильно-прожилковых зон, локализованных в интрузивных породах и во вмещающих их осадочных породах. При описании мощность жил составляла в среднем от 4 до 45 см с протяжённостью от 30 до 800 м. Шурфами и штольнями рудные тела были изучены на глубину до 30 м. Простираение жил северо-восточное ($55-60^\circ$), реже субмеридиональное ($15-20^\circ$). Выделяются как пологие ($15-20^\circ$), так и крутопадающие ($50-60^\circ$) структуры. Жилы характеризуются неравномерным распределением золота. Из сопутствующих элементов присутствовал мышьяк (до 1-2%, редко больше), реже сурьма, висмут; содержание серебра не превышало 1-3 г/т.

В 1936-1941 гг. на месторождении Дяппе проводилась добыча золота, а в 1941-1942 гг. - сурьмы. Добыто 9472 т руды, извлечено 177.6 кг золота, а также добыто 15.0 т сурьмы при 30% её содержании [Юшманов, 2014]. По итогам работ, проведённых трестом «Приморзолото» на месторождении Дяппе, на государственный баланс полезных ископаемых были поставлены забалансовые запасы в количестве 271 тыс. т руды и 1948 кг золота. Среднее содержание золота - 7.2 г/т.

В 1962 г. на площади месторождения Дяппе и в его окрестностях работал отряд Приморской партии ЦНИГРИ под руководством Ю. М. Михайлова, который занимался изучением геолого-структурной позиции и закономерностью распространения оруденения. Важным результатом работы было установление золота не только в кварцевых жилах, но и в окварцованных алевролитах.

Изучение и частичная отработка месторождения проводились лишь в его центральной части. Остальная часть была опойскавана только с поверхности редкой сетью канав, причем основное количество установленных жил было вскрыто лишь в одном пересечении и по простираению не прослежено. В 1966 году в этой связи Г. П. Воларовичем в обобщающей работе по золотоносности южной части Дальнего Востока было представлено мнение, что

месторождение Дяппе изучено недостаточно и рекомендовано продолжить его изучение, акцентируя внимание на поисках крупнообъёмного оруденения штокверкового типа.

В 1984-85 гг. Дяппенской партией Нижне-Амурской экспедиции на месторождении Дяппе проводятся поисково-оценочные геолого-геофизические работы масштаба 1:10 000, которые включали в себя поисковые маршруты, литохимическую съемку, магниторазведку, электроразведку методом ВП, проходку канав и бурение скважин [Бруско, 1988]. В результате этих работ был выявлен ряд не известных ранее рудных тел с промышленно интересными параметрами. Средние содержания золота по пересечениям рудных тел составили от 2.1 г/т до 15.7 г/т, при мощности от 0.3 м до 8.2 м. Прогнозные ресурсы месторождения по категории Р₂ были оценены в 15 т золота при его среднем содержании 7.7 г/т и средней мощности рудных тел 2.0 м.

С 1988 г по 1989 г Удыльской партией этой же экспедиции было продолжено изучение месторождения Дяппе горно-буровыми работами. На этапе оценочных работ центральная часть рудного поля была изучена шестью пересечениями магистральных канав через 320 м. Изучение месторождения на глубину проводилось отдельными скважинами колонкового бурения. Следующим этапом стало сгущение сети канав до 160 м с детализацией на участках развития минерализованных зон и кварцевых жил через 20-80 м. Оценка глубоких горизонтов проводилась наклонными скважинами колонкового бурения по разведочным профилям через 160-320 м. В результате работ были выделены 39 ранее неизвестных золоторудных тел, представленных кварцевыми жильно-прожилковыми зонами и телами метасоматитов кварцевого и серицит-кварцевого состава с прожилково-вкрапленной минерализацией, представленной кварцем, пиритом, арсенопиритом. Мощности рудных тел составили от 0.1 м до 7.6 м, содержания золота в них от 1.0 г/т до 19.1 г/т. Установлено, что рудные тела локализуются как в пределах Дяппенской интрузии, представленной кварцевыми диоритами, так и во вмещающих её осадочных образованиях, представленных алевролитами, алевропесчаниками, туфопесчаниками. Кроме этих 39 рудных тел, скважинами были вскрыты зоны прожилкового и метасоматического окварцевания без чётких контуров, несущие золотую минерализацию. Авторами работы эти зоны были охарактеризованы предположительно как штокверк столбообразной формы. В пределах штокверка по результатам опробования было выделено три рудных тела. Содержания золота в этих рудных телах варьирует от 1.0 г/т до 9.6 г/т.

Таким образом исследования М. К. Дьячкова и др. показали, что рудоносные узлы коррелируют с очаговыми структурами площадью 10–150 км², при этом благоприятной средой размещения руд являются трещиноватые пачки переслаивания песчаников и алевролитов.

В период с 2000 г. по 2007 г. артель старателей «Приморье» проводила на месторождении геологоразведочные работы, с 2008 г. на правах преемственности эти работы продолжало ООО

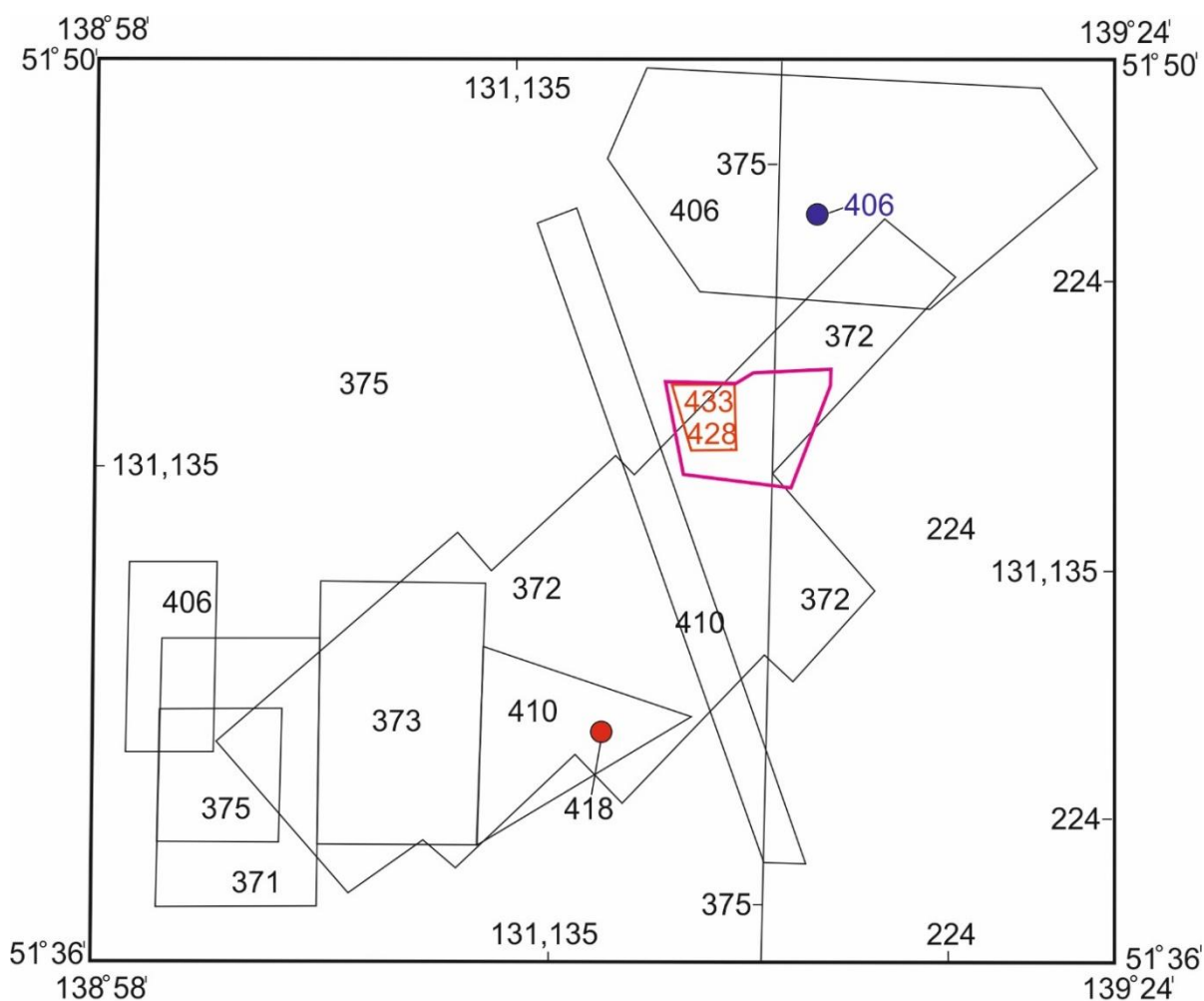
«Дяппе». По результатам проведённых работ в 2012 г было составлено технико-экономическое обоснование временных разведочных кондиций и выполнен подсчёт запасов золота по категории С2. Балансовые запасы составили 7,6 т золота при среднем содержании 2,88 г/т (Рисунок 3) [Екимов, 2012].

К 2018 году были проведены масштабные разведочные работы, включающие буровые работы со средней плотностью сети 40х40 м. Общий объем колонкового бурения составил 114 тыс. п.м. и 383 тыс. м³ канав и траншей. На основании проведённых работ было составлено ТЭО постоянных кондиций с подсчётом запасов золота по категориям С₁+С₂. Балансовые запасы составляют 62,3 т золота со средним содержанием 2,23 г/т. [Чернышёв, 2019].

1.2.3. Геофизическая изученность

Геофизическая изученность района началась в 1958–1960 гг. с аэромагнитной съемки масштаба 1:200 000 [Шапочка и др., 1960], выполненной с помощью аппаратуры АГСМ-25. По результатам этих работ была составлена карта магнитного поля, выявившая прямую связь магнитных аномалий с интрузивными образованиями.

Дальнейшие исследования включали региональную гравиметрию масштаба 1:1 000 000 и высокодетальные комплексные аэрогеофизические съемки масштаба 1:50 000 [Ермилова, 1986]. Последние позволили локализовать аномалии, обусловленные как выходами интрузий среднего и умеренно-кислого состава, так и их скрытыми ореолами. Важным этапом стала гравиметрическая съемка 1988 г. масштаба 1:200 000, на основе которой была обоснована связь золотого оруденения с позднемеловыми купольными структурами [Кузнецов, 1988].



- | | |
|---|--|
| 375 | Групповая геологическая съемка масштаба 1:50000 с участками
детальных поисковых работ масштаба 1:10000 (Дьячков М.К., 1989 г.) |
| 224 | Геологическая карта СССР масштаба 1:200000. Лист М-54-II
(Абрамсон Б.Я., 1959 г.) |
| 372 | Поисковые геолого-геофизические работы на площади Дяппенско-Спорненского
рудного узла масштаба 1:10000 (Бруско Э.Н., 1988 г.) |
| 371 | Региональные геологические исследования масштаба 1:500000 с участками
детальных поисковых работ масштаба 1:25000 (Никитин Ю.И. и др. 1987г.) |
| 373 | Поисковые геолого-геофизические исследования в пределах Пильдо-Лимупийского
золотоносного района масштаба 1:10000 (Степанов Н.Н., 1989 г.) |
| 428 | Поисково-оценочные работы на золоторудном месторождении Дяппе в 2000-2010 годах
с подсчетом запасов и ресурсов (1 этап) (Екимов А.А., 2011 г.) |
| 433 | Технико-экономическое обоснование временных разведочных кондиций и подсчет запасов
на золоторудном месторождении Дяппе по состоянию на 01.01.2012 г. (Екимов А.А., 2012 г.) |
| 406 | Поисково-оценочные и разведочные работы на россыпное золото в бассейне руч. Жорма,
Горикан, Северный, Евгеньевский масштаба 1:2000 (Остапчук В.И., 1995- 2001 гг.) |
| 410 | Поисковые, поисково-оценочные и разведочные работы на россыпное золото в пределах
Удильского золото-россыпного узла масштаба 1:200000 (Павлов В.Н., 1997- 2000 гг.) |
| 418 | Поисковые и разведочные работы на россыпное золото в бассейне руч. Заиграевского, правого
притока р. Дали масштаба 1:2000 (Прибилюк В.И., 2005-2006 гг.) |
| 131 | Гравиметрическая съемка масштаба 1:200000
(Кондратьев Е. М., Пашко В.Ф. и др. 1978 г., покрыт весь район работ) |
| 135 | Комплексная аэрогеофизическая съемка масштаба 1:50000
(Ермилова И. О., Потоцкий Ю.П., 1986 г., покрыт весь район работ) |
|  | Контур лицензии ХАБ 02062 БР |

Рисунок 3 – Схема геологической, поисковой и геофизической изученности района работ
масштаб 1:200 000 [Чернышёв, 2019]

1.3. Геологическое строение района

1.3.1 Структура района месторождения

Согласно карте минерагенического районирования Хабаровского края и Еврейского автономного округа [Васькин и др., 2006] золоторудное месторождение Дяппе входит в Пильдо-Лимурийский рудно-россыпной район Нижнеамурской минерагенической зоны Сихотэ-Алинской минерагенической провинции и локализовано в Дяппенском рудно-россыпном узле, границы которого практически совпадают с границами Дяппенско-Амурканской очаговой структуры (ОС).

В структурном плане район месторождения (Пильдо-Лимурийский район) входит в состав Приамурской структурно-формационной подзоны Западно-Сихотэ-Алинской структурно-формационной зоны Сихотэ-Алинской складчатой системы [Тиньков, 2009].

Район месторождения Пильдо-Лимурийского района находится в Приамурской структурно-формационной подзоне, входящей в Западно-Сихотэ-Алинскую зону Сихотэ-Алинской складчатой системы. Эта зона состоит в основном из осадочных пород мелового периода таких, как альб, сеноман и турон. Формирование самой Приамурской зоны предположительно началось в период турона, одновременно с образованием складчатых и разрывных структур северо-восточного и северо-западного направлений.

Золоторудное месторождение Дяппе локализовано в Лимури-Дяппенской зоне смятия. Эта зона представляет собой блок пород ранне-позднемелового структурного яруса шириной около 6 км, ограниченный Дяппенским и Жорминско-Далинским сдвигами. В пределах этого блока породы интенсивно рассланцованы, разбиты трещинами, перемяты, раздроблены, интродуцированы дайками и мелкими штоками разного состава. В пределах зоны фиксируется развитие зон гидротермально-метасоматических изменений, представленных кварцевыми, кварц-карбонатными и карбонат-кварцевыми жилами и прожилками, зонами сульфидизации, метасоматического окварцевания. К этой зоне приурочено большинство известных в Пильдо-Лимурийском районе проявлений золоторудной минерализации.

Дяппе-Амурканская ОС включает в себя две ОС второго порядка: Дяппенскую и Амурканскую.

Дяппенская ОС имеет изометричную форму, её размер 12×12 км, расположена в верховьях рек Дали, Дяппе, Горикан. В рельефе она проявлена как морфоструктура центрального типа (г. Дяппе). ОС сложена алевролитами и песчаниками ранне-позднемелового возраста алевролитовой и туфопесчаниковой толщ, собранных в синклинальную складку. Ядро складки интродуцировано массивом кварц-диоритового состава. В пределах массива и вмещающих его пород локализовано золоторудное месторождение Дяппе.

Интрузивные образования, сформировавшиеся в орогенный этап в районе месторождения, имеют ограниченное распространение и представлены малыми интрузиями диоритов, кварцевых диоритов, гранодиоритов и дайками разного состава (от основных до кислых). Дайки чаще всего связаны с этими малыми интрузиями, реже сформированы независимо от них.

1.3.2. Стратиграфия

Большая часть территории района месторождения представлена стратифицированными ниже-верхнемеловыми терригенно-осадочными отложениями, в основном песчаниками и алевролитами. В связи с крайней редкостью находок органических остатков разделение разреза на картируемые стратиграфические подразделения было проведено на основе сочетаний двух основных литологических разностей пород с учётом характера ритмичности, мощности слоёв, характерных текстур и других особенностей строения каждого стратиграфического подразделения. На основе данных критериев в пределах района были выделены три толщи: песчаниковая, алевролитовая и туфопесчаниковая [Дьячков, 1989; Бруско, 1991]. Эти отложения смяты в систему антиклинальных и синклинальных складок северо-восточной ориентировки, осложнённых складчатостью более высоких порядков. Принадлежность пород к меловой системе подтверждается палеонтологическими данными – находками пелеципод на водоразделе рек Амуркан и Дали [Абрамсон, 1959].

Меловая система

Нижний отдел

Барремский-альбский ярусы

Песчаниковая толща (K_{1p}) в районе месторождения занимает значительную площадь и распространена в основном на западной части территории в виде широкой полосы северо-восточного простирания. Сложена она преимущественно песчаниками различной зернистости, плохо сортированными и почти всегда включающими угловатые обломки чёрных алевролитов разной величины, алевролитами, прослоями и линзами конгломератов, гравелитов, седиментационных брекчий, туфопесчаников, единичными линзами углей, пластовыми телами спилитов и их туфов.

Нижняя подтолща (K_{1p1}) сложена песчаниками в основном средне- и крупнозернистыми до гравелитистых, реже мелкозернистыми, прослоями и линзами конгломератов, гравелитов, отдельными прослоями алевролитов.

Верхняя подтолща (K_{1p2}) представлена песчаниками разной размерности, алевролитами, пачками их переслаивания, реже линзами гравелитов, конгломератов, седиментационных брекчий, туфоалевролитов, послойными телами спилитов, их туфов, единичными линзами углей.

*Нижний-верхний отделы**Альбский-сеноманский ярусы*

Алевролитовая толща (K_1-2a) распространена в восточной и юго-восточной частях территории района месторождения. Она довольно широкой полосой прослеживается от нижнего течения р. Лимури через бассейны рек Амуркан, Дали, Дяппе и Горикан. Толща в основном сложена алевролитами. Кроме алевролитов, в её составе выделяются песчаники, пачки «флишоидного» переслаивания песчаников и алевролитов, в незначительном объёме присутствуют аргиллиты, кремнистые и кремнисто-глинистые породы, туфы различного состава, туфопесчаники и туфоалевролиты, гравелиты. Взаимоотношения толщи с ниже- и вышезалегающими отложениями – согласные. По литологическому составу и внутреннему строению толща разделена на две подтолщи: нижнюю – песчаниково-алевролитовую и верхнюю – существенно алевролитовую.

Нижняя подтолща (K_1-2a_1). Основу подтолщи составляют пачки грубого и тонкого («флишоидного») переслаивания алевролитов и песчаников. Кроме того, в составе подтолщи отмечаются редкие прослои и линзы туфоалевролитов и туфопесчаников, а также кремнисто-глинистых пород, гравелитов и спилитов. Латеральные изменения подтолщи выражаются в незначительном огрублении отложений и увеличении количества туфового материала в направлении от руч. Золотой Ключ до верховьев рр. Дали и Дяппе.

Верхняя подтолща (K_1-2a_2) на 85% сложена алевролитами. В её составе преобладают кремнистые и кремнисто-глинистые разности с остатками радиолярий; в подчинённом количестве присутствуют мелко- и среднезернистые песчаники, туфопесчаники, аргиллиты, гравелиты, а также туфы дацитового, андезитового и андезибазальтового состава. Характерной чертой разреза является высокая вертикальная изменчивость при относительно слабой латеральной (в направлении с запада на восток). Наблюдается чёткая зональность: в верхней части разреза преобладают кремнисто-глинистые и туфогенные образования, тогда как в нижней они практически отсутствуют, уступая место пестроокрашенным кремнистым породам и алевролитам на кремнистом цементе. Алевролиты часто содержат повышенное содержание органического углерода в пределах 0.33-0.95%, в единичных пробах до 3%.

*Верхний отдел**Сеноманский-туронский ярусы*

Туфопесчаниковая толща (K_2tp) в районе месторождения занимает незначительную площадь, слагая ядра синклинальных складок в междуречье Амуркан-Горикан. В составе толщи преобладают мелко-, средне-, и крупнозернистые песчаники с редкими прослоями и линзами

алевролитов, гравелитов, седиментационных брекчий, туфопесчаников и туфов андезитов. Роль вулканогенного материала в составе толще незначительна.

Четвертичная система

Среднечетвертичное звено (aQ_{II}). Аллювиальные отложения среднечетвертичного звена развиты в северо-восточной части района месторождения, в бассейне реки Горикан. Здесь они выполняют надпойменную террасу 20-40 метрового уровня. Литологический состав отложений разнообразен, преобладают галечники пески, глины, в подчиненном количестве валунные и гравийные отложения, супеси, илы, торф.

Верхнечетвертичное звено (aQ_{III}). Аллювиальные верхнечетвертичные отложения развиты в бассейнах рек Амуркан, Дали и Дяппе, где они слагают надпойменные террасы высотой от 2 до 20 м. Представлены эти отложения валунами, галечниками, песками, суглинками, глинами.

Верхнее и современное звенья нерасчлененные (pdQ_{III-IV}). Проллювиально-делювиальные отложения этого возраста широко распространены вдоль подножий склонов в бассейнах рек Горикан, Дали, Амуркан и Дяппе, где они перекрывают отложения террас более раннего возраста, формируя так называемый делювиальный шлейф. Мощность отложений варьирует от 1-2 до 9 м и более.

Современное звено (aQ_N). Современные аллювиальные образования выполняют русловые и пойменные отложения рек и ручьев и пользуются широким распространением по всем водотокам. Представлены галечниками, валунами, песками, супесями, суглинками, илами. Мощность отложений не превышает 8 м.

1.3.3. Интрузивные образования

В позднем мелу произошло внедрение магматических тел от габбро до лейкогранитов, сформировавших Нижнеамурский интрузивный комплекс [Дьячков, 1989; Бруско, 1991].

Интрузивные образования в районе месторождения представлены тремя фазами Нижнеамурского интрузивного позднемелового комплекса:

Первая фаза. Штоки габбро (v_1K_2n), дайки диабазов ($v\pi$), базальтов (β_1K_2n), андезибазальтов ($\alpha\beta_1K_2n$), андезитов (α_1K_2n) распространены в пределах Лимури-Дяппенской зоны смятия. Размер штоков не превышает 0.75 км^2 . Контакты их крутые. Дайки имеют мощность от первых десятков сантиметров до десятков метров, протяженностью от десятков метров до первых сотен метров. Простирание их северо-восточное, реже западное, меридиональное и широтное. Падение как пологое, так и крутое.

Вторая фаза. Диориты (δ_2K_2n) и кварцевые диориты ($q\delta_2K_2n$), дайки и штоки диорит-порфириров ($\delta\pi_2K_2n$) и кварцевых диорит-порфириров ($q\delta\pi_2K_2n$), дайки андезитов (α_2K_2n). Интрузии и штоки диоритов и кварцевых диоритов установлены в пределах Дяппе-Амурканской очаговой структуры. В плане штоки имеют овальную форму. Площадь наиболее крупной Дяппенской интрузий составляет около 700 м². Дайки имеют преимущественно северо-восточное направление. Мощность их не превышает нескольких десятков метров, а протяженность - первые сотни метров.

Третья фаза. Штоки и дайки гранодиорит-порфиров ($\gamma\delta\pi_3K_2n$), дайки спессартитов ($^s\chi_3K_2n$) развиты в водораздельной части рек Дали, Дяппе. Штоки, дайкообразные и неправильной формы тела гранодиорит-порфиров имеют размеры от несколько десятков квадратных метров до 0.5 км² и сконцентрированы в пределах очаговой структуры.

1.3.4. Метаморфические и гидротермально-метасоматические образования

Метаморфические и гидротермально-метасоматические образования в районе месторождения пользуются довольно широким распространением.

Метаморфические образования, представленные контактово-изменёнными породами, роговиками и ороговикованными породами, сопровождают выходы интрузивных образований. По данным бурения скважин, площади ороговикованных пород и степень их изменения возрастает с глубиной, что указывает на то, что мелкие штоки, дайки и интрузии являются апикальными частями более крупных интрузивных массивов. По минеральному составу роговики представлены кварц-слюдистыми разностями (кварц-полевошпат-биотитовыми).

Гидротермально-метасоматические образования, развитые в районе месторождения, делятся на следующие основные типы:

- метасоматиты кварцевого, серицит-кварцевого и кварц-серицитового состава, а также породы в различной степени, подвергшиеся метасоматическим изменениям кварцевого, серицит-кварцевого и кварц-серицитового состава;
- жилы и прожилки кварцевого состава.

Метасоматиты кварцевого, серицит-кварцевого и кварц-серицитового состава распространены довольно широко в пределах всех очаговых структур. Метасоматиты развиваются как по осадочным, так и по интрузивным породам. Морфология тел метасоматитов и ореолов метасоматических изменений самая различная, но в основном линейная, вытянутая вдоль дизъюнктивных нарушений. Чаще всего это зоны мощностью от нескольких сантиметров до первых метров, изредка до 10 м и более, протяжённостью от первых метров до первых сотен метров. Как правило, кварцевые, серицит-кварцевые и кварц-серицитовые метасоматиты сопровождаются хлоритизацией, карбонатизацией, эпидотизацией и сульфидной

минерализацией (пирит, арсенопирит, пирротин, реже галенит, сфалерит, халькопирит, марказит).

В интрузивных породах наиболее сильно эти изменения проявились кварцевых диоритах и гранодиоритах. Изменения выражены в псевдоморфном замещении породообразующих минералов (плагиоклаза, калий-натриевого полевого шпата, пироксена) серицитом, хлоритом, эпидотом, кварцем, биотитом, лимонитом, сфеном и пиритом, реже отмечаются вторичный амфибол, альбит, мусковит, карбонат и каолинит. Наиболее интенсивные изменения пород отмечаются вблизи мощных разломов и в краевых частях интрузий.

С кварцевыми жилами и зонами прожилкового окварцевания связана вся золоторудная минерализация в районе месторождения. Кварцево-жильные и прожилково-кварцевые зоны пространственно сочетаются с ореолами развития метасоматически изменённых пород. Мощности кварцевых жил варьируются от нескольких сантиметров до 1 м, при их протяжённости первые десятки, реже первые сотни метров. Обычно кварцевые жилы не выдержаны по мощности как по простиранию, так и по падению, имеют форму с частыми пережимами и раздувами.

Зоны прожилкового окварцевания имеют ширину от первых десятков сантиметров до первых десятков метров, протяжённость от нескольких метров до километра. Ориентировка чаще всего северо-восточная. Внутри зон часто появляются интервалы, насыщенные кварцевыми прожилками. Внутри зон по отношению к их основному направлению прожилки могут быть ориентированы по-разному - субпараллельные, ветвящиеся, косо расположенные и т.п. Мощности кварцевых прожилков от долей миллиметра до 2 см.

Глава 2. Геология месторождения Дяппе

2.1. Геологическое строение месторождения

Месторождение Дяппе находится в верховьях р. Дяппе левого притока р. Дали, на водоразделе рек Дяппе, Дали и руч. Горикан в пределах Лимури-Дяппенской зоны смятия. Месторождение приурочено к интрузии кварцевых диоритов (Рисунок 4, 5).

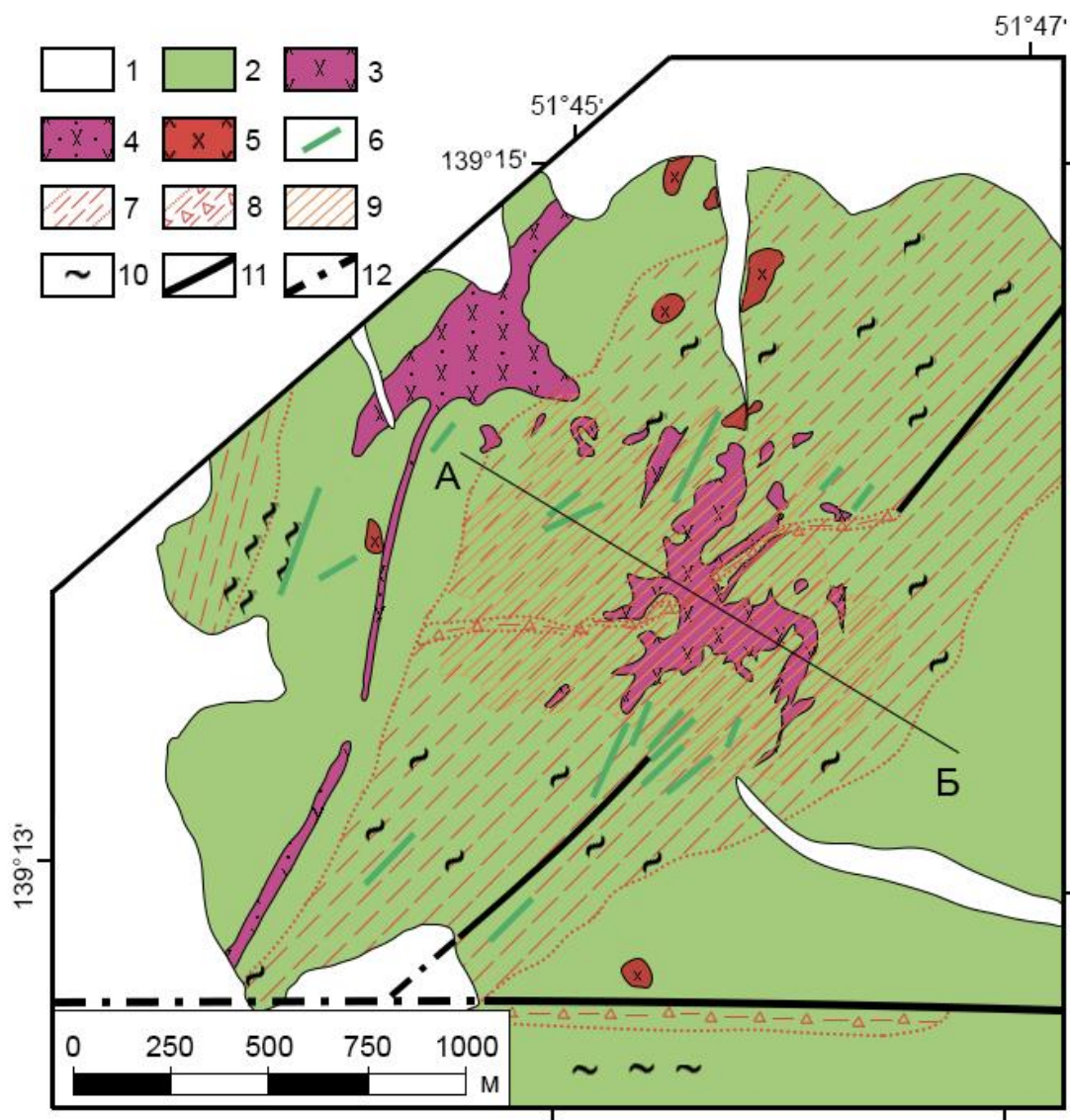


Рисунок 4 – Геологическая карта месторождения Дяппе, с изменениями и добавлениями [Дьячков, 1988; Чернышёв, 2019]. 1 – Четвертичные отложения; 2 – Меловые теригенно-осадочные отложения; 3 – Диориты и кварцевые диориты; 4 – Кварцевые диорит-порфириты; 5 – Гранодиориты; 6 – Дайки и штоки диоритовых и кварцевых диоритовых порфиритов; 7 – Тектониты, зоны смятия; 8 – Тектониты, зоны дробления; 9 – Метасоматиты (серицит-кварцевые); 10 – Кварцевые прожилки; 11 – Разломы установленные; 12 – Разломы скрытые под аллювием

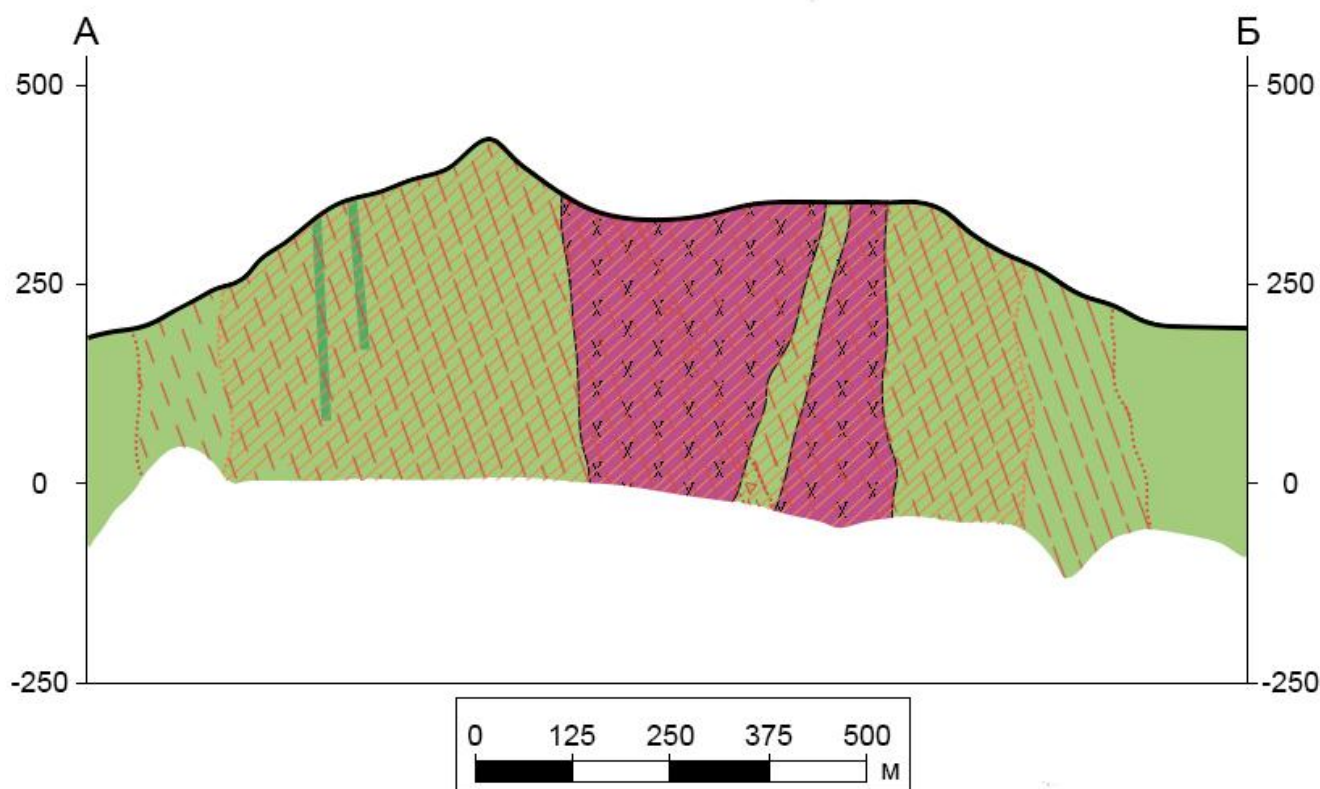


Рисунок 5 – Геологический разрез месторождения Дяппе по линии А-Б. Условные обозначения и линия разреза на рисунке 4

Для месторождения Дяппе характерно сложное геологическое строение, обусловленное широким развитием пликативной и дизъюнктивной тектоники. Наибольшее осложнение в геологическое строение месторождения вносит широкое развитие разрывной тектоники, проявленной как в дорудный, так и пострудный периоды.

Среди факторов, определяющих размещение, геолого-промышленный тип, морфологию, размеры и условия локализации рудных тел в пределах золоторудного месторождения Дяппе можно выделить: структурно-тектонический и гидротермально-метасоматический. Роль каждого из этих факторов была установлена ещё предшествующими работами [Бруско, 1988; Дьячков, 1989; Бруско, 1991].

Большая часть площади месторождения сложена осадочными отложениями, представленными толщей переслаивания песчаников, алевропесчаников и алевролитов ранне-поздне мелового возраста. Характерной особенностью алевролитов этой подтолщи является повышенное содержание в них органического углерода – от 0.17 до 3.0% [Дьячков, 1989], что могло сказаться как благоприятный фактор в процессе рудообразования, но негативно отразилось на технологических свойствах руды. Однообразие пород толщи и отсутствие устойчивых маркирующих горизонтов затруднили выделение и прослеживание складчатых

структур в пределах рудного поля и месторождения, в связи с чем предшественники на геологических картах и разрезах объединили отложения в одну терригенно-осадочную толщу (K1-2a2+K2tp).

Осадочные отложения прорваны позднемеловыми интрузиями диоритов, кварцевых диоритов, гранодиоритов и многочисленными дайками различного состава.

Формирование изверженных пород, развитых на площади месторождения, происходило в 3 фазы (от ранних к поздним):

1 фаза – диориты, кварцевые диориты, диоритовые порфириды, кварцевые диоритовые порфириды; дайки диоритов, спессартитов, диоритовых порфиритов;

2 фаза – гранодиориты; дайки кварцевых диоритов, кварцевых диоритовых порфиритов, гранодиорит-порфиров;

3 фаза – дайки габбродиоритов, дайки гранит-аплитов.

Диориты, кварцевые диориты в центральной части месторождения слагают интрузию (Дяппенская интрузия) площадью около 0.7 км², вытянутую в северо-восточном направлении. Внедрение интрузии, по мнению предшественников [Бруско, 1991], происходило в области пересечения разрывных нарушений с осевой поверхностью синклинали складки. К моменту внедрения интрузии породы, слагающие синклиналь, уже были нарушены серией разрывов, возникших в результате инверсий, произошедших после сенонской фазы складчатости, что сказалось на форме Дяппенской интрузии, принявшей сложный амёбообразный вид. Фациальный состав Дяппенской интрузии неоднороден. В её состав входят диориты, кварцевые диориты, диорит-порфириды, кварцевые диорит-порфириды. Вокруг Дяппенского массива фиксируются интрузивные тела (штоки) диорит-порфиритов, кварцевых диорит-порфиритов, гранодиоритов. Все изверженные породы относятся к позднемеловому Нижнеамурскому интрузивному комплексу. В настоящей работе был принят обобщающий индекс для состава пород, приведенный предшественниками: диориты (δ_2K_2) и кварцевые диориты ($q\delta_2K_2$) Дяппенского массива ($\delta-q\delta_2K_2$).

Метасоматические изменения, сопровождавшие становление изверженных пород, в той или иной степени проявлены во всех породах, представленных на месторождении. Все метасоматические изменения носят однотипный характер. По минеральному составу это пирит-кварц-серицит-карбонатная ассоциация, что соответствует среднетемпературным, кислотным гидротермальным околорудным преобразованиям березитовой формации, т.е. основной метасоматический процесс, проявленный на месторождении – березитизация. Продуктом этого процесса являются кварцевые, кварц-серицитовые и серицит-кварцевые метасоматиты и в различной степени проявленные метасоматические изменения вмещающих пород. Результат собственных исследований образцов небольшого участка рудной зоны Рита указывает на

метасоматические преобразования. Детальнее об этом представлено в главе 2.4, в которой рассмотрен вещественный состав руд.

Гидротермальные образования на месторождении представлены жилами и прожилками кварцевого, карбонат-кварцевого и кварц-сульфидного состава (Рисунок 6). Являясь продуктом единого гидротермально-метасоматического процесса все жилы и прожилки, как правило, пространственно связаны с участками интенсивного окварцевания и березитизации.



Рисунок 6 – Метасоматит серицит-кварцевого состава (по песчанику) с сульфидно-кварцевыми и карбонат-кварцевыми прожилками

2.2. Структурные особенности месторождения

Ниже последовательно разобраны морфоструктурные элементы рудного узла: от регионального генерального разлома до локальных признаков внутри рудного поля. Такой порядок позволяет проверить, складываются ли независимо полученные наблюдения в однозначную кинематическую модель.

Генеральным сдвигом является главный широтный разлом, который пересекает весь лист: длина прослеженной трассы 19,0 км, среднее простирание 93° , местами сопровождается тектоническими брекчиями. Месторождение Дяппе находится в 2,15 км севернее его. Простирание меняется волнообразно с амплитудой $\pm 8^\circ$.

У р. Амуркан, в 7 км к запад-юго-западу от месторождения, разлом несет три кинематических знака: полустрелку на северном крыле, направленную на восток (правый сдвиг),

кружок «+0,3» (северное крыло поднято на 0,3 км) и стрелку падения сместителя к северу – в сумме правый взбросо-сдвиг. Эти знаки расположены там, где простираение разворачивается с 96° до 86° , то есть на входе в изгиб, который при правом смещении является встречным; взбросовая компонента здесь является независимой проверкой механики, поскольку тот же изгиб при левом смещении работал бы как попутный.

Исходя из вышеуказанного, широтный генеральный сдвиг является закартированным главным разломом с прослеженной трассой, изгибами и знаками кинематики (Рисунок 7).

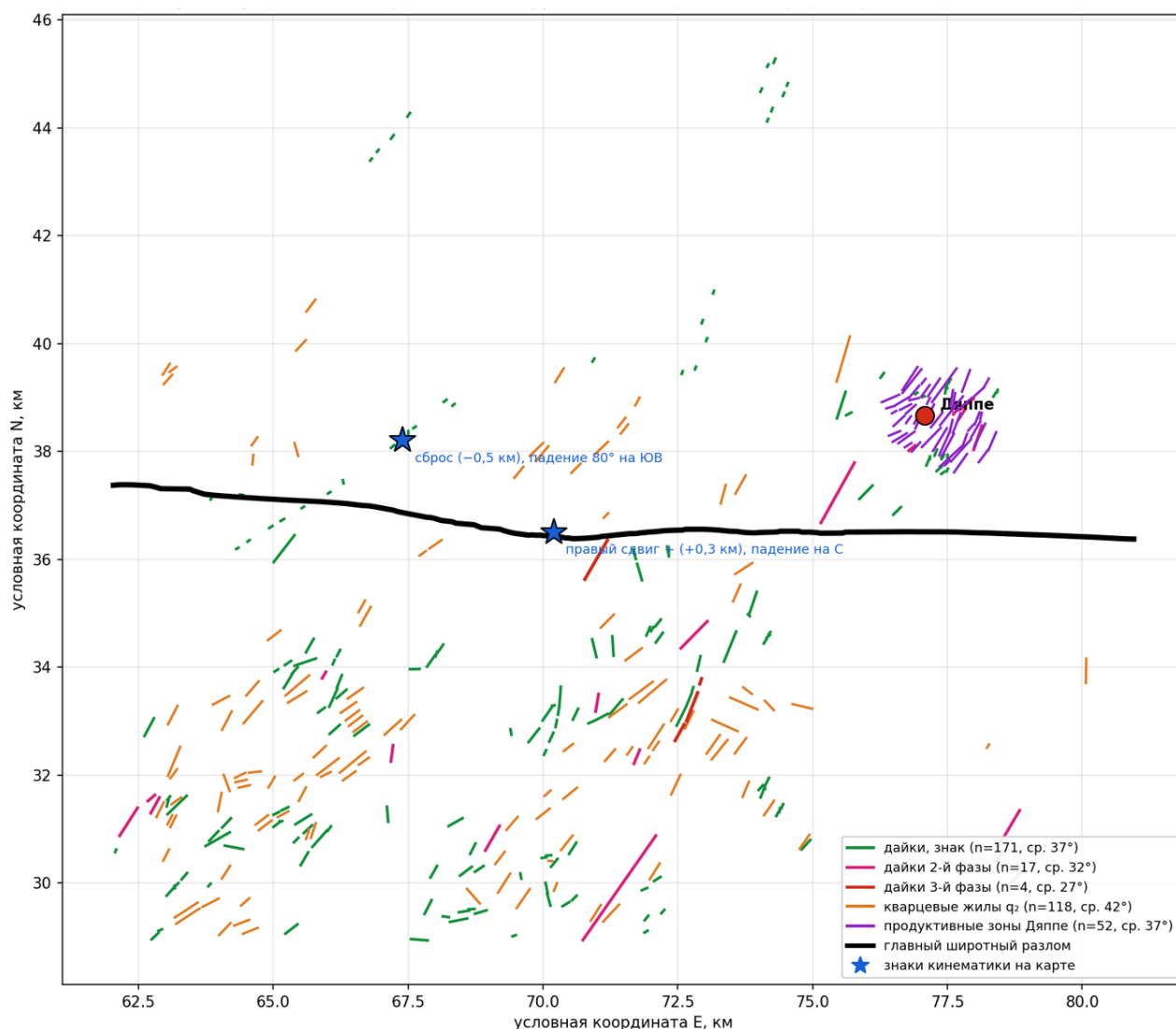


Рисунок 7 – План Дяппе-Спорненского рудного узла с вынесенными дайками, кварцевыми жилами и продуктивными зонами

Согласно системе разрывов Риделя (Рисунок 8) применительно к району Дяппе могут быть выделены следующие трещины: Y – генеральный сдвиг с простираением 93° ; синтетические, того же знака смещения, что и Y: R и P с простираением 78° и 108° , соответственно; антитетические сколы R', имеющие противоположный знак, с простираением 18° и трещины

отрыва Т с простираем 48°. Структуры сжатия (взбросы, складки) - 138° при левом смещении; при правом смещении Т и структуры сжатия меняются местами.

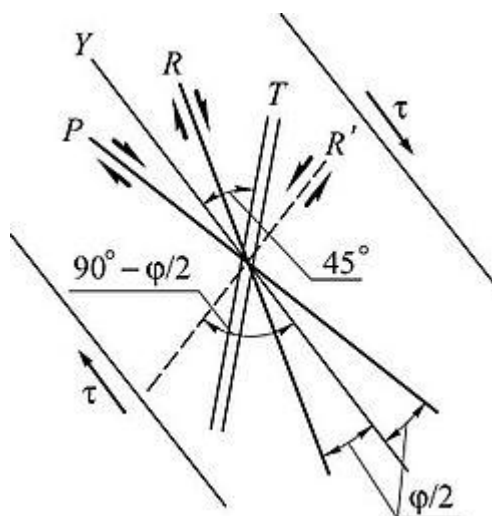


Рисунок 8 – Система сколов и отрывов Риделя (правый сдвиг)

(по В. Риделю, цитируется по: [Тевелев, 2011])

В настоящем анализе введена мера кучности направлений К (степень различия простираения): каждый замер представляется единичным вектором, а К – длина суммы всех векторов, делённая на их число:

$$K = \frac{|\sum_{i=0}^n v_i|}{n}, \text{ где} \quad (1)$$

v – вектор, n – количество векторов.

Чем ближе К к единице, тем теснее сгруппированы направления вокруг среднего; К близкое к нулю означает хаотичный разброс, неотличимый от случайного.

На листе выделен 171 объект даек немасштабного знака суммарной длиной 27,9 км (среднее простираение $37,0^\circ \pm 4,7^\circ$, $K=0,676$), 17 тел даек 2-й фазы в масштабе (9,1 км, среднее $31,9^\circ \pm 6,6^\circ$, $K = 0,911$) и 4 тела даек 3-й фазы в масштабе (1,8 км, среднее $26,6^\circ \pm 6,2^\circ$, $K = 0,986$). Все три фазы совпадают по простираению в пределах $5-10^\circ$. По схеме легенды метасоматиты и кварцевые жилы отнесены ко 2-й фазе интрузивного комплекса, то есть дайки 3-й фазы – послерудные, и поле напряжений сохранялось и после рудоотложения.

Густота даек в контуре рудного поля – 1,9 км суммарной длины на км^2 (комбинированная груша «дайки участка», $n = 27$), тогда как густота зон минерализации в том же контуре 6,1 $\text{км}/\text{км}^2$: т.е. на рудном этапе использовалась существенно более частая система трещин при том же простираении.

Кварцевые жилы q : 118 объектов, 37,6 км, среднее простираение $41,8^\circ \pm 4,6^\circ$, $K = 0,753$. Зоны продуктивной прожилково-вкрапленной минерализации участка: 52 объекта, 15,9 км, среднее $37,2^\circ \pm 4,9^\circ$, $K = 0,851$ (Рисунок 9).

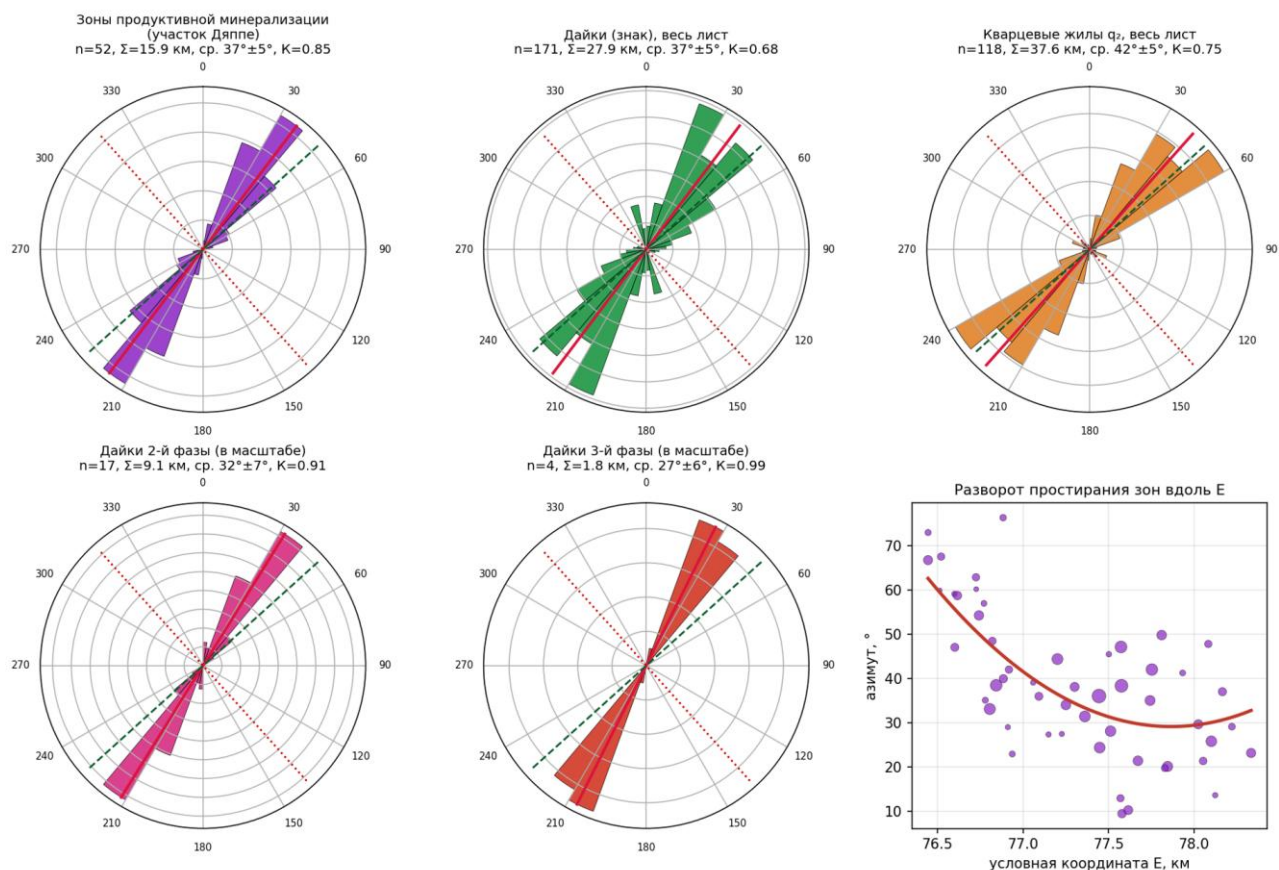


Рисунок 9 – Роза-диаграммы простираций по всему листу, взвешенные по длине: зоны продуктивной минерализации, дайки немасштабного знака, кварцевые жилы q, дайки 2-й и 3-й фаз в масштабе. Справа внизу – график разворота трещин вдоль линии широты

Все 171 дайки-знака объединены со «в масштабе» показанными телами того же состава (17 тел 2-й фазы, 4 тела 3-й фазы). Получены три независимые, представительные выборки (Рисунок 10, 11) (Таблица 1).

Таблица 1 – Выборки даек по фазам

Фаза	Кол-во	Сумма, км	Простираение (K, крит $\alpha=0.05$)
1	18	3,6	$50^\circ \pm 10^\circ$ (K = 0,82, крит = 0,41)
2	131	27,7	$50^\circ \pm 5^\circ$ (K = 0,68, крит = 0,15)
3	43	7,5	$50^\circ \pm 7^\circ$ (K = 0,78, крит = 0,26)

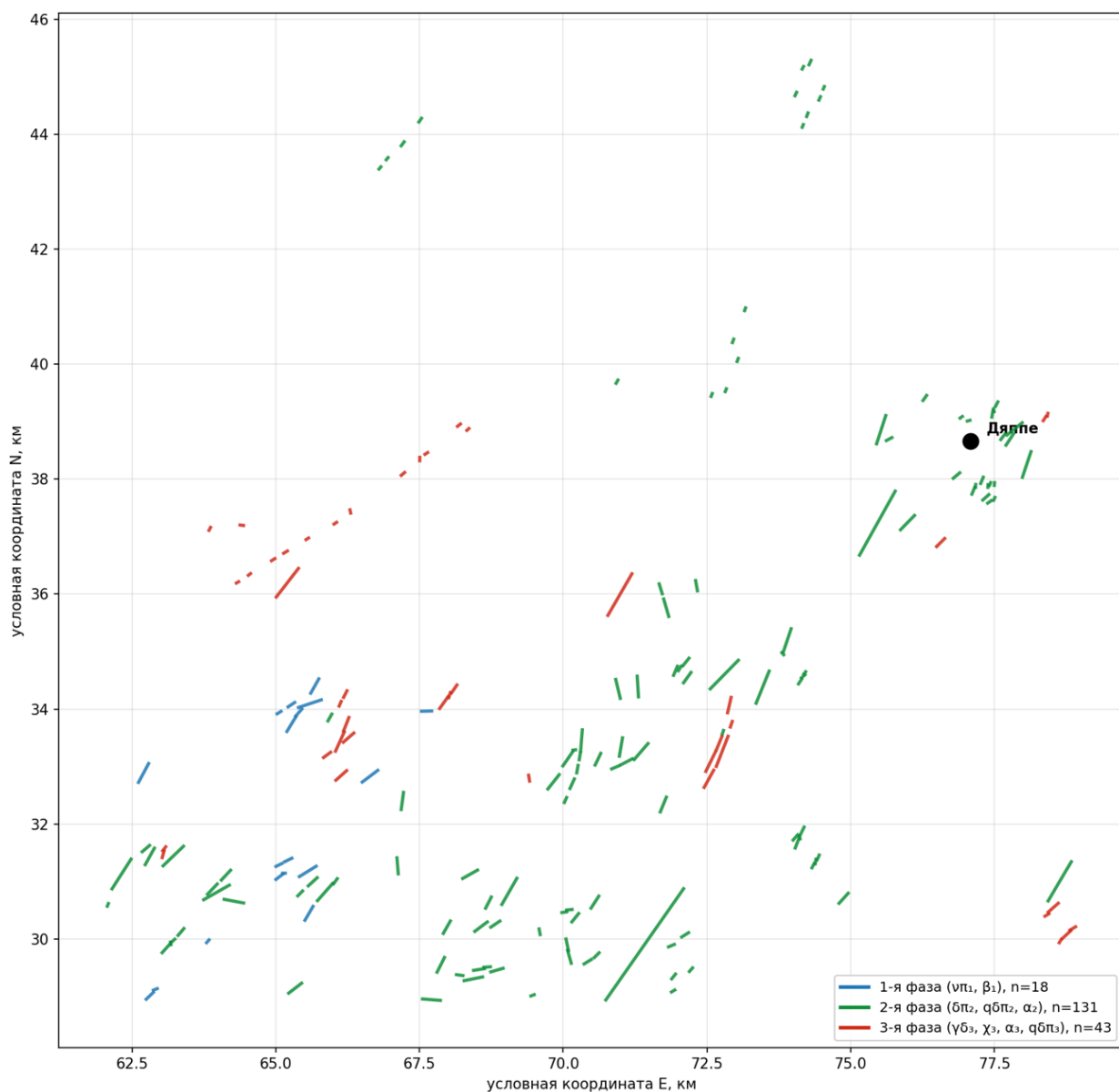


Рисунок 10 – Схема Дяппе-Спорненского рудного узла с дайками, разделёнными по фазам

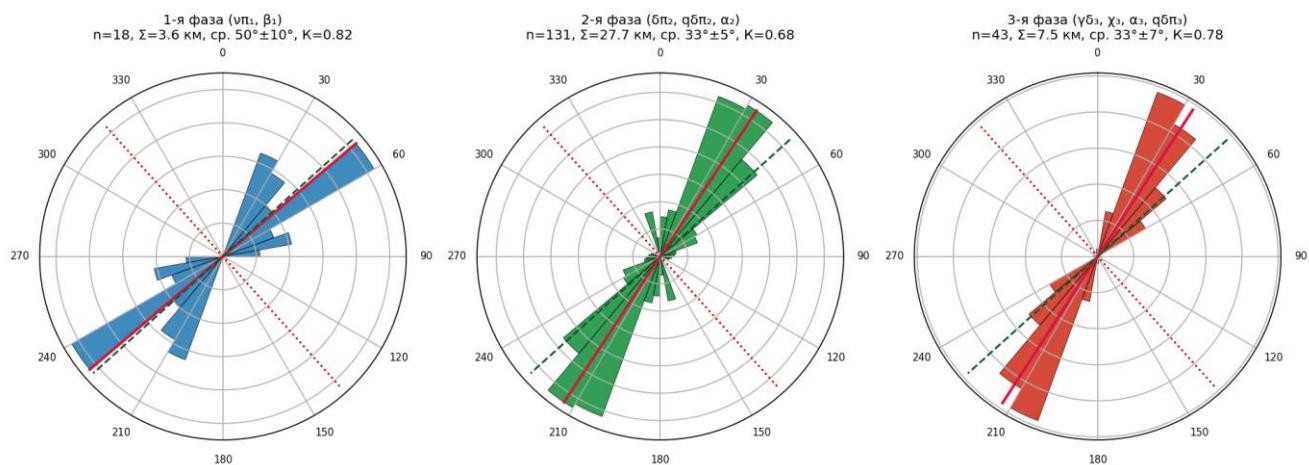


Рисунок 11 – Роза-диаграммы простираций даек по фазам

1-я фаза (габбро. базальты) – самая ранняя и химически наиболее отличная от остальных; её простирание (50°) близко к региональному простиранию складчатости и зон катаклаза (СВ 50°), то есть эти дайки могли использовать унаследованную анизотропию, а не свежую систему трещин отрыва действующего сдвига. 2-я и 3-я фазы, напротив, статистически совпадают на 33° – это означает, что уже развитая, единая система трещин отрыва левого сдвига контролировала оба поздних этапа внедрения и, далее, рудный этап (зоны минерализации, 37° , статистически неотличимы от даек 2-3-й фаз). Иными словами, граница между «унаследованным» и «свежим сдвиговым» контролем проходит между 1-й фазой и всем, что после неё, а не постепенно нарастает от фазы к фазе.

Густота систем растёт от магматического этапа к рудному: 1,9 км даек на км^2 (2-я и 3-я фазы в контуре участка) против 6,1 км зон минерализации на км^2 в том же контуре – рудный этап использовал ту же систему трещин, но при существенно более частом приоткрывании.

Также была проведена оценка накопленной сдвиговой деформации: если трещины отрыва закладывались под 45° к генеральному сдвигу (азимут 48°) и далее пассивно разворачивались, то $\gamma = \text{tg } 48^\circ - \text{tg } \alpha$ даёт около 0,3 для 2-й и 3-й фаз (33°) и всего около 0,05–0,1 для 1-й фазы (50° , то есть почти не развёрнута от исходного положения) – это согласуется с прочтением, что дайки 1-й фазы либо предшествуют развитию этой системы трещин отрыва, либо используют другую, унаследованную структуру (Рисунок 12)

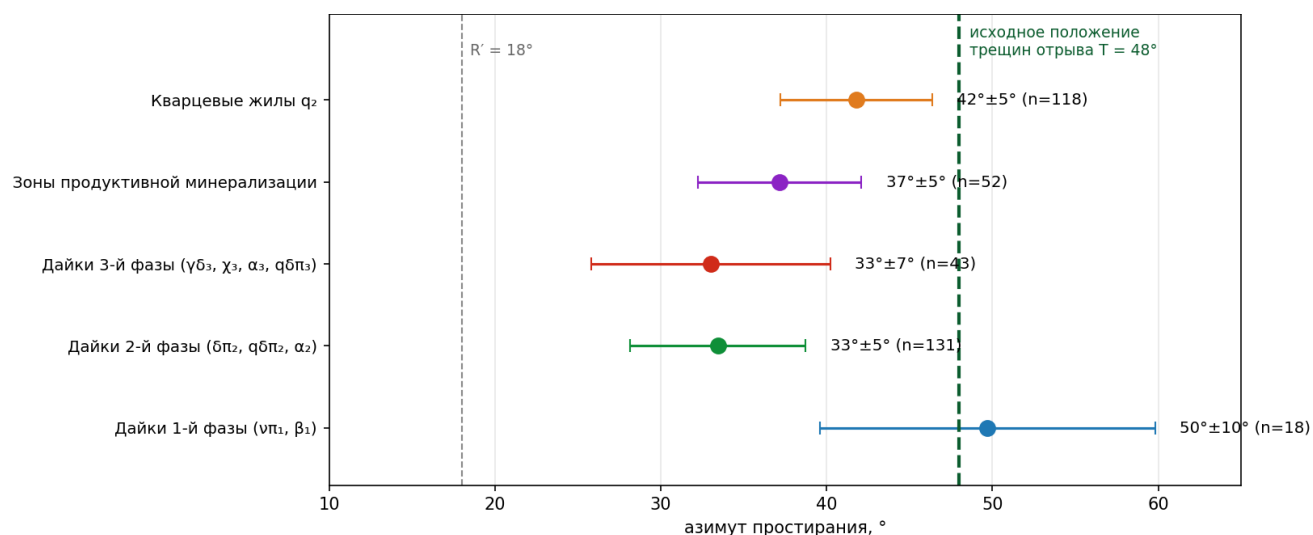


Рисунок 12 – Средние направления даек по фазам и по последующим стадиям

Зона тектонических брекчий в центре рудного поля («Центральная») состоит из двух широтных отрезков, соединённых наклонным: западный отрезок 88° длиной 1,1 км, изогнутый. отрезок 58° длиной 0,8 км и восточный отрезок 85° длиной 0,6 км (Рисунок 13). Изогнутый отрезок развёрнут на 30° против часовой стрелки относительно общего простирания зоны,

суммарный шаг составляет 0,45 км к северу на 0,70 км к востоку. То есть при движении вдоль зоны на восток она делает левый шаг.

Механический смысл этой геометрии однозначен. Левый шаг на широтной зоне при левом смещении есть попутный изгиб: крылья расходятся, возникает локальное растяжение (транстенсия) и раскрывается полость. При правом смещении тот же изгиб становится встречным: крылья сходятся, возникает транспрессия и дробление.

Наблюдаемое заполнение перегиба отвечает первому варианту: изогнутый отрезок пересекает северную часть интрузива кварцевых диоритов, а на него самого приходится максимум густоты рудных зон. Внедрение магмы и отложение руды требуют раскрытия, а раскрытие этого перегиба возможно только при левом смещении по широтным отрезкам. Это является определением знака сдвига на магматическом и рудном этапах по механической необходимости раскрытия, а не по замеренному смещению.

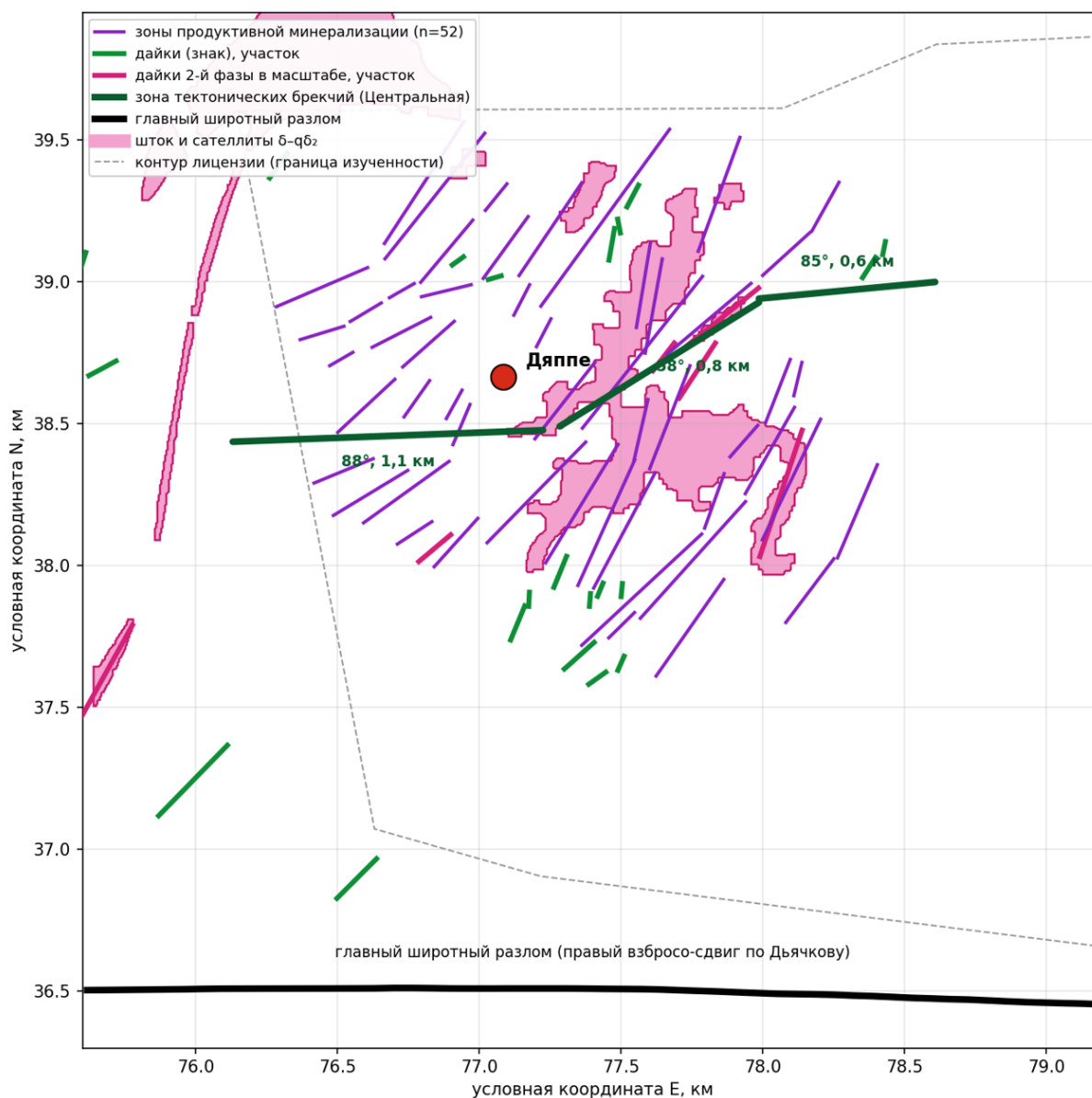


Рисунок 13 – Структурная схема участка месторождения Дяппе

Смена знака фиксируется несколькими независимыми признаками. Кинематический знак на главном широтном разломе – правый сдвиг со взбросовой компонентой $+0,3$ км и падением сместителя к северу – поставлен на отрезке $86-90^\circ$, то есть именно на том изгибе, который для правого смещения является встречным. Дробление при этом носит явно пострудный характер: тектоническая брекчия в зоне Центрального разлома не залечена, а геохимические аномалии на ней обрываются, то есть дробление наложено на рудные тела, а не предшествует им. Сама ширина зоны дробления вдоль всей длины разлома, при отсутствии в ней рудных выполнений, отвечает транспрессии на встречном изгибе, тогда как заполнение того же перегиба интрузивом и рудой отвечает предшествующей транстенсии. Оба состояния зафиксированы в одном и том же месте – в перегибе Центральной зоны и по всей её длине. Поэтому объяснение через пространственное соседство участков транстенсии и транспрессии вдоль одного сдвига здесь не может быть обосновано: перегиб последовательно был раздвигом и зоной сжатия, то есть речь идёт о временной смене знака смещения.

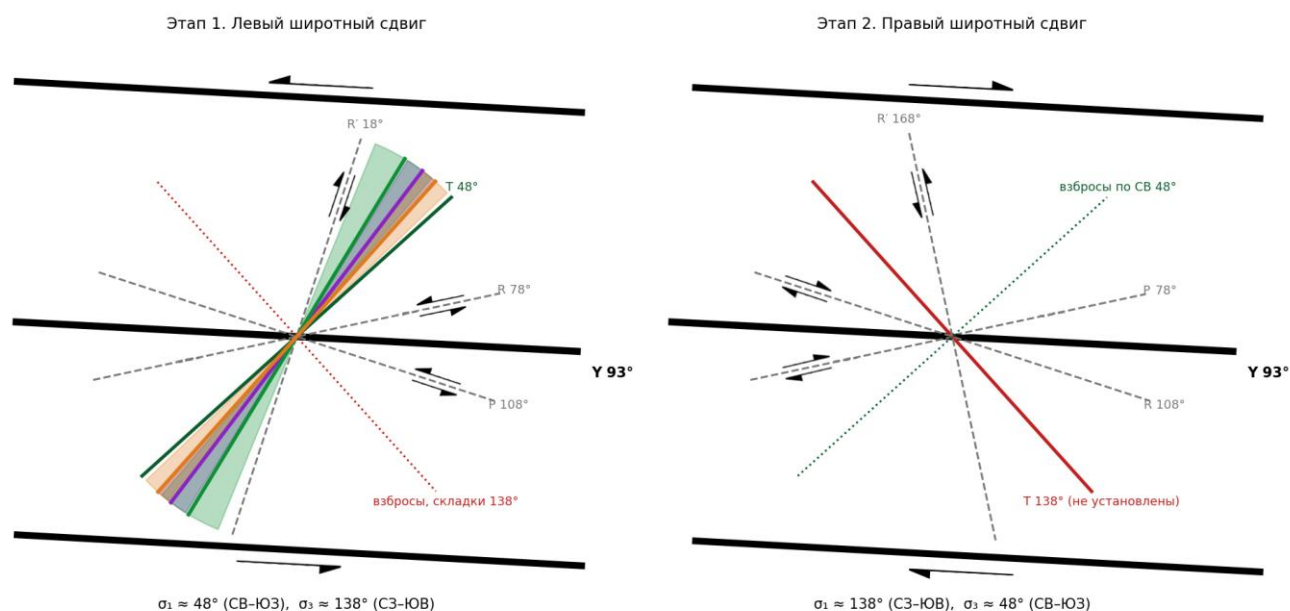


Рисунок 14 – Кинематическая интерпретация двух этапов (левый и правый сдвиг) с вынесением основных структур (даек, жил и продуктивных зон)

Формирование Дяппе-Спорненского рудного узла происходило в механической обстановке широтного простого сдвига, в котором генеральные сдвиги были представлены региональными разломами, имевшими, по крайней мере, два этапа развития. Направление смещения по ним изменилось с левостороннего на первом этапе (Рисунок 15), на правостороннее на втором этапе. Последовательность деформационных событий в районе месторождения на первом этапе представляется в следующем виде:

Этап 1(а), дорудная стадия. Левое смещение по широтным генеральным сдвигам ($Y = 93^\circ$). Формируется зона присдвигового растяжения северо-восточного простирания с сериями трещин

и широких зон отрыва (система Т). В неё внедряются магматические тела – от линейных интрузивов до серий даек 1-й и 2-й фаз. Попутный (левый) изгиб Центральной зоны создает локальную транстенсию, которую занимает интрузив кварцевых диоритов.

Этап 1(б), рудная стадия. После застывания интрузива в той же обстановке происходит его хрупкая деформация; многократно приоткрываются системы трещин, по которым проникают гидротермальные растворы и формируются зоны метасоматитов и продуктивной минерализации. Их среднее простирание (37°) ближе к исходному положению трещин отрыва, чем у более ранних даек ($27-32^\circ$), что качественно согласуется с прогрессивным разворотом при продолжающемся левом сдвиге.

Этап 2. Направление смещения по генеральным сдвигам меняется на правое, ось максимального сжатия разворачивается к 138° . Обстановка присдвигового растяжения сменяется сжатием вкрест северо-восточной зоны ($\sigma_1 = 138^\circ$): попутный изгиб Центрального разлома становится встречным, зона транстенсии – зоной транспрессии, и в её пределах, а также практически по всей длине разлома формируется зона дробления. Новых трещин отрыва северо-западного простирания при этом не возникает, что закономерно для обстановки сжатия и подтверждается отсутствием направления 138° во всех пяти выборках.

Таким образом, формирование Дяппе-Сповненского рудного узла происходило в механической обстановке широтного простого сдвига. Генеральные сдвиги (система Y) представлены широтными региональными разломами, главный из которых прослежен на 19 км при среднем простирании 93° . В этой обстановке сформировалась зона присдвигового растяжения северо-восточного простирания, отвечающая системе трещин отрыва Т. Приоткрытие системы трещин было многофазным: последовательно внедрялись дайки, затем формировались кварцевые жилы и метасоматиты с продуктивной минерализацией. Ранняя, химически иная 1-я фаза отличается от 2-й и 3-й фаз, которые совпадают по простиранию с более поздними зонами минерализации: единая система трещин отрыва левого сдвига контролировала оба поздних этапа внедрения и рудный этап, тогда как 1-я фаза тяготеет к унаследованному простиранию складчатости.

Локализация оруденения контролируется попутным изгибом Центрального разлома. На заключительном этапе смещение по генеральным сдвигам сменилось на правое: обстановка растяжения сменилась сжатием вкрест северо-восточной рудоносной зоны, попутный изгиб стал встречным, транстенсия – транспрессией, и по Центральному разлому сформировалась пострудная зона дробления, фиксируемая незамеченными брекчиями и обрывом геохимических аномалий.

На основе представленного морфоструктурного анализа было произведено сведение концепции в единую хронологическую последовательность. Формирование Дяппе-

Спорненского рудного узла происходило в механической обстановке широтного простого сдвига, в котором генеральные сдвиги были представлены региональными разломами, имевшими, по крайней мере, два этапа развития. Направление смещения по ним изменилось с левостороннего на первом этапе (Рисунок 15), на правостороннее на втором этапе.

В той же механической обстановке левостороннего простого сдвига после застывания интрузива Дяппе произошла его хрупкая деформация, за счет которой приоткрывались многочисленные системы трещин. По этим системам проникали гидротермальные минерализованные растворы, формирующие зоны метасоматитов, что является рудной стадией.

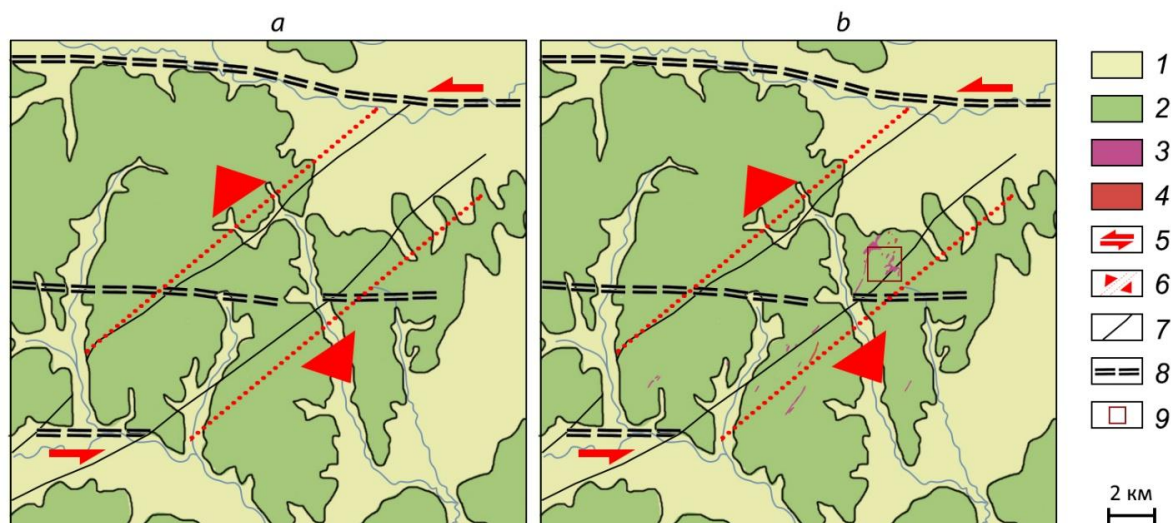


Рисунок 15 – Структурная схема первого этапа становления Дяппе-Спорненского рудного узла, с изменениями [Дьячков, 1989; Бруско, 1991]: 1 – четвертичные отложения; 2 – меловые терригенно-осадочные отложения; 3 – диориты и кварцевые диориты; 4 – гранодиориты; 5 – левосторонние широтные сдвиги, 6 – зона присдвигового растяжения, отвечающая Дяппе-Спорненскому рудному узлу; 7 – внутриблоковые разломы второго порядка; 8 – региональные разломы; 9 – месторождение Дяппе

Для начального этапа минерализации характерна серицит – (серицит-хлорит – эпидот) – кварцевый этап с пирит-арсенопиритовой ассоциацией рудных минералов и привносом небольших порций золота [Пискунов, 1989].

В последующие этапы минералообразования происходило формирование жилообразных кварцевых тел, кварцевых жил и зон прожилкового окварцевания, которые выполняли трещины приоткрывания различной интенсивности. В одну из продуктивных стадий образования кварца и происходило формирование рудных тел с привносом основного количества золота. Привнос золота сопровождался выделением небольшого количества сульфидов пирит-арсенопиритовой ассоциации. Чуть позже, когда привнос золотосульфидной ассоциации минералов резко сократился, началось формирование антимонит-кварцевых рудных тел [Пискунов, 1989].

Одним из элементов этой системы трещин является синтетический Центральный разлом, параллельный широтным генеральным сдвигам. Он имеет попутный изгиб, в зоне которого формировался локальный участок присдвигового растяжения (транстенсии) (Рисунок 16).

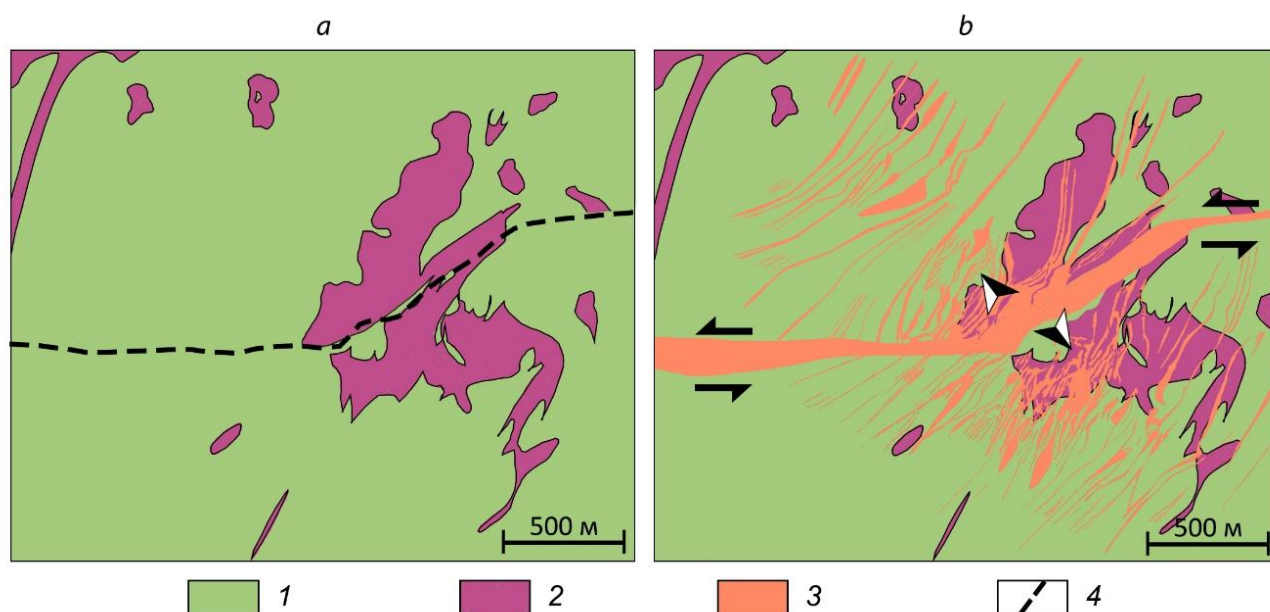


Рисунок 16 – Схема дорудной (а) и синрудной (б) структур на месторождении Дяппе. Основная рудная зона сформировалась в зоне транстенсии на попутном изгибе Центрального левого сдвига. 1 – меловые терригенно-осадочные отложения; 2 – Дяппенский массив диоритов, кварцевых диоритов; 3 – зоны выходов метасоматизированных пород на поверхность; 4 – Центральный разлом; 5 – Дяппенский разлом

На втором этапе формирования Дяппе-Спорненского рудного узла направление смещения по генеральным сдвигам сменилось на правостороннее, вследствие чего его дальнейшее развитие проходило в механической обстановке правостороннего простого сдвига (Рисунок 17). Обстановка присдвигового растяжения сменилась режимом субширотного сжатия. Следствием этого процесса стало вероятное формирование взбросов прямо в пределах первичной зоны растяжения. На этом этапе развития и кинематика Центрального сдвига изменилась на правостороннюю. При этом попутный изгиб Центрального сдвига стал встречным, а зона транстенсии трансформировалась в зону транспрессии (рисунок 18). Вследствие этого в ее пределах, а также практически по всей своей длине Центрального сдвига сформировалась зона дробления, достигающая мощности 30 м.

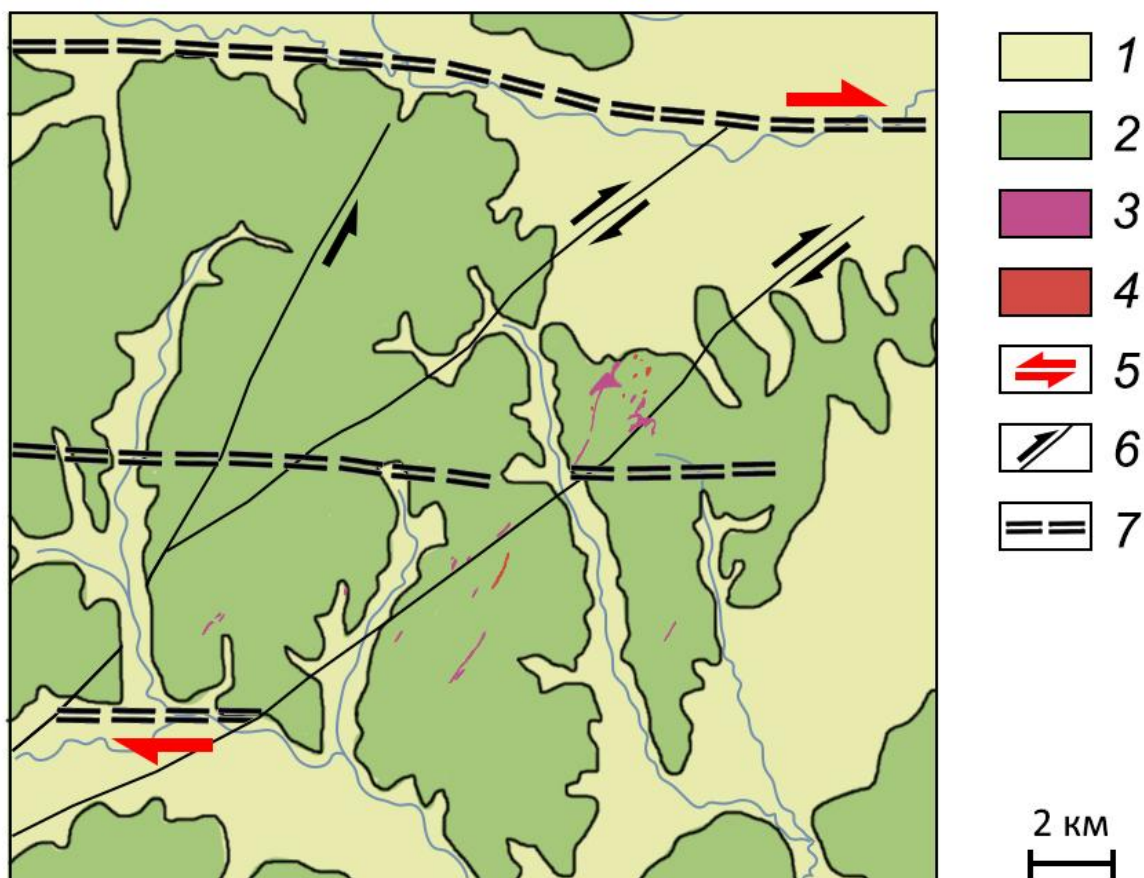


Рисунок 17 – Структурная схема второго этапа становления Дяппе-Спорненского рудного узла, с изменениями [Дьячков, 1989; Бруско, 1991]: 1 – четвертичные отложения; 2 – меловые терригенно-осадочные отложения; 3 – диориты и кварцевые диориты; 4 – гранодиориты; 5 – региональные разломы; 6 – внутриблоковые разломы второго порядка, преимущественно косые правые сдвиги; 7 – правосторонние широтные сдвиги

Деформации второго этапа формирования района создали ясно различимые зоны катаклаза, трещиноватости и тектонических брекчий, фиксирующих участки разгрузки тектонических напряжений. В пределах месторождения и рудного поля в целом этими зонами контролируется развитие гидротермально-метасоматических преобразований, представленных метасоматитами и метасоматическими изменениями кварцевого, серицит-кварцевого и кварц-серицитового состава, а также пространственно сопряжённых с ними прожилковых зон кварцевого и карбонат-кварцевого состава. Зоны имеют северо-восточное и северо-северо-восточное простирание и развиты как в терригенно-осадочных породах, представленных алевролитами, песчаниками, туфопесчаниками, так и в магматических породах Дяппенского массива.

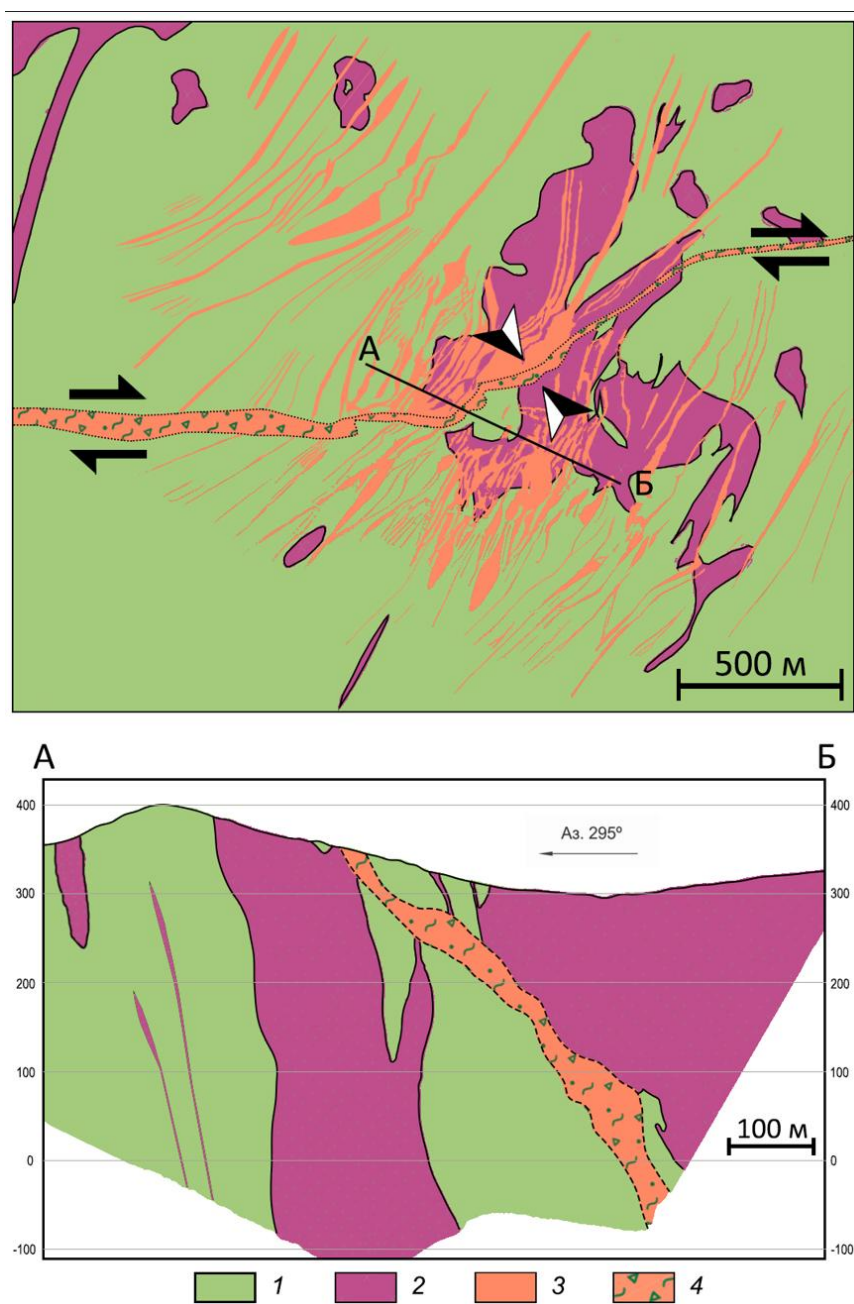


Рисунок 18 – Схема встречного изгиба Центрального правого сдвига в пострудный период с разрезом: 1 – меловые терригенно-осадочные отложения; 2 – Дяппенский массив диоритов, кварцевых диоритов; 3 – зоны выходов метасоматизированных пород на поверхность; 4 – рудная брекчия Центрального разлома

Необходимо отметить, что более поздние деформации широтного сжатия привели к интенсивному трещинообразованию, которое существенно «затушевало» первоначальный структурный план. Тектонические брекции, отмеченные на Дяппе, присутствуют и в пределах широтных региональных разломов, и вдоль широких зон сжатия.

Подтверждением пострудного периода формирования Центрального разлома являются два фактора: во-первых, отсутствие видимого залечивания брекчий гидротермальным раствором и, во-вторых, отсутствие геохимических трендов, присущих зоне метасоматоза.

Был проведён анализ образцов керна, и выявлено, что ни один из них не был подвержен гидротермальным изменениям, при этом весь керн представлен раздробленным материалом (Рисунок 19).

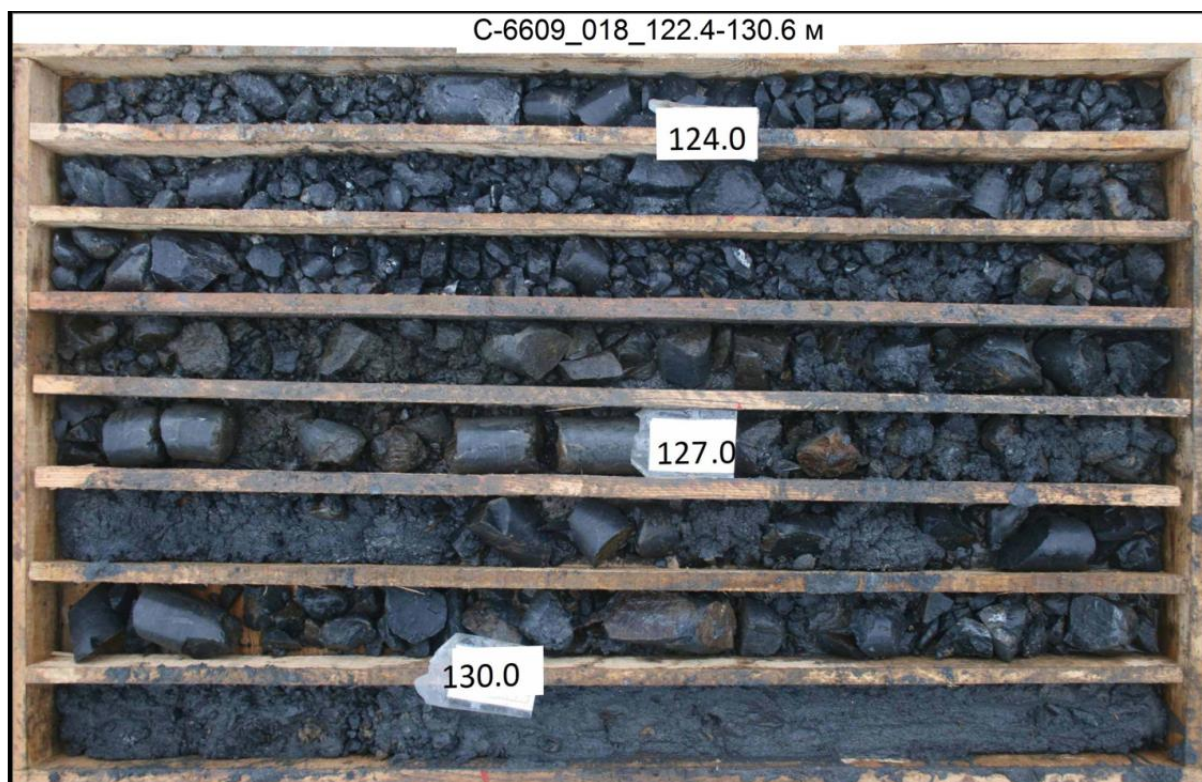


Рисунок 19 – Керн из интервала 122.4–130.6 м, пересекающий разлом (зону Центральную)

Также были рассмотрены результаты анализов ICP-AES керновых проб по 33 элементам из 51 скважины. На глубинной диаграмме одной из скважин с вынесенными прологарифмированными значениями элементов наблюдается их резкое изменение как в зоне разлома, так и при литологическом переходе. Красными линиями указаны абсолютное значение 160 метров на уровне разлома и литологический переход из вмещающих пород в интрузив на уровне 5 метров (Рисунок 20). Для диаграмм были выбраны элементы, которые лучшим образом демонстрируют данные переходы (Y, Zn, K). Иттрий является относительно инертным элементом, в то время как цинк и калий – высокоподвижные, при этом калий является показателем калийного метасоматоза (серицитизации). Геохимические значения на уровне 160 метров резко изменяются в зоне разлома и так же резко приходят к прежнему уровню в интрузиве на уровне 5 метров. Это указывает на отсутствие геохимических процессов в зоне дробления (абс. 160м), и, соответственно, на пострудный этап возникновения разлома.

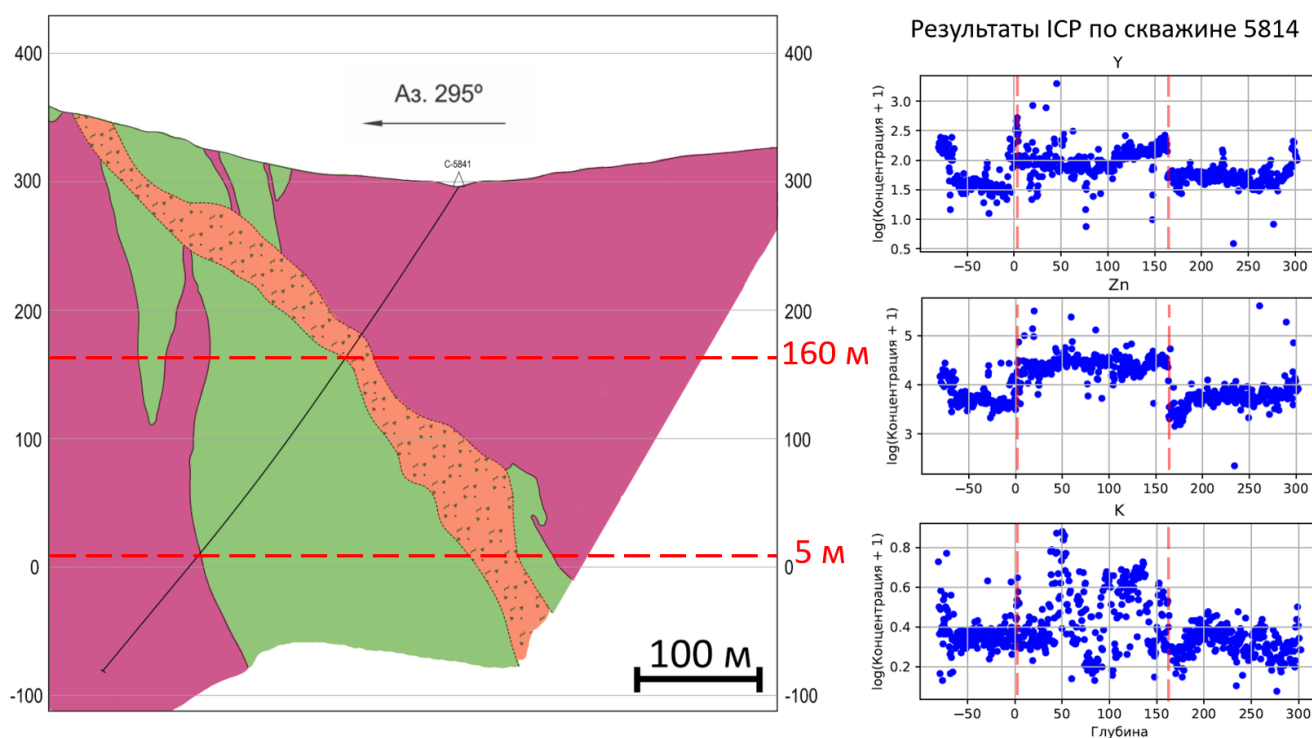


Рисунок 20 – Схематический разрез бурового профиля с указанием скважины 5814 и логарифмированные значения выборки элементов в соответствии с абсолютной глубиной по интервалу скважины 5814, проходящей через разлом (зону Центральную). Условные обозначения на рис. 18

2.3. Залегание рудных тел

Предшественники для подсчёта запасов проводили оконтуривание зон продуктивной минерализации по крайним рудным интервалам, так как отмечали, что вследствие неравномерного распределения золота и развития пострудной тектоники на месторождении нет возможности выделить рудные тела в классическом их понимании, где рудное тело представляет собой геологическое образование, которое соответствовало бы по содержанию ценных компонентов, мощности и другим показателям, установленным кондициями [Коган, 1974; Чернышёв, 2019].

Оконтуривание зон продуктивной минерализации предшественниками проводилось по крайним рудным интервалам, выделенным по бортовому содержанию золота 0,2 г/т без учета структурного фактора. По тектоническим границам была полностью оконтурена только одна рудная зона - Центральная.

Как было указано ранее в работе, внедрение растворов происходило по ослабленным зонам (трещинам). Впоследствии по плоскости одной из ослабленных зон происходило смещение блоков, и, таким образом, было получено рудное тело Центрального разлома, выделяемое литологически (в виде зоны дробления). В этой связи была сформулирована гипотеза

о возможном выделении остальных рудных тел конформно Центральной зоне в рамках единой системы трещиноватости, то есть под углом 30° - 60° (среднее 45°) от дневной поверхности.

Для подтверждения данной гипотезы был проведён геолого-структурный анализ кернового материала скважин и обнажений траншей по соответствующим буровым профилям. Для анализа были выбраны скважины двух профилей 66 и 80. При этом профиль 66 проходит по центру месторождения и пересекает самый крупный выход рудной зоны на поверхность. Количество профилей было ограничено из-за отсутствия достаточных для анализа данных по профилям.

При документировании буровых работ было определено количество трещин в каждом интервале опробования, результаты подсчета при этом распределялись на три группы: 0 - 30° , 30 - 60° , 60 - 90° (Рисунок 21). Однако для использования имеющихся данных и получения однозначного результата исследования важно было исключить влияние отсутствия направленности керна. Для этого были рассмотрены два профиля, что дало возможность анализировать данные в объеме. Важно отметить, что в выборке присутствовали скважины с противоположным азимутальным направлением бурения и разными углами бурения.

Угол трещин в керне рассчитывался от оси керна. На основании угла трещин и угла бурения определялся угол залегания рудных тел как угол падения трещин от земной поверхности. Например, трещина попадает в третью группу (60 - 90° , среднее значение – 75°), а угол бурения – 60° , в таком случае было принято, что рудное тело залегает в среднем под углом 45° относительно земной поверхности (Рисунок 13).

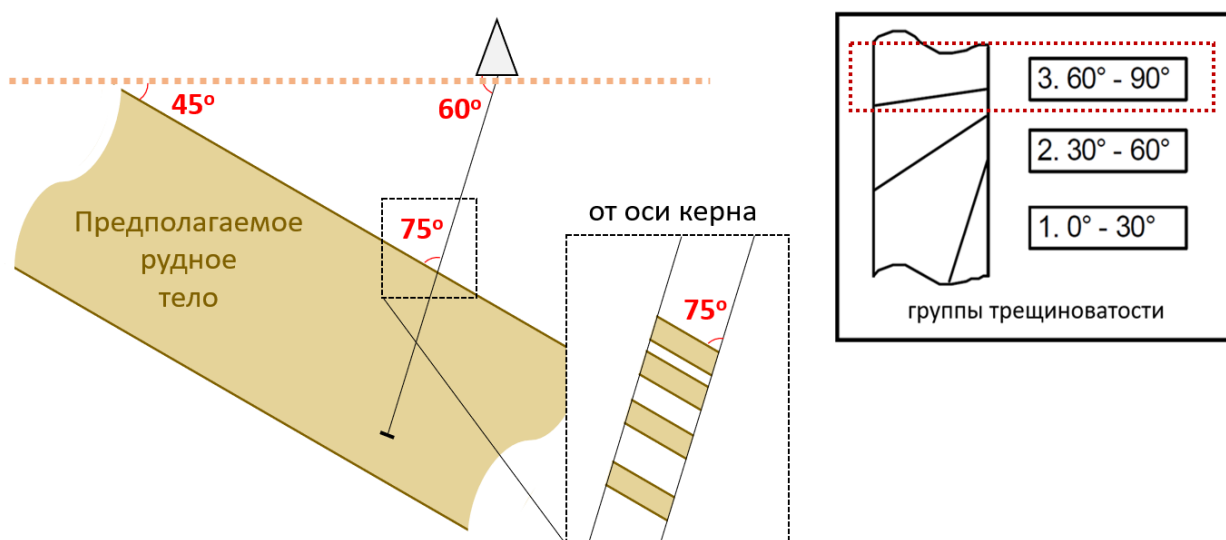


Рисунок 21 – Схема определения искомой группы трещин

Что касается влияния на результаты исследования факта отсутствия направленности керна, то важно иметь в виду, что при наличии трещин с углом к оси керна близком к 90°

исключается необходимость определения направленности керна, что позволяет однозначно ориентировать рудное тело в пространстве, и именно это группа является для исследования наиболее важной.

Сначала был произведен анализ скважин профиля 66. В качестве порогового значения для выделения рудных интервалов принято содержание золота $\geq 0,2$ г/т. К рудным было отнесено 314 интервалов с содержанием $Au \geq 0,2$ г/т (группа А), а к безрудным – 1147 интервала с содержанием $Au < 0,2$ г/т (группа Б). Для каждого интервала опробования из обеих групп были рассчитаны соответствующие количественные показатели трещиноватости. Так как интервалы опробования и интервалы бурения (рейсы) не всегда совпадали, была произведена пропорциональная разбивка данных с частотами трещин из журналов бурения для точного соответствия каждому рудному и безрудному интервалу.

Для каждой группы (А и Б) были рассчитаны: общее количество интервалов, суммарная мощность, суммарное количество трещин по группам (0-30°, 30-60°, 60-90° и общее) и средняя плотность трещин на 1 погонный метр (Таблица 2).

Таблица 2 – Сводные данные плотностей трещин по двум группам интервалов: рудным и безрудным

Показатель	Группа А (Рудные, $Au \geq 0,2$ г/т)	Группа Б (Безрудные, $Au < 0,2$ г/т)	Отношение (Рудные/Безрудные)
Количество интервалов	314	1147	-
Суммарная мощность, м	210,4	748,8	-
Суммарное кол-во трещин 0-30°	96	248	-
Суммарное кол-во трещин 30-60°	359	630	-
Суммарное кол-во трещин 60-90°	214	414	-
Общее количество трещин	669	1292	-
Средняя плотность трещин 0-30° (шт/м)	0,46	0,33	1,38х
Средняя плотность трещин 30-60° (шт/м)	1,71	0,84	2,03х
Средняя плотность трещин 60-90° (шт/м)	1,02	0,55	1,84х
Общая средняя плотность (шт/м)	3,18	1,73	1,84х

Общая плотность трещин в рудных интервалах оказалась (3,18 трещин/метр) больше, чем в безрудных (1,73 трещин/метр). Наиболее сильный контраст наблюдается для трещин 30-60° и 60-90°, где плотность в рудных зонах превышает безрудные примерно в два раза.

Для каждой группы интервалов был проведен корреляционный анализ (корреляция Пирсона) (Таблица 3).

Таблица 3 – Сводные данные корреляционного анализа по выборкам интервалов

Корреляция с содержанием золота	Вся выборка	Группа А (Рудные, $Au \geq 0,2$ г/т)	Группа Б (Безрудные, $Au < 0,2$ г/т)
С трещинами 0-30°	0,170	0,213	-0,082
С трещинами 30-60°	0,401	0,503	-0,088
С трещинами 60-90°	0,593	0,687	-0,175

Было выявлено, что золотое оруденение уверенно контролируется структурным фактором. Рудоотложение происходило преимущественно в зонах интенсивной трещиноватости, которые служили зонами повышенной проницаемости для гидротермальных флюидов. Группа трещин 60–90° к оси керна является главным рудоконтролирующим фактором. Они демонстрируют максимальную корреляцию с рудоносными интервалами по сравнению с остальными группами трещин с коэффициентом около 0,7.

Дополнительно были проанализированы данные горных выработок. Анализ элементов залегания выходов рудных зон со значимыми содержаниями золота (от 0,2 г/т) показал приуроченность к структурам с азимутом падения около 100° и с углами падения от 40 до 80°. Такое залегание рудных зон соответствует вышеуказанным группам трещин 60–90° и 30–60° к оси керна, и преимущественно тяготеет к группе 60–90°, что совпадает с проведенным статистическим анализом по керновому материалу (Рисунок 22).

Азимут выходящих на поверхность тел варьируется от 80 до 110°, что соответствует простиранию «Центрального» разлома. Вероятнее всего, именно поэтому бурение и было заложено под углом вкрест предполагаемых рудных тел, выходящих на поверхность.

Также для исключения пространственной неопределенности были проанализированы данные по трем скважинам профиля 80, пробуренным по направлению падения предполагаемых структур (Рисунок 23), с углами 80°, 60° и 50° от поверхности (Таблица 4).

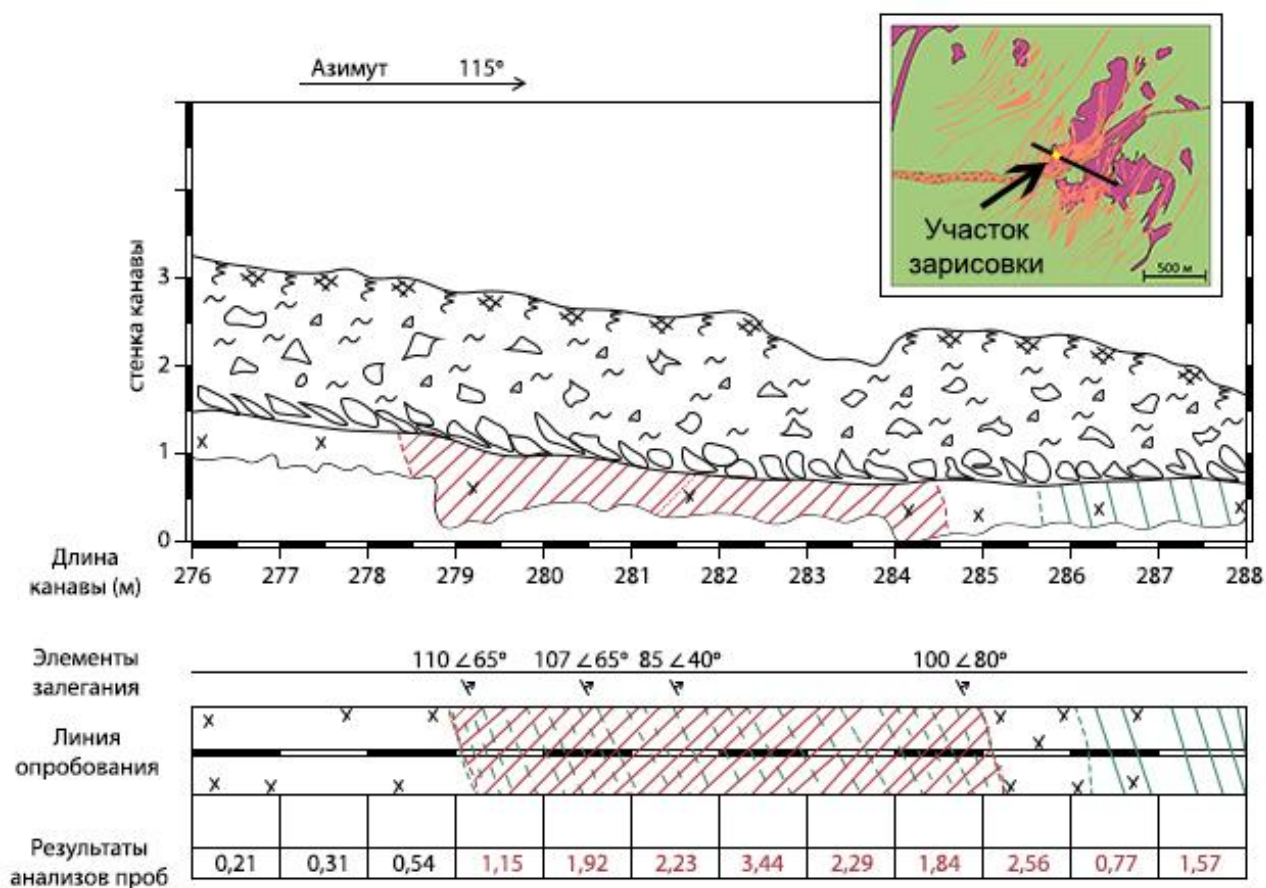


Рисунок 22 – Оцифрованный лист журнала документации траншеи рудного интервала с указанием участка зарисовки на геологической схеме



Рисунок 23 – Изображение разреза с указанием трех скважин, имеющих СВ направление (азимут 115°), с углами от поверхности 80°, 60° и 50°: 8015-1, 8015-2 и 8015-3, соответственно

Для скважины С-8015-1 угол между осью скважины и предполагаемой рудной плоскостью (45°) составляет 35° . В данном случае максимум корреляции (0,445) сместился в среднюю группу $30-60^\circ$, что совпадает с расчетным углом 35° , при этом группы $0-30^\circ$ и $60-90^\circ$ отличаются низким значением корреляции (0,206).

Таблица 4 – Сводные данные корреляционного анализа по рудным интервалам ($Au \geq 0,2$)

Корреляция с содержанием золота	С-8015-1	С-8015-2	С-8015-3
С трещинами $0-30^\circ$	0,226	0,356	0,339
С трещинами $30-60^\circ$	0,445	0,206	0,177
С трещинами $60-90^\circ$	0,209	0,039	0,033

Для скважин С-8015-2 и С-8015-3 угол между осью скважины и предполагаемой рудной плоскостью составляет 5° и 15° соответственно (субпараллельно). В этих скважинах наблюдается резкая инверсия статистики в сравнении с результатами, представленными в Таблице 2. Высокое значение корреляции с трещинами группы $60-90^\circ$, характерное для скважин с противоположным простиранием (профиль 66), сменилось низким значением и составило около 0,03-0,04, что указывает на отсутствие связи с данной группой трещин. Максимальное значение корреляции сместилось в группу $0-30^\circ$, что также полностью соответствует теоретически ожидаемым острым углам встречи при бурении вдоль рудной структуры.

Во всех скважинах для каждой группы трещиноватости абсолютные значения коэффициентов корреляции указывают на слабые положительные связи, что затрудняет их сопоставление. Нормировка коэффициентов корреляции на общее среднее позволяет определить направления трещиноватости, где связь с содержанием золота выражена сильнее или слабее средней по всему массиву (Таблица 5). Переход к относительным коэффициентам корреляции в данном случае является обоснованным, поскольку позволяет выявить относительную выраженность слабых положительных корреляционных связей между содержанием золота и различными группами трещиноватости в зависимости от геометрии пересечения скважин с рудным телом, не искажая их общую слабую положительную связь.

Таблица 5 – Относительные значения от среднего по сводным данным корреляционного анализа из Таблицы 4. Цветом указано усиление (зеленое) и снижение (красное) корреляции

Корреляция с содержанием золота	С-8015-1	С-8015-2	С-8015-3
С трещинами 0-30°	0%	58%	50%
С трещинами 30-60°	97%	-9%	-22%
С трещинами 60-90°	-7%	-83%	-85%

Анализ групп трещин в скважинах, пробуренных по падению рудных тел, снимает проблему отсутствия направленности зерна, так как случайное совпадение полученной инверсии корреляции углов при смене направления бурения маловероятно.

2.4. Вещественный состав руд

Минеральный состав руд месторождения не отличается большим разнообразием и довольно постоянен. По мнению Н.Е. Савва [Савва, 1989], это характерно для хорошо дифференцированных рудно-магматических систем, в которых скопления минеральных видов, отличающихся по термодинамическим параметрам минералообразования, разобщены в пространстве и их отложение происходило зонально по мере изменения этих параметров.

Вещественный и минеральный состав руд в настоящей работе изучался по 32 отобраным штучными пробам по четырем профилям с шагом в 10 метров из рудной зоны «Рита» (Рисунок 24). Анализ химического состава минералов производился на растровом электронном микроскопе Tescan Vega II XMU с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 450 с полупроводниковым Si(Li) детектором INCA x-sight. Изучение петрографических шлифов и аншлифов проводилось на поляризационных микроскопах ZEISS Axilskop 40 и Полам Р-312 в лаборатории рудной микроскопии на кафедре геологии, геохимии и экономики полезных ископаемых геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

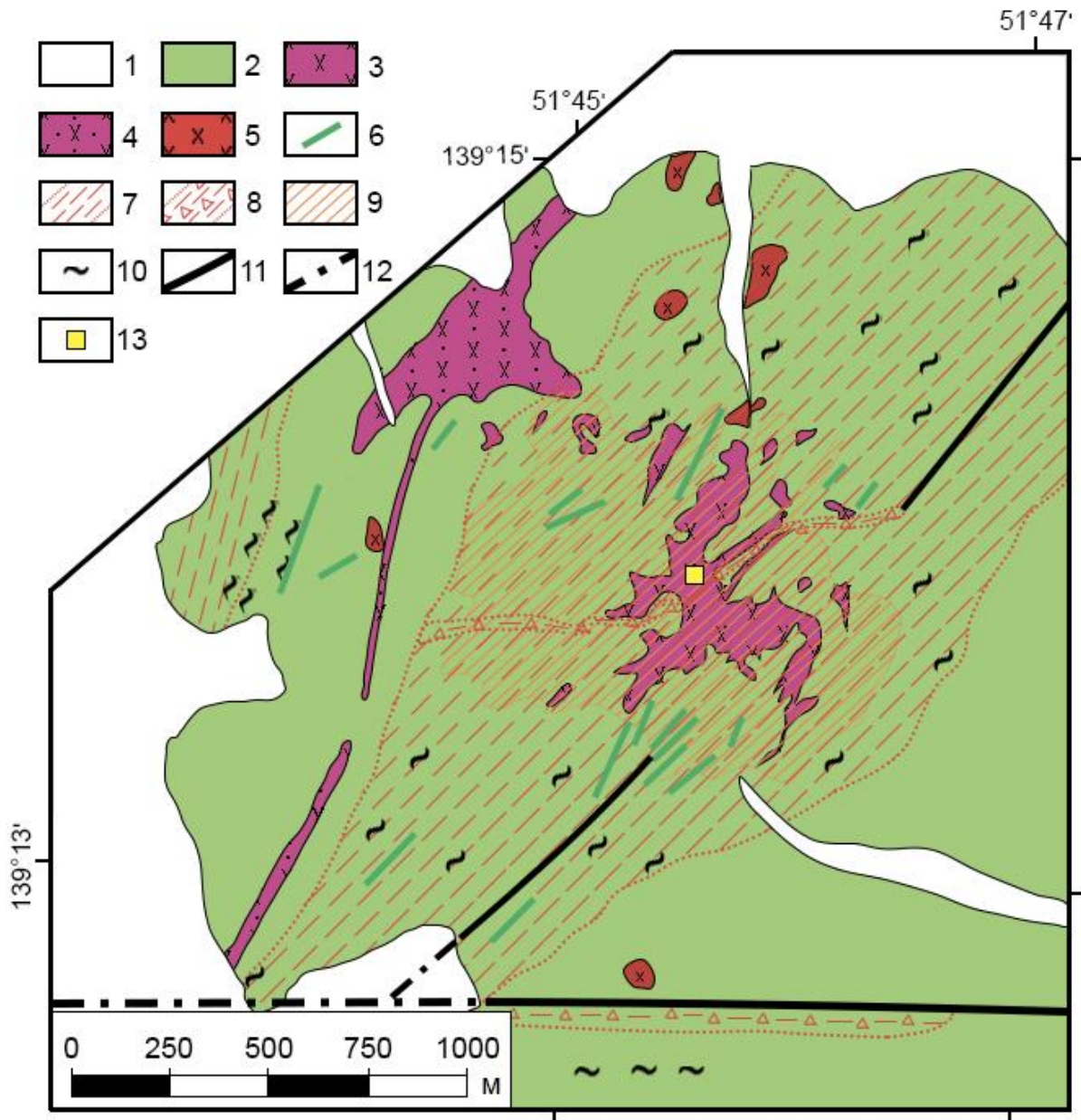


Рисунок 24 – Карта месторождения Дяппе. Условные обозначения на Рисунке 4. 13 – зона отбора проб

По результатам описания приготовленных препаратов были выделены три основные группы пород: микрогаббродиорит, гранит-аплиты и метасоматиты по ним. Ниже приведены данные по представительным образцам выделенных пород. Здесь и далее буквенные обозначения минералов даны по международному стандарту сокращений (аббревиатур) для названий минералов [Warr, 2021].

Образец D_1_2 представляет собой микрогаббродиорит. Порода имеет массивную текстуру с элементами жильной; структура породы среднетонкозернистая, порфировидная, гипидиоморфнозернистая. Магматическая ассоциация включает в себя клинопироксен, авгит,

плагиоклаз An 43-30, биотит (4-6 масс. % TiO_2), кварц, титаномagnetит и ильменит, акцессорный апатит (Рисунок 25).

В мелкокристаллическую массу субидиоморфного плагиоклаза погружены относительно крупные кристаллы моноклинного пироксена-авгита ($\text{Mg}^\#$ 76-78, En 42-44, Fs 12-13, Wo 44-45). Биотит ксеноморфный, включает в себя ильменит и титаномagnetит. Основная масса содержит небольшое количество кварца, часть которого может иметь метасоматическое происхождение. Ильменит периодически образует в титаномagnetите структуры распада твердого раствора.

Порода рассечена карбонатными прожилками (минимум три системы прожилков, от первой к третьей размер кристаллов карбоната растет), порода подверглась карбонатизации, хлоритизации и серицитизации крайне неравномерно. Наложенная сульфидная минерализация представлена очень мелкими (менее 0,05 мм) вкраплениями халькопирита, пирита, реже пирротина, борнита и сфалерита. Степень изменения породы достигает 40 об %, что по градации [Плющев и др., 1981] отвечает сильнопроявленным метасоматитам.

Эпигенетическая (гидротермально-метасоматическая) ассоциация представлена КПШ, который замещает плагиоклазы, карбонатами (долomit и сидерит), рутилом, фторапатитом. Предполагается, что часть низкотитанистого (2-4 масс. % TiO_2) биотита также может иметь эпигенетическое происхождение. Установлен новообразованный барит. Редкий альбит отмечен в интерстициях между кристаллами плагиоклаза.

Рудные минералы представлены редкими халькопиритом и пиритом, последний содержит до 1,25 масс. % мышьяка, до 1,4 масс. % никеля и 0,42 масс. % кобальта.

Образец D_4_3 представляет собой биотитовый гранит-аплит, рассеченный кварцевой жилой. Порода массивная, мелкозернистая, гипидиоморфнозернистая. Степень изменения породы достигает 80 об % (Рисунок 26).

Из потенциально магматогенных минералов установлены КПШ, альбит-олигоклаз An 6 и биотит с содержанием TiO_2 4,5-4,7 масс. %.

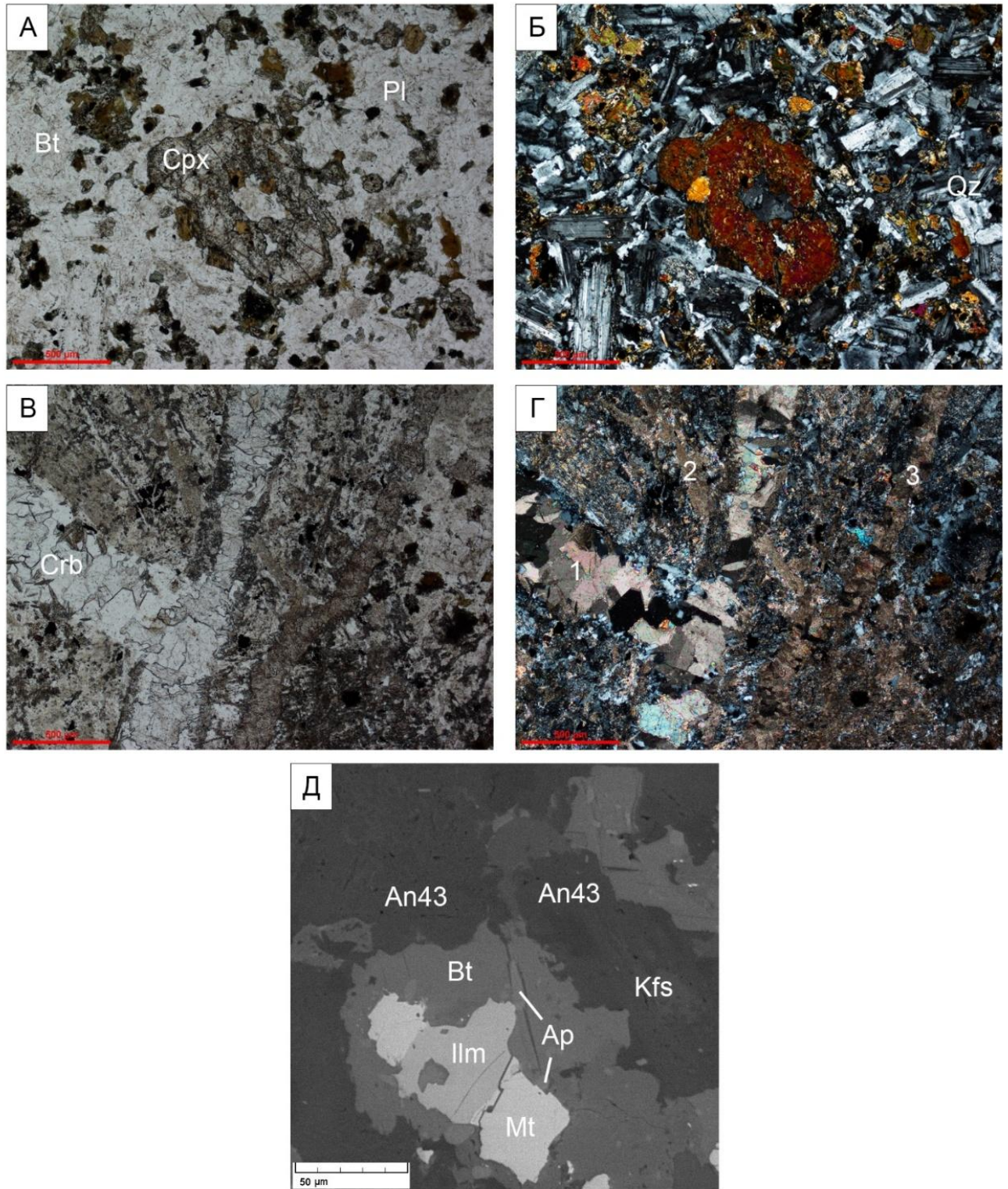


Рисунок 25 – Образец D_1_2: Кристалл моноклинного пироксена в окружении биотита и плагиоклаза, наименее измененный участок: при одном николе (А), в скрещенных николях (Б);

Системы карбонатных прожилков: при одном николе (В), в скрещенных николях (Г);

Магматогенный плагиоклаз An 43 замещается КФС, магматогенные магнетит, ильменит и биотит с вросками фторапатита, в отраженных электронах (Д)

Эпигенетическая ассоциация представлена хлоритом, развивающимся по биотиту и образующим самостоятельные выделения. Среди полевых шпатов преобладает КПШ, он встречается также и в кварцевой жиле совместно с сульфидами, рутилом, фторапатитом и карбонатами. Среди карбонатов установлены редкий кальцит и повсеместно распространенный доломит с высоким содержанием железа (Рисунок 27). Рутил представлен двумя генерациями – с содержанием вольфрама до 2,5 масс. % и без вольфрама, оба приурочены к выделениям хлорита и карбонатов. Сульфиды представлены арсенопиритом, сфалеритом (3 масс. % Fe), халькопиритом и пиритом двух генераций: пирит-I идиоморфный без примеси никеля и с низким содержанием мышьяка; пирит-II ксеноморфный. Отмечено присутствие монацита-Ce с высоким содержанием ThO_2 до 15 масс. %.

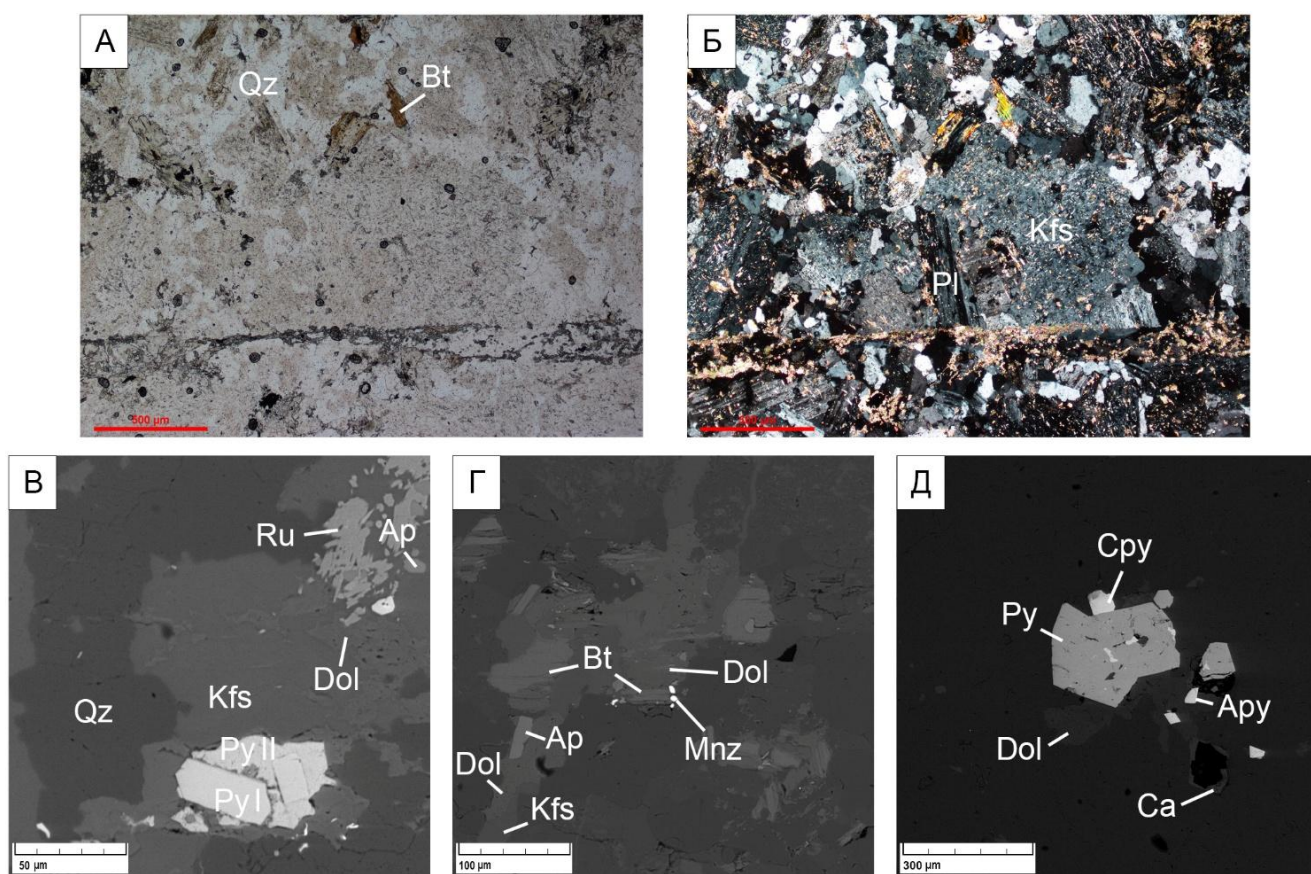


Рисунок 26 – Образец D_4_3: Общий вид биотитового аплита: при одном николе (А), в скрещенных николях (Б); Общий вид метасоматизированной части породы. Канва сформирована сростаниями кварца, КПШ и доломита, в нее погружены рутил, биотит, фторапатит, монацит и сульфиды: пирит II нарастает на пирит I, в отраженных электронах (В, Г); Типичная сульфидная ассоциация в метасоматически измененном биотитовом аплите: сростания пирита I, халькопирита и арсенопирита в доломите, в отраженных электронах (Д)

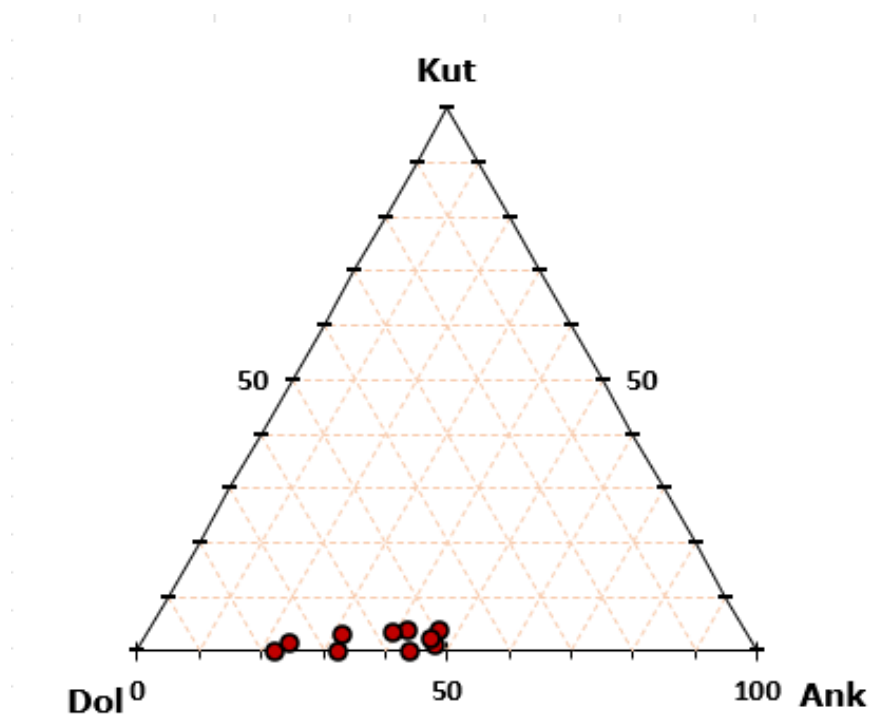


Рисунок 27 – Состав карбонатов образца D_4_3 в координатах доломит-анкерит-кутногорит

По равновесной паре кальцит-доломит проведена термобарометрия с применением карбонатного термобарометра Таланцева (Рисунок 28), являющийся методом оценки Р-Т условий минералообразования [Таланцев, 1981], основанного на температурной зависимости растворимости магния в кальците (Mg'_K) и барической зависимости межфазного распределения железа между равновесными кальцитом и доломитом:

$$Mg'_K = Mg_K (1 + 11,5Fe_K + 5Fe_K^2 + 550Fe_K^3 + 8Mn_K - 50Mn_K^2) \quad (2)$$

Также был использован хлоритовый термометр [Cathelineau, 1988], который предполагает строго линейную зависимость между температурой кристаллизации и входением алюминия в тетраэдрическую позицию:

$$T (^{\circ}C) = 321.98 * Al^{IV} - 61.92 \quad (3)$$

Третьим термометром был фактически модифицированный метод Cathelineau. Авторы [Zang & Fyfe, 1995] работали с золоторудным месторождением Игарпе-Байя в Бразилии и столкнулись с тем, что классический термометр Cathelineau давал некорректные результаты для сильножелезистых хлоритов, поэтому ввели в расчёт поправку на железистость (X_{Fe}):

$$T (^{\circ}C) = 106.2 * (Al^{IV} - 0.88 * [X_{Fe} - 0.34]) + 17.5, \text{ где } X_{Fe} = Fe / (Fe + Mg) \quad (4)$$

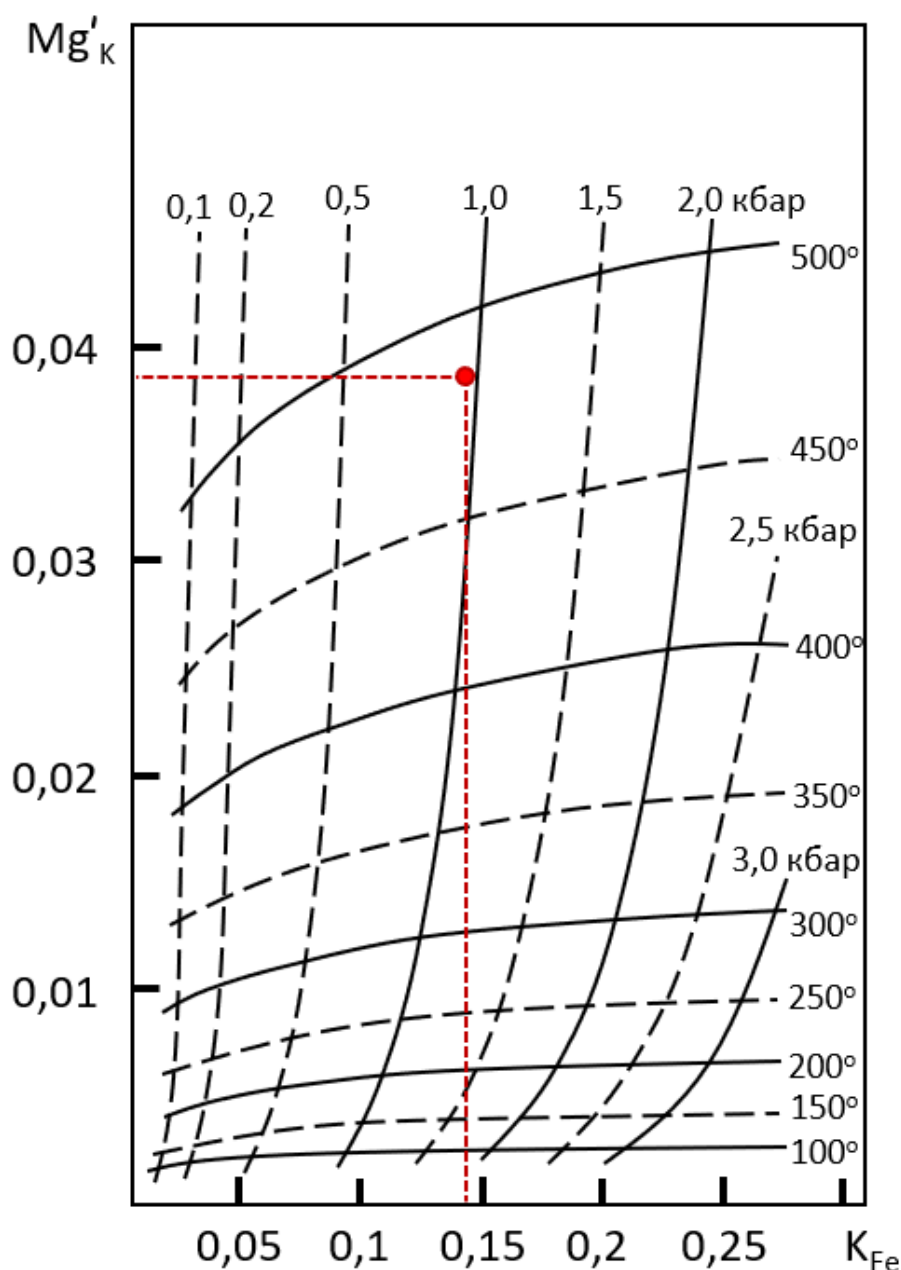


Рисунок 28 – Диаграмма доломит-кальцитового геотермобарометра с указанием пересечения расчетных коэффициентов [Таланцев, 1981]

Наряду с вышеописанными термометрами, для получения дополнительных температурных оценок использовалась многофакторная модель (Рисунок 29) [de Caritat et al., 1993; Plissart et al., 2009]. Данный подход, помимо содержания кремния учитывает влияние состава хлорита через поправочный параметр Al-chl:

$$T (^{\circ}\text{C}) = 1363.7 * (4.069 - Si - 4.5 * Al_chl), \text{ где} \quad (5)$$

Al-chl – структурный параметр, который учитывает соотношение алюминия, железа и магния в решетке хлорита, рассчитываемый по следующей формуле:

$$Al_chl = \frac{Al_{tot}}{(Al_{tot} + 2Fe^{2+} + 2Mg)} \quad (6)$$

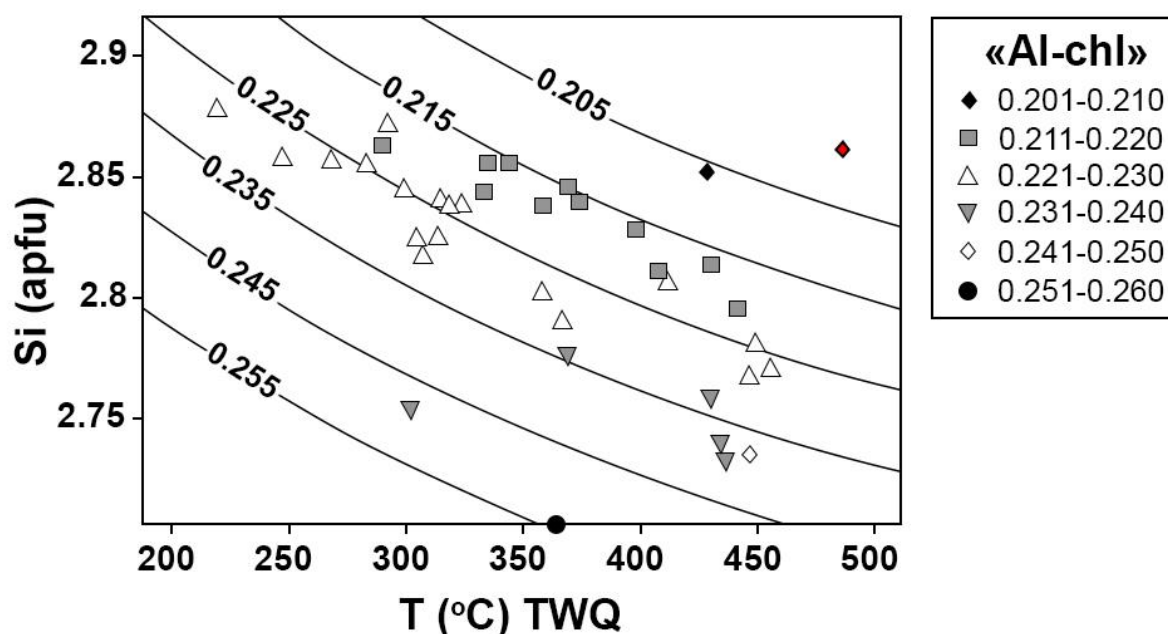


Рисунок 29 – Распределение составов хлоритов Тисовита-Иути в координатах «содержание кремния – температура» с указанием трендов снижения содержания кремния по мере роста температуры в зависимости от величины параметра «Al-chl» [Plissart et al., 2009]. Красным ромбом указан один из результатов термометрии

Результаты расчетов приведены в таблице 6 (Таблица 6). Хлоритовая термометрия по формулам (3) и (4) дает согласованные оценки 240-310 °C, которые принимаются в качестве рабочих. Значения, полученные по формуле (5) (около 500 °C) и по карбонатному геотермобарометру (480 °C при 0,9 кбар), из дальнейшего рассмотрения исключены. Основанием служит прежде всего наблюдаемый парагенезис: ассоциация кварца, светлой слюды, хлорита, карбоната, эпидота и альбита не требует температур выше 350°C, а хлорит в гидротермальных системах выше этого рубежа неустойчив. При температурах порядка 500 °C следовало бы ожидать появления высокотемпературных метасоматических ассоциаций (амфиболовая, скарновая), однако ни одна из них в изученных метасоматитах не установлена.

Расхождение температур может быть объяснено свойствами самих методов: формула (5) откалибрована на магнезиальных хлоритах офиолитового комплекса [Plissart et al, 2009], то есть на существенно магнезиальных разностях из пород основного и ультраосновного состава, тогда как изученные хлориты развиваются по биотиту и заметно более железистые. Карбонатный геотермобарометр требует равновесной пары кальцит – доломит, тогда как в образце D_4_3 карбонаты разностадийны: они присутствуют и в секущей кварцевой жиле, и в самой измененной породе, где повсеместно развит железистый доломит, а редкий кальцит устойчивых сростаний с ним не образует.

Таблица 6 – Результаты геотермометрии по выбранным методам (средние значения, округленные до десятков)

Методика (авторы)	Минерал	Средние значения температур, °С
Zang & Fyfe, 1995	Хлорит	240
Cathelineau, 1988	Хлорит	310
Plissart et al, 2009	Хлорит	500
Таланцев, 1981	Доломит-кальцит	480

Образец D_2_4 представляет собой метасоматит по гранит-аплиту (Рисунок 22). Порода массивная с элементами жильной, мелкозернистая, псевдоморфная, лепидогранобластовая. Полнопроявленный метасоматит – исходная порода полностью замещена.

Новообразованная ассоциация представлена срастаниями кварца, КПШ и альбита. Характерно наличие магнезиального фенгита. Акцессорные минералы – рутил без вольфрама и монацит с содержанием ThO_2 до 2,7 масс. %. Обильный гётит развивается по пириту, сорбируя мышьяк. КПШ имеет вид корродированных, растворяющихся ксеноморфных выделений в окружении альбита и кварца. Полевые шпаты альбитизируются и замещаются мусковитом. Отсутствие карбоната и хлорита в этом образце закономерно: бескарбонатные фации березитов характерны именно для кислых магматических пород – аплитов и лейкогранитов, обедненных кальцием и магнием [Абрамов и др., 1998].

Реликты пирита в гётите также характеризуются повышенным содержанием мышьяка. Установлен циркон, близкий к теоретическому составу. Следует отметить, что гидротермальный циркон в подобных обстановках обычно представлен нестехиометричными метамиктными разностями (циртолит, аршиновит) [Плющев и др., 1981; Плющев, Шатов, 1985], поэтому стехиометричность изученных зерен скорее указывает на их реликтовую магматогенную природу.

Рудная минерализация в пределах изученной зоны носит комплексный характер, сквозным и наиболее распространенным сульфидом является пирит. По данным рентгеноспектрального микроанализа выявлена гетерогенность его химического состава, коррелирующая с типом вмещающих пород и стадийностью минералообразования (Таблица 7).

В микрогаббродиоритах пирит характеризуется заметным присутствием изоморфных примесей: содержание мышьяка в нем достигает 1,25 масс. %, никеля – 1,4 масс. %, кобальта – 0,42 масс. %. В гидротермальных кварцевых жилах, секущих биотитовые гранит-аплиты, выделяются две генерации минерала. Ранняя идиоморфная генерация отличается относительной

чистотой состава с низким содержанием мышьяка (до 0,17 масс. %) и полным отсутствием никеля, при фоновых значениях кобальта 0,21–0,38 масс. %. Поздняя генерация выделяется морфологически, в которой ксеноморфные зерна нарастают на пирит-I. Наиболее аномальный состав зафиксирован для реликтовых зерен пирита в метасоматитах по аплиту, где минерал подвергается интенсивному окислению с развитием гётита. В этих реликтах содержание мышьяка скачкообразно возрастает, достигая 2,96 масс. %.

Таблица 7 – Химический состав пирита, масс. %

Точка анализа	S	K	Ti	Fe	Co	Ni	As	Sb	Сумма
2_4_6	50,56	-	-	45,97	-	-	2,96	-	99,49
4_3_3	53,67	-	-	46,08	0,38	-	0,17	-	100,3
4_3_7	53,71	-	-	46,03	0,21	-	-	-	99,95
4_3_13*	50,05	-	-	49,2	0,29	0,6	0,69	0,96	101,79
4_3_23*	53,95	-	-	46,47	0,28	0,82	0,33	-	101,85
4_3_28*	41,66	-	-	50,9	0,22	0,47	0,8	-	94,05
1_2_7	54,32	-	-	43,47	0,42	1,4	1,25	-	100,86
1_2_19*	53,48	0,5	2,57	43,36	0,37	0,57	0,91	-	101,76

Спектры 4_3_13, 4_3_23, 4_3_28, отмеченные звездочкой, показывают отклонение от стехиометрии пирита и плохую сумму. Вероятно, электронный зонд захватил соседние железосодержащие силикаты или карбонаты (поэтому железа больше, а серы меньше). В спектре 1_2_19 присутствие калия и титана указывает на попадание в область смежных силикатных минералов.

Вторым по распространенности рудным минералом, приуроченным преимущественно к жильному комплексу биотитовых гранит-аплитов, является арсенопирит.

Микронзондовые анализы показывают, что его состав стабилен и близок к теоретической стехиометрии (Таблица 8). Содержание железа варьирует в узких пределах от 33,75 до 34,69 масс. %, мышьяка – от 43,30 до 44,77 масс. %, а серы – от 19,69 до 20,74 масс. %. Характерной геохимической особенностью арсенопирита в изученной выборке является постоянное присутствие изоморфной примеси кобальта на уровне 0,24–0,37 масс. %, а также спорадическая фиксация следовых количеств никеля, не превышающих 0,1 масс. %.

Таблица 8 – Химический состав арсенопирита, масс. %

Точка анализа	S	Fe	Co	Ni	As	Сумма
4_3_4	20,74	33,75	0,24	-	43,3	98,03
4_3_5	20,71	34,02	0,37	0,1	44,24	99,44
4_3_27	19,69	34,69	-	0,1	44,77	99,25

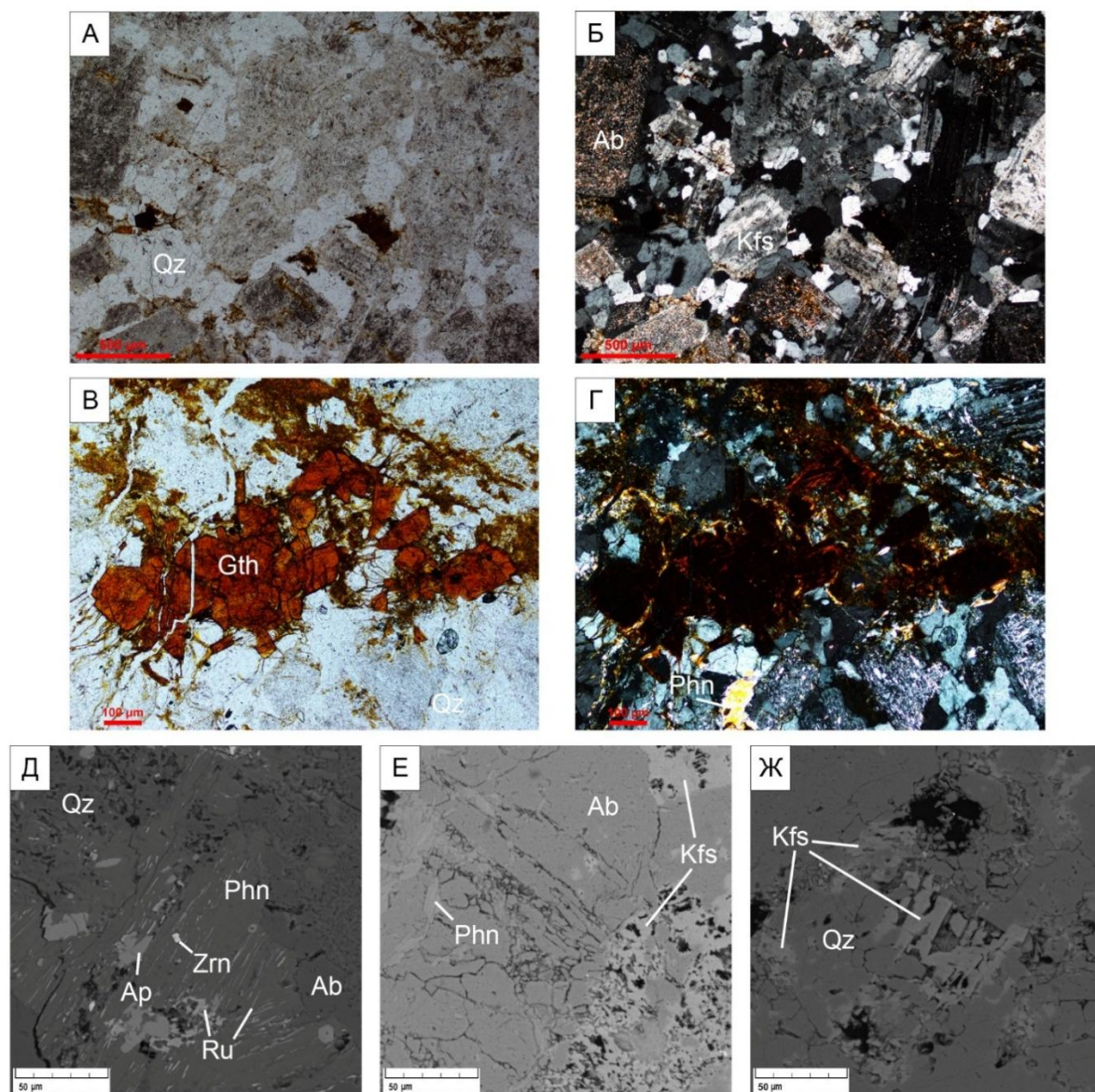


Рисунок 30 – Образец D_2_4: Общий вид метасоматита по гранит-аплиту: при 1 никеле (А), в скрещенных николях (Б); Крупное выделение гётита в фенгит-кварцевом агрегате: при 1 никеле (В), в скрещенных николях (Г); Кварцевый агрегат содержит срастания фенгита в альбитовой оторочке. Фенгит включает в себя ориентированные вроски рутила, циркон и апатит, в отраженных электронах (Д); Замещаемый КФС в фенгит-альбитовом (Е) и в кварцевом (Ж) агрегате, в отраженных электронах

Минералы цветных металлов играют подчиненную роль и представлены редкими выделениями халькопирита и сфалерита. Халькопирит, проанализированный в сульфидной ассоциации микроаббродиоритов, демонстрирует состав, близкий к теоретическому (35,01 масс. % Cu, 31,18 масс. % Fe и 34,70 масс. % S) с незначительными примесями кобальта (0,45 масс. %) и никеля (0,14 масс. %). Сфалерит установлен микронзондом в составе парагенезиса кварцевых жил. По элементному составу он относится к низкожелезистой разновидности: содержание цинка составляет 62,60 масс. %, тогда как доля изоморфного железа 3,19 масс. %. Отмечена примесь кадмия на уровне 0,21 масс. %.

Описываемый блок пород представляет собой контрастный комплекс, состоящий из пород основного-среднего состава и поздних кислых гранит-аплитов. Наиболее ранний, магматический этап фиксируется реликтовой ассоциацией клинопироксена, основного плагиоклаза, магматогенного биотита, титаномagnetита и ильменита со структурами распада, а также акцессорными апатитом и цирконом.

При температурах 240–310 °С, установленных по хлориту, развивался этап массивованного кислотного выщелачивания. Последовательность изученных шлифов отвечает общей направленности этого процесса, отраженной в метасоматической колонке березитизации умеренно кислых пород [Плющев и др., 1981]: от биотитовых гранит-аплитов с серицитизацией полевых шпатов и хлоритизацией биотита к породам, перекристаллизованным в лепидогранобластовые кварц-полевошпат-светлослюдистые агрегаты, с карбонатом или без него. Отличие от эталонной колонки состоит в повышенной устойчивости калиевого полевого шпата, сохраняющегося в виде корродированных реликтов. Такое поведение характерно для двуполевошпатовых пород, в которых плагиоклаз растворяется первым, а устойчивость калишпата относительно альбита возрастает с понижением температуры [Абрамов и др., 1998].

Флюид при этом был единым, а породы реагировали на него по-разному в зависимости от первичного состава. Независимо от протолита формируется единая по набору главных минералов ассоциация – светлая слюда, кварц, пирит, рутил, – тогда как количество карбоната и хлорита определяется запасом кальция, магния и железа в исходной породе. В основных породах, богатых железом и магнием, роль хлорита и доломита резко возрастает при сокращении кварца. В гранит-аплитах, обедненных кальцием и магнием, карбонат может отсутствовать вовсе. Такое поведение отвечает представлению о локальной метасоматической формации как о совокупности фаций, возникающих под действием единого раствора в породах разного состава.

Отдельного внимания заслуживает адуляр в кварцевых жилах. Кристаллы кварца и адуляра ориентированы перпендикулярно контакту, а жилы имеют зональное строение, то есть адуляр кристаллизовался в открытых полостях. Это свидетельство того, что среднетемпературная мезотермальная система эволюционировала в близповерхностную

2.5. Геологическая 3D модель месторождения

[illegible]

Рисунок 31 – План месторождения Дяппе с выделенной зоной ограничения модели (красный пунктир)

Сверху модель ограничена топоповерхностью. Нижняя плоскость модели (по оси Z) находится на -190 м, что чуть выше абсолютной отметки уровня забоя самой глубокой скважины (598 м).

2.5.1. Статистический анализ

Гистограмма логарифмированных значений результатов анализов проб указывает на логнормальное распределение при исключении проб с содержанием менее предела обнаружения 0,01 г/т (Рисунок 32). Таким образом, инструменты статистического анализа применимы для оценки [Капутин и др., 1995].

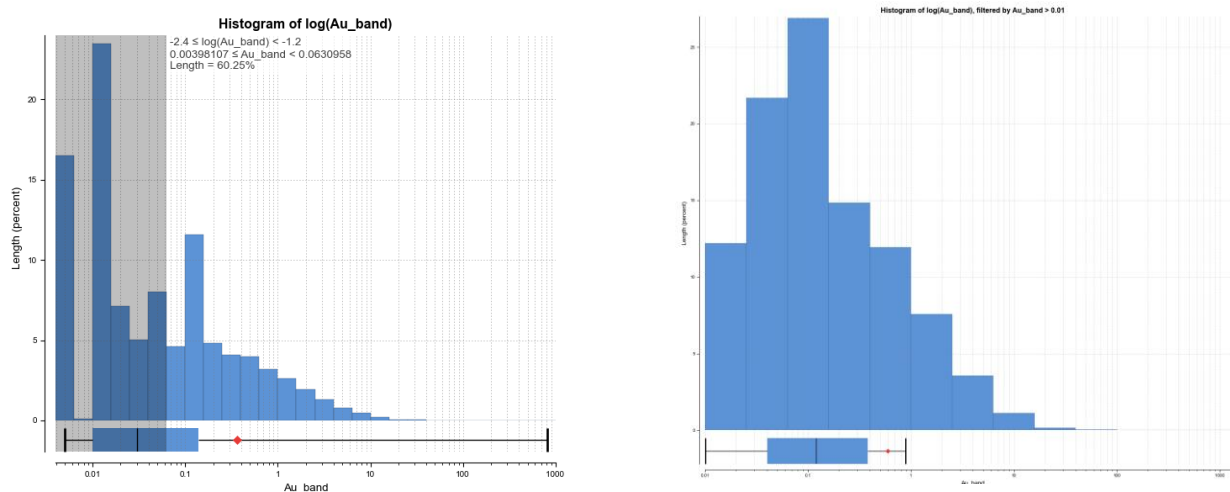


Рисунок 32 – Гистограмма распределения содержаний в пробах до применения фильтра 0,01 г/т (слева) и после (справа)

Опробование преимущественно было выполнено интервалами около 1 м (Рисунок 33). Геостатистический анализ исходных рудных интервалов нецелесообразен, так как пробы имеют различную длину, что требует их предварительного приведения к единому размеру [Кушнарёв, 2024]. В этой связи было произведено композитирование длиной 1 м для нормализации данных.

Смещение среднего содержания при композитировании не произошло, что указывает на сохранение свойств всего объекта при дальнейшей оценке с использованием композитов (Рисунок 34).

Для определения ураганных содержаний было применено несколько популярных способов: метод «дезинтеграции», а также «квантильный» метод. [Вяльцев и др., 2024].

Первым и самым наглядным методом являлся «метод дезинтеграции», поскольку он позволяет определить значение ураганных содержаний визуально на гистограмме [Капутин, 2002]. Согласно распределению логарифмированных значений содержания золота, основная масса наблюдений отделяется на уровне 25,12 г/т (Рисунок 35).

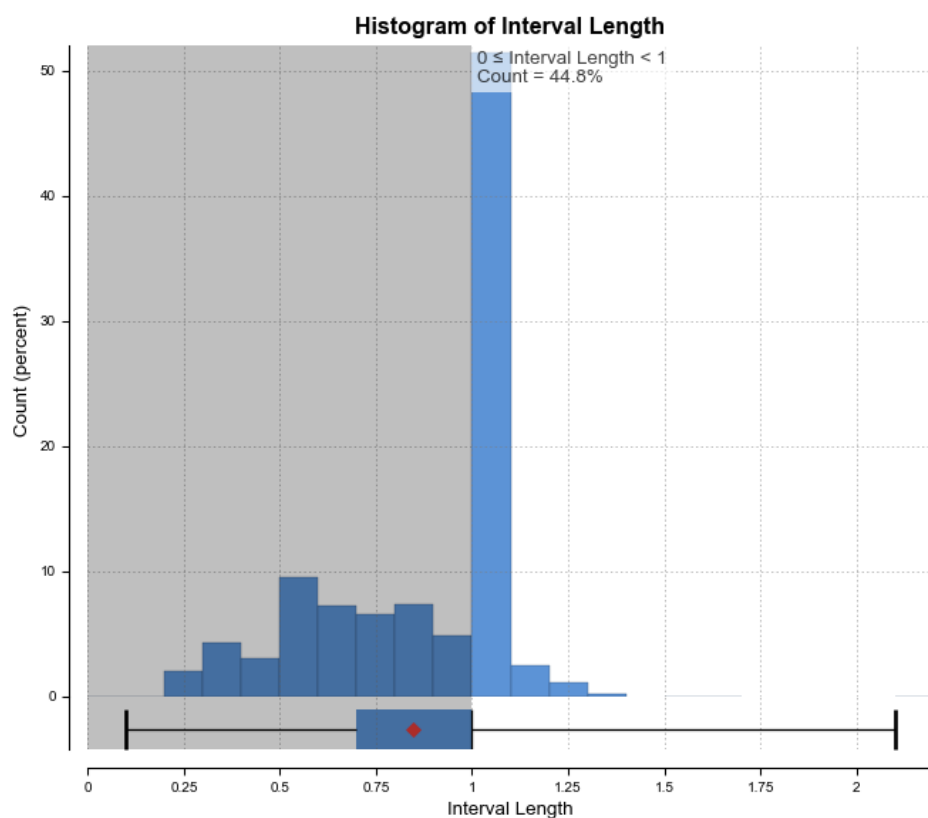


Рисунок 33 – Гистограмма длин интервалов опробования

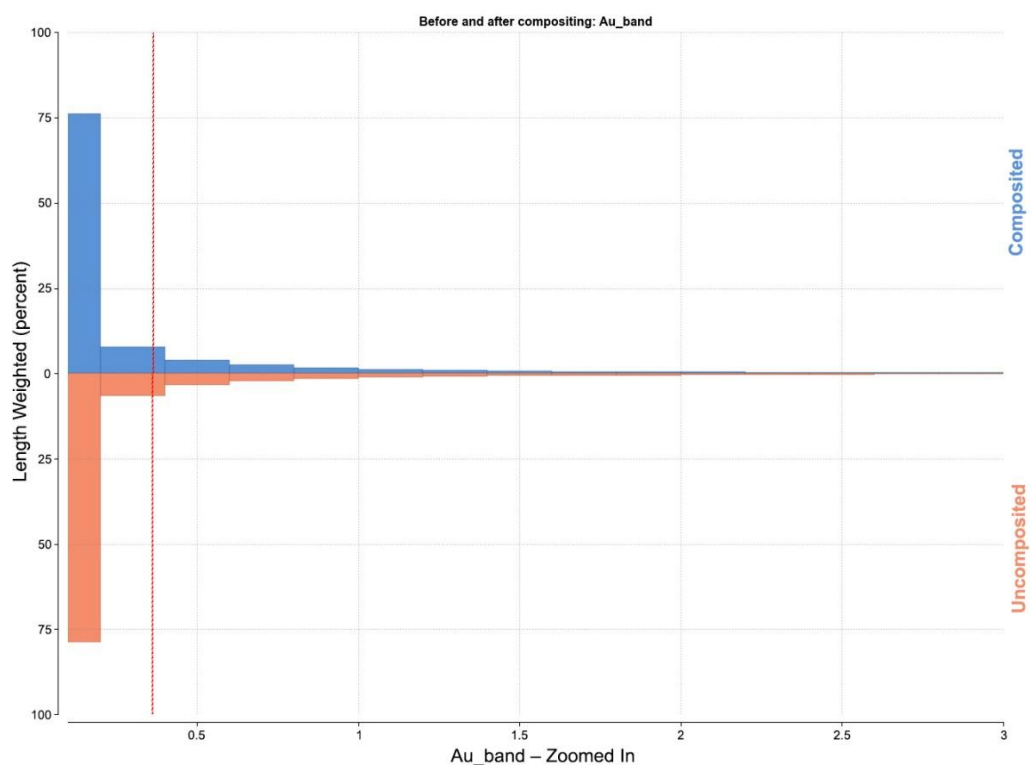


Рисунок 34 – Сравнение распределения содержаний до (оранжевое) и после (синее) композитирования. Горизонтальная ось – содержание полезного компонента от 0 до 3 г/т; вертикальная ось – доля средних длин интервалов в процентах. Красные линии на диаграмме – средние содержания

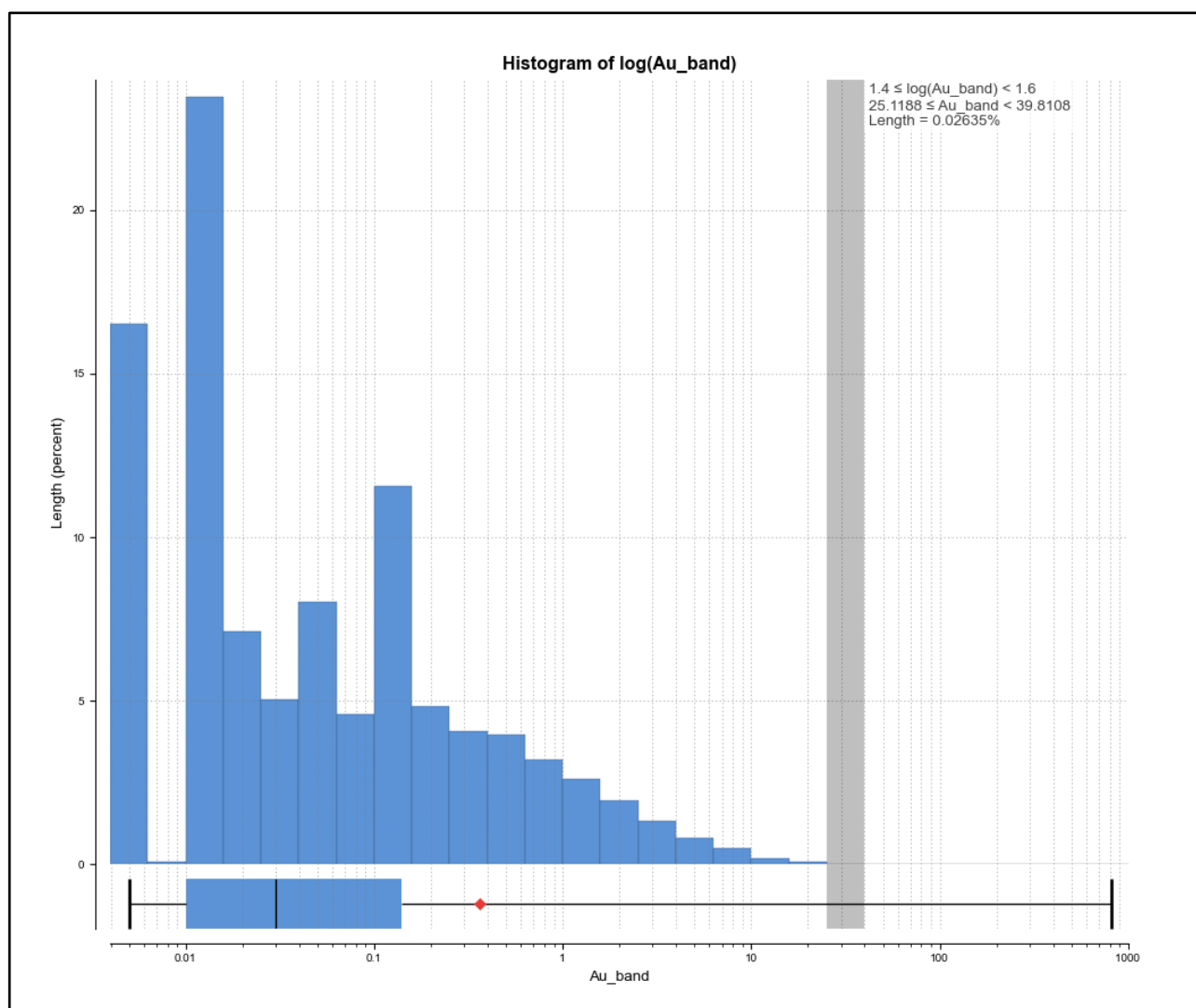


Рисунок 35 – Гистограмма прологарифированных значений проб золота всей выборки.

Горизонтальная ось – значения содержаний; вертикальная ось – доля их интервалов

Также был применён «квантильный» метод, в котором выборка сначала проверяется на аномалии, а затем происходит поиск ураганных содержаний. Аномалия подтверждается, если 90-й перцентиль включает в себя более 40% металла. Затем внутри этих аномальных проб производится поиск ураганных содержаний, где их границей считается первый перцентиль с конца, который несёт более 10% металла [Поротов, 2006]. Так, при генеральной выборке в 139726 проб 90% перцентиль проходит по 125753-ей пробе. В большой интервал (до 90% проб) входит 24,04% всего среднего содержания золота, в оставшиеся 10% проб - 76%, поэтому аномалия подтверждается (Рисунок 36).

В оставшейся группе находится 13973 проб, а первый перцентиль с конца по ним проходит по 13833-ей пробе. В остатке остаётся 16,49% содержаний, что означает возможность выбора границей ураганных значений 13833-ю пробу, а именно содержание в 21,2 г/т.

С учётом проведённых методов границей ураганных методов было принято использовать значение, равное 25 г/т, выделив 103 пробы, как ураганные.

Для оценки запасов было рассмотрено 3 варианта работы с ураганными содержаниями: 1) без ограничения; 2) с «плавным ограничением», с ограничением влияния ураганных проб по расстоянию; и 3) с полной заменой ураганных значений на пороговое – 25 г/т. Во втором варианте ограничение применяется на этапе интерполяции и зависит от положения пробы относительно оцениваемого блока. Ураганная проба (> 25 г/т), попавшая во внутреннюю часть поисковой окрестности в пределах 50% размера поискового эллипсоида, участвует в расчёте с её фактическим значением, так как на таком удалении её высокое содержание будет считаться достоверным для данного блока. Если же ураганная проба попадает во внешнюю часть окрестности, её значение при расчёте усекается до порогового – 25 г/т. На пробы с содержанием ниже порогового данное ограничение не распространяется.

Исходная выборка композитов при этом не изменяется: одна и та же проба может быть усечена при оценке одних блоков и использована с фактическим значением при оценке других. Тем самым второй вариант занимает промежуточное положение между первым и третьим – он сохраняет ураганные значения в непосредственной близости от опробования и ограничивает их вклад в оценку удалённых блоков.

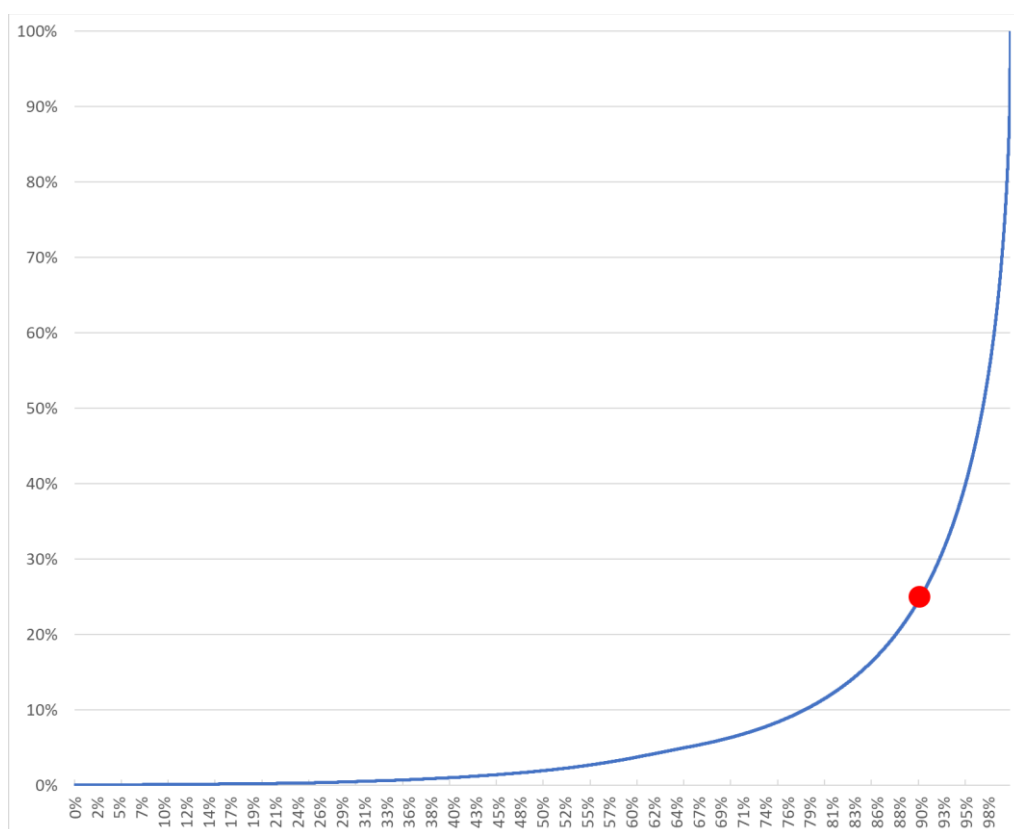


Рисунок 36 – Кумулятивная диаграмма долей содержаний золота (вертикальная ось). Горизонтальная ось указывает кумулятивную долю всех проб. Красной точкой указана граница 90% перцентиля

2.5.2. Геологическая 3D модель месторождения

Первым этапом построения модели являлось получение рудных интервалов, которые выделялись исходя из параметров кондиций по ТЭО [Чернышёв, 2019]:

- Минимальная истинная мощность рудного интервала, включаемого в подсчёт запасов – 3 метра.
- Максимальная истинная мощность прослоев пустых пород и некондиционных руд, включаемых в подсчёт запасов – 5 метров.
- Подсчёт запасов произведён статистическим способом в границах минерализованных зон, оконтуренных по крайним рудным интервалам.

Полученные интервалы визуально не дают чётких паттернов для выделения рудных тел (Рисунок 37, 38).

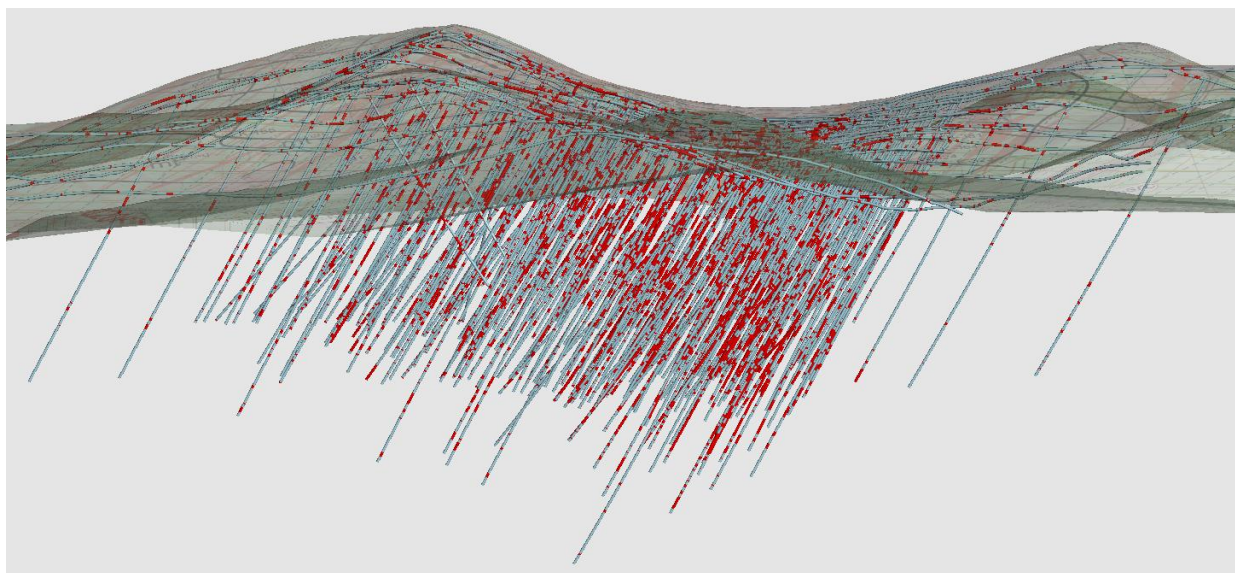


Рисунок 37 – 3D модель, вид направлен по азимуту 25° с указанием рудных интервалов от 0,2 г/т (красное) и нерудных (голубое)

Для визуализации гипотезы о наклонном положении рудных тел было произведено автоматическое экспресс построение 3D моделей, где в качестве метода интерполяции данных использовалась радиально-базисная функция [Stewart et al., 2014]. В качестве входных данных были использованы исходные данные кернового и бороздового опробования, а поисковый эллипс имел схожие с зоной дробления элементы залегания с увеличенным коэффициентом радиуса по оси падения.

Оперативная визуализация позволила определить несоответствие концепции в юго-восточной части месторождения вблизи зоны прохождения Дяппенского разлома (Рисунок 39) в виде рудного столба. Полученный результат указывает на сложность строения объекта и

добавляет к общей концепции отдельные субвертикальные рудные тела, приуроченные к крупному разлому.

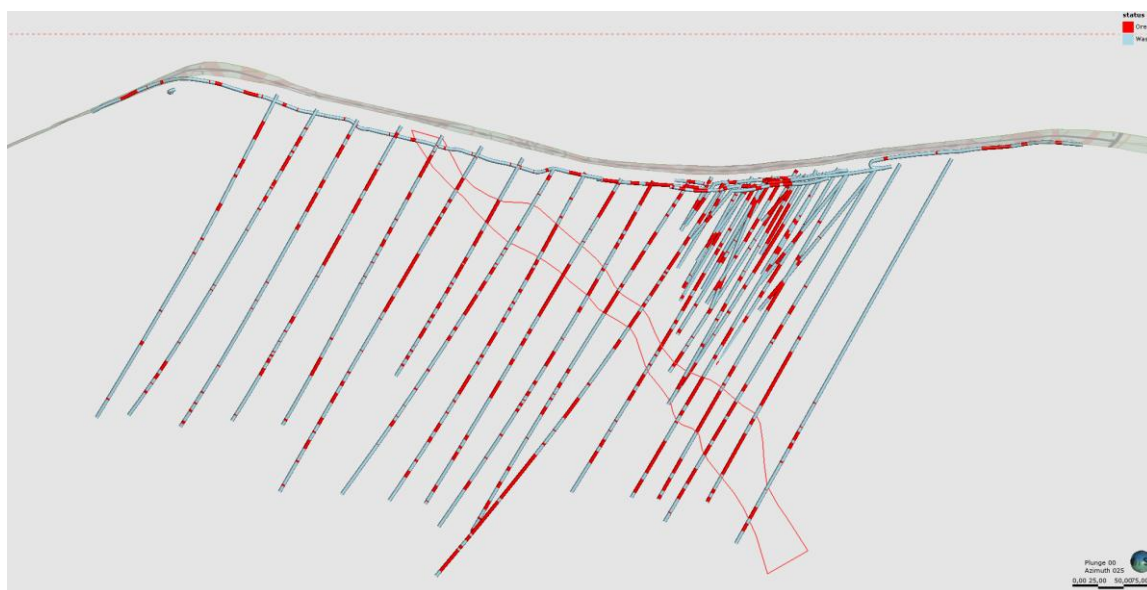


Рисунок 38 – Разрез СЗ простирания (азимут 295) с выделением зоны дробления (Центральная) с указанием рудных интервалов от 0,2 г/т (красное) и нерудных (голубое)

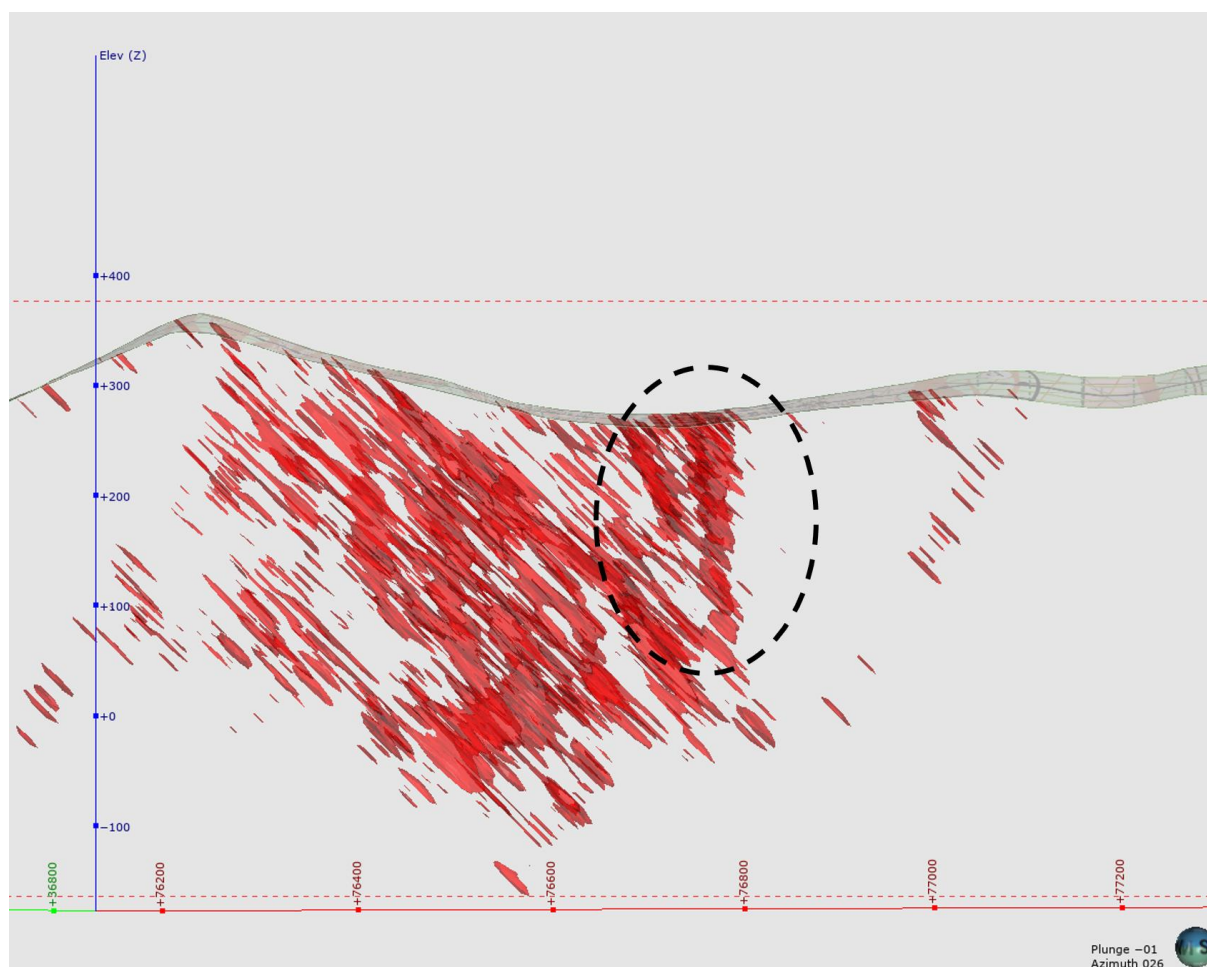


Рисунок 39 – Разрез 3D модели по азимуту 295° с указанием рудного столба, не попадающего под общую концепцию

На основе предварительного анализа экспресс модели было выделено 5 отдельных рудных доменов (участков), каждый из которых имеет собственные характеристики и выборку данных. 5 доменов при этом группируются в 3 основных (Рисунок 40):

- Зона дробления «Центральная» (на последующих графиках выделена синим цветом и обозначена как “Tecton”)
- Рудные столбы: два рудных столба, связанные, вероятнее всего, с Дяппенским разломом (на графиках выделены фиолетовым и зеленым цветом, обозначены как “RS” и “RS 2”);
- Рудные тела: два домена, соответствующие лежащему и висячему блоку (на графиках выделены красным цветом и соответствуют северной и южной части месторождения, обозначены как “Ore N” и “Ore S”, соответственно).

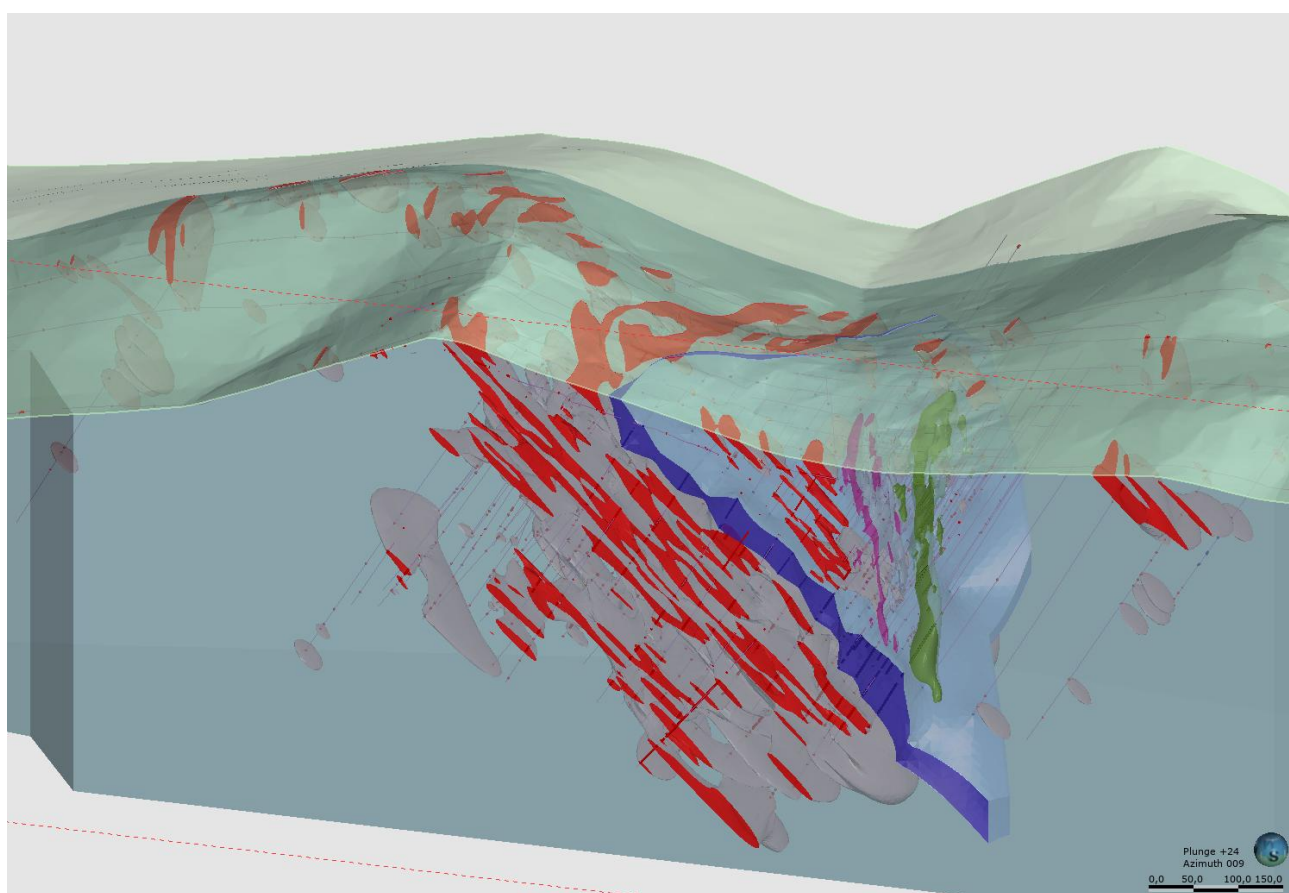


Рисунок 40 – 3D модель месторождения с выделенными доменами. Прозрачным голубым цветом указана пустая порода

Графики соотношения содержания золота к рудным доменам подтверждают корректность выделения доменов, так как на границе доменов происходит резкий переход по средним содержаниям (Рисунок 41).

В работе были использованы имплицитные (условные) методы моделирования, которые имеют ряд преимуществ, поскольку создают геологические поверхности и объемы с помощью математических функций, которые интерполируют данные напрямую из скважин и траншей, что

позволяет получать объективный результат и оперативно тестировать различные геологические гипотезы.

Низкоуровневая детализация рудных тел не представляется необходимой в связи с особенностью строения объекта в виде штокверка, для которого нецелесообразно выделять сотни жил. Детализация возможна при ручном оконтуривании, которое в свою очередь является методом эксплицитного (явного) моделирования и имеет серьезные ограничения при работе со сложными структурами, такими как штокверки. Во-первых, этот подход крайне субъективен, поскольку результат зависит от интерпретации конкретного геолога. Во-вторых, при работе со сложной геометрией, например, с многочисленными пересекающимися жилами, возникают технические проблемы с построением корректных каркасов. Также подход отличается высокой трудоемкостью как при первичном построении, так и при потребности в актуализации модели, так как требуется повторное ручное оконтуривание [Cowan et al., 2003].

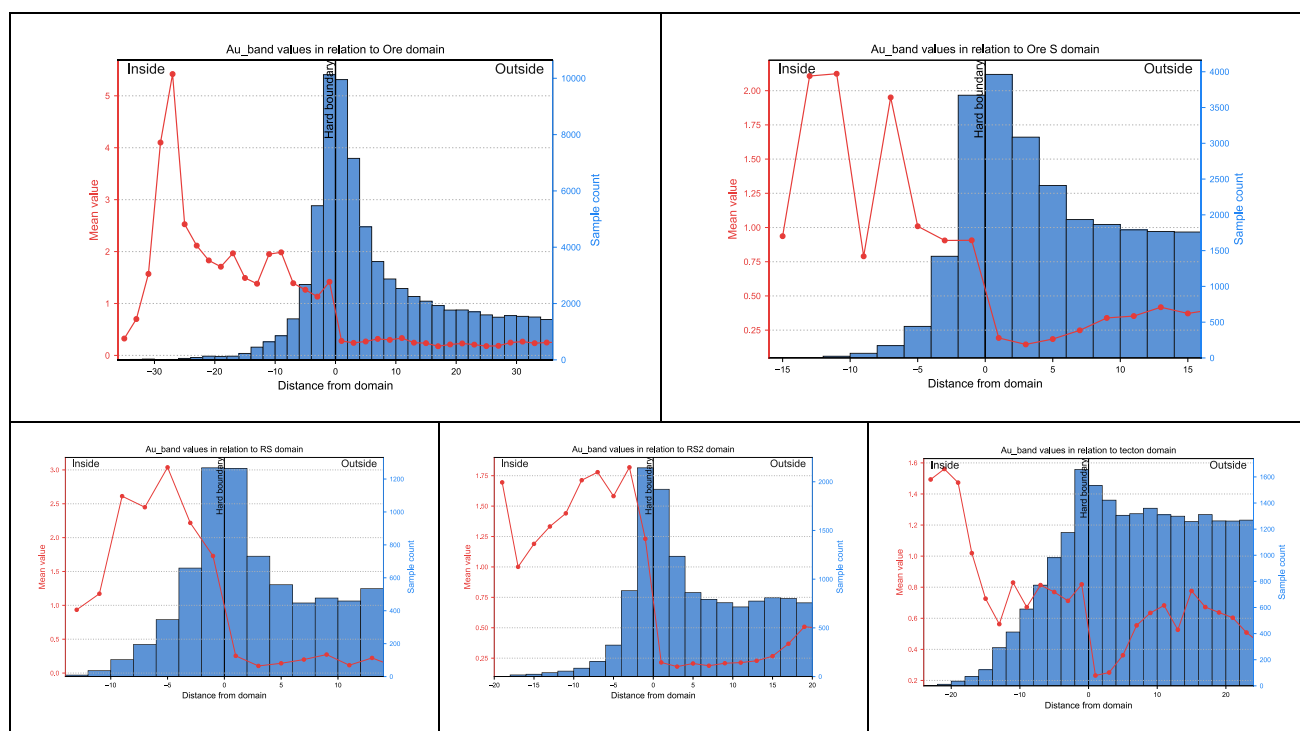


Рисунок 41 – Графики оценки доменов с указанием количества проб (синие столбцы, вертикальная ось справа), их средним содержанием (красная линия, вертикальная ось слева) и расстоянием от границы доменов (горизонтальная ось)

2.5.3. Подсчёт запасов

Методология настоящего подсчета запасов отличается от методологии, которой придерживались предшественники. Предшественники использовали метод параллельных сечений и коэффициенты рудоносности, а для каждого бортового содержания применяли один и тот же рудный контур, выделенный по содержанию золота 0,2 г/т.

Подсчёт запасов в данной работе был проведен при бортовом содержании 0,2 г/т, 0,5 г/т и 0,7 г/т, что соответствует значениям между минимальным бортом по ТЭО и итоговым бортовым содержанием по ТЭО. Далее представлено описание оценки при бортовом содержании 0,2 г/т.

Интерполяция содержаний выполнена методом обратных взвешенных расстояний (IDW). Выбор метода обусловлен двумя обстоятельствами. Во-первых, высокая изменчивость содержаний и отсутствие закономерности их распределения не позволяют построить устойчивую и уверенно интерпретируемую модель вариограммы, а гипотеза стационарности в пределах рудной зоны не является выполненной. В этих условиях кригинг не может быть реализован, поскольку должен опираться на корректную вариограммную модель. Во-вторых, разведочная сеть достаточно равномерна, что дает схожие результаты при оценке обоими методами [Journel et al., 1978; Isaaks et al., 1989; Pyrcz et al., 2014]. Как результат, это делает применение более простого и устойчивого IDW обоснованным.

Параметры интерполяции выбраны исходя из пространственного распределения проб, обусловленных сетью бурения и строением объекта (Таблица 9). Были выбраны следующие размеры блоков: базовый, составляющий половину от минимального расстояния между профилями, – 10х10х2, и повышенные – 20х20х4 и 40х40х8, для оценки эффекта сглаживания за счет попадания большего количества проб в блок.

Таблица 9 – Параметры поисковых интервалов для блоков 10х10х2

Домен	Радиус поиска по осям	Ориентация эллипсоида поиска	Минимальное количество проб для оценки	Максимальное кол-во проб для оценки	Количество секторов эллипсоида	Максимальное кол-во пустых секторов
Рудная зона N	60х60х5	Падение – 44,37 Азимут падения – 115,17	20	80	10	4
Рудная зона S	60х60х5	Падение – 44,37 Азимут падения – 115,17	20	80	10	7
Рудный столб 1	60х60х5	Падение – 82,00 Азимут падения – 115,17	20	80	10	7
Рудный столб 2	60х60х5	Падение – 82,00 Азимут падения – 115,17	20	80	10	7
Центральная зона	90х90х10	В соответствии с отстроенной зоной дробления по данным ТЭО	4	80	10	7

В моделях с блоками 20х20х4 и 40х40х8 менялись лишь радиусы поисковых эллипсоидов пропорционально увеличению размеров блока. Для корректного отражения сложной морфологии оруденения и точного подсчета объемов на границах рудных тел применялось субблокирование. Минимальный размер субблока был задан как 2,5х2,5х0,5 м, что соответствует

параметрам минимальной выемочной единицы при отработке месторождения [Rossi, 2014]. Каждая модель рассчитывалась с этим размером с сохранением минимального размера блока выемочной единицы [Rossi, 2014]. Применение субблоков позволяет минимизировать краевое разубоживание в модели и получить достоверную статистику распределения металла для всех вариантов блочных моделей. На основании расчетов блочных моделей была получена статистика (Таблица 10).

Таблица 10 – Основные статистические параметры блочных моделей

	Без обрезки ураганов			С мягкой обрезкой ураганов			С полной обрезкой ураганов		
	10x10x2	20x20x4	40x40x8	10x10x2	20x20x4	40x40x8	10x10x2	20x20x4	40x40x8
Среднее содержание, г/т	1,19	1,18	1,21	1,15	1,14	1,16	1,08	1,08	1,09
Стандартное отклонение	2,09	2,11	2,26	1,98	1,95	2,21	1,07	1,02	1,02
Медиана, г/т	0,78	0,79	0,81	0,77	0,79	0,80	0,77	0,79	0,80
Максимальное значение, г/т	263,26	226,66	95,63	263,26	226,66	95,63	24,95	22,46	18,93

Для штокверковой морфологии, которая характеризуется высокой изменчивостью содержаний, выбор метода контроля ураганных значений является ключевым. Отказ от обрезки ураганов приводит к завышенному среднему содержанию (1,18-1,21 г/т) и высокому стандартному отклонению (2,09-2,26). Максимальные значения (до 263,26 г/т) достигаются из-за влияния единичных высоких проб. Такая модель может привести к значительному завышению запасов.

В то же время полная обрезка ураганов является слишком консервативным вариантом. Это резко снижает среднее содержание (1,08-1,09 г/т) и делает стандартное отклонение низким (1,02-1,07). Модель становится слишком сглаженной и теряет естественную геологическую изменчивость, которая является неотъемлемой частью штокверка. Это может привести к недооценке и занижению богатых участков рудного тела.

Компромиссным вариантом является «мягкая» обрезка (clamping), при котором снижается влияние изолированных ураганных проб, но сохраняются высокие значения там, где они подтверждены соседними пробами. Среднее содержание (1,14-1,16 г/т) становится меньшим, чем при отсутствии обрезки, но не таким заниженным, как при полном исключении ураганных значений. Стандартное отклонение (1,95-2,21) остается достаточно высоким, что корректно отражает высокую изменчивость штокверка. Максимальные значения также остаются высокими, но их влияние на модель ограничено, что предотвращает глобальное завышение запасов.

Что касается размера блока, то он должен соответствовать плотности разведочной сети и предполагаемой минимальной выемочной единице. Блоки 20х20х4 и 40х40х8 являются достаточно крупными и могут привести к сильному сглаживанию (усреднению) значений. Неоднородность содержаний внутри такого большого блока теряется. Для штокверка, где рудные прожилки могут быть тонкими, а золото распределено неравномерно, такие крупные блоки не смогут адекватно отразить морфологию оруденения.

На основании проведённого анализа, наиболее оптимальной с геологической точки зрения является блочная модель 10х10х2 с «мягкой» обрезкой ураганов.

2.5.4. Заверка построенной модели

Заверка геологической 3D-модели представляет собой важный этап в процессе оценки минеральных ресурсов, конечной целью которого является подтверждение, что модель является геологически обоснованной и надёжно представляет месторождение [«Mineral Resource and Ore Reserve Estimation», 2014; Wц, 2015].

Первоначальным и фундаментальным методом заверки является визуальная проверка, которая служит для оценки локальной точности модели и ее геологического правдоподобия. Проверка заключается в создании ряда вертикальных разрезов через блочную модель, на которые одновременно выводятся оценённые значения в блоках, а также исходные данные скважин и траншей. Анализ полученных разрезов позволяет убедиться в наличии пространственной согласованности между блоками и соответствующими интервалами в скважинах. Этот метод эффективен для оценки степени сглаживания, присущей любому методу интерполяции, и для контроля за тем, что модель корректно учитывает заданные геологические границы доменов, не допуская нежелательной экстраполяции содержаний через них. В целом, визуальный анализ позволяет оперативно выявлять грубые ошибки в параметрах оценки или неточности в исходных геологических интерпретациях. Построенная модель корректно накладывается на интервалы, и содержания в них совпадают (Рисунок 42).

В дополнение к визуальной заверке был применён статистический метод, в основе которого лежит сравнение средних содержаний по всем блокам модели со средним значением по исходным композитам. Гистограмма указывает на корректно проведённое моделирование, отражая практически одинаковое среднее значение по каждому домену (Рисунок 43). Исключением является «Центральная зона» (зона дробления – Tecton). Она была выделена по литологии и оконтуривалась не по содержаниям, а по геологической интерпретации, включив в себя большой объём, что и привело к занижению содержания.

Для выявления локальных смещений, которые могут быть не видны при общем статистическом анализе, был использован метод пространственного анализа Swath Plots.

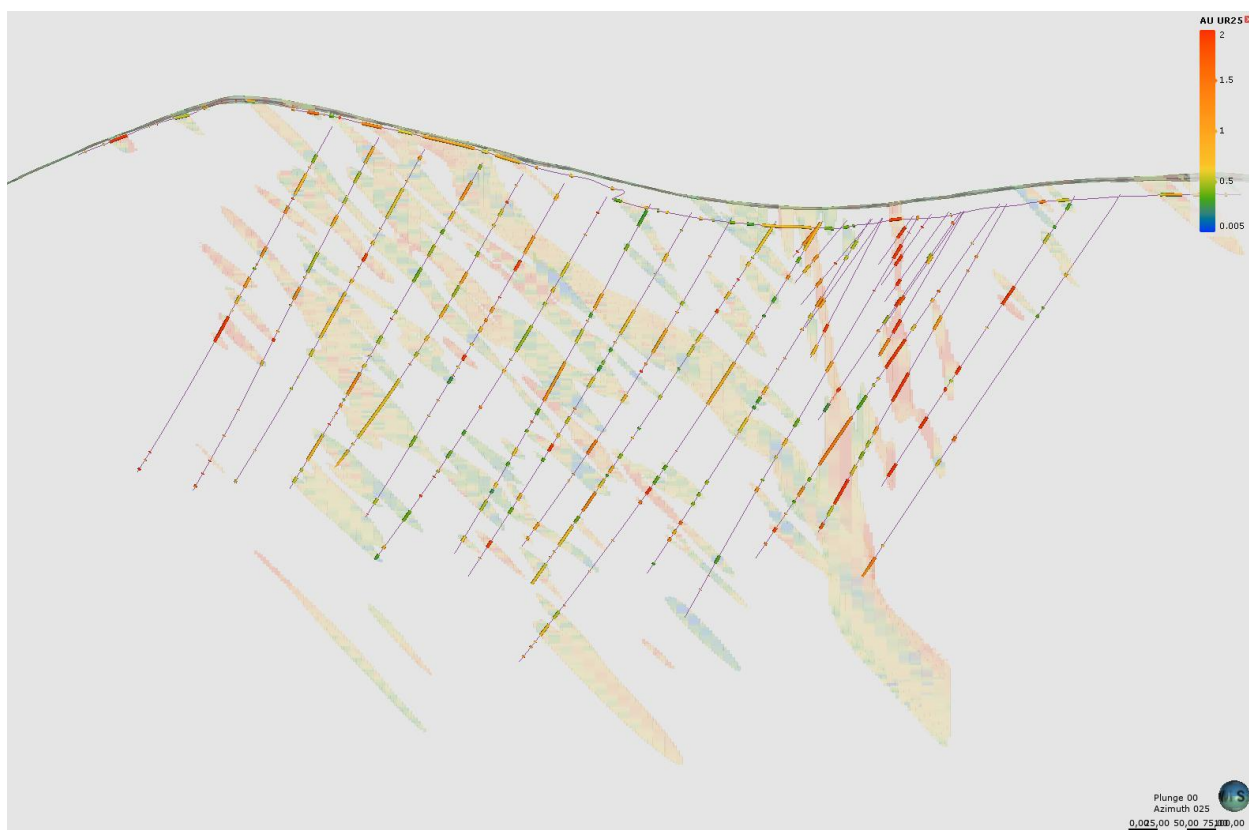


Рисунок 42 – Разрез блочной модели по 52-ому буровому профилю

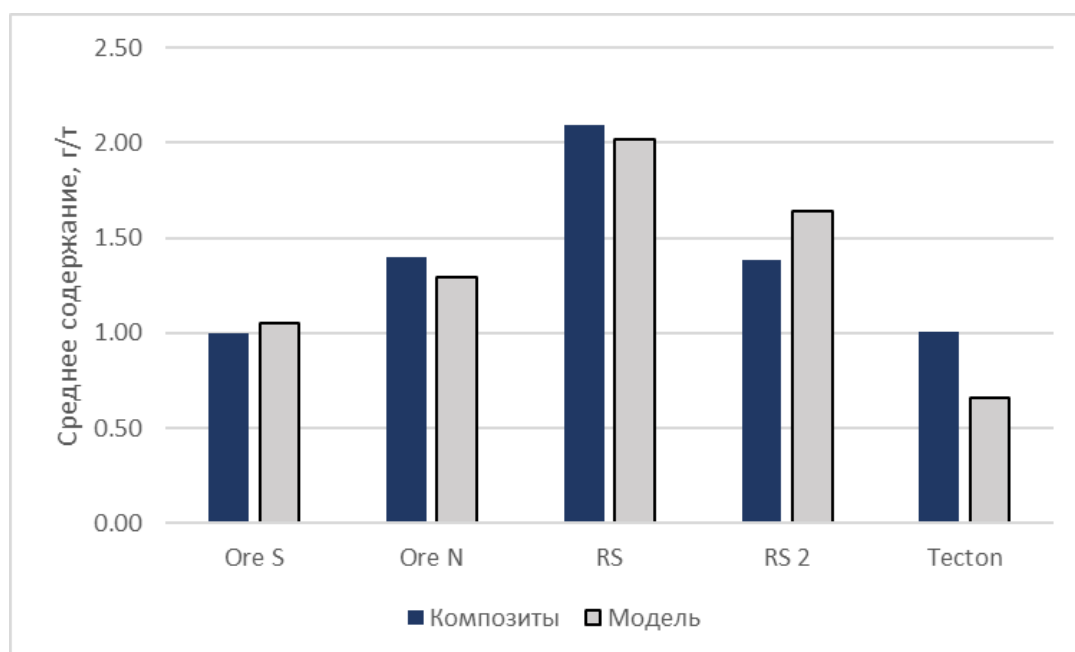


Рисунок 43 – Гистограмма средних содержаний в каждом домене по композитам и по полученной 3D модели

Суть метода заключается в искусственной нарезке трехмерной модели месторождения на равные параллельные срезы вдоль одной из осей координат. В каждом срезе рассчитываются два значения: среднее содержание полезного ископаемого по фактическим данным бурения и

среднее содержание в блочной модели. Полученные результаты отображаются на едином линейном графике в виде двух кривых [Rossi, 2014]. Анализ этих графиков позволяет визуально оценить, насколько точно смоделированные содержания повторяют пространственные тренды реальных данных. В корректно построенной модели кривая блочной модели выглядит более плавной, отражая неизбежный эффект математического сглаживания, но при этом она обязательно проходит через центр локальных колебаний кривой фактических данных. Такой результат и был получен в настоящей работе. Для демонстрации были представлены графики по оси Z, которые обеспечивают непрерывное и плотное распределение данных на каждом срезе, что гарантирует достоверность валидационного сравнения без разрывов (Рисунок 44).

Для объективности оценки на задний план графиков выведена гистограмма количества блоков в каждом срезе. Это позволяет игнорировать расхождения между средними содержаниями, которые возникают на краях месторождения из-за меньшего объема данных.

Проведенная комплексная заверка, включающая визуальный, статистический и пространственный анализ, подтвердила высокое качество и геологическую состоятельность построенной 3D-модели. Результаты всех этапов проверки продемонстрировали отсутствие значительных смещений и высокое соответствие оцененных значений исходным данным опробования. Таким образом, модель признана достоверной и является надежной основой для последующего подсчета запасов.

По тому же принципу были отстроены и заверены модели с бортовыми содержаниями 0,5 г/т и 0,7 г/т (Рисунок 45).

При бортовом содержании 0,2 г/т значения собственной модели совпадают с ТЭО в рамках 10% погрешности, что является адекватным результатом сравнения значений, полученных с помощью цифровой модели и методом параллельных сечений (Рисунок 46). Однако при повышении бортового содержания появляются существенные различия в параметрах запасов.

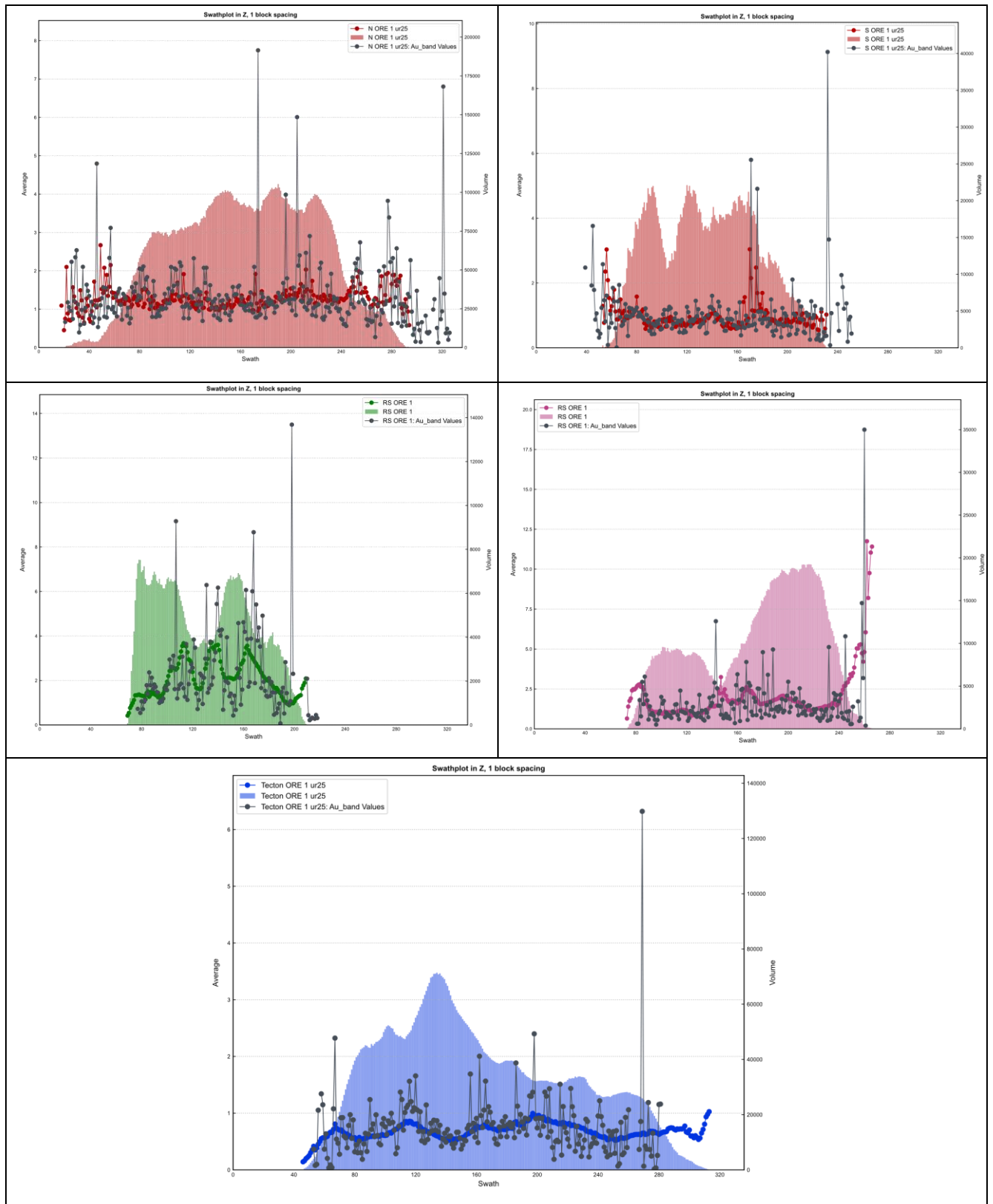


Рисунок 44 – SWATH-графики по оси Z. Цвета соответствуют ранее выделенным доменам (как на рис. 32)

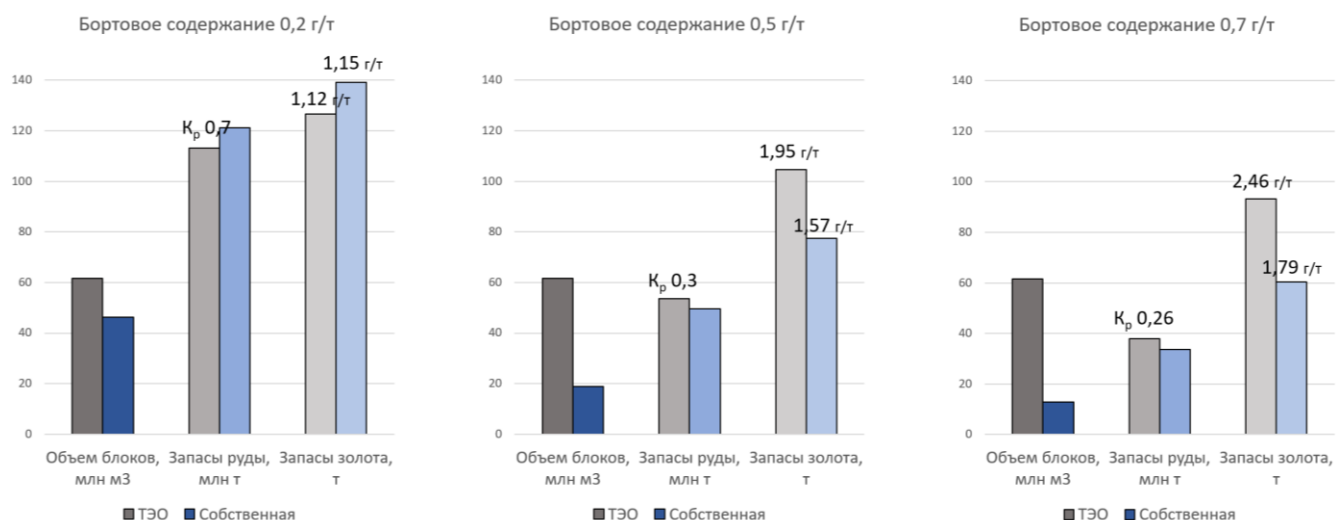


Рисунок 45 – Сверка запасов с ТЭО при разных бортовых содержаниях

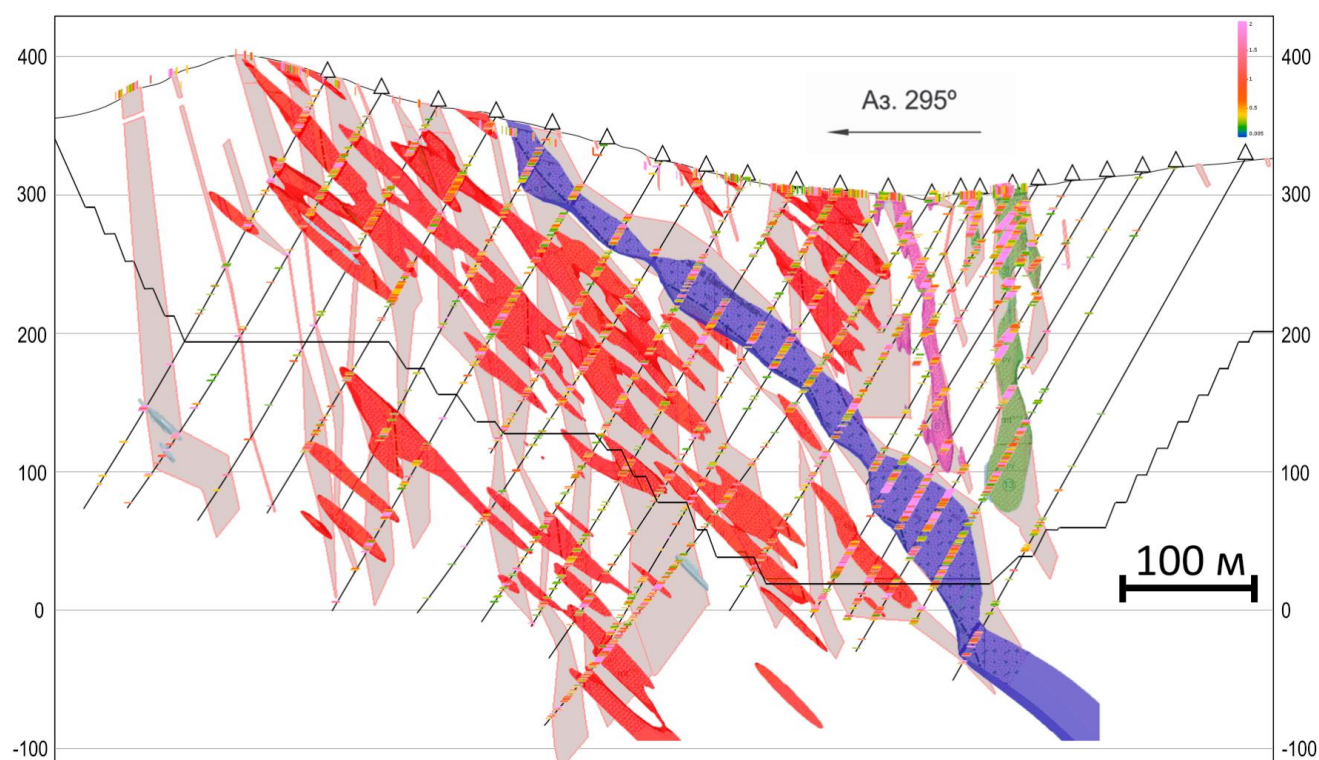


Рисунок 46 – Рудные тела по ТЭО (розовые тела) и новой модели

Предшественниками был отрисован контур минерализованной зоны по 0,2 г/т методом параллельных сечений. Этот контур определял максимальный геометрический объём потенциального оруденения. Однако при повышении бортового содержания контуры не были перестроены по соответствующему содержанию. Вместо этого был сохранён исходный контур (по 0,2 г/т) и снижался лишь коэффициент рудоносности. Такой метод неявно предполагает, что руда с высоким содержанием равномерно распределена внутри огромного объема минерализации, который ограничивают коэффициентом рудоносности. Однако руды с высокими

содержаниями обычно формируют отдельные, более компактные тела внутри общей минерализованной зоны, и контур по более высокому борту должен иметь совершенно другую, более сложную форму (Рисунок 47).

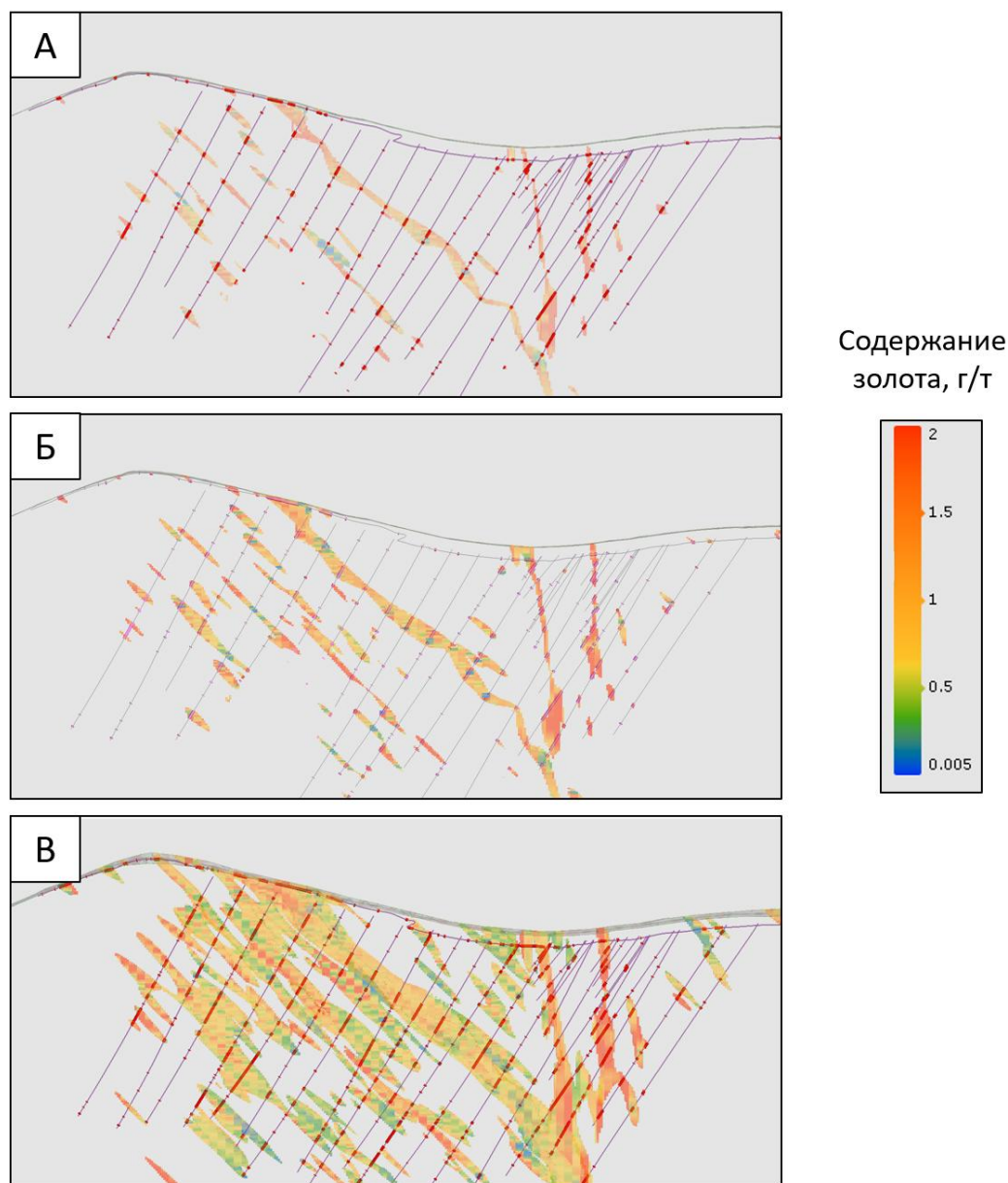


Рисунок 47 – Модели месторождения с различными бортовыми содержаниями, полученные с помощью компьютерного моделирования. Бортовые содержания: А – 0,7 г/т, Б – 0,5 г/т, В – 0,2 г/т

Таким образом, при сохранении внешнего контура 0,2 г/т для подсчета запасов по более высокому борту свойства руды приписываются всему большому объему, что приводит к колоссальному завышению запасов (свыше 50% с полученной моделью).

Снижение коэффициента рудоносности в данном случае также не является эффективным, поскольку при использовании метода параллельных сечений невозможно точно сказать, какую долю от общего объема занимают богатые руды.

Геостатистический подход же работает принципиально иначе, что обеспечивает его большей точностью. IDW и Кригинг учитывают пространственную взаимосвязь проб и их содержаний, позволяя моделировать реальную геологическую изменчивость. Блочная модель даёт возможность оценивать содержание для каждого отдельного блока модели, а не для всего контура в целом. Геостатистический подход создает трехмерное распределение содержаний, при котором богатые блоки естественно соседствуют с бедными. Модель не "размазывает" содержание, а локализует его [«Mineral Resource and Ore Reserve Estimation», 2014].

Таким образом, использование трехмерной блочной модели, построенной с применением геостатистических методов, обеспечивает значительно более точную и геологически достоверную оценку запасов по сравнению с методом параллельных сечений. Расхождение в оценках, достигающее 55%, является прямым следствием фундаментальных недостатков примененного метода параллельных сечений при сохранении одного контура минерализации. Метод 3D-моделирования с использованием взвешенных средних ближайших проб (IDW или Кригинг) является современным отраслевым стандартом, так как он учитывает пространственную структуру оруденения и обеспечивает локально достоверную оценку. Построенная блочная модель в настоящем исследовании является надежным инструментом для планирования горных работ и оценки запасов при любых экономических сценариях.

Глава 3. Возможность комплексного подхода к отработке¹

3.1. Особенности нахождения сурьмы на месторождении

Месторождение Дяппе с момента обнаружения в 1935 году считалось золотосурьмяным месторождением. В промежутке 1941-1942 гг. было добыто 15,0 т сурьмы при 30% её содержании, что характерно для руды с высоким качеством [Екимов, 2012]. Однако по итогам проведения крайних разведочных работ сурьма не была поставлена на баланс в связи с отсутствием промышленной минерализации.

На месторождении Дяппе основным минералом сурьмы является антимонит (Рисунок 48). Он образует длинные радиально-лучистые агрегаты, которые заполняют трещины в кварце. В составе антимонита, помимо сурьмы, также установлены содержания железа (0,3 %), мышьяка (0,1 %) и серебра (0,001%) [Екимов, 2012].



Рисунок 48 – Кристаллы антимонита и галенита в кварцевой жиле [Екимов, 2012]

Помимо антимонита, на Дяппе также встречаются галенит и джемсонит, которые являются индикаторами наиболее поздней стадии минералообразования кварц-сурьмяной ассоциации. Данные минералы образуют кристаллы неправильной формы (ксероморфные), в некоторых случаях заполняют промежутки между слегка корродированными зернами кварца, образуя вроски в них. [Екимов, 2012].

¹ При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором в соавторстве, в которых, согласно «Положению о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова», отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

Кузнецов М.В., Богуславский М.А. Геологические особенности месторождения Дяппе (Хабаровский край) и возможности комплексного подхода к отработке // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2026. Т. 65. №2. С. 80-87. EDN: VOIZDE. Импакт-фактор 0,478 (РИНЦ). 1,50 п.л., вклад автора 80%.

Наличие антимонитовой минерализации в комплексе с адуляром, рассмотренным ранее в главе с минералогическим описанием настоящей работы, и зонами кислотного выщелачивания (березитизации) свидетельствует о том, что изученный объект представляет собой эпитермальную золотосурьмяную систему. Система характеризуется ярко выраженным многостадийным развитием и телескопированием: ранние высокотемпературные ассоциации, связанные со становлением аплитов, совмещены с поздним низкотемпературным сурьмяным этапом.

Уверенно говорить о соотношении во времени образования золота и сурьмы сложно, однако построенная 3D модель на основе данных разведочных работ позволяет выделять разные этапы их минерализации. Построенные объемные модели сурьмы (зеленая оболочка) от 0,1% и золота (рыжие оболочки) от 0,4 г/т указывают на отсутствие пространственной связи между элементами (Рисунок 49).

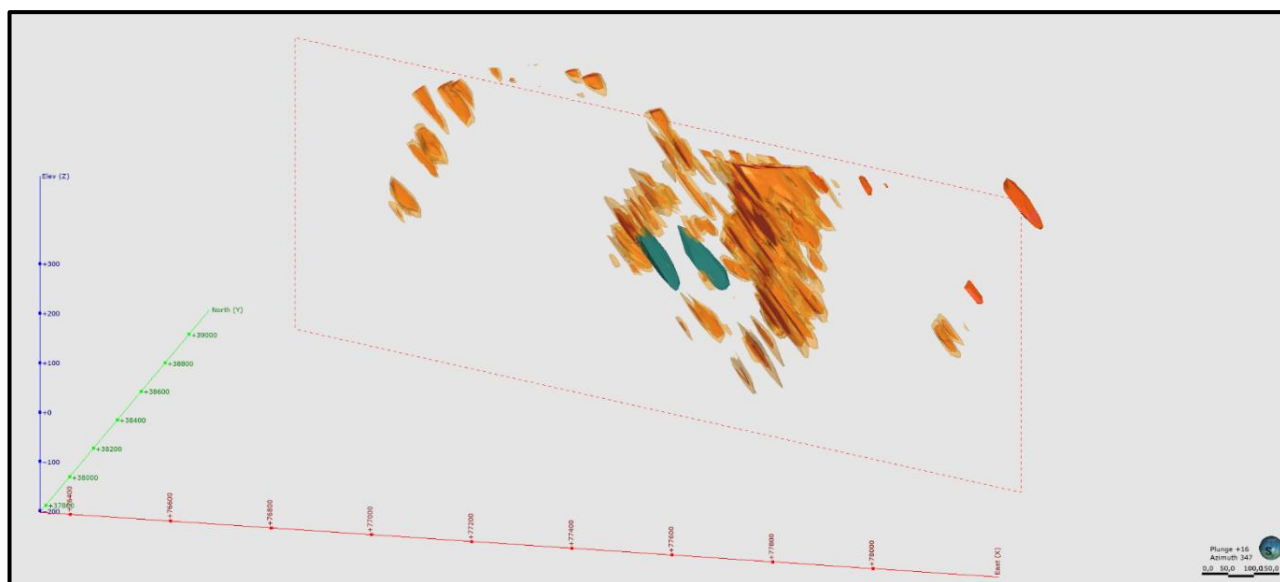


Рисунок 49 – Объемные модели сурьмы (зеленые тела) от 0,1% и золота (рыжие тела) от 0,4 г/т северо-восточной части месторождения Дяппе от разреза с азимутом простираия 295°

Единственные доступные на сегодняшний день сведения о параметрах антимонитовых жил, разработка которых велась в 1940-х годах, содержатся в объяснительной записке к подсчёту запасов 1940 года. В этом документе приведена зарисовка из забоя, на которой изображены желваки антимонита в кварцевых жилах мощностью около 30 см. (Рисунок 50).

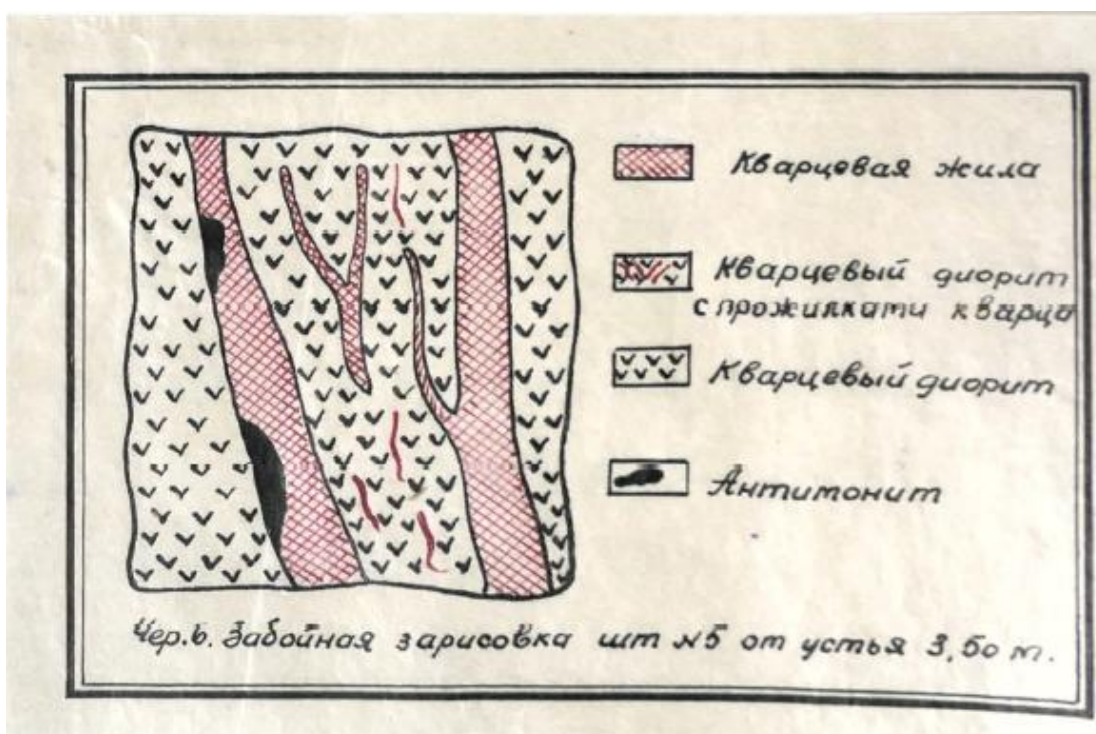


Рисунок 50 – Забойная зарисовка с указанием антимонита в кварцевых жилах [Суматов, 1940]

На архивных зарисовках забоя видно, что антимонит занимает около 5% площади плоскости обнажения, и гнезда с ним довольно чётко выделяются на фоне кварцевых жил. Такая морфология рудных тел сурьмы позволяет при отработке получать крупнокусковой товарный продукт без дополнительных технологических переделов, таких как флотация [Соложенкин и др., 1985]. Содержание сурьмы в руде, согласно историческим данным, составляет 30 %, что отвечает требованиям, предъявляемым к шихте при выплавке черновой сурьмы [Мельников, 1977]. Принятая технология наиболее эффективна для обогащения монометалльных антимонитовых руд [Поляков, 2012].

Помимо отдельных гнёзд с антимонитом, можно рассматривать и совместную минерализацию сурьмы в золотоносных рудных телах, однако качество (содержание) будет значительно ниже (более чем в 10 раз) в сравнении с предыдущим вариантом, а технологический процесс в таком случае будет совмещен с золотом, где итоговым продуктом будет являться флотоконцентрат [Лаврик и др., 2020].

3.2. Оценка ресурсов сурьмы на месторождении

Согласно методическим рекомендациям ГКЗ по применению классификации запасов и прогнозных ресурсов сурьмяных руд, руды с гнездовым распределением полезного компонента относятся к четвертой группе, самостоятельного промышленного значения не имеют и пригодны лишь для попутной отработки действующими предприятиями. В этой связи нет четких рекомендаций по параметрам разведочных сетей. В состав работ для подсчёта запасов по

категориям С₁ – С₂ требуется добавлять непрерывное прослеживание по штольням и штрекам, а также сгущать сеть [Методические рекомендации, 2007]. Таким образом, корректный подсчет запасов без проведения подземных горных выработок невозможен.

Последние разведочные работы, ориентированные на золото, проводились с использованием сети 40×40 м, что не позволило оценить объемы сурьмы из-за характера распределения и морфологии рудных тел. Средняя длина керна, отбираемого на пробу, составляет метр, в то время как сами гнезда антимонита по одной оси могут достигать размеров до 30 см (Рисунок 51). Поэтому при отборе пробы из скважины, попавшей в антимонит, содержание сурьмы распределялось на всю длину пробы, что искажало интерпретацию наличия сурьмы в недрах. К тому же вероятность непопадания в гнезда антимонита при текущих параметрах сети очень высока. По этой причине на Дяппе сурьма в значимом количестве (от 0,1%) встречалась лишь в небольшом количестве проб: до 20 из общего количества в 25844 проб.



Рисунок 51 – Пересечение скважиной жилы с антимонитом, Сква. С-5814, гл. - 81.0 м

В качестве метода для анализа проб предшественники применяли атомно-эмиссионную спектрометрию с индуктивно-связанной плазмой (ICP AES), в которой верхним пределом количественного определения сурьмы был 1% (Таблица 11). В 5 пробах генеральной выборки результат анализа превышает данное значение, что может указывать на попадание в гнездо антимонита.

В целях собственной оценки прогнозных ресурсов минимальным содержанием для оконтуривания рудной минерализации был выбран 0,1%, как один из используемых порогов на подобных объектах [Волков, Галямов, 2025]. Данный порог позволяет выделить потенциально

рудоносные зоны, тяготеющие к гнездовому типу оруденения. Также были выделены зоны с содержанием от 0,01%, которые могут являться потенциальной рудой для последующей флотационной переработки.

Таблица 11 – Выборка ICP AES из образцов с содержанием сурьмы от 0,01% из скважины 5814, отсортированная по убыванию содержания сурьмы (ppm)

Образец	Al	As	Ca	Cr	Cu	K	Mg	Mn	Sb	Sr	Zn
5814-130	0.18	1820	0.13	50	49.4	0.11	0.03	103	>10000	35.8	9.5
5814-129	0.52	1070	0.28	27	25.2	0.25	0.14	278	2600	47.8	37.5
5814-131	0.45	943	1.72	34	63	0.33	0.07	407	532	45.9	50.2
5814-135	0.5	1220	0.3	13	40.5	0.28	0.12	457	372	77.5	47.2
5814-112	0.43	1020	0.31	24	20.3	0.29	0.11	286	193	39.3	44.5
5814-134	0.92	428	0.28	35	40.9	0.41	0.45	320	145	39.4	46.5
5814-138	0.48	806	0.61	11	37.4	0.32	0.1	524	135	36.3	49
5814-144	0.59	1810	0.5	28	24.3	0.31	0.2	374	133	46.8	42

Для оценки прогнозных ресурсов было принято решение использовать не объёмную модель, а выделение контуров минерализованных зон на каждом разрезе. Такой подход снижает вероятность необоснованного увеличения количества ресурсов. Расстояние между профилями составляет около 40 метров, а мощность жил около 30 см. В таких условиях соединение контуров между профилями с построением объёмной модели приведёт к некорректной завышенной оценке.

Площадь контуров с меньшим бортовым содержанием составляет 4 570 м², с большим – 1 114 м². Плотность горной массы принята за 2,65 т/м³. С учётом исторических данных по мощности жил и по их количеству на обнажении, прогнозные ресурсы антимонита при бортовых содержаниях сурьмы 0,01% и 0,1% составляют 181,7 т и 44,3 т, соответственно.

Важно отметить, что проведённый анализ ICP-AES по ряду элементов, включая сурьму, сделан только для части проб, относящихся к северо-восточной части месторождения (Рисунок 52). Поэтому есть вероятность получения схожих результатов и по юго-западной части месторождения. Как следствие, общее количество прогнозных ресурсов может достигать более 360 т антимонита. В пересчёте на сурьму оценка составляет около 250 т при бортовом содержании сурьмы 0,01%, и 60 т – при 0,1%.

Важно учитывать, что сурьма находится внутри контура предполагаемого карьера. Это даёт возможность её извлечения из недр попутно с золотом без дополнительных затрат, так как затраты по добыче руды уже учтены при отработке золота. Возможно, появятся незначительные дополнительные затраты на селективную отработку. Форма представления сурьмы в виде гнезд

с антимонитом позволяет ей без существенной технологической переработки быть готовым товарным продуктом.

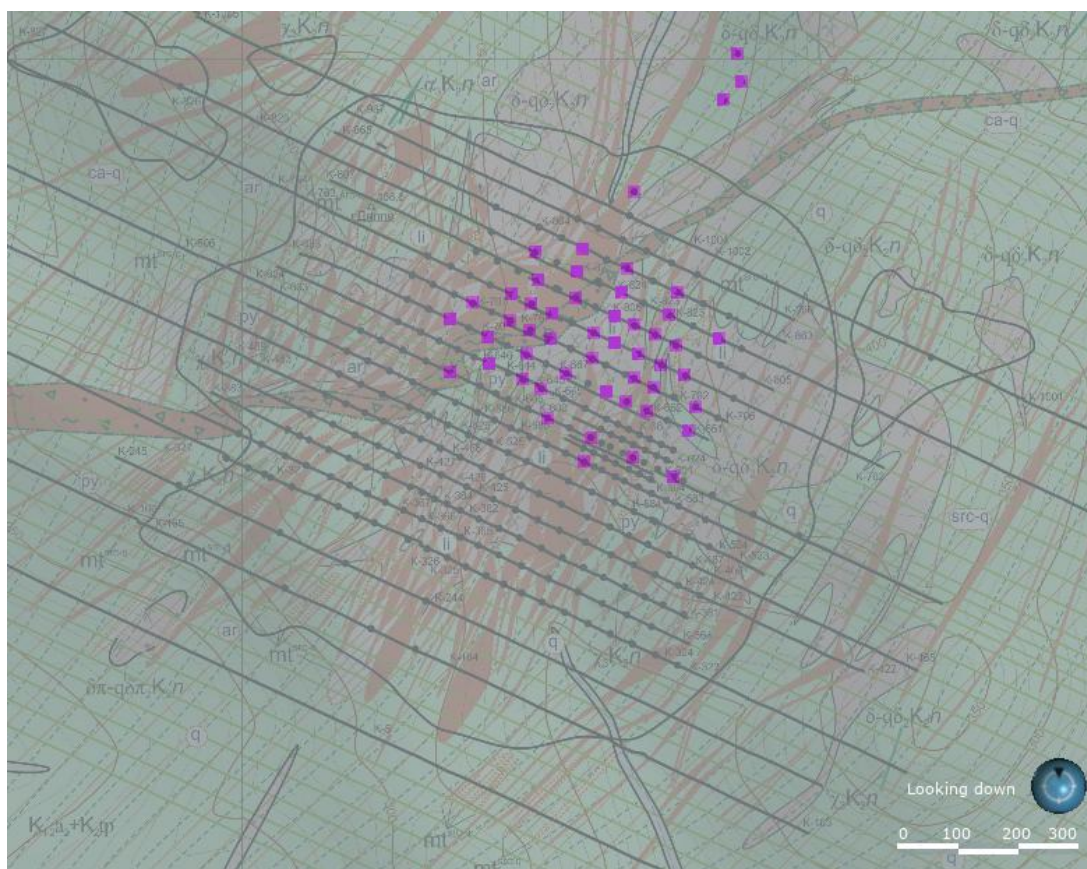


Рисунок 52 – Схематический план месторождения с указанием устьев скважин (фиолетовый цвет) по которым происходил отбор проб для многоэлементного ICP-AES

Глава 4. Рудный кластер на базе Дяппе-Спорненского рудного узла²

4.1. Оценка параметров предполагаемого объекта

Большая часть добычи золота в РФ приходится на мелкие месторождения, но их отдельная отработка менее привлекательна для крупных инвесторов, в особенности, если руды месторождения являются труднообогатимыми.

Так и в пределах Дяппе-Спорненского рудного узла есть множество рудопроявлений и слабоизученных объектов, которые потенциально могут восполнить минерально-сырьевую базу района (Рисунок 53). Для увеличения инвестиционной привлекательности таких объектов возможна их переоценка совместно с существующими вблизи месторождениями. Данный подход позволяет рассматривать дальнейшую совместную разработку в рамках единого кластера. Помимо положительного эффекта в виде вовлечения небольших объектов в отработку, также возможно изменение параметров и базового объекта за счёт возможного снижения бортового содержания.

Так как новые объекты в рассматриваемой концепции для Дяппе-Спорненского узла не предназначены для самостоятельной отработки, то подход для оценки на базе построения полноценной экономической модели избыточен. Из-за непосредственной близости с разрабатываемым месторождением новый объект с большой долей вероятности будет относиться к той же формации и характеризоваться той же геолого-генетической моделью, поэтому методы добычи и переработки будут идентичны, как и затраты на них. В этой связи для нового объекта необходимо детально рассматривать единственную группу затрат для принятия решений о включении в совместную разработку - затраты на транспортировку товарной руды.

² При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором в соавторстве, в которых, согласно «Положению о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова», отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

Кузнецов М.В., Богуславский М.А., Вильданов Д.И. Государственные центры по переработке упорных руд как путь организации золотодобычи в России // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2024. Т. 191. № 6. С. 43-49. EDN: SPUEJF. Импакт-фактор 0,421 (РИНЦ). 1,04 п.л., вклад автора 80%.

Богуславский М.А., Вильданов Д.И., **Кузнецов М.В.** Геолого-экономический подход к оценке рудных полей с известным крупным базовым объектом на примере месторождения Дяппе // Недропользование XXI век. 2025. Т. 107. № 2-3. С. 78-87. EDN: QMUMZC. Импакт-фактор 0,333 (РИНЦ). 1,16 п.л., вклад автора 60%.

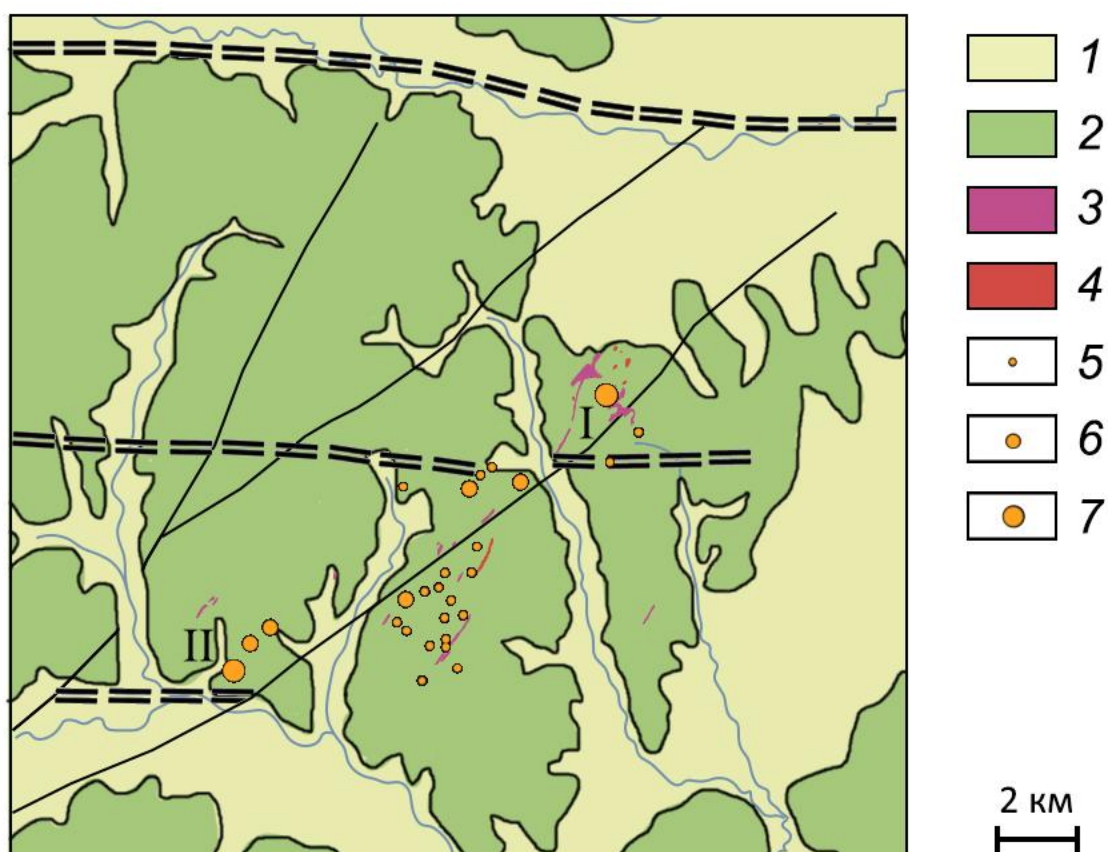


Рисунок 53 – Геологическая и структурно-тектоническая схема Дяппе-Спорненского рудного узла, с изменениями [Дьячков, 1989; Бруско, 1991]: 1 – четвертичные отложения; 2 – меловые терригенно-осадочные отложения; 3 – диориты и кварцевые диориты; 4 – гранодиориты; 5 – пункты минерализации; 6 – рудопроявления; 7 – месторождения: I – Дяппе, II – Мартемьяновское

4.2. Оценка параметров затрат на транспортировку

Для оценки затрат на транспортировку товарной руды была построена многофакторная модель зависимости расходов от расстояния перевозки руды до обогатительной фабрики, возведенной на якорном месторождении.

Затраты на транспортировку состоят из затрат на приобретение техники, её обслуживание, горюче-смазочные материалы, фонд оплаты труда водителей, а также затраты на строительство дороги.

Рассматриваемым самосвалом в модели является самосвал, выбранный при составлении ТЭО [Чернышёв, 2019]. Для расчёта производительности самосвалов и их количества использованы следующие формулы:

Принятым количеством самосвалов является значение рассчитанного инвентарного парка автосамосвалов, округленное вверх до первого целочисленного значения.

Инвентарный парк автосамосвалов **Ни** рассчитывается по формуле $N_i = N_{рас} / k_{тг}$, где $N_{рас}$ – расчетное количество машин в смену, а $k_{тг}$ – коэффициент технической готовности, равный 0,85.

Расчетное количество машин в смену **Н_{рас}** рассчитывается по формуле $N_{рас} = W_{сут} \times k_t / (Q_{см} \times N_{см})$, где $W_{сут}$ – суточный грузооборот карьера, k_t – коэффициент работы транспорта, равный 1,1, $Q_{см}$ – сменная производительность, и $N_{см}$ – количество смен в сутки, равное двум.

Суточный грузооборот карьера **W_{сут}** (т/сут) рассчитывается, как объем работ (т), деленный на количество дней. Поскольку мощность фабрики по ТЭО составляет 1,5 млн т в год, то суточный грузооборот карьера – 4110 т/сут.

Сменная производительность **Q_{см}** (т) рассчитывается по формуле $Q_{см} = Q_t \times T_{см} \times k_{и}$, где Q_t – техническая производительность автосамосвала, $T_{см}$ – продолжительность смены, равное 11 часам, и $k_{и}$ – коэффициент использования автосамосвала в смену, равное 0,7.

Техническая производительность автосамосвала **Q_т** (т/час) рассчитывается по формуле $Q_t = G \times n \times k_g$, где G – грузоподъемность самосвала, равная 55 т; n – количество рейсов в час; k_g – коэффициент использования грузоподъемности, равное 95%.

Количество рейсов в час **n** рассчитывается по формуле $n = 60 / T_p$, где T_p – продолжительность рейса (мин).

Продолжительность рейса **T_p** (мин) рассчитывается по формуле $T_p = t_p + t_g + t_{пор} + t_m + t_{раз}$, где t_p – время погрузки самосвала, t_g – время движения груженого самосвала, $t_{пор}$ – время движения порожнего самосвала, t_m – время на маневры, установленное в 2 мин, и $t_{раз}$ – время разгрузки, составляющее 1 минуту.

Время погрузки самосвала **t_p** (мин) рассчитывается по формуле $t_p = t_{ц} \times N_k$, где $t_{ц}$ – время цикла экскаватора, равное половине минуты, и N_k – принятое число ковшей, разгружаемых в кузов самосвала, равное 5.

Время движения груженого самосвала **t_г** (мин) рассчитывается по формуле $t_g = L \times k_n / V_g$, где L – длина транспортирования, которая в базовом варианте для Дяппе составляет 3,5 км, k_n – коэффициент неравномерности движения, равный 1,1, и V_g – средняя скорость груженого автосамосвала, равная 35 км/ч.

Время движения порожнего самосвала **t_{пор}** (мин) рассчитывается по формуле $t_{пор} = L \times k_n / V_{пор}$, где L – длина транспортирования, k_n – коэффициент неравномерности движения и $V_{пор}$ – средняя скорость порожнего автосамосвала, равная 30 км/ч.

Годовой расход топлива рассчитывается по формуле $N_p \times k_{и} \times V_{топ} \times 365$, где N_p – принятое количество самосвалов, $k_{и}$ – коэффициент использования автосамосвала в смену, $V_{топ}$ – расход топлива в сутки.

Расход топлива в сутки **V_{топ}** (л/сут) рассчитывается по формуле $V_{топ} = V_{топп} + V_{топг}$, где $V_{топп}$ – расход топлива порожнего самосвала в сутки, $V_{топг}$ – расход топлива груженого самосвала в сутки.

Расход топлива порожнего самосвала в сутки **V_{топп}** (л/сут) рассчитывается по формуле $V_{топп} = t_{пор} / 60 * n * T_{см} * N_{см} * рп$, где $t_{пор}$ - время движения порожнего самосвала, n – количество рейсов в час, $T_{см}$ – продолжительность смены, $N_{см}$ – количество смен в сутки и $рп$ – расход топлива во время движения порожнего самосвала, равное 30 л/час.

Расход топлива порожнего самосвала в сутки **V_{топг}** (л/сут) рассчитывается по формуле $V_{топг} = tг / 60 * n * T_{см} * N_{см} * рг$, где $tг$ - время движения груженого самосвала, n – количество рейсов в час, $T_{см}$ – продолжительность смены, $N_{см}$ – количество смен в сутки и $рг$ – расход топлива во время движения груженого самосвала, равное 50 л/час.

Списочное количество водителей самосвалов рассчитывается исходя из принятого количества самосвалов, умноженное на количество смен, а также на два, поскольку график работы у водителей вахтовый (1 рабочий месяц / 1 месяц отдыха).

Часть стоимостных данных была взята из ТЭО. Так, стоимость приобретения самосвала составляет 45,5 млн рублей за одну единицу техники, удельный показатель стоимости строительства дороги – 11 млн рублей за 1 км. Годовой фонд оплаты труда одного водителя – около 1,1 млн рублей, а годовая сумма отчислений по социальному страхованию – 414 тыс. рублей.

При этом стоимость автошин и топлива была взята рыночная (на момент расчётов): стоимость шины – 260 тыс. руб.; дизельного топлива в Хабаровском крае – 51,42 руб. Срок амортизации соответствует сроку проекта (эксплуатации нового объекта) и составляет 10 лет [О Классификации основных средств..., 2002]. При этом ежегодные затраты на ремонт составят 40% от годового размера амортизации техники.

На основе сформированной модели была построена диаграмма, демонстрирующая изменение совокупных затрат на транспортировку руды на расстояние до 50 км с шагом в 2,5 км (Рисунок 54).

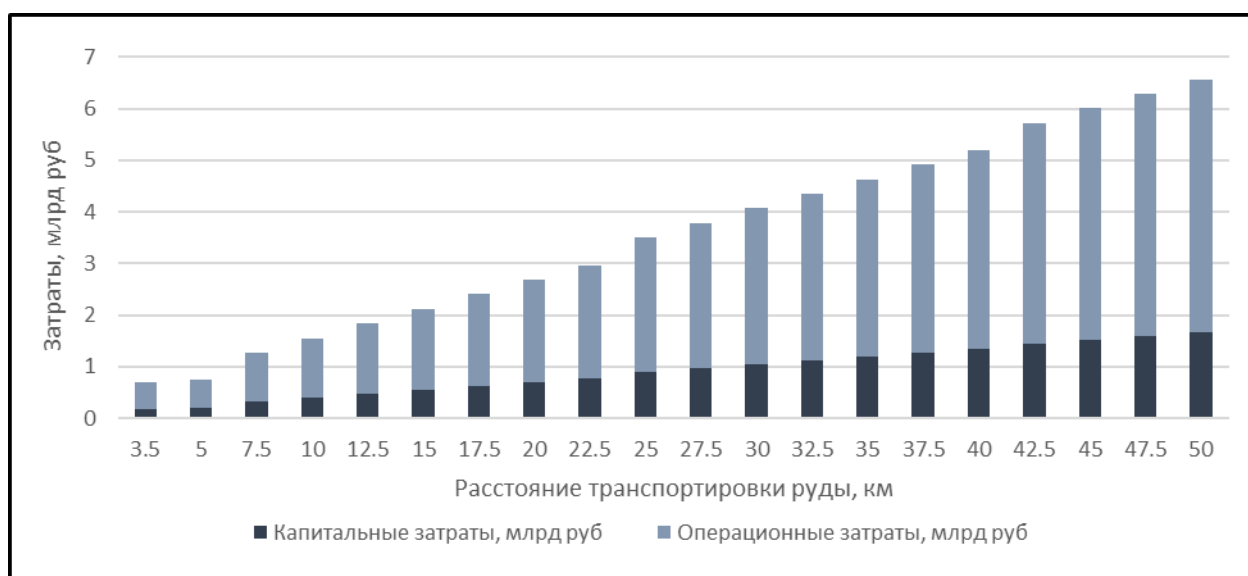


Рисунок 54 – Затраты на транспортировку руды в зависимости от расстояния транспортировки руды

4.3. Оценка экономики разработки нового объекта

Для того, чтобы сохранить экономическую эффективность предприятия, количество золота в товарной руде нового объекта должно покрывать затраты на увеличенное плечо откатки, а также оценочные работы и ГРР.

Для оценки количества руды было взято значение, характерное для недавно открытых объектов в РФ. На базе данных Госдоклада [Роснедра, 2021], а также открытых источников [Корчагина, 2023], удалось собрать выборку из 28 абсолютно новых золоторудных объектов, поставленных на баланс с 2011 года по 2021 год, имеющих значимое значение запасов золота, превышающее 5 тонн. Проведенный кластерный анализ позволил разбить месторождения на несколько групп, и в самую крупную попало 11 объектов со средними запасами в 13,6 т и средним содержанием золота 1,54 г/т [Богуславский и др., 2025]. Таким образом, значение количества руды составило 9,1 млн тонн руды с учётом коэффициента разубоживания 5% и потерь 2%.

Далее приведено описание методологии оценки необходимого количества золота в товарной руде для покрытия затрат на транспортировку. Для каждого значения плеча откатки были рассчитаны дополнительные затраты на транспортировку в сравнении с базовым уровнем – 3,5 км, текущим плечо для Дяппе. Полученные дополнительные затраты были переведены в количество золота при цене на золото 3000 дол/унц и курсе 90 рублей за доллар (обоснование значений приведено в главе 5), которое должно дополнительно находиться в товарной руде, чтобы сохранить прежний экономический эффект базового уровня. В результате было рассчитано среднее содержание полезного компонента в товарной руде для каждого значения расстояния.

Ниже представлена зависимость содержания золота в товарной руде от плеча откатки руды, не учитывая затраты на ГРР, при котором предприятие будет сохранять экономическую эффективность (Рисунок 55). Как видно на рисунке, увеличение необходимого среднего содержания для плеча 50 км составляет всего 3,5 %. Такое незначительно увеличение обусловлено большим размером Дяппе.

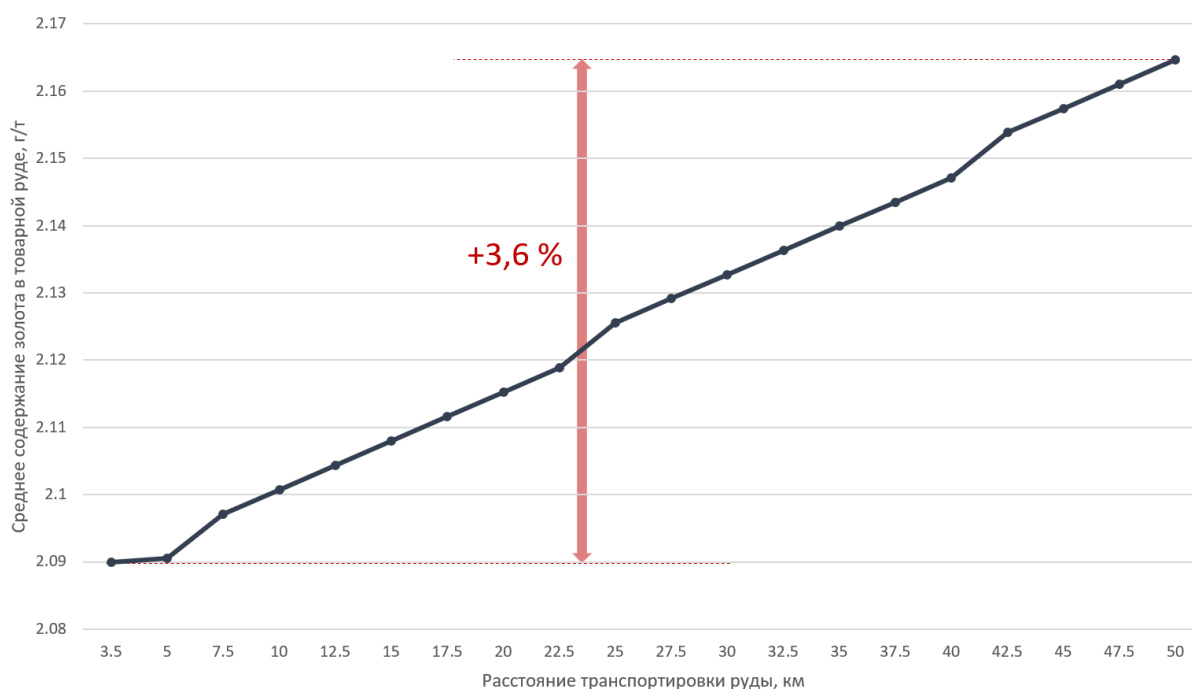


Рисунок 55 – Необходимое содержание золота в перевозимой руде для сохранения текущего экономического эффекта

Важно отметить, что согласно выбранной методике настоящей работы расчёты производятся с учетом, что для якорного объекта реализована собственная инфраструктура. Затраты на инфраструктуру не распределяются на новые объекты, новые объекты рассматриваются как источник возможного прироста минерально-сырьевой базы для якорного объекта. Поэтому для дальнейшей оценки ключевым показателем будет выступать доля затрат, приходящаяся на непосредственное производство унции золота без учета уже понесенных инвестиций. Для упрощения расчетов было взято отношение между денежными затратами на добычу (ТСС) и полными затратами на поддержание производства (AISC), что составило 75% [Лесков и др., 2021].

Полученное значение позволяет рассчитать необходимое содержание полезного компонента в перевозимом материале для определения безубыточности отработки нового месторождения. Например, при расстоянии 50 км необходимое содержание золота в товарной руде, исходя из рисунка 5, будет не 2,164 г/т, а 1,62 г/т, ровно на 25% меньше (Рисунок 56).

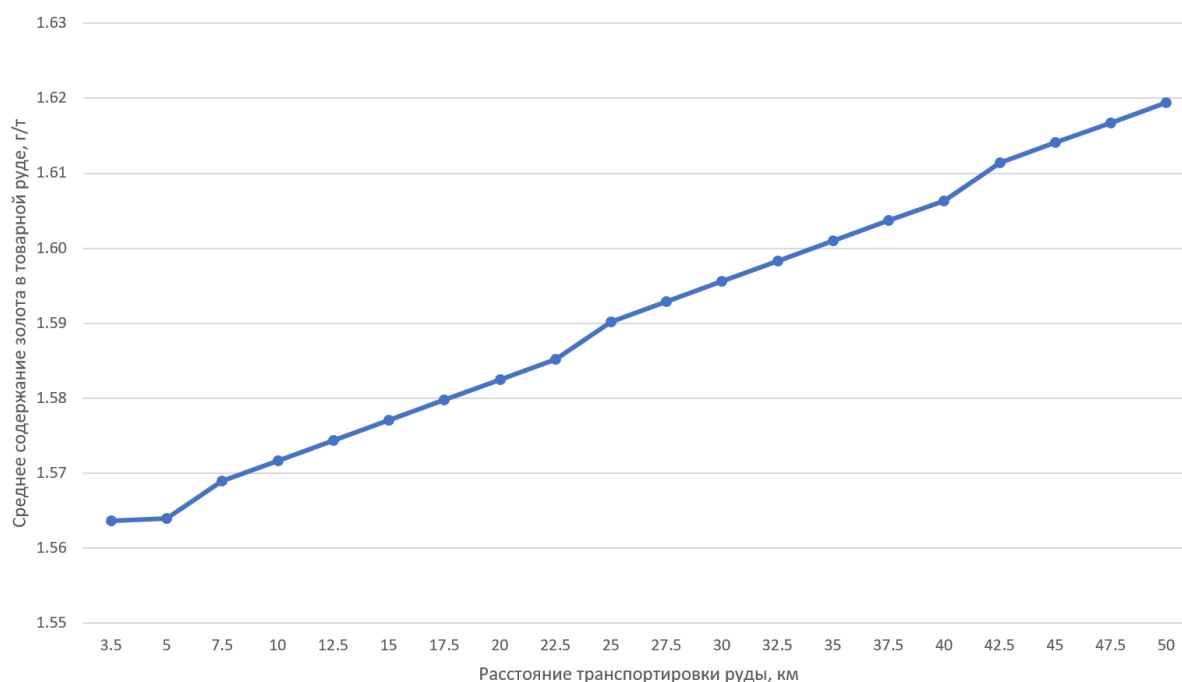


Рисунок 56 – Необходимое содержание золота в перевозимой руде нового объекта для сохранения текущего экономического эффекта

Таким образом, перед проведением оценочных и разведочных работ появляется возможность оценить необходимое минимальное содержание полезного компонента в товарной руде нового объекта в зависимости от его отдалённости от существующего. Методика позволяет на базе геологических данных о ближайших объектах заранее оценивать целесообразность проведения ГРП.

4.4. Мартемьяновское месторождение

В пределах рудного узла вокруг Дяппе расположены золоторудные объекты с совокупными оценёнными ресурсами в десятки тонн золота [Никитин, 1987; Дьячков, 1989; Степанов, 1989; Бруско, 1991]. Внимание в настоящей работе будет сосредоточено на Мартемьяновском месторождении.

На дистанции 40 км от месторождения Дяппе локализован золоторудный объект Мартемьяновское. Свое название он получил в честь золотопромышленника после обнаружения в 1911 году. На протяжении сорока лет (с 1914 по 1954 гг.) на нём с перерывами велись изыскания, включавшие проходку горных выработок (канав и штолен). Непосредственная эксплуатация месторождения пришлась на конец 1930-х годов, ее итогом стало извлечение 33 кг драгметалла. Позднее, в период 1984–1991 гг., на участке Спорненский реализовывался комплекс поисковых мероприятий в масштабах 1:10 000 и 1:25 000. В это время исследователи [Никитин, 1987; Дьячков, 1989; Степанов, 1989; Бруско, 1991] выполняли геофизические и литохимические

съемки, маршрутные поиски с отбором штучных проб, а также задавали проходку траншей и бурение скважин.

Геологическое строение участка представлено нижнемеловыми алевролитами, которые секутся позднемеловыми дайками гранит-порфиров. В ходе изысканий была оконтурена мощная (600–700 м) зона жильно-прожилкового окварцевания, вытянутая более чем на 2,5 км. В ее пределах задокументированы 52 кварцевые жилы, причем 46 из них изучены непосредственно в коренных породах. Морфологические параметры жил отличаются изменчивостью: при невыдержанной мощности до 4,0 м их протяженность по простиранию достигает 850 м, а глубина прослеживания по падению составляет до 30 м. Оруденение характеризуется крайне неравномерным распределением золота в ассоциации со вкрапленностью ряда минералов: галенита, вольфрамита, шеелита, пирротина, арсенопирита и пирита. По данным штучного опробования, содержания золота доходят до 32,3 г/т, тогда как керновые и бороздовые пробы показывают значения до 1,7–1,9 г/т [Бруско, 1991]. Среди элементов-примесей фиксируются серебро (до 13,0 г/т), мышьяк (до 0,9 %) и медь (до 0,09 %).

Оценка ресурсного потенциала и запасов месторождения неоднократно пересматривалась разными геологами и отличается неоднозначностью. Так, по состоянию на 1934 год забалансовые запасы оценивались в 198 кг при среднем содержании 2,6 г/т. Позже были оценены прогнозные ресурсы по категории Р2 на уровне 15 тонн [Никитин, 1987]. Альтернативный прогноз предложил Бруско [Бруско, 1991], выделив на участке пять рудных тел со следующими параметрами: длина 300 м, глубина до 50 м и мощность 1,0 м. Суммарный потенциал (категория Р2) в этом варианте составил 1 950 кг металла при ожидаемом среднем содержании 10 г/т.

При рассмотрении Мартемьяновского как самостоятельного проекта, его разработка не будет являться привлекательной. Главные факторы, которые ограничивают перспективы отработки, – затрудненная логистика, отсутствие инфраструктуры, а также наличие упорности руд.

Та же проблематика характерна и для месторождения Дяппе, однако благодаря его большим запасам, по ТЭО, отработка месторождения считается рентабельной.

При отработке Дяппе вся необходимая инфраструктура и логистика уже будет обустроена, тем самым предоставив возможность близлежащим объектам рассматриваться как дополнение к МСБ. Дополнительные затраты для Мартемьяновского месторождения в таком случае будут формироваться преимущественно за счёт логистики руды от месторождения до ГОКа Дяппе. Такой подход к оценке эффективности вовлечения в совместную отработку небольших объектов делает их рентабельными. По данным предшественников можно сделать вывод о том, что есть предпосылки переоценки Мартемьяновского месторождения, параметры которого потенциально превышают рассчитанное пороговое значение на 1 г/т.

При этом, если содержание золота будут выше полученного порогового уровня, то дополнительная прибыль сможет повлиять на снижение бортового содержания самого Дяппе, тем самым переместив часть забалансовых запасов в балансовые, что также увеличит МСБ кластера.

Глава 5. Экономическая переоценка месторождения Дяппе

Методической основой для выполнения экономической оценки являлись «Методические рекомендации по технико-экономическому обоснованию кондиций для подсчета запасов месторождений твердых полезных ископаемых (кроме углей и горючих сланцев)», утвержденные распоряжением МПР России от 05.06.2007 г. №37-р и другие нормативные и методические документы ГКЗ Роснедра [Методические рекомендации..., 2007].

При выполнении настоящей оценки использовались параметры из ТЭО постоянных разведочных кондиций с учётом уровня инфляции и роста заработных плат.

Основополагающими параметрами модели являются геологические данные, включающие в себя обновлённые запасы в размере 121,2 млн т руды со средним содержанием золота 1,15 г/т при бортовом содержании 0,2 г/т. Суммарные запасы геологической модели составляют более 139 т золота, при этом в контур карьера входит 73,3 млн т руды со средним содержанием золота 1,21 г/т, таким образом запасы, принятые в расчёт, составляют 88,49 т золота.

Сравнение полученных оптимальных оболочек карьеров (в варианте бортовых содержаний 0,2, 0,5; 0,7; 0,9 и 1,2 г/т) показывает их незначительное отличие между собой: разница в количестве горной массы составляет около 1,0%. Так, общий объем карьера составляет 135,3 млн м³ [Чернышёв, 2019].

Экономическая оценка месторождения Дяппе была проведена по базовой и альтернативной концепции. Согласно базовой концепции ТЭО оценка учитывает продажи золотосодержащего концентрата. Альтернативная концепция подразумевает возведение собственных перерабатывающих мощностей для дальнейшей переработки до сплава доре.

В основу расчёта в альтернативной концепции лёг учёт дополнительной автоклавной переработки полученного концентрата на собственных мощностях, а также перевод электрогенерации от дизельных электростанций на газотурбинные установки.

Ключевыми технико-технологическими решениями настоящего расчёта являются:

- Применение открытого способа разработки с использованием буровзрывных работ.
- Применение производительной техники при бурении, отгрузке и экскавации горной массы.
- Основным полезным компонентом месторождения Дяппе является золото.
- Товарной продукцией будет являться сплав Доре.
- Добываемая руда на месторождении Дяппе разделяется по форме содержания полезного компонента на «окисленную» и «первичную» для последующей раздельной переработки. Доля окисленной руды к общему количеству руды составляет 16%.

- Переработка первичной руды месторождения Дяппе принята по гравитационно-флотационной схеме на золотоизвлекательной фабрике. При этом во втором варианте модели была учтена дополнительная автоклавная переработка полученного концентрата на собственных мощностях.

- Переработка окисленных руд месторождения Дяппе осуществляется методом кучного выщелачивания.

- Во втором варианте модели электрогенерация от дизельных электростанций была пересчитана на газотурбинные установки.

Далее описаны основные предпосылки, принятые для проведения расчётов.

Годовая производственная мощность предприятия по добыче руды составляет 4350 тысяч т в год для первичной руды и 1150 тысяч т для окисленных руд.

Коэффициент потерь и разубоживания был заимствован из работ предшественников. Потери для первичных руд составляют 2,00% и для окисленных - 3,46%; разубоживание – 4,00% и 8,13%, соответственно.

Основой для определения расчетной цены 1 г химически чистого золота служит округленная средняя стоимость золота с января 2025 года по октябрь 2025 года на Лондонской Ассоциации торговли слитками драгоценных металлов («Precious Metal Prices», 2025), составляющая 3 286,0 долл. США/тр.унц. С учетом консервативной оценки на весь период отработки, снижающей уровень практически на 10%, цена на золото будет составлять 3 000,0 долл. США/тр.унц.

Курс доллара США принят в расчетах в соответствии со средним прогнозом до конца 2025 и 2026 года и составляет 90,0 руб./долл [Макроэкономический опрос Банка России, 2025].

В соответствии с пунктом 43 «Методических рекомендаций по технико-экономическому обоснованию кондиций ...» [Методические рекомендации..., 2007] все расчеты ведутся с учетом цен (без учета НДС) на технику и оборудование, материалы и энергоресурсы.

Финансирование проекта освоения запасов месторождения Дяппе в рамках настоящей финансово-экономической модели предполагается осуществлять за счет собственных средств предприятия.

Заработные платы из ТЭО были проиндексированы на 92% в соответствии с ростом средней заработной платы в регионе [Рынок труда и занятость населения, 2025].

Цены на основные средства и расходные материалы были также проиндексированы на 63,1% в соответствии с инфляцией в регионе [Инфляция в Хабаровском крае, 2025].

В соответствии с действующим законодательством Российской Федерации, в расчетах учтена система страховых взносов, составляющая суммарно 30% от фонда оплаты труда. Налог на добычу полезных ископаемых (золота) составляет 6%. Налог на имущество составляет 2,2%

от остаточной стоимости основных фондов предприятия. Налог на прибыль предприятий исчисляется с базы налогообложения по ставке, установленной законодательством Российской Федерации, в размере 25% [Налоговый кодекс Российской Федерации, 2025].

Стоимость источников энергии была определена отдельно на момент проведения финансово-экономической оценки, и составила 76,68 руб/л дизельного топлива и 7,33 руб/м³ газа [Розничная цена на природный газ для населения в Хабаровском крае, 2025].

Базовый вариант финансово-экономической модели указывает на возможность получения 178,1 млрд рублей за 18 лет без учёта дисконтирования (Рисунок 57). При ставке дисконтирования 10% NPV проекта составит 60,4 млрд рублей, IRR 36,4%. Срок окупаемости без учёта дисконтирования – около 5 лет.

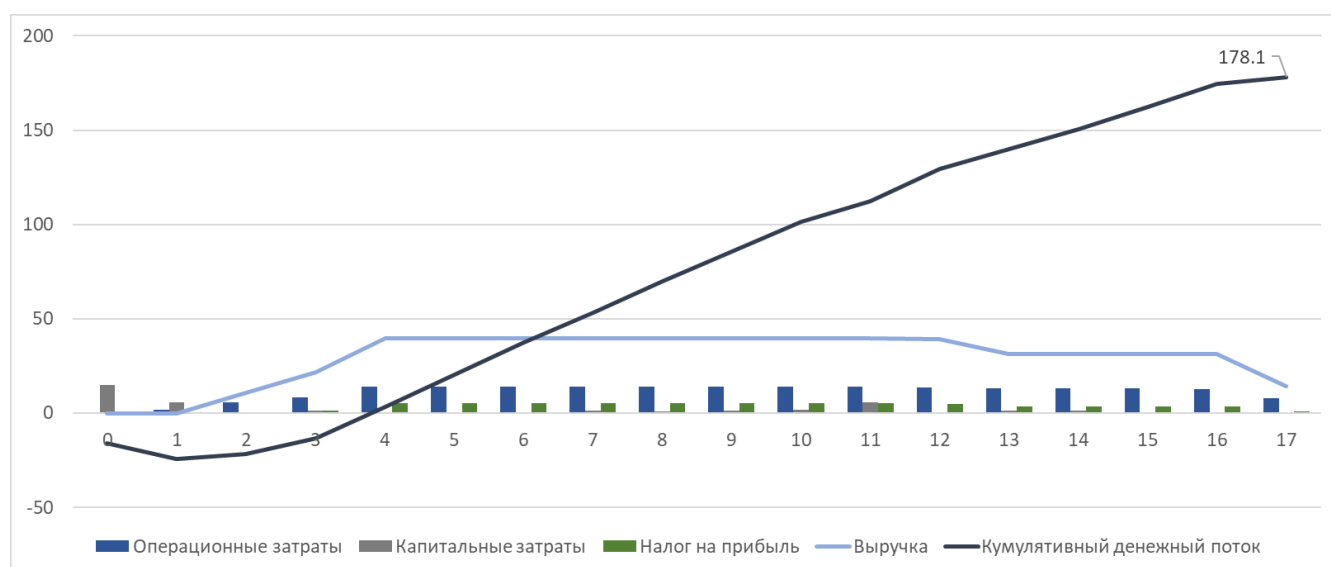


Рисунок 57 – График основных финансовых показателей проекта за весь период отработки, первый вариант отработки. Денежные выражения в млрд рублей

Анализ графика чувствительности показывает, что NPV наиболее чувствителен к изменениям цены на золото (Рисунок 58). Эта зависимость прямая и наиболее выраженная, что видно по крутому положительному наклону синей линии: даже незначительное увеличение цены на золото приводит к существенному росту NPV. Вторым по степени влияния фактором являются операционные затраты. Здесь наблюдается сильная обратная зависимость - рост операционных расходов значительно снижает NPV проекта. Наименьшее влияние на итоговый финансовый результат оказывают капитальные затраты. Хотя их увеличение также негативно сказывается на NPV, пологий наклон серой линии указывает на то, что проект менее чувствителен к изменениям в инвестициях по сравнению с колебаниями цены на золото и операционными расходами. Таким образом, ключевыми факторами успеха проекта являются рыночная конъюнктура цен на золото и эффективность контроля над операционными расходами.

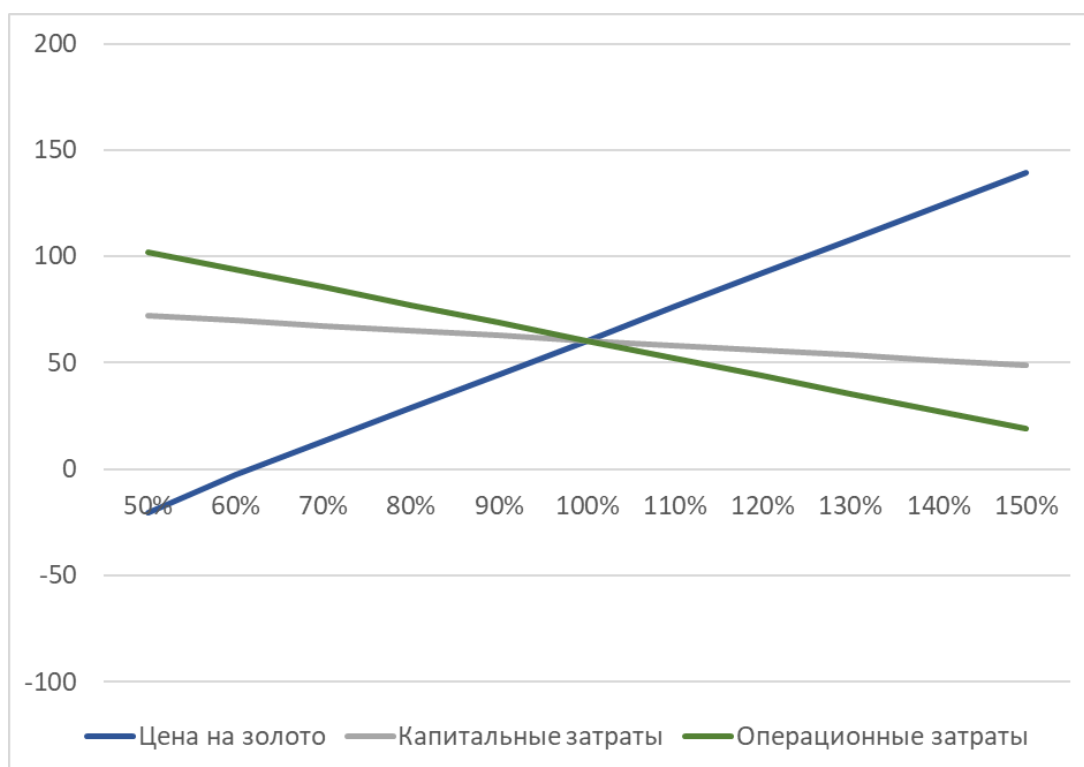


Рисунок 58 – График анализа чувствительности NPV на основные параметры модели, первый вариант отработки. Денежные выражения в млрд рублей

Модель, построенная с учетом возведения собственных перерабатывающих мощностей и изменения источника электроэнергии, указывает на возможность получения 171,8 млрд рублей за 18 лет без учёта дисконтирования (Рисунок 59). При ставке дисконтирования 10% NPV проекта составит 22,8 млрд рублей, IRR 13,6%. Срок окупаемости без учёта дисконтирования – около 8 лет.

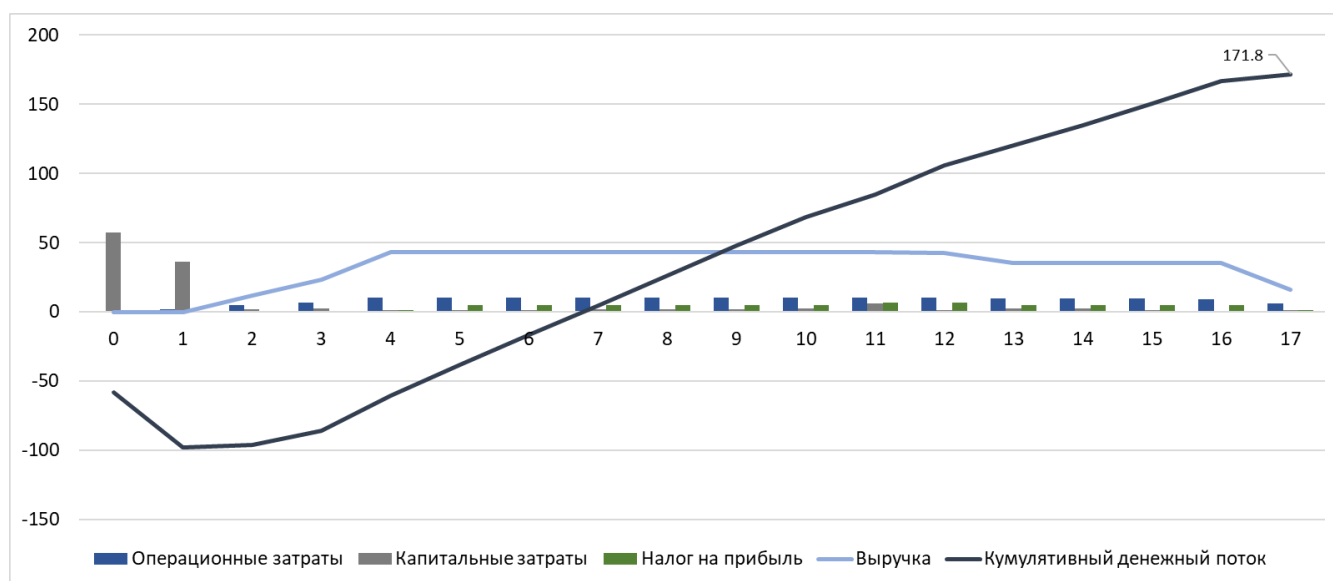


Рисунок 59 – График основных финансовых показателей проекта за весь период отработки, первый вариант отработки. Денежные выражения в млрд рублей

Анализ графика чувствительности показывает изменение в структуре рисков проекта (Рисунок 60). Наибольшее влияние на NPV по-прежнему оказывает цена на золото, демонстрируя сильную прямую зависимость. Однако теперь проект стал значительно более чувствителен к изменениям в капитальных затратах, что отражено в более крутом наклоне серой линии. Влияние операционных затрат, наоборот, снизилось, и теперь они оказывают меньшее воздействие на финансовый результат по сравнению с капитальными затратами.

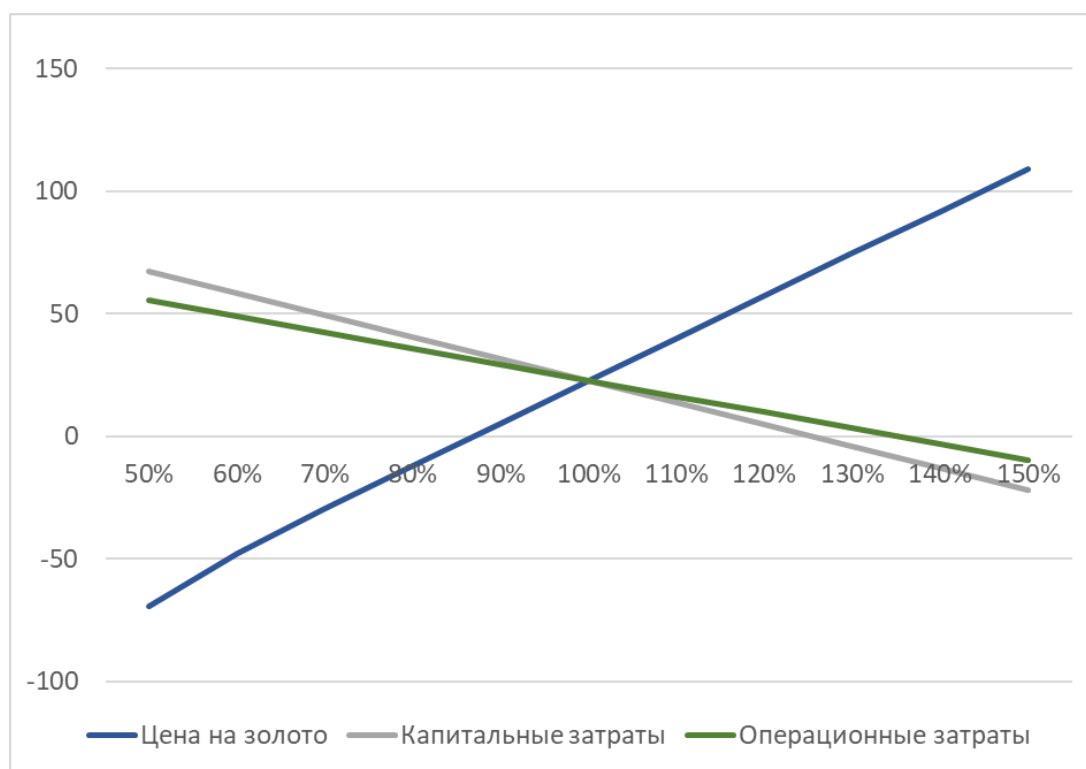


Рисунок 60 – График анализа чувствительности NPV на основные параметры модели, первый вариант отработки. Денежные выражения в млрд рублей

Такое изменение обусловлено дополнительными инвестициями в инфраструктуру и организацией дополнительного передела продукции. Важно отметить, что инвестиции в более глубокую переработку позволили оптимизировать операционные расходы, связанные с выработкой электроэнергии и финальным переделом концентрата, тем самым снизив зависимость финансового результата от колебаний текущих операционных расходов (Рисунок 61).

Несмотря на снижение NPV, инвестиции в собственную энергетическую и технологическую инфраструктуру позволяют сэкономить в затратах на поддержание текущего уровня производства.

В подтверждение были рассчитаны среднегодовые затраты по операционной и инвестиционной деятельности со второго года, а также средний уровень добычи за аналогичный период, который равен 4,6 млн т руды в год. Для базовой концепции затраты составили 12,4 и 1 млрд руб., соответственно, а для альтернативной – 9,4 и 1,9 млрд руб. Удельный показатель затрат на тонну руды для первого варианта составил 2 936 руб/т, а второго – 2 474 руб/т, разница – 462 руб/т. С учетом среднего содержания золота в руде, равного 1,18 г/т, и выбранным макроэкономическим параметрам, экономия второго варианта на производство золота достигает порядка 190 долл. США за тр. унц. К такому эффекту в большей степени привели инвестиции в собственную энергетическую инфраструктуру, которые позволяют сократить затраты на выработку электроэнергии более, чем в 4 раза.

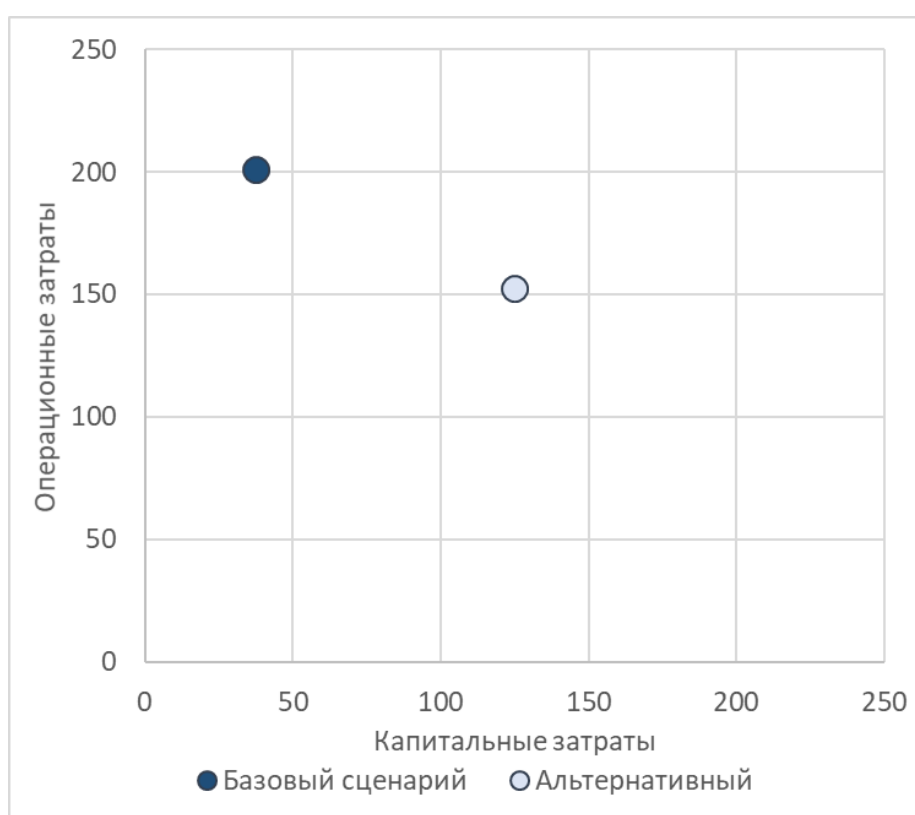


Рисунок 61 – Сравнение затратной части вариантов ФЭМ, млрд руб

Инвестиции в собственную технологическую инфраструктуру дают возможность избежать дисконта на переработку золота при продаже концентрата. Фактически недропользователь в базовом сценарии упускает дополнительную выручку, которая с учётом выбранных макроэкономических параметров составляет 300 долл. США за тр. унц.

При суммировании двух показателей итоговая выгода использования альтернативного варианта для новых близлежащих объектов составляет около 500 долл. США за тр. унц., а это практически треть от среднеотраслевых AISC по миру [Ever upwards for AISC, 2025].

Это означает, что при увеличении МСБ каждая дополнительная унция золота при том же среднем содержании в руде будет произведена почти на 500 долл. США дешевле, чем при базовом варианте с продажей концентрата стороннему переработчику и работой на дизельных электростанциях.

Таким образом, альтернативный вариант позволяет рассматривать создание кластера, обеспеченного всей необходимой инфраструктурой и перерабатывающими мощностями для запуска новых проектов в непосредственной близости. Важным фактом при таком подходе является существенное удешевление производства золота для новых проектов, что дает возможность рассматривать объекты, ранее считавшиеся нерентабельными. Для оценки эффективности включения объектов в совместную отработку может быть использована ранее представленная методика, согласно которой ключевым параметром является расстояние до ГОКа. Наглядным примером такого объекта является Мартемьяновское месторождение, которое после доразведки может стать дополнением к действующему предприятию, тогда как для самостоятельной разработки оно не является экономически рациональным. Помимо вовлечения соседних площадей в совместную разработку, усиление производственных мощностей дают предпосылки к снижению бортового содержания, что также увеличит МСБ проекта.

Заключение

В процессе комплексного анализа было установлено, что оруденение контролируется ослабленными зонами, которые объединяются в единую систему трещин с углами падения около 45° от дневной поверхности конформно Центральному разлому. Центральный разлом представляет собой не изолированное позднее нарушение, а индикатор унаследованной проницаемости, что подчёркивает единство процессов рудообразования и тектонической эволюции месторождения. Метасоматические изменения и сопутствующая золотая минерализация приурочены к этим ослабленным зонам, которые служили основными проводниками для рудоносных гидротермальных растворов.

Комплексный анализ структурных, минералогических и геохимических данных позволил уточнить модель месторождения и выявить новые перспективные направления для дальнейших геологоразведочных работ. Предложенная модель с иной морфологией рудных тел (с наклонным залеганием) позволила переоценить геологические запасы в 139 тонн золота при бортовом содержании 0,2 г/т и среднем содержании 1,15 г/т.

Геолого-экономический анализ месторождения Дяппе с учётом новой концепции залегания рудных тел при бортовом содержании 0,2 г/т позволил установить, что проект промышленного освоения с вовлечением в отработку 88,5 т запасов, входящих в контур проектного карьера, является рентабельным и позволяет получить NPV (10%) около 60 млрд рублей.

Анализ исторических данных позволил определить особенность представления сурьмы на Дяппе в виде гнезд с антимонитом, из-за чего результаты буровых работ, направленных на разведку золота, не дали высоких результатов для сурьмы. Построенная модель с подсчитанными ресурсами до 250 т позволяет говорить о пространственной разобщённости золотой и сурьмяной минерализации, что даёт возможность отрабатывать антимонит селективно, попутно с золотом.

Совместная отработка месторождений в едином кластере открывает новые перспективы для вовлечения в отработку мелких и средних объектов, позволяя эффективно использовать их потенциал и продлить общий срок эксплуатации инфраструктуры базового актива.

Так, Мартемьяновское месторождение, считающееся нерентабельным, может быть вовлечено в совместную разработку с Дяппе при среднем содержании золота не менее 1,61 г/т в товарной руде после дополнительной разведки.

Таким образом, осуществляется активное развитие всего района за счет вовлечения в кластер объектов, отработка которых вне кластера была бы нецелесообразной.

Рекомендации по дальнейшей разработке темы

На основании введённых структурных факторов контроля рудных тел предполагается обновлённая программа разведочных работ на Дяппе, позволяющая прирастить минерально-сырьевую базу в основном за счёт соединения рудных тел и минерализованных зон на поверхности на северо-восточной части участка месторождения. Также рекомендуется провести повторные поисково-оценочные работы в Дяппе-Спорненском рудном узле, а технико-экономическое обоснование проводить с учётом предложенной концепции совместной отработки.

Список сокращений

ВСЕГЕИ – Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского

ВП – Вызванная поляризация

ГОК – Горно-обогатительный комбинат

ГКЗ – Государственная комиссия по запасам

ДВГУ – Дальневосточный государственный университет

ДВГТУ – Дальневосточный государственный технический университет

КПШ – Калиевый полевой шпат

МСБ – Минерально-сырьевая база

НРС – Научно-редакционный совет

ОС – Очаговая структура

ТЭО – Техничко-экономическое обоснование

ФЭМ – Финансово-экономическая модель

ЦНИГРИ – Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов

AISC – All-In Sustaining Costs (полные затраты на поддержание производства)

IDW – Inverse Distance Weighting (интерполяция по обратному средневзвешенному расстоянию)

IRR – Internal Rate of Return (внутренняя норма доходности)

NPV – Net Present Value (чистый дисконтированный доход)

TCC – Total Cash Costs (денежные затраты на добычу)

Список литературы

1. Абрамов С.С., Андреева О.В., Жариков В.А., Зарайский Г.П., Маракушев А.А. и др. Метасоматизм и метасоматические породы. М.: Научный мир, 1998. 492 с.
2. Абрамсон Б.Я. Государственная геологическая карта. СССР. 1: 200 000. Серия Нижне-Амурская. Лист М-54-П: Объясн. зап. М.: Госгеолтехиздат, 1959. 46 с.
3. Богуславский М.А., Вильданов Д.И., **Кузнецов М.В.** Геолого-экономический подход к оценке рудных полей с известным крупным базовым объектом на примере месторождения Дяппе // Недропользование XXI век. 2025. Т. 107. № 2-3. С. 78-87. EDN: QMUMZC. Импакт-фактор 0,333 (РИНЦ). 1,16 п.л., вклад автора 60%.
4. Белогуб В.Н. Результат гравиметрической съемки масштаба 1:1000000 на северном Сихотэ-Алине и в междуречье Амур-Амгунь-Уда (Отчет Сихотэ-Алинской партии за 1964 г.). Т. 1. Хабаровск, 1965.
5. Бруско Э.Н. Отчёт о результатах поисковых геолого-геофизических работ на площади Дяппенского и Спорненского золотоносных узлов в 1984-87 гг. (Дяппенская партия). с. Красное, 1988.
6. Бруско Э.Н. Отчёт о результатах поисковых работ на рудное золото в пределах Агние-Афанасьевского золоторудного узла и его флангах в 1985-88 гг. (Агние-Афанасьевская партия). с. Красное, 1989.
7. Бруско Э.Н. Отчёт о результатах поисково-оценочных работ в пределах Дяппенско-Спорненского рудного узла в 1988-89 гг. (Удыльская партия). с. Красное, 1991.
8. Васькин А.Ф., Роганов Г.В. Карта минерагенического районирования Хабаровского края и ЕАО. Масштаб 1:1 000 000. Хабаровск: ФГУГТП «Хабаровскгеология», 2007.
9. Вильданов Д.И., Богуславский М.А., Коршунов Д.М. Особенности и перспективы российской минерально-сырьевой базы золота // Недропользование XXI век. 2020. № 6 (89). С. 39–45.
10. Волков А. В., Галямов А. Л. Перспективы добычи сурьмы в Чукотском автономном округе // Арктика: экология и экономика. 2025. Т. 15, № 1. С. 37-47. DOI: 10.25283/2223-4594-2025-1-37-47.
11. Вяльцев А.С., Кирьяков Г.А. Способы определения ураганных содержаний при оценке минеральных ресурсов // Успехи современного естествознания. 2024. № 6. С. 41-49.
12. Головкин Б.А., Бронштейн А.Н. Отчет о результатах аэрогеофизических работ Херпучинской партии в Тугуро-Чумиканском, Ульчском, Тахтинском и Н-Амурском районах Хабаровского края в 1958 году. Хабаровск, 1959.

13. Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 году / Федеральное агентство по недропользованию (Роснедра). М., 2022. 626 с.
14. Дорохова И. Сурьма на пробу [Электронный ресурс] // Атомный вестник. 2024. № 5. URL: <https://atomvestnik.ru/2024/06/28/surma-na-probu/> (дата обращения: 01.05.2025).
15. Дьячков М.К. Отчёт Лимурийской партии о результатах групповой геологической съёмки масштаба 1:50 000, проведённой на листах М-54-2 –А, Б, В, Г; М-54-3-А, В; М-54-3-Б-а,в; М-54-3-Г-а,в; М-54-14-Б-а,б, М-54-15-А-а,б (бассейн рек Лимури и Пильда) за 1984–1989 гг. ХТФГИ, 1989.
16. Екимов А.А. Отчет о результатах поисковых и оценочных работ на золоторудном месторождении Дяппе в 2000-2010 годах с подсчетом запасов и ресурсов на 01.01.2011 г. (1 этап). Чита, 2012. 255 с.
17. Ермилова И.О., Потоцкий Ю.П. Отчет о результатах работ Лимурийской аэрогеофизической партии за 1983-86 гг. (Комплексная аэрогеофизическая съемка м-ба 1:50000 и 1:25000 в пределах Нижне-Амурской рудоносной площади и Гонжинского золотоносного района) (Лимурийский объект). Хабаровск, 1986.
18. Инфляция в Хабаровском крае [Электронный ресурс] // Центральный банк Российской Федерации: [официальный сайт]. URL: <https://www.cbr.ru/khabarovsk/Inflations/> (дата обращения: 30.05.2025).
19. Капутин Ю.Е. Горные компьютерные технологии и геостатистика. СПб.: Недра, 2002. 424 с.
20. Капутин Ю.Е., Ежов А.И., Хенли С. Геостатистика в горно-геологической практике. Апатиты: КНЦ РАН, 1995. 165 с.
21. Кластеризация [Электронный ресурс] // Scikit-learn: машинное обучение на Python: [сайт]. URL: <https://scikit-learn.ru/stable/modules/clustering.html#k-means-k> (дата обращения: 01.06.2024).
22. Коган И.Д. Подсчет запасов и геолого-промышленная оценка рудных месторождений. М.: Недра, 1974. 304 с.
23. Корчагина Д.А. Состояние и перспективы развития минерально-сырьевой базы золота в РФ: [устный доклад] // Золото и технологии 2023: [конференция], Москва, 26 апреля 2023 г.
24. Кузнецов В.А. Отчет о результатах гравиметрической съемки м-ба 1:200000 в бассейнах верхних течений рек Пильда, Лимури, Тумнин за 1986-1988 г. Ульчский объект. Хабаровск, 1988.

25. **Кузнецов М.В.,** Богуславский М.А. Геологические особенности месторождения Дяппе (Хабаровский край) и возможности комплексного подхода к отработке // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2026. Т. 65. №2. С. 80-87. EDN: VOIZDE. Импакт-фактор 0,478 (РИНЦ). 1,50 п.л., вклад автора 80%.
26. **Кузнецов М.В.,** Богуславский М.А., Вильданов Д.И. Государственные центры по переработке упорных руд как путь организации золотодобычи в России // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2024. Т. 191. № 6. С. 43-49. EDN: SPUEJF. Импакт-фактор 0,421 (РИНЦ). 1,04 п.л., вклад автора 80%.
27. Кушнарёв П.И. Количественная оценка разведанности рудных месторождений. М., 2024. 198 с.
28. Лаврик Н.А., Архипова Ю.А., Литвинова Н.М. Геологические и экономические предпосылки добычи сурьмы на золоторудном месторождении «Дяппе» // Кулагинские чтения: техника и технология производственных процессов: материалы XX Международной научно-практической конференции: в 3 ч. (г. Чита, 30 нояб. – 4 дек. 2020 г.). Чита: ЗабГУ, 2020. Ч. 2. С. 115–121.
29. Лесков М.И., Баушев С.С., Дудник А.В. Затраты золотодобывающих компаний в России в 2020 году // Золото и технологии. 2021. № 1 (51). С. 46-49.
30. Макроэкономический опрос Банка России [Электронный ресурс] // Центральный банк Российской Федерации: [официальный сайт]. URL: https://cbr.ru/statistics/ddkp/mo_br/ (дата обращения: 30.10.2025).
31. Мельников С. М. Сурьма. - М.: Металлургия, 1977. 536 с.
32. Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Сурьмяные руды. М.: ФГУ «ГКЗ», 2007. 34 с.
33. Методические рекомендации по составу и правилам оформления представляемых на государственную экспертизу материалов по технико-экономическим обоснованиям кондиций для подсчета запасов месторождений полезных ископаемых. М.: ФГУ «ГКЗ», 2007. 43 с.
34. Методические рекомендации по технико-экономическому обоснованию кондиций для подсчета запасов месторождений твердых полезных ископаемых (кроме углей и горючих сланцев). М.: ФГУ «ГКЗ», 2007. 49 с.
35. Мещеряков С.С. Золоторудные и редкометальные месторождения Пильдо-Лимурийского района. ВСЕГЕИ. Ленинград, 1960.
36. Налоговый кодекс Российской Федерации (часть вторая): федер. закон от 05.08.2000 № 117-ФЗ (ред. от 27.10.2025) [Электронный ресурс] // СПС «КонсультантПлюс». URL: <https://www.consultant.ru/> (дата обращения: 12.11.2025).

37. Никитин Ю.И. Карта прогноза СССР на золото м-ба 1:500000 с объяснительной запиской. П Северный Сихотэ-Алинь (лист М-54-А). Хабаровск, 1987.
38. О Классификации основных средств, включаемых в амортизационные группы: постановление Правительства РФ от 01.01.2002 № 1 (ред. от 18.11.2022) // Собрание законодательства РФ. – 2002. – № 1 (ч. 2). – Ст. 52.
39. Пискунов Ю.Г. Изучение вещественного состава пород и руд Удильского района и их использование при поисково-разведочных работах (Нижнее Приамурье). Владивосток, 1989.
40. Плющев Е. В., Ушаков О. П., Шатов В. В., Беляев Г. М. Методика изучения гидротермально-метасоматических образований. Л.: Недра, 1981. 262 с.
41. Плющев Е. В., Шатов В. В. Геохимия и рудоносность гидротермально-метасоматических образований. Л.: Недра, 1985. 247 с.
42. Поляков О. А. Особенности рентгенорадиометрической сепарации кварц-антимонитовых руд Восточного Забайкалья при рудоподготовке // Вестник ЧитГУ. 2012. № 2 (81). С. 20-35.
43. Поротов Г.С. Математические методы моделирования в геологии. Санкт-Петербургский государственный горный институт, Санкт-Петербург, 2006. 223 с.
44. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 30 августа 2022 г. № 2473-р // Собрание законодательства РФ. 2022.
45. Розничная цена на природный газ для населения в Хабаровском крае [Электронный ресурс] // Газпром межрегионгаз Дальний Восток: [сайт]. URL: <https://gazdv.ru/prices/>
46. Рынок труда и занятость населения [Электронный ресурс] // Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Хабаровскому краю, Магаданской области, Еврейской автономной области и Чукотскому автономному округу: [сайт]. URL: <https://27.rosstat.gov.ru/folder/25033> (дата обращения: 30.05.2025).
47. Савва Н.Е. Минералогия руд участка Дяппе. Магадан, 1989
48. Соложенкин П.М., Зинченко З.И. Обогащение сурьмяных руд. М.: Наука, 1985. 179 с.
49. Степанов Н. Н. Отчет о результатах поисковых геолого-геофизических исследований в пределах Пильдо-Лимурийского золотоносного района (Далинская партия, 1985-89 гг.). Хабаровск, 1989.
50. Суматов М.С. Объяснительная записка к подсчёту запасов на 1-е января 1940 года по золоторудному месторождению Дяппе. 1940.
51. Таланцев А.С. Геотермобарометрия по доломит-кальцитовым парагенезисам. М.: Наука, 1981. 136 с.

52. Тевелев Ал.В. Структурная геология и геологическое картирование. Курс лекций. Учебно-методическое пособие. Тверь: ГЕРС, 2011. 292 с.
53. Тиньков Е.А., Кайдалов В.А. Легенда Николаевской серии листов Госгеолкарты-200/2. Хабаровск, 2009.
54. Фомин Д.П. Технологическая типизация руд месторождений Дяппенское и Албазинское: отчет о научно-исследовательской работе. Иркутск: Иргиредмет, 1991.
55. Чернышёв Е.И. Техничко-экономическое обоснование постоянных разведочных кондиций и подсчёт запасов на золоторудном месторождении Дяппе по состоянию на 01.01.2018 г. Хабаровск: Горно-геологическая консалтинговая компания «Ореолл», 2019. 307 с.
56. Шапочка И.И., Диденко С.И., Казачихина Л.Л. Отчет о результатах аэромагнитных работ Амгуньской партии за 1958-60 гг. Т. 1. Хабаровск, 1960.
57. Шапочка И.И., Забродина М.Л. Отчет о результатах гравиметрической съемки масштаба 1:200000, проведенной Высокогорной партией в 1966-69 гг в Бунту-Коппинском оловорудном районе Северного Сихотэ-Алиня (Отчет Высокогорной партии за 1966-69 гг). Хабаровск, 1970.
58. Юшманов Ю.П. Геолого-структурная позиция, структура и условия локализации золотого оруденения в Дяппе-Мартемьяновском рудном узле, Нижнее Приамурье // Отечественная геология. 2016. № 4. С. 56–62.
59. Юшманов Ю.П. Структурно-тектонические закономерности размещения золота в Пильда-Лимурийском районе Нижнего Приамурья // Тихоокеанская геология. 2014. Т. 33, № 4. С. 99–109.
60. Cathelineau M. Cation site occupancy in chlorites and illites as a function of temperature // Clay Minerals. 1988. Vol. 23. P. 471–485.
61. Cowan E.J., Beatson R.K., Ross H.J., Fright W.R., McLennan T.J., Evans T. J. Practical Implicit Geological Modelling // Proceedings of the Fifth International Mining Geology Conference (Bendigo, 17–19 November 2003). Melbourne: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2003. P. 81–87.
62. Dong G., Morrison G., Jaireth S. Quartz Textures in Epithermal Veins, Queensland: Classification, Origin, and Implication // Economic Geology. 1995. Vol. 90. P. 1841–1856.
63. Ever upwards for AISC as distinct regional variations are emerging [Электронный ресурс] // World Gold Council: [сайт]. 2025. March. URL: <https://www.gold.org/goldhub/gold-focus/2025/03/ever-upwards-aisc-distinct-regional-variations-are-emerging> (дата обращения: 30.10.2025).
64. Hedenquist J. W., Arribas A. R., Gonzalez-Urien E. Exploration for Epithermal Gold Deposits // SEG Reviews. 2000. Vol. 13. P. 245–277.

65. Isaaks E.H., Srivastava R.M. An Introduction to Applied Geostatistics. New York: Oxford University Press, 1989. 561 p.
66. Journel A.G., Huijbregts C.J. Mining Geostatistics. London: Academic Press, 1978. 600 p.
67. Mineral Resource and Ore Reserve Estimation: The AusIMM Guide to Good Practice. 2nd ed. Melbourne: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2014. (Monograph 30).
68. Plissart G., Femenias O., Maruntiu M., Diot H., Demaiffe D. Mineralogy and geothermometry of gabbro-derived listvenites in the Tisovita–Iuti ophiolite, Southwestern Romania // The Canadian Mineralogist. 2009. Vol. 47, No. 1. P. 81–105.
69. Precious Metal Prices [Электронный ресурс] // The London Bullion Market Association (LBMA): [сайт]. URL: <https://www.lbma.org.uk/prices-and-data/precious-metal-prices> (дата обращения: 30.10.2025).
70. Pyrcz M.J., Deutsch C.V. Geostatistical Reservoir Modeling. New York: Oxford University Press, 2014. 448 p.
71. Rossi M.E., Deutsch C.V. Mineral Resource Estimation. Dordrecht: Springer, 2014. 332 p. DOI: 10.1007/978-1-4020-5717-5.
72. Simmons S. F., White N. C., John D. A. Geological Characteristics of Epithermal Precious and Base Metal Deposits // Economic Geology 100th Anniversary Volume. 2005. P. 485–522.
73. Stewart M., de Lacey J., Hodkiewicz P., Lane R. Grade estimation from radial basis functions: how does it compare with conventional geostatistical estimation? // Proceedings of the Tenth International Mining Geology Conference (Adelaide, 2014). Melbourne: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2014. P. 277–286.
74. Warr L. N. IMA–CNMNC approved mineral symbols // Mineralogical Magazine. 2021. Vol. 85, No. 3. P. 291–320.
75. Wu Y. Block Variance Validation // SRK News (Mineral Resource Estimation). 2015. Issue 51.
76. Zang W., Fyfe W. S. Chloritization of the hydrothermally altered bedrock at the Igarapé Bahia gold deposit, Carajás, Brazil // Mineralium Deposita. – 1995. – T. 30. – №. 1. – С. 30-38.