

*На правах рукописи*



**Бабинцев Никита Анатольевич**

**ГЕОЛОГО-ГЕНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ И  
ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ РУДОНОСНОСТЬ МАФИТ-  
УЛЬТРАМАФИТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ КУЛИБИНСКОГО РУДНОГО  
УЗЛА КАНСКОЙ МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКОЙ ЗОНЫ  
(ВОСТОЧНЫЙ САЯН)**

Специальность 25.00.11 – Геология, поиски и разведка  
твёрдых полезных ископаемых, минерагения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Красноярск, 2021

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

**Научный руководитель:** *Чернышов Алексей Иванович*, доктор геолого-минералогических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Томский государственный университет», кафедра петрографии, заведующий кафедрой

**Официальные оппоненты:** *Ножкин Александр Дмитриевич*, доктор геолого-минералогических наук, ФГБУН «Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН», лаборатория геодинамики и магматизма, ведущий научный сотрудник

*Перфилова Ольга Юрьевна*, кандидат геолого-минералогических наук, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», кафедра геологии, минералогии и петрографии, доцент

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук», г. Иркутск

Защита диссертации состоится 28 апреля 2021 года в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.23 при ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660025, г. Красноярск, пр-т им. газеты «Красноярский рабочий», 95, ауд. 219.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» и на сайте университета: [www.sfu-kras.ru](http://www.sfu-kras.ru).

Автореферат разослан «    » февраля 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



С.С. Бондина

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность исследования** мафит-ультрамафитовых комплексов Кулибинского рудного узла обусловлена широким спектром дискуссий в научном сообществе, связанных с этими образованиями. Канский зеленокаменный пояс (ЗКП) относят к неопротерозойским ЗКП и единого мнения о его строении, формационной принадлежности структурно-фациальных комплексов и перспективах рудоносности различных его образований нет и по настоящее время. Между тем, магматические комплексы исследуемой территории концентрируют в себе широкий спектр полезных ископаемых – никель, медь, хром, благородные металлы, нерудное сырьё, а повышающийся интерес к потенциально рудоносным площадям Канского ЗКП диктует необходимость разработки научно-методических обоснований постановки ГРР. Широкое разнообразие форм, состава исследуемых образований, сложная взаимосвязь различных критериев с фактической рудоносностью обуславливают необходимость комплексного подхода при изучении потенциально рудоносных территорий. Большое количество научных трудов, посвящённых Канскому ЗКП, охватывают, как правило, крупные его зоны и узлы, тогда как для характеристики потенциала рудоносности сложных магматических комплексов необходимы детальные исследования в пределах локальных площадей. На данном этапе изучения, для образований Кулибинского рудного узла остаются дискуссионными формационная принадлежность тех или иных магматических образований, их рудная специализация, потенциал рудоносности и перспективность освоения.

**Объектами исследования** являются магматические образования Кулибинского рудного узла, в первую очередь – гипабиссальные мафит-ультрамафитовые тела кингашского и идарского комплексов, а также метавулканиды кулижинской и кузынской толщ.

**Цель исследования** – комплексная характеристика вулканических и гипабиссальных мафит-ультрамафитовых образований, анализ их вещественного состава и структур для выявления потенциала рудоносности и характеристики рудной специализации.

**Задачи исследования.** 1. Изучить петрографические, минералогические, структурные, геохимические и петрохимические особенности исследуемых пород. 2. Выявить главные типы рудной минерализации и охарактеризовать особенности распространения рудного вещества в продуктивных телах. 3. Провести типизацию изученных вулканических и гипабиссальных образований, определить их формационную принадлежность. Реконструировать геодинамические условия формирования выделенных типов магматических образований. 4. Разработать критерии рудоносности образований Кулибинского рудного узла и дать прогноз перспектив его освоения.

**Фактический материал.** В основу исследования положен материал, собранный автором в ходе поисковых работ 2013-2015 гг, проведённых ГПКК «КНИИГиМС». Минералого-петрографическая характеристика дана по результатам изучения 804 прозрачных шлифов (в том числе 164 авторских) и 328 полированных шлифов (в том числе 41 авторский). Оценка петрохимических особенностей пород базируется на 163 силикатных анализах, которые проведены в лабораториях ОАО «Минусинская ГРЭ» (г. Минусинск) и Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск). Концентрации редких и редкоземельных элементов изучались методом MS-ISP в лабораториях «Аналитического центра геохимии природных систем» при Томском государственном университете (г. Томск) и в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск) в количестве 60 анализов. Оценка химического состава породообразующих минералов проведена в «Аналитическом центре геохимии природных систем» при Томском государственном университете (г. Томск) на электронном сканирующем микроскопе Tescan Vega II LMU - 155 определений и в Институте геохимии

им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск) на рентгеноспектральном электронно-зондовом микроанализаторе JXA8200 – 159 определений, всего – 314 определений. Химические анализы на медь, никель, кобальт (3081 анализ), ICP-MS на платиноиды (957 анализов), а так же атомно-эмиссионные спектральные анализы на 26 элементов заимствованы из материалов поисковых работ ГПКК «КНИИГиМС». При анализе имеющихся материалов использовались опубликованные и фондовые работы, полный список которых приведён в библиографии.

#### **Основные защищаемые положения.**

**Положение 1.** В Кулибинском потенциальном рудном узле впервые выделены и петрологически обоснованы два формационных типа гипбиссальных мафит-ультрамафитовых образований: реститовый дунит-гарцбургитовый (идарский комплекс) и дифференцированный дунит-верлит-пикритовый (кингашский комплекс) и четыре серии вулканогенных образований: пикрит-базальтовая, существенно базальтовая толеитовая, дацит-базальт-пикробазальтовая бимодальная и андезит-базальтовая известково-щелочная.

**Положение 2.** Интрузивные породы кингашского комплекса и вулканы пикрит-базальтовой серии слагают единый вулcano-плутонический комплекс и образованы в ходе дифференциации высокомагнезиального расплава, с продуктами эволюции которого связаны два типа месторождений: сульфидные медно-никелевые с платиноидами и малосульфидные платинометалльные, существенно палладиевые. Основной прогнозный потенциал рудоносности Кулибинского перспективного рудного узла связан с малосульфидными платинометалльными рудами магматического и эпимагматического генезиса, которые приурочены к базальным частям массивов пикритов кингашского интрузивного комплекса и вулканической пикрит-базальтовой серии.

**Положение 3.** Малосульфидные платинометалльные руды, в отличие от сульфидных медно-никелевых, формировались при повышенных температурах и пониженном давлении, что связано с особенностями режима магматических камер и контаминацией различного корового материала. Критериями потенциальной малосульфидной платинометалльной рудоносности являются: доля фаялитового компонента в оливине свыше 18%; примеси Co и Ni в сульфидных минералах; соотношения Ni/Cu – 15-100, Pd/Ir – 50-100, Zr/Y < 3 при Nb/Y < 0,2; обеднение Nb, Ba, Rb, Sr, Ti до уровня менее 1 MORB, ярко выраженная на мультиэлементных спектрах аномалия Zr-Hf отрицательного знака (до 0,1 MORB); наличие распределения Ni антиподного с Cu и Ti; расположение пиков концентраций Cu, Ag и Ti в кровле ритмов, а пиков Cr, Ni, Co, Pd – в подошве.

**Научная новизна работы.** Впервые детально изучены петрографические, минералогические, структурные, геохимические и петрохимические особенности мафит-ультрамафитовых образований кингашского и идарского интрузивных комплексов, а также метавулканитов кулижинской и кузьинской толщ Кулибинского РУ. Исследованные образования типизированы и впервые подразделены на два интрузивных комплекса и четыре вулканических ассоциации. Изучена рудная минерализация исследуемых комплексов, выявлены закономерности пространственного распространения рудного вещества в пределах продуктивных толщ. Выявлен новый для региона тип оруденения в мафит-ультрамафитовых комплексах – малосульфидный платинометалльный, установлена платинометалльная специализация исследованной территории. Установлено, что потенциально рудоносными являются субвулканические тела кингашского комплекса и вулканы пикрит-базальтовой серии, которые вместе образуют единый рудоносный вулcano-плутонический комплекс. Разработаны геолого-генетические модели образования исследованных тел мафит-ультрамафитовых комплексов и обоснованы прогнозно-поисковые модели для наиболее перспективных типов оруденения. Реконструированы геодинамические условия формирования изученных образований.

**Практическое значение.** Проведена оценка перспектив рудоносности мафит-ультрамафитовых комплексов Кулибинского РУ, впервые выделен малосульфидный платинометалльный тип оруденения. Разработаны критерии выделения потенциально рудоносных площадей и даны рекомендации по проведению дальнейших ГРР. Потребителями полученной информации являются научно-производственные предприятия Красноярского края, а также недропользователи, ведущие добычу руд платиноидов на его территории (ОАО «Норильский никель», ООО «Русская платина»).

**Публикация и апробация работы.** По теме диссертации опубликовано 8 научных работ, в том числе 4 в изданиях из списка ВАК. Результаты исследований были представлены в виде устных и стендовых докладов на 4 российских и международных конференциях.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, 9 глав и заключения общим объёмом 183 страницы, содержит 67 рисунков, 5 таблиц и 5 приложений. Список литературы включает 150 наименований.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую признательность научному руководителю, д.г.-м.н., профессору А.И. Чернышову за неоценимую помощь в написании работы на всех этапах.

За критические замечания и ценные советы по наиболее важным вопросам металлогении и рудоносности автор также благодарен д.г.-м.н., профессору С.С. Сердюку.

В обсуждении результатов принимали участие д.г.-м.н., профессор О.М. Глазунов, д.г.-м.н. Т.Я. Корнев, Г.И. Шведов, к.г.-м.н., доцент В.И. Совлук и Н.Е. Зобов в дискуссиях с которыми рождалась истина, за что автор им искренне признателен.

Особую благодарность автор хотел бы выразить заслуженному геологу РФ, к.г.-м.н. П.П. Курганькову за наставления и поддержку на самых ранних этапах написания работы, без которых она могла и не состояться.

## **1. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ИССЛЕДУЕМОЙ ТЕРРИТОРИИ**

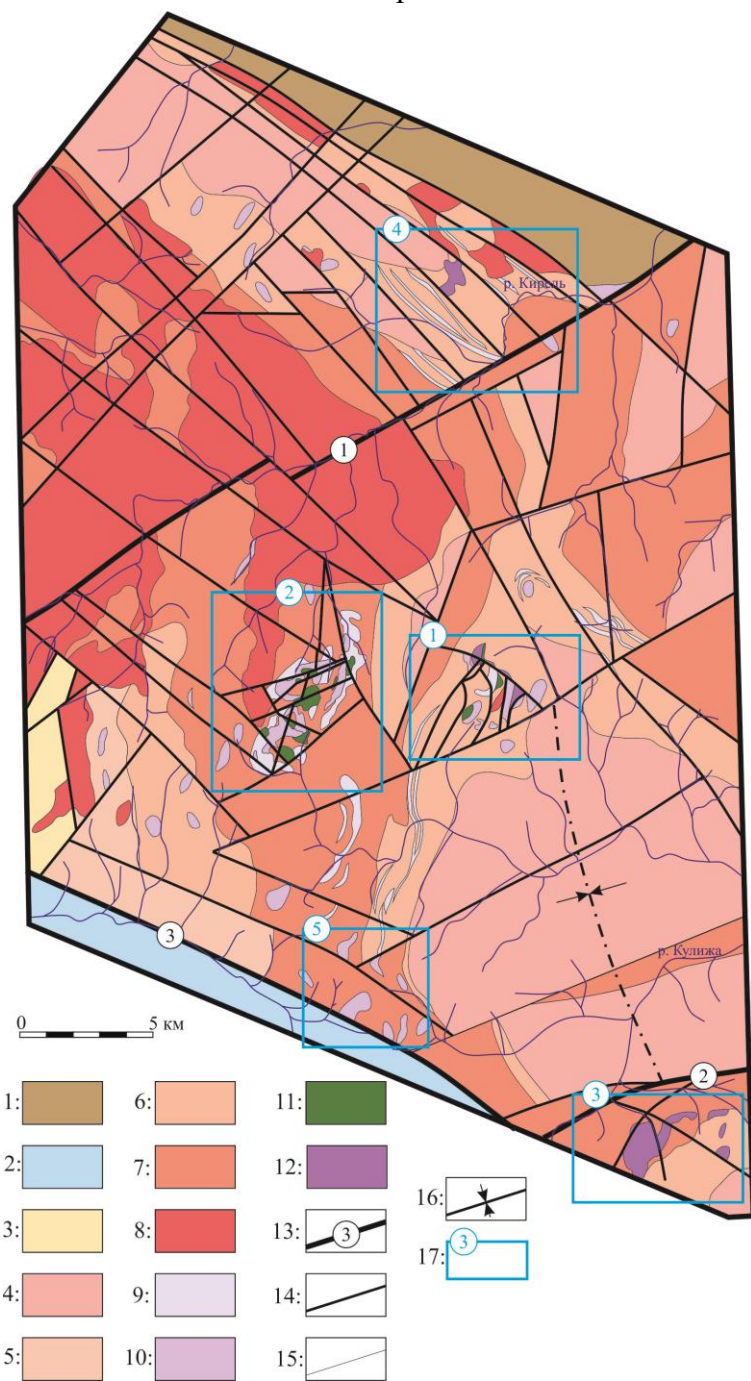
Кулибинский ПРУ расположен в центральной части Канского глыбового выступа фундамента Сибирской платформы, являющегося составной частью складчатых структур Восточного Саяна. Главными структурными элементами Восточного Саяна в изучаемом районе являются блоки дорифейского фундамента Канский и Бирюсинский, разделенные среднепалеозойским Агульским грабеном. Исследование Канской глыбы и сопряжённых с ней структур показало, что Канская глыба по своему строению и составу ближе всего соответствует гранит-зеленокаменным образованиям древних кратонов. В структуре Канской глыбы выделяется три террейна: Канский, Идарский и Шумихинско-Кирельский. Каждый из этих террейнов разбит на микроблоки и пластины, в пределах которых породы подвержены неоднократному метаморфизму. Исследуемый Кулибинский ПРУ расположен в пределах Канского террейна, который отделён от Идарского коллизионным швом надвигового типа.

Основным объектом изучения в рамках данной работы явились потенциально рудоносные породы мафит-ультрамафитовых комплексов, широко распространённые в пределах Кулибинского ПРУ. В пределах рудного узла выделено пять основных ареалов массивов (рис. 1): Адралкинский, Куйгинский, Кирельский, Кержинский и Борыньский.

**Адралкинский ареал** расположен в западном крыле Кирельской синклинали вблизи её северного центриклинального замыкания в верхнем течении р. Адралка, левого притока р. Кулижи. Здесь, в приподошвенной части амфиболито-гнейсовой кузьинской толщи, картируется группа малых тел ультрамафитового и мафит-ультрамафитового состава кингашского комплекса, с которыми ассоциируют вулканиты базальт-пикритовой серии.

**Куйгинский ареал** располагается в истоках рр. Куйга и Кулижа, сложен ассоциацией метавулканитов пикрит-базальтовой и толеитовой серий, которые

вмещающих группу тел ультрамафитов кингашского комплекса с подчинённым количеством массивов габброидов.



1 – средне-верхнедевонская карбонатно-терригенная формация: павловская и кунгусская свиты; 2 – венд-нижнекембрийская терригенно-карбонатная формация: солбинская и ангульская свиты; 3 – позднерифейская вулканогенно-осадочная формация: кувайская серия; 4 – раннепротерозойская? гнейсо-амфиболито-сланцевая формация: анжинская серия; 5 – раннепротерозойская? гнейсо-амфиболитовая формация: караганская серия; 6 – раннепротерозойская? существенно гнейсовая формация с прослоями амфиболитов, метапикритов, кварцитов и мраморов: кузынская толща; 7 – раннепротерозойская? существенно амфиболитовая формация: кулижинская толща; 8 – раннепротерозойская? гранодиорит-плагиогранитная формация: кирельский (саянский) комплекс; 9 – горизонты метапикритов и пикробазальтов в кузынской и кулижинской толщах; 10-11 – раннепротерозойская? пикрит-перидотит-дунитовая формация: кингашский комплекс, 10 – ультрамафиты, 11 – мафиты; 12 – раннепротерозойская? дунит-гарцбургитовая формация: идарский комплекс; 13 – разрывные нарушения главные (1 – Кирельский, 2 – Кулижинский, 3 – Мимийский); 14 – разрывные нарушения второстепенные; 15 – геологические границы; 16 – ось Кирельской синклинали; 17 – ареалы ультрамафитовых тел (1 – Адралкинский; 2 – Куйгинский; 3 – Борынский; 4 – Кирельский; 5 – Кержинский).

Рис. 1. Геологическая карта Кулибинского потенциального рудного узла (построена автором на основании материалов [Хаиров и др., 2015])

**Кирельский ареал** располагается в среднем течении р. Кирель в районе устья р. Шумиха. В пределах ареала откартировано 2 группы ультрамафитовых тел: на севере – линзы ультрамафитов идарского комплекса, прорывающие гнейсово-сланцевые с амфиболитами горизонты кузынской толщи; на юге – пластообразные тела ультрамафитов кингашского комплекса, интрузирующие гнейсово-амфиболитовые отложения кулижинской толщи.

**Кержинский ареал** расположен в истоках р. Кержа, левого притока р. Кулижа. Здесь, в западном крыле Кирельской синклинали, группа мелких ультрамафитовых тел субсогласно залегает в метапикритах и metabазальтах кулижинской толщи.

**Борынский ареал** располагается в бассейне р. Борынь, правого притока р. Бол. Кулижа и объединяет одноимённый ультрамафитовый массив и группу его мелких

сателитов. Он приурочен к группе разрывных нарушений, оперяющих Кулижинский разлом с юга, в зоне контакта кулижинской и кузьинской вулканогенно-осадочных толщ.

## 2. ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОДУКТИВНЫХ ИНТРУЗИВНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ И ВУЛКАНИЧЕСКИХ ТОЛЩ

### 2.1. Петрография

Породы *кингашского комплекса* представлены двумя сериями: ультрамафитовой (дуниты, верлиты, лерцолиты, кумулятивные пикриты) и мафитовой (клинопироксениты и габброиды). Отличительной особенностью пород кингашского комплекса является наличие кумулятивных и порфировых структур (рис. 2), что свидетельствует об относительно малой глубине их образования. Преобладают среди пород комплекса дуниты и пикриты.

*Идарский комплекс* представлен дунитами, гарцбургитами, ортопироксенитами и образовавшимися по ним серпентинитами. Эти породы – реститовые мантийные образования, перемещённые в верхние этажи литосферы по глубинным надвигам. Для них характерны гранобластовые, порфирокластовые и мозаичные структуры, образовавшиеся как результат пластических деформаций, которым подверглись породы.

Вблизи относительно крупных разломов в ультрамафитах кингашского и идарского комплексов широко проявлены процессы метасоматоза, результатом которых стало формирование пород, условно объединённых в группу *апоультрамафитовые метасоматиты*. Это микро- и мелкозернистые породы с разнообразными бластоструктурами и однородной, сланцеватой, либо пятнистой текстурой. Породы сложены оливином, тальком, тремолитом, серпентином, кальцитом, хлоритом в различных количественных сочетаниях вплоть до мономинеральных.

В пределах Кулибинского ПРУ широко распространены породы *вулканических мафит-ультрамафитовых комплексов*, которые обнаружены в кулижинской и кузьинской вулканогенно-осадочных толщах. В результате реконструкции исходного состава пород, выделяются следующие их разновидности: метапикриты, метапикробазальты, metabазальты 1-го типа, metabазальты 2-го типа, метаандезиты и метадациты. Для этих пород характерны бластоструктуры и различные сочетания амфиболов, плагиоклаза/соссюрита, серпентина, талька, хлорита, эпидота, кальцита, кварца и клиноцоизита.

Крупные тела габброидов в пределах Кулибинского ПРУ не обнаружены, а с мелкими дайками часто ассоциируют поля *апобазальтовых метасоматитов*. При интенсивном метасоматозе сами габброиды преобразовываются в мелкозернистые агрегаты актинолита-альбита-серицита-эпидота-клиноцоизита в разных количественных соотношениях.

### 2.2. Особенности минералогического состава

В ультрамафитах кингашского комплекса Кулибинского ПРУ отчётливо выделяется две генерации *оливина*: первая по химическому составу соответствует магнизальному хризолиту ( $Fa \sim 12\%$ ), вторая – хризолиту ( $Fa = 21,2-26,8\%$ ). В Кингашском РР по составу оливин также делится на две группы: оливин ранних дифференциатов с  $Fa = 12-15\%$  и оливины поздних дифференциатов с  $Fa = 18-21\%$ . Оливины ультрамафитов идарского комплекса Кулибинского ПРУ существенно отличаются от оливинов кингашского комплекса и соответствуют форстериту ( $Fa = 4,7-9,71\%$ ).

В составах *клинопироксенов* Кулибинского ПРУ проявляется существенная неоднородность. Клинопироксены в верлитах относятся к авгиту, а в пикритах и клинопироксенитах – к диопсиду. В ультрамафитах Кингашского РР выделено 2 генерации пироксена, первая из которых представлена клиноэнстатитом, а вторая – диопсидом.

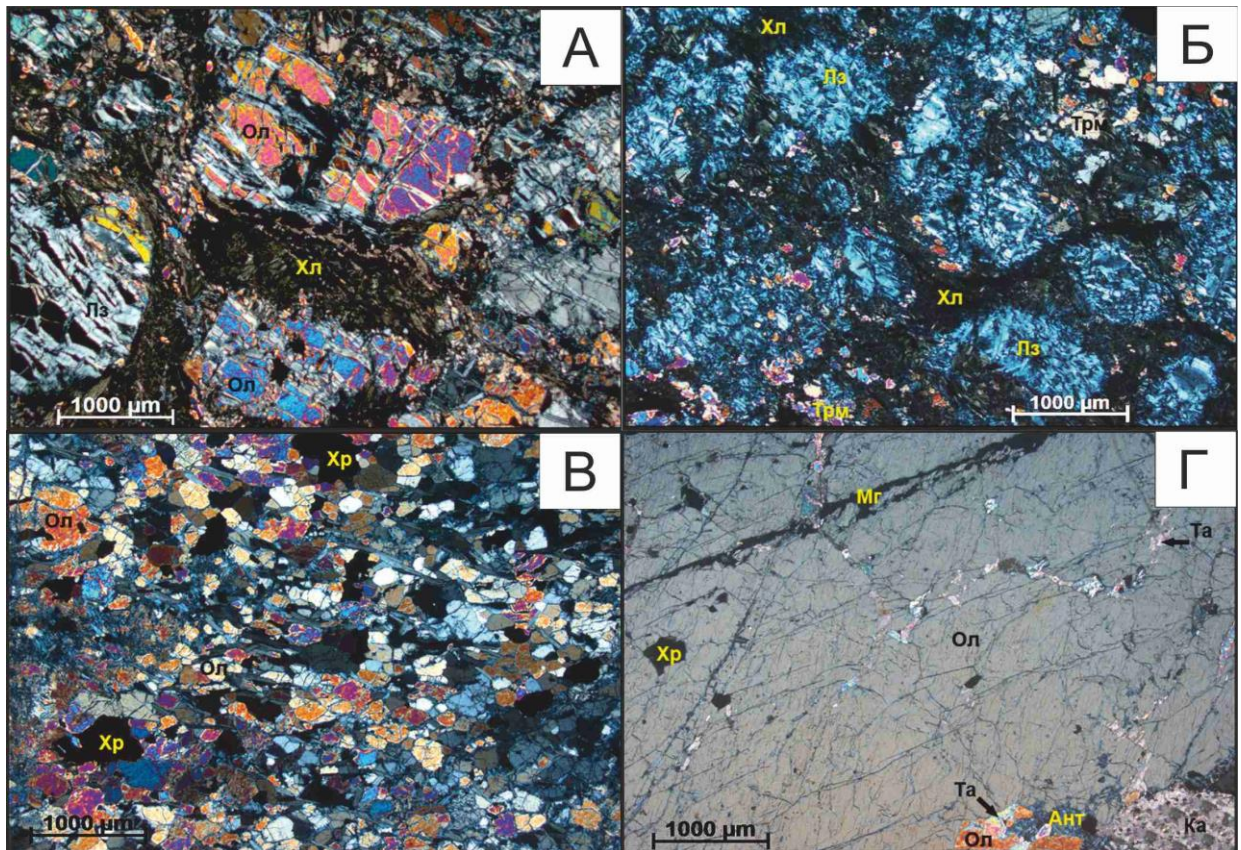


Рис. 2. Микроструктуры ультрамафитов идарского и кингашского комплексов. А, Б – куммулятивные дуниты кингашского комплекса; В, Г – мозаичные и протогранулярные дуниты идарского комплекса

**Амфиболы** в пределах Кулибинского ПРУ обнаруживаются практически во всех разновидностях исследованных пород, их состав широко варьирует. По минералам дунитов как кингашского, так и идарского комплексов образуются тремолиты близкого состава, по минералам куммулятивных пикритов кингашского комплекса и афировых пикритов кулижинской и кузынской толщ – актинолиты со значительными вариациями состава. По минералам metabasalts 1-го типа, как и по габброидам Кингашского РР, развивается магнезиальная роговая обманка, реже – ферропаргасит. В metabasalts 2-го типа обнаруживается чермакит, с составом, граничным к роговой обманке, а в пироксенитах кингашского комплекса – амфибол со схожим составом, но повышенной щёлочностью, отнесённый к ферроэденитам. Обособленную группу на диаграммах образуют ферроэдениты рудных метасоматитов, образованных в приконтактных частях тел гранитоидов.

**Ортопироксены** в пределах Кулибинского ПРУ наблюдаются преимущественно в породах идарского комплекса. По своему составу они соответствуют энстатиту малоглиноземистого типа.

### 3. РУДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ

#### 3.1. Ассоциации рудных минералов

В пределах Кулибинского ПРУ выделено 11 рудоопределяющих породных ассоциаций, которые характеризуются своей оригинальной металлогенической специализацией. Из них в плане потенциальной рудоносности интерес представляют 6.

Для **ранних дифференциатов кингашского комплекса** характерна бедная до убогой сульфидно-оксидная минерализация. Среди рудных минералов преобладают хромшпиннелиды, образующие ксеноморфные зёрна размером в десятые доли мм, располагающиеся в интеркумулусном материале и слагающие до 5% породы В



подчинённом количестве (доли %) отмечаются железоникелевые сульфиды, образующие мелкие (0,01-0,05 мм) каплевидные сростки, которые обрастает и замещает магнетит.

Для *поздних дифференциатов кингашского комплекса* характерна бедная сульфидно-оксидная минерализация. Оксиды представлены магнетитом двух генераций и слагают до 5% породы. Сульфиды представлены эпигенетической вкрапленностью пирита и пирротина, реже – халькопирита. Они редко слагают более 1% породы и обнаруживаются в виде рассеянной вкрапленности. *Клинопироксениты* среди поздних дифференциатов кингашского комплекса выделяются более богатой сульфидной минерализацией (10-20 %) при полном отсутствии оксидов в породе. Рудные минералы представлены пиритом, пирротинном и халькопиритом. На участках обогащения сульфидами отмечается брекчиевая структура, где фрагменты клинопироксенитов цементируются перетёртым силикатным материалом и сульфидами. На участках, где сульфиды слагают 10 % и менее – отмечается сидеронитовая структура.

Для *метапиритов* характерна однообразная рассеянная сульфидная вкрапленность на уровне 1-5%. Рудные минералы представлены пирротинном и халькопиритом, которые образуют зёрна размером в десятые доли мм.

*Аномалитовые метасоматиты*, расположенные в приконтактовых частях даек габброидов, вмещают обильную сульфидно-оксидную минерализацию. В таких метасоматитах рудная минерализация разнообразна и в ней обнаруживается зональность, выраженная в изменении соотношений пирротина, рутила, графита, халькопирита и пирита. С некоторыми телами гранитоидов саянского комплекса, как и с вышеописанными габброидами, связаны ареалы *апогранитных метасоматитов*, вмещающих рудную минерализацию. Здесь богатая вкрапленность пирротина, халькопирита, пирита, ильменита и магнетита имеет отчётливую зональность, выраженную в изменении соотношений этих минералов по мере удаления от контакта дайки гранитоидов.

### 3.2. Особенности состава рудных минералов

*Хромшпинелиды* в ультрамафитах Кулибинского ПРУ метаморфизованы до магнетитов и хроммагнетитов, свежие индивиды в изученных образцах отсутствуют.

*Пирротины* в Кулибинском ПРУ отмечаются практически во всех рудных минеральных ассоциациях, и во многих из них являются преобладающими минералами. Пирротины во всех ассоциациях обнаруживают близкий состав, характерный для высокотемпературных магматических образований (рис. 3). Для них характерна повышенная сернистость при пониженной железистости, постоянные примеси Со на уровне 0,1-0,2%, Ni на уровне 0,05-0,15% и практически полное отсутствие примесей Си. Для Кингашского РР, напротив, характерны высокожелезистые пирротины с существенно меньшими примесями Со и Ni, и большими – Си.

*Пентландиты* в породах Кулибинского ПРУ существенно более никелестые и менее сернистые, чем пентландиты Кингашского РР. Они, в отличие от кингашских, отвечают «среднему стехиометричному» пентландиту с близкими соотношениями железа и никеля.

*Пириты* в изученных породах обнаруживаются повсеместно, их доля возрастает от ультрамафитов к мафитам, а в метасоматических образованиях они распространены неравномерно и отражают их зональность. В составе изученных пиритов отмечается значительная примесь кобальта (до 3,77%), а также примесь никеля (до 0,33%)

*Халькопириты* Кулибинского ПРУ характеризуются составом, близким к стехиометричному, примесью кобальта на уровне 0,05% и примесью свинца в отдельных зёрнах. Состав халькопиритов неизменен во всех минеральных ассоциациях, как в магматических, так и в метасоматических.

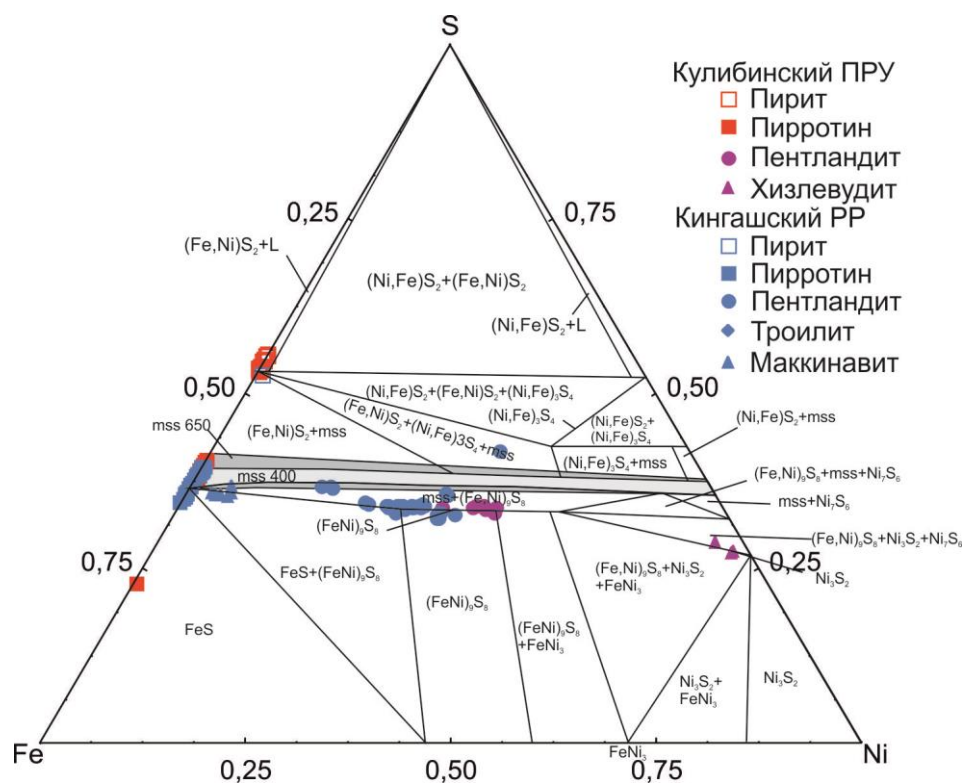


Рис. 3. Состав сульфидов железа и никеля в системе Fe-Ni-S

Поля на классификационной диаграмме отражают соотношения конденсированных фаз при температуре 400 градусов Цельсия по [Vaughan, Craig, 1974], mss-650 – поле моносльфидного твёрдого раствора при 650 градусах Цельсия по [Kullerud, Yund, Moh, 1969]. Составы минералов Кулибинского ПРУ приведены по результатам оригинальных анализов и фондовых материалов работ КНИИГуМС, составы минералов Кингашского РР приведены по [Глазунов, Богнибов, Еханин, 2003, Радомская и др, 2017] и их библиографии.

Теллурид свинца **алтаит** был обнаружен в клинопироксенитах кингашского комплекса в виде отдельного включения в силикатной матрице и само его наличие в парагенезисе с водосодержащими минералами (апатитом) в породах с повышенными концентрациями  $P_2O_5$  говорит о насыщенности поздних дифференциатов кингашского комплекса остаточным флюидом.

Фазовым анализом в отдельных пробах установлены сотни знаков металлического палладия, однако **минералы платиноидов** в шлифах и образцах на микрозондовые исследования не обнаружены, что связано с размерностью частиц благородных металлов – все обнаруженные в ходе сцинтиляционного атомно-эмиссионного анализа частицы палладия имеют размер менее 5 мкм, в связи с чем их обнаружение в ходе микроскопической аттестации затруднительно.

#### 4. ПЕТРОГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАГМАТИЧЕСКИХ ОБРАЗОВАНИЙ КУЛИБИНСКОГО ПРУ

##### 4.1. Петрохимические особенности изученных пород

По результатам анализа распределения петрогенных элементов, его сопоставления с результатами геологических наблюдений и петрографической аттестации пород, в пределах Кулибинского ПРУ выделено 4 серии вулканических и 3 серии интрузивных пород.

##### 4.1.1. Вулканиды

**Вулканиды пикрит-базальтовой серии** образуют на диаграммах обособленное поле и по петрохимическим особенностям соотносимы с перидотитовыми коматиитами, базальтовыми коматиитами и высокомагнезильными толеитовыми базальтами (рис. 4). В отличие от пород других серий, в них отмечается тренд увеличения концентраций  $CaO$  с

падением магнезиальности. Магнезиальность пород в ходе эволюции изменяется линейно, достигая минимальных значений MgO равных 10-12 %. Породы пикрит-базальтовой серии в пределах Канского и Идарского ЗКП близки по составу и образуют на диаграммах единое поле, которое отвечает полям составов известных ЗКП мира.

**Вулканиды толеитовой базальт-андезибазальтовой серии** образуют на всех диаграммах компактные поля распространения фигуративных точек с трендом изменения состава от нормальных базальтов до андезибазальтов. Породы толеитовой серии по ряду параметров схожи с архейскими толеитами. На всех диаграммах поля толеитов расположены на продолжении трендов пикрит-базальтовой серии, что позволяет сделать вывод об общности процесса их образования.

**Вулканиды бимодальной серии** образуют на диаграммах обширное и протяжённое поле, одна часть которого соответствует умеренно щелочным пикробазальтам и базальтам, а вторая – дацитам. Поле вулканидов бимодальной серии на всех диаграммах обособлено и отражает эволюционные тренды, существенно отличающиеся от других серий по положению и направленности. От вулканидов других серий эти образования отличаются повышенной щёлочностью, железистостью и титанистостью. По составу дациты серии близки к дацитам архейских ЗКП второго типа, а мафиты – к базальтам континентальных рифтов.

**Вулканиды известково-щелочной серии** образуют на диаграммах компактное поле распространения фигуративных точек с трендом изменения состава от андезибазальтов до андезитов. В мафитовой части вулканиды серии обнаруживают некоторое сходство с описанными выше толеитами, однако по мере роста количества SiO<sub>2</sub>, отличия от толеитов становятся всё более явными. По составу породы серии близки к архейским андезитам первого и второго типов по Конди и к современным известково-щелочным андезитам островных дуг.

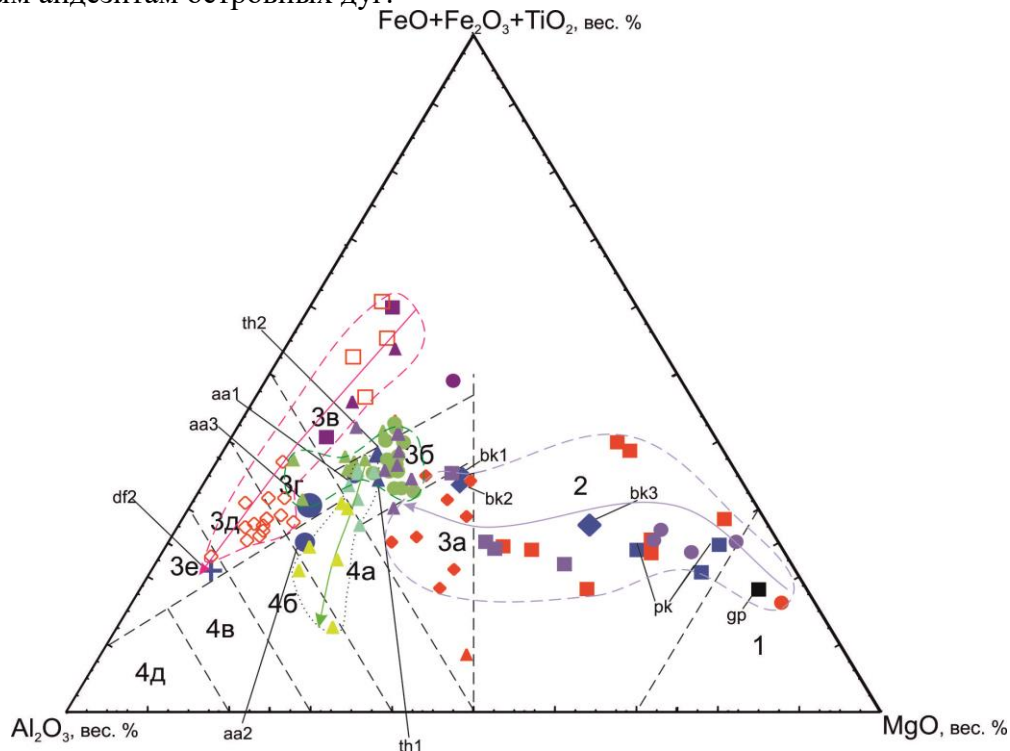


Рис. 4. Составы вулканидов Канского и Идарского ЗКП на диаграмме Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO-(FeO+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiO<sub>2</sub>)

Поля на классификационной диаграмме по [Yensen, 1976]: 1 – коматииты; 2 – коматиитовые базальты; 3 – породы толеитовой серии – 3а – магнезиальные базальты, 3б – нормальные базальты, 3в – железистые базальты, 3г – андезиты, 3д – дациты, 3е – риолиты; 4 – породы известково-щелочной серии – 4а – базальты, 4б – андезиты, 4в – дациты, 4е – риолиты. Условные обозначения приведены на рисунке 3б.

#### 4.1.2. Интрузивные образования

В результате анализа, интрузивные образования мафит-ультрамафитового состава подразделены на два комплекса: *кингашский и идарский*.

Породы *кингашского комплекса* Канского ЗКП образуют поле, которое совпадает с полем составов вулканитов пикрит-базальтовой серии (рис. 5). Вулканиты пикрит-базальтовой серии и породы кингашского комплекса обнаруживают единый тренд, отражающий эволюцию общего для них исходного высокомагнезиального расплава. Составы пород кингашского комплекса в Идарском ЗКП в целом соответствуют аналогичным породам Канского ЗКП, за исключением существенно больших концентраций  $TiO_2$ . Породы *идарского комплекса* Канского ЗКП образуют обособленное поле, тренд изменения их состава схож с трендом пород кингашского комплекса по направлению, однако отличается по положению на диаграммах.

Установлено, что ключевые петрохимические отличия пород кингашского от идарского комплексов заключаются в следующем: 1. Породы кингашского комплекса отличаются широкими вариациями состава и образуют тренды, отражающие эволюцию исходного расплава; породы идарского комплекса представлены дунитами и гарцбургитами, которые образуют компактные поля распространения фигуративных точек и для них не характерно наличие выраженных трендов изменения состава; 2. Породы идарского комплекса в целом менее железистые и более магнезиальные, чем породы кингашского комплекса; 3. В высокомагнезиальных разновидностях, где породы идарского и кингашского комплекса наиболее трудно различимы, ведущим петрохимическим критерием является относительная железистость  $Fe^* = (FeO_{общ}/(FeO_{общ}+MgO))$ . У пород идарского комплекса  $Fe^*$  колеблется в пределах 15-20% и не превышает 25%, у пород кингашского комплекса  $Fe^*$  варьирует в пределах 25-45%. Граничное значение  $Fe^*=25\%$  актуально как для Канского, так и для Идарского ЗКП. Отмечается также, что в породах кингашского комплекса зависимость  $Fe^*$  от концентраций  $SiO_2$  прямопропорциональная, а в породах идарского комплекса – обратнопропорциональная; 4. Вспомогательным петрохимическим критерием является различие в концентрациях  $Al_2O_3$ ,  $CaO$  и  $TiO_2$ . Суммарные концентрации  $Al_2O_3 + CaO$  не превышают 1-2% в наиболее магнезиальных породах идарского комплекса и 5-7% в наименее магнезиальных. В породах кингашского комплекса концентрации этих компонентов в 2-4 раза выше. Породы идарского комплекса отличаются в целом существенно меньшей титанистостью, концентрации  $TiO_2$  в них редко превышают 0,05%.

#### 4.2. Геохимия редких элементов

##### 4.2.1. Вулканиты

*Вулканиты пикрит-базальтовой серии* Канского и Идарского ЗКП близки к базальтам океанических плато, родоначальный расплав которых соответствовал примитивной мантии (рис. 6). По ряду критериев они обнаруживают также сходство с островодужными образованиями. Пикриты и пикробазальты характеризуются отчётливым обогащением лёгкими лантаноидами, при выполаживании редкоземельного спектра в области тяжёлых лантаноидов. В Идарском ЗКП выделяется второй геохимический тип вулканитов ультраосновного состава, который характеризуется выположенными спектрами РЗЭ и лёгким обогащением Sm, Eu и Gd. Базальты серии по топологии спектров РЗЭ аналогичны вышеописанным пикритам первого геохимического типа и отличаются лишь несколько повышенными общими концентрациями РЗЭ. Вместе с пикритами они образуют единое поле и по характеру спектра схожи с архейскими толеитами типа ТН-2. Пикриты также делятся на 2 типа, различающихся общим уровнем концентраций ряда элементов, и, особенно, литофильными Ba, Rb, в области которых у пикритов второго типа отмечается явно выраженная положительная аномалия. Вероятно, пикриты первого типа отражают состав исходного высокомагнезиального расплава, тогда как пикриты второго типа – результат контаминации фрагментов коры этим расплавом.

Базальты серии, как и пикриты, делятся на 2 типа, но если в части ультрамафитов количество пород разных типов приблизительно равно, то в базальтах отмечается значительное преобладание пород второго типа, обогащённого литофильными элементами.

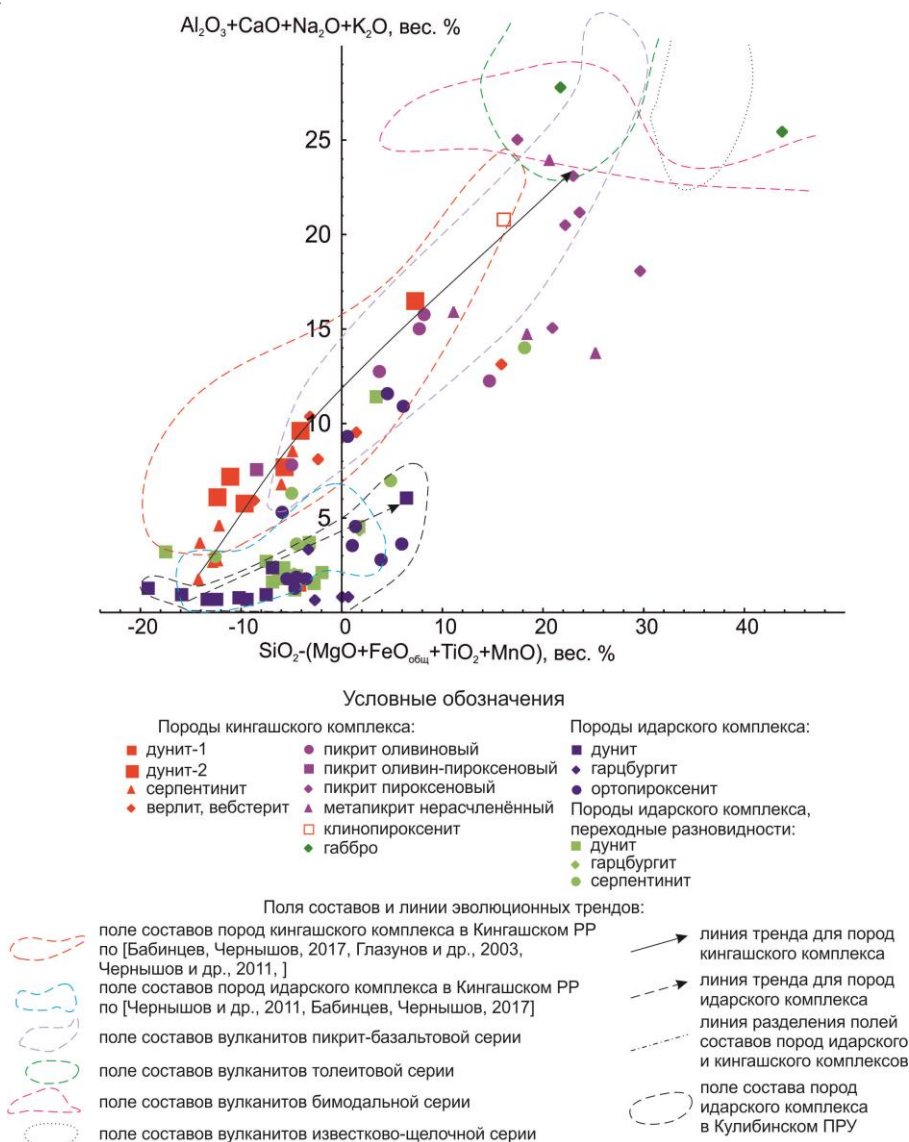


Рис. 5. Составы интрузивных образований Кулибинского ПРУ и Кингашского РР на диаграмме Барсукова-Дмитриева

**Вулканиты толеитовой серии** схожи с вулканитами пикрит-базальтовой серии и зачастую образуют с ними единое поле, что говорит об их формировании в схожих условиях из единого магматического источника. Образования этих двух серий схожи с вулканитами протерозойских ЗКП. Базальты толеитовой серии характеризуются умеренным обогащением лёгкими лантаноидами и пологонаклонными, близкими к ровным, спектрами. Общий уровень концентраций РЗЭ аналогичен базальтам пикрит-базальтовой серии. По характеру спектров РЗЭ схожи с архейскими толеитами типа ТН-1. В отличие от базальтов пикрит-базальтовой серии, толеиты менее интенсивно обогащены Ва и Rb и схожи с современными толеитами островных дуг.

**Вулканиты известково-щелочной серии** обоих ЗКП образуют обособленное поле, которое соответствует базальтам, сформированным в островодужных обстановках с родоначальным расплавом, соответствующим обогащённой мантии. В Идарском ЗКП известково-щелочные базальты близки к современным известково-щелочным породам островных дуг, тогда как в Канском ЗКП они более схожи с современными островодужными толеитами. Идарские известково-щелочные базальты характеризуются

равномерно наклонными спектрами РЗЭ, а аналогичные породы Канского ЗКП формируют выположенные спектры РЗЭ с лёгким обогащением Sm, Eu и Gd. По характеру редкоэлементных спектров все изученные известково-щелочные вулканы схожи с современными известково-щелочными базальтами.

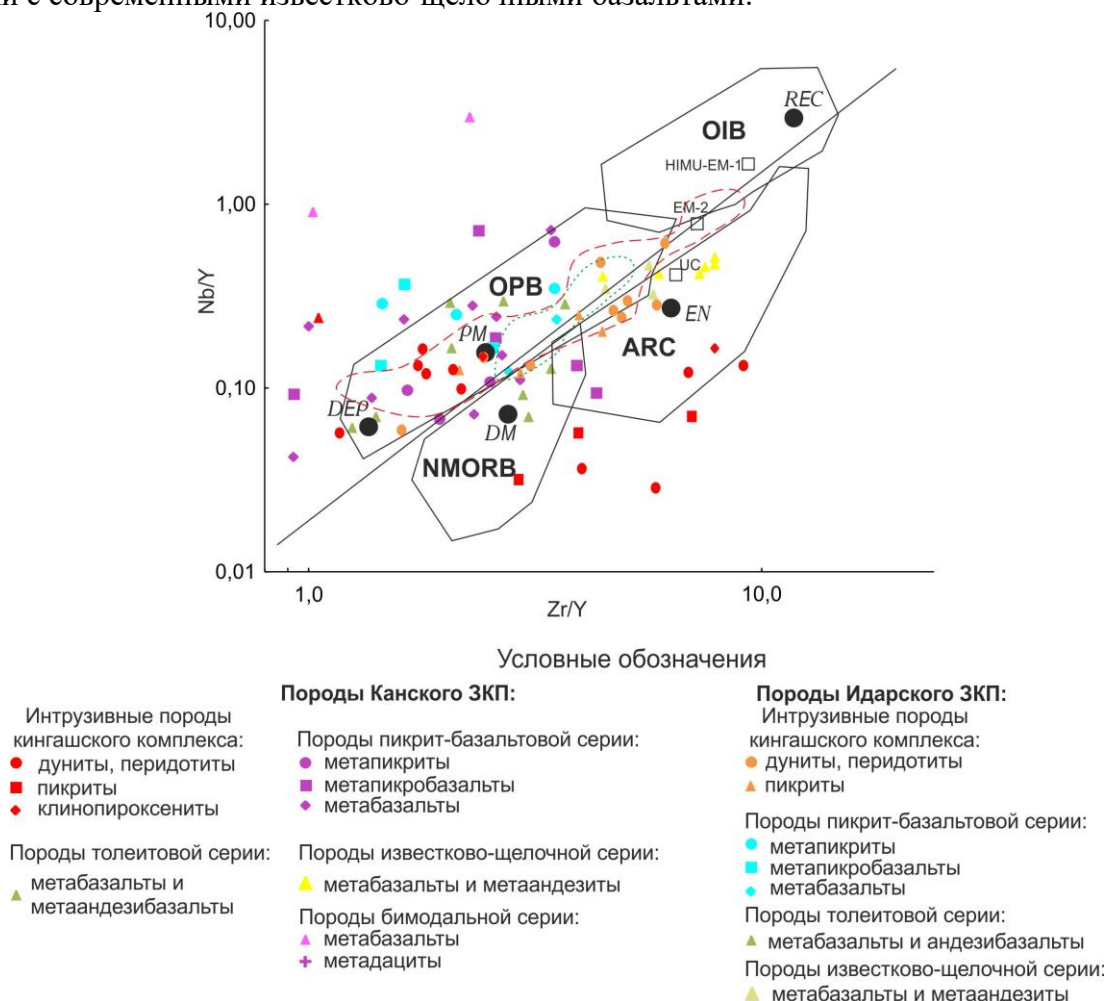


Рис. 6. Дискриминационная диаграмма Nb/Y-Zr/Y мафитов и ультрамафитов Канского и Идарского ЗКП

Поля на классификационной диаграмме по [Condie, 2005]: OPB – базальты океанических плато, OIB – базальты океанических островов, ARC – базальты островных дуг, NMORB – базальты срединно-океанических хребтов. Черными кружками и квадратами показаны мантийные компоненты – REC – рециклированная мантия, DEP – интенсивно деплетированная мантия, DM – умеренно деплетированная мантия, EN – обогащённый компонент, UC – континентальная кора, EM – обогащённая мантия, HIMU источник с высоким отношением U/Pb. Сплошной линией показано деление на плюмовые (в верхней части диаграммы) и неплюмовые (в нижней) источники. Зелёным пунктиром отмечено поле распространения пород талажинского массива. Красной штриховой линией – поле вулканизов протерозойских ЗКП по [Condie, 2005].

**Андезиты и дациты** Канского ЗКП характеризуются крутонаклонными спектрами в области лёгких лантаноидов и пологонаклонными – в области тяжёлых. Андезиты наиболее схожи с архейскими андезитами ЗКП 2 типа A2, часть образцов обладает некоторым сходством с андезитами 1 типа A1. Спектр дацитов Канского ЗКП аналогичен спектру кислых вулканизов архейских ЗКП второго типа F2. Редкоэлементные спектры андезитов и дацитов близки к спектрам, типичным для протерозойских пород континентальных окраин и имеют некоторые отличия от спектров островных дуг в части Ta-Nb.

#### 4.2.2. Интрузивные образования

Породы **кингашского комплекса** Канского ЗКП комагматичны вулканизам пикрит-базальтовой серии и формируют с ними единое поле. Породы кингашского комплекса

Идарского ЗКП также комагматичны вулканитам пикрит-базальтовой серии, однако часть пород, относящихся к Кингашскому массиву, отличаются по соотношению ряда редких элементов и их родоначальный расплав интерпретируется как близкий к обогащённой мантии. Данный факт объясняется частичной контаминацией фрагментов континентальной коры и является важным при прогнозировании оруденения. В породах **кингашского комплекса** отмечается постепенное накопление РЗЭ в ходе дифференциации исходного расплава без изменения топологии спектров РЗЭ. Они характеризуются пологнаклонными спектрами, в ранних дифференциатах отмечается повышенное  $La_n/Lu_n$  до 3-5. Концентрации РЗЭ растут от дунитов к пикритам, в отдельных образцах отмечается отрицательная Eu-аномалия. Анализ мультиэлементных спектров показал, что дуниты и перидотиты кингашского комплекса в Канском и Идарском ЗКП схожи по характеру распределения примесных элементов. В рудоносных массивах Кингашского РР повсеместно отмечается аномалия Zr-Hf положительного знака, что позволяет рассматривать наличие отрицательных Zr-Hf аномалий как критерий низкой перспективности массивов на Cu-Ni сульфидное оруденение. Ранние дифференциаты, в сравнении с поздними, существенно обеднены Nb, Sr, Zr, Hf, Ti, что связано с постепенным накоплением данных элементов в остаточном расплаве в ходе дифференциации.

Породы **идарского комплекса** в Канском и Идарском ЗКП характеризуются значительным преобладанием лёгких РЗЭ и значительно меньшими концентрациями тяжёлых РЗЭ в сравнении с породами кингашского комплекса. При сравнении с ультрамафитами офиолитовых комплексов Восточного Саяна видно, что характер спектра и концентрации РЗЭ в породах идарского комплекса значительно отличается от них. Альпинотипные гипербазиты офиолитов формируют характерные «ковшеобразные» спектры, тогда как спектры пород идарского комплекса представляют собой нечто среднее между спектрами пород кингашского комплекса и офиолитовых комплексов. Мультиэлементные спектры пород идарского комплекса в целом соответствуют ранним дифференциатам кингашского комплекса, за исключением РЗЭ и Y, концентрации которых существенно ниже.

#### 4.3. Геохимия ведущих рудных компонентов

По соотношению Cr, Ni, Co, Cu и ЭПГ среди ультрамафитов выделены 6 популяций пород: вулканиты пикрит-базальтовой серии, вулканиты прочих серий, 2 типа ультрамафитов кингашского комплекса и 2 типа ультрамафитов идарского комплекса. Для каждой популяции выделены свои особенности, которые использованы при классификации изученных образований и составлении прогнозно-поисковых моделей. Ключевые различия между выделенными популяциями заключаются в соотношениях  $MgO/Ni/Cu$ ,  $Ti/Ni/Cu$ ,  $Cr/Ti-Ni/Cu$ ,  $Pd/Ir - Ni/Cu$ . В ходе анализа характера изменчивости концентраций основных рудных компонентов в пределах Кулибинского ПРУ выделено 5 типовых разрезов мафит-ультрамафитовых комплексов: ритмично переслаивающаяся толща вулканитов пикрит-базальтовой серии; относительно крупные массивы кингашского комплекса; крупные массивы «классического» идарского комплекса; массивы переходных идарских пород 1 типа; массивы переходных идарских пород 2 типа. Для каждого типа разреза выявлены свои закономерности распределения рудных компонентов, которые были использованы при разработке комплекса критериев и прогнозно-поисковой модели оруденения. Общие выводы из анализа распределения рудных компонентов в разрезах разного типа следующие:

1. Вулканиты пикрит-базальтовой серии характеризуются ритмичным строением, к подошве ритмов отмечается накопление Cr, Ni, Co, Pd при снижении концентраций Ag, Cu и Ti. При этом для всех элементов кроме титана от ритма к ритму отмечается постепенное увеличение пиковых концентраций. Геохимический профиль толщи

- вулканитов отражает ход процессов магматической дифференциации и схож с рудоносными расслоенными интрузиями, в том числе – с Кингашским массивом;
2. Ранние дифференциаты кингашского комплекса характеризуются слабой отрицательной корреляцией между Ni и Cu, Ni и Ti, резко изменчивыми концентрациями Pd при близких Cr и Ni. По соотношению рудных компонентов ранние дифференциаты схожи с породами массива Токты-Ой. По разрезу ранних дифференциатов отмечается накопление Cr, Ni, Co; благородные металлы коррелируют с титаном, однако их наиболее высокие концентрации зафиксированы в приподошвенных частях;
  3. Поздние дифференциаты кингашского комплекса характеризуются отчётливым антиподным распределением Ni с Cu и Ti, положительной корреляцией между концентрациями Pd и Cr с Ni. Ультрамафитовая часть вулканитов пикрит-базальтовой серии схожа с поздними дифференциатами кингашского комплекса и вместе они близки к породам массива Желос. В разрезе поздние дифференциаты характеризуются изрезанным геохимическим профилем, схожим с «платиноидным горизонтом» Кингашского месторождения;
  4. Порода идарского комплекса характеризуются незначительным снижением общей хромистости при возрастании концентраций титана, а по характеру соотношений Pd с основными рудными элементами они схожи с ранними дифференциатами кингашского комплекса. По характеру распределения рудных элементов они схожи с ультрамафитами офиолитовых комплексов, однако среди них выделяется 2 популяции, одна из которых обладает чертами магматических пород кингашского комплекса. Геохимический профиль в разрезах массивов идарского комплекса схож с профилем магматических образований кингашского комплекса и вулканитов пикрит-базальтовой серии, что говорит об общем источнике и существенно меньшей в сравнении с офиолитами степени деплетированности;
  5. Метасоматиты по ультрамафитам идарского комплекса характеризуются антиподным распределением Pd с Ni и Cr, обладая чертами не характерными для магматических пород.

Также изучены разрезы апогаббровых метасоматитов, которые характеризуются: отчётливым привнесом никеля, серебра и выносом свинца на протяжении всей зоны метасоматоза; привнесом Ti и Co в метасоматиты в непосредственной близости от рудоносных даек, и выносом – в краевых частях зон метасоматоза; обогащением экзоконтактов рудоносных даек Cu, Zn, Sn; повышенные/пониженные концентрации прочих элементов обусловлены не процессами метасоматоза, а составом исходных пород.

## 5. P-T УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ УЛЬТРАМАФИТОВ

Оценка температуры и давления, при которых сформированы различные магматические образования исследуемой территории, проведена в результате анализа состава сосуществующих клинопироксенов, а также анализа оливин-хромшпинелевых равновесий. Установлено, что наиболее применимым из оливин-хромшпинелевых термометров, является термометр Фабри. Для дунитов кингашского комплекса температура становления массивов принимается равной ~ 1261 °С. Для дунитов идарского комплекса характерны температуры образования в диапазоне 1200-1350 °С, для гарцбургитов – 1236-1418 °С, расчёты по образцу ортопироксенитов показывают температуру равновесий равную 1306 °С. При исследовании пород кингашского комплекса наиболее информативными оказался клинопироксеновый термобарометр по Keith D. Putirka. Установлено, что верлиты кингашского комплекса в пределах Кулибинского ПРУ образованы в диапазоне температур 1195-1326 °С и давлений 4,15-11,13 кБар, пикриты - при температурах около 1220 °С и давлениях около 8,4 кБар, клинопироксениты – при температурах около 1170 °С и давлениях около 5,7 кБар. В сравнении с породами Кингашского массива, для Кулибинского ПРУ отмечаются



несколько более высокие температуры (~ на 200 °С выше) и пониженные давления (на 4-5 кБар ниже) становления массивов верлитов, пикритов и клинопироксенитов. В ходе эволюции расплава при снижении его магнезиальности постепенно снижалось и давление в магматической камере. Клинопироксены, позже вошедшие в состав верлитовых тел, кристаллизовались при постепенно снижающихся с 1326 °С до 1195 °С температуре и с 11 кБар до 4 кБар давлении. Далее, на определённой стадии эволюции расплава произошло резкое повышение температуры и давления кристаллизации клинопироксенов, в результате чего куммулятивные пикриты и клинопироксениты сформированы при существенно больших температуре и давлении, чем поздние верлиты. Схожий скачок Р-Т условий наблюдается и на ранних этапах эволюции исходного расплава – наиболее ранние высокомагнезиальные куммулятивные дуниты сформированы при температурах ~ на 100 °С ниже, чем поздние железистые дуниты и ранние верлиты. Такие скачкообразные изменения расчётных Р-Т условий формирования связаны с контаминацией расплавом карбонатных пород, которая происходила в два этапа: на ранней стадии эволюции расплавом были ассимилированы магнезиты, на поздней – кальцитовые породы.

## **6. ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ РУДОНОСНОСТЬ МАГМАТИЧЕСКИХ ОБРАЗОВАНИЙ КУЛИБИНСКОГО ПРУ**

### **6.1. Типы потенциально значимой рудной минерализации**

В мафит ультрамафитовых комплексах Кулибинского ПРУ выделяется 5 потенциально значимых типов рудной минерализации:

1. Смешанные магматические/эпимагматические сульфидные медь-никель-платиноидные руды, аналогичные рудам Кингашского месторождения. Потенциально рудоносными являются ранние и поздние дифференциаты кингашского комплекса. Учитывая все факторы сделан вывод о крайне низких перспективах обнаружения промышленно значимых скоплений сульфидных медь-никель-платиноидных руд на изученной территории.
2. Эпимагматические малосульфидные платинометалльные руды. Рудоносными являются поздние дифференциаты кингашского комплекса и вулканиты пикрит-базальтовой серии. «Контактовые» малосульфидные платинометалльные руды в базальных частях массивов являются наиболее перспективными на обнаружение промышленно значимых концентраций рудных компонентов. Малосульфидные же платинометалльные «рифы» в зоне перехода мафиты-ультрамафиты, хоть и не вмещают достаточно высоких концентраций ЭПГ, являются критерием выявления протяжённых богатых руд, не выявленных ранее;
3. «Офсетные» медь-серебро-палладиевые руды метасоматического происхождения, связанные с дайками габброидов и гранитоидов в зоне их взаимодействия с породами кингашского комплекса и вулканитов пикрит-базальтовой серии. Наибольшей практической ценностью обладают толщи бимодальной серии, прорванные дайками гранитоидов. Здесь сформированы специфические «палладиевые горизонты», суммарная мощность которых достигает 100 м;
4. Метаморфогенно-метасоматические малосульфидные палладиевые руды, связанные с апоультрамафитовыми породами в приконтактовых частях массивов кингашского и идарского комплексов. На сегодняшний день такие палладиеносные метасоматиты не имеют практического интереса, однако в будущем, при совершенствовании технологий обогащения, они могут стать дополнительным источником благородных металлов;
5. Позднемагматические хромитовые и хром-платиноидные руды, связанные с породами идарского комплекса. Учитывая масштабы известных проявлений хромитов, характер их рудной минерализации и химический состав, можно сделать вывод о низкой перспективности ультрамафитов Кулибинского ПРУ на обнаружение промышленно значимых скоплений таких руд.

## 6.2. Особенности продуктивной рудной минерализации, прогноз рудоносности и сравнение с месторождениями-аналогами

Как указано выше, наибольшей промышленной значимостью в районе пользуются малосульфидные платинометалльные руды. В изученных образцах из мафит-ультрамафитовых тел Кулибинского ПРУ концентрации ЭПГ изменяются от сотых долей г/т до 1 г/т. По ряду выработок выделены интервалы до 12 м мощностью со средними содержаниями более 0,5 г/т. Повышенные концентрации палладия в пробах подтверждены фазовым анализом в виде тонких частиц металлического Pd (100–350 знаков при просыпке 50 г порошка).

Наиболее значимые рудные тела приурочены к приподошвенным контактам вулканических и интрузивных пикритов, где выявлены платиноносные горизонты мощностью 8 м с содержаниями 0,8 – 1,0 г/т. Закономерности распределения палладия в телах метапикритов следующие: от кровли к подошве (как отдельных пластов, так и сближенных тел метапикритов, объединённых в пачки) отмечается закономерное увеличение концентраций палладия; за пределами пикритовых тел концентрации резко падают. Самые высокие в пределах рудного узла концентрации ЭПГ обнаружены в нижних частях пикритовых пачек; здесь же обнаружена равномерно вкрапленная пирит-пирротин-халькопиритовая минерализация на уровне ~5%, что в полтора-два раза выше, чем в верхних частях пикритовой толщи. Для разреза пикритовой толщи характерно цикличное распределение Cr, Ni и ЭПГ. На экзоконтакте ниже подошвы рудоносных ультрамафитов отмечаются повышенные до 0,2 г/т концентрации серебра, мощность зоны повышенных концентраций серебра – около 5 м, с постепенным снижением концентраций по мере удаления от контакта.

Вторыми по значимости являются офсетные руды, расположенные на некотором удалении от тел ультрамафитов. Наиболее перспективны - толщи вулканитов бимодальной серии, сопряжённые с поздними дифференциатами кингашского комплекса и дайками гранитоидов. В таких толщах выделены многочисленные тела с содержаниями палладия свыше 0,5 г/т. Мощности их колеблются от 1 до 12 м, средние содержания палладия от 0,54 до 0,76 г/т (максимальное по отдельным пробам до 0,98 г/т). Группы сближенных в разрезе тел палладиевых руд маркируют палладиеносные пачки. Здесь выделяются рудные тела двух типов: 1. Тела, приуроченные непосредственно к контактам даек плагиогранитов, пронизывающих палладиеносную толщу. 2. Тела, приуроченные к контактам разностей пород бимодальной серии (чаще всего – к приподошвенным частям горизонтов метадацитов). Сближенные тела первого и второго типа образуют зоны до 12 м мощностью. Формирование обоих типов офсетных руд произошло в результате единого процесса гидротермального перераспределения ЭПГ в ходе наложенного на ЭПГ-продуктивные толщи гранитного магматизма.

В случае с платинометалльными рудами, непосредственно в телах мафит-ультрамафитовых рудоносных комплексов Кулибинского ПРУ существует 2 механизма концентрирования ЭПГ:

1. Развитие высокого R-фактора в процессе кристаллизации расслоенных интрузий, что ведет к аккумуляции рассеянных (0,5 - 3 %) вкрапленных сульфидов в определенных слоях. Основной механизм при формировании платинометалльных малосульфидных руд в верхних горизонтах расслоенных комплексов на границе мафитовой и ультрамафитовой их частей (стратиформные руды или «платиноидные рифы»). Такие руды, как указано выше, на данном этапе не имеют промышленной значимости;
2. Сегрегация богатой ЭПГ несмесимой сульфидной жидкости до или во время внедрения силикатной магмы. Наиболее значимый механизм для изученной части мафит-ультрамафитовых комплексов Кулибинского ПРУ. В результате сегрегации богатой ЭПГ несмесимой сульфидной жидкости сформированы рудные тела в приподошвенных частях ультрамафитов расслоенных комплексов (вулканических и

интрузивных) на эндо- и экзоконтактах ультрамафитов (базальные или контактовые руды).

По комплексу признаков рудопроявления Кулибинского ПРУ обнаруживают сходство с платинометальными проявлениями Восточно-Саянской металлогенической провинции: массивов Желос, Токты-Ой, Огнит, Тартай. В качестве дальнего аналога может рассматриваться месторождение Контиярви (расслоенные интрузии комплекса Портимо, Финляндия). Кингашское месторождение, не смотря на схожесть геологии, распределения рудных компонентов в разрезе и принадлежность к одному магматическому комплексу, в качестве ближнего аналога рассматриваться не может в связи с различным типом оруденения (непосредственно в Кингашском массиве малосульфидные руды не выявлены).

## **7. ПЕТРОГЕНЕТИЧЕСКИЕ ВЫВОДЫ**

### **7.1. Геодинамические обстановки формирования продуктивных толщ**

На основании имеющихся материалов проведена палеогеодинамическая реконструкция. Установлено, что Канский и Идарский ЗКП представляют собой неопротерозойские коллизионно-аккреционные орогены, образованные на месте окраинно-континентальной палеосубдукционной зоны. Продуктивные вулканиты мафит-ультрамафитового состава сформированы в обстановках задугового спрединга, формирование родоначального расплава связано с переплавлением материала океанического плато, поступавшего в зону субдукции. В окончательном виде изученные ЗКП сформированы после закрытия задугового бассейна в ходе коллизионно-аккреционных событий, с которыми, в том числе, было связано формирование гранитных плутонов и роя даек плагиогранитов, насыщающих толщи ЗКП.

### **7.2. Генезис продуктивных магматических образований**

Родоначальный для продуктивных мафит-ультрамафитовых образований расплав эволюционировал в магматической камере, расположенной под задуговым бассейном, в ходе его эволюции происходило постепенное снижение магнезиальности с формированием всё более кислых разновидностей эффузивов – от меланопикритов (коматиитов) до железистых базальтов. В ходе эволюции расплава происходило формирование кумулатов оливина и пироксена, их гравитационная отсадка и фракционирование. В нижних частях камеры, где накапливалось достаточно большое количество кумулатов, формировались тела, позже интродуцировавшие вулканические толщи пикрит-базальтовой серии – массивы кингашского комплекса. Неоднородность условий в магматической камере и ритмичное проявление кратковременных процессов сжатия на фоне растяжения в условиях задугового бассейна стали причиной появления группы небольших и существенно различающихся массивов ультрамафитов кингашского комплекса на достаточно обширной территории Канского и Идарского ЗКП. Формирование тел ультрамафитов происходило в несколько этапов:

1. На ранней стадии эволюции расплава произошла контаминация магнезитов, ассимиляция которых вызвала повышение магнезиальности расплава и выделение значительного количества  $\text{CO}_2$ . Из-за неоднородных условий в магматической камере повышение магнезиальности расплава происходило неравномерно. Флюидонасыщенность части камеры инициировала отжимку высокомагнезиального расплава с оливиновыми кумулатами, которые сформировали малые тела (дайки и мелкие силлы) дунитов. В процессе посткумулусного переуравновешивания с высокомагнезиальным интеркумулусным расплавом произошло формирование низкожелезистых оливинов в мелких дунитовых телах кингашского комплекса. На данном этапе в ультрамафитах не было достаточного количества серы, а также не возникло условий её несмесимости с расплавом, в виду чего такие тела крайне бедны сульфидами.

2. Избыток  $\text{CO}_2$  в высокомагнезиальном расплаве при давлениях ниже 25-30 кБар вызывает повышение температуры кристаллизации оливина и пироксенов. Обогащение расплава углекислотой вызвало изменение P-T условий в магматической камере и повышение температуры формирования кумулатов поздних дунитов и верлитов кингашского комплекса. При этом условий для проявления несмесимости сульфидного вещества не возникло. На этом этапе сформированы тела дунитов и верлитов в пределах Кулибинского ПРУ.

3. На поздней стадии эволюции расплава произошла контаминация значительной массы карбонатов кальцитового состава, вероятно обогащённых серой. Новое обогащение расплава  $\text{CO}_2$  вызвало аналогичные вышеописанным изменения условий в магматической камере и повышение температуры кристаллизации кумулатов. В ходе последующей дифференциации в остаточном расплаве накапливались летучие компоненты и на определённом этапе произошло выделение сульфидного вещества из расплава. На этом этапе сформированы тела пикритов и клинопироксенитов в пределах Кулибинского ПРУ, последние нередко образуют брекчиевидные и сидеронитовые структуры.

Описанное выше характеризует становление массивов в пределах Кулибинского ПРУ, тогда как для Кингашского РР характерна другая этапность:

1. На этапе формирования ранних дифференциатов, в то время как «Канский» фрагмент магматической камеры ассимилировал магнезиты, «Идарский» фрагмент ассимилировал богатые серой кальциты, которые, вероятно, приурочены к одной стратиграфической толще. Продуктивные породы Кингашского РР обогащены рядом литофильных и редких малоподвижных элементов.

2. Уже на ранних этапах эволюции в «Идарском» фрагменте камеры произошло насыщение серой и несмесимость сульфидного вещества. Сульфид аккумуляровал никель из силикатного расплава и формировал в дунитах вкрапленные до сидеронитовых структуры. При этом сульфидное вещество, взаимодействуя с силикатным расплавом, аккумуляровало из него ЭПГ, в результате чего образовались комплексные платино-медно-никелевые руды.

3. На поздних этапах, аналогично Кулибинскому ПРУ, произошло формирование брекчиевидных тел, в которых произошло перераспределение рудных компонентов и образование богатых руд.

***Итогом перечисленных выше процессов стало формирование двух значительно различающихся рудных районов: Кингашского, богатого сульфидными медь-никель-платиноидными рудами, и Канского (фрагментом которого является Кулибинский ПРУ), перспективного преимущественно на малосульфидные платинометалльные руды.***

Такие различия могут быть связаны не только со значительными неоднородностями в пределах единой магматической камеры, но и с формированием отдельных магматических камер для фронтальной и тыловой частей задугового бассейна. О такой вероятности свидетельствует отсутствие в тылу Идарского пояса крупных гранитных плутонов. Ещё одной причиной может быть наличие ряда разделённых проводниками магматических камер, в каждой из которых накопление рудных компонентов происходило неоднородно.

### 7.3. Генезис руд исследованной территории

Потенциал рудоносности Кулибинского ПРУ связан с малосульфидными платинометалльными рудами, приуроченными к базальным частям массивов пикритов кингашского интрузивного комплекса и вулканической пикрит-базальтовой серии. В ассоциации с ними рассматриваются «офсетные» сульфидные медь-серебро-палладиевые руды, расположенные на некотором удалении от рудоносных массивов во вмещающих вулканитах и связанные с перераспределением рудных компонентов в ходе последующего

гранитного магматизма. Дополнительным источником ЭПГ могут служить малосульфидные платинометалльные стратиформные залежи в верхних частях расслоенных мафит-ультрамафитовых комплексов, образованные в результате позднемагматических и/или аутометасоматических процессов.

Рудные тела в приподошвенных частях ультрамафитов расслоенных комплексов (вулканических и интрузивных) на эндо- и экзоконтактах ультрамафитов (базальные или контактовые руды) сформированы в результате сегрегации богатой ЭПГ несмесимой сульфидной жидкости. По механизму концентрирования ЭПГ данные образования Кулибинского ПРУ схожи с платинометалльными месторождениями маргинальной серии комплекса Порtimo, Финляндия.

Формирование платинометалльных малосульфидных руд в верхних частях расслоенных комплексов на границе мафитовой и ультрамафитовой их частей (стратиформные руды или «платиноидные рифы») связано с развитием высокого R-фактора в процессе кристаллизации расслоенных интрузий, что привело к аккумуляции рассеянных (0,5 - 3 %) и богатых ЭПГ вкрапленных сульфидов в определенных слоях. Не исключено, однако, что при формировании таких руд существенную роль сыграло позднемагматическое гидротермально-метасоматическое перераспределение ЭПГ, что характерно для малосульфидных руд Норильска и платинометалльных рифов Кингаша.

Специфические «офсетные» сульфидные медь-серебро-палладиевые руды сформированы в результате перераспределения рудных компонентов первичных магматических руд под воздействием наложенного гранитоидного магматизма. Непосредственно с мелкими дайками плагиогранитов и гранодиоритов связаны маломощные зоны обогащения серебром и палладием на их экзоконтактах во всех разновидностях пород, пространственно близких к продуктивным мафит-ультрамафитовым толщам. С воздействием гидротермальных растворов, связанных с гранитоидным магматизмом, связаны рудные тела, приуроченные к контактам разностей пород бимодальной серии (чаще всего – к приподошвенным частям горизонтов метадацитов). Вероятно, области контактов разностей представляют собой наиболее проницаемые участки толщи, по которым шёл ток гидротермальных растворов. Наиболее крупные проявления таких руд связаны именно с толщами пикрит-базальтовой серии, где группы офсетных рудных тел разного типа образуют мощные рудоносные толщи.

***Итогом комплекса процессов рудообразования стало формирование малосульфидных палладиевых руд в базальных частях мафит-ультрамафитовых тел и стратиформных «рифов» в верхних частях этих же тел. В ходе наложенного гранитоидного магматизма произошло перераспределение рудных компонентов с формированием медь-серебро-палладиевых руд на некотором удалении от первичных магматических в породах вмещающей толщи.***

#### 7.4. Критерии разделения ультрамафитов и мафитов разных формаций

Одной из ключевых задач в рамках данного исследования стала разработка комплекса характерных критериев, по которым можно выделить породы каждой распространённой в пределах Кулибинского ПРУ формации. Потенциально рудоносными являются вулканиты пикрит-базальтовой серии и интрузивные породы кингашского комплекса и ниже приведены критерии их выделения, опираясь на которые сформулировано защищаемое положение №3.

***Вулканиты пикрит-базальтовой серии*** широко распространены в подошве кулижинской толщи, представлены метапикритами и пикробазальтами с неравномерной эпимагматической пирит-халькопирит-ильменит-магнетитовой минерализацией. От вулканитов других серий их отличает: повышенная магнизиальность (10-40% MgO); сниженные концентрации SiO<sub>2</sub> (менее 50%); отношение Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(FeO<sub>общ</sub>+TiO<sub>2</sub>) менее 1 при отношении MgO/(FeO<sub>общ</sub>+TiO<sub>2</sub>) более 0,25; отношение Zr/Y < 4 при Nb/Y > 0,04; отношение Th/Yb в диапазоне от 0,1 до 1; нормированные по хондриту C1 PЗЭ в диапазоне от 0,9 до

11, графики пологонаклонные со слабо выраженным накоплением лёгких лантаноидов,  $La_n/Gd_n/Lu_n$  близко к 1; концентрации Cr находятся в пределах 120-1000 г/т при концентрациях Ti 180-1700 г/т;

**Интрузивные породы кингашского комплекса** характеризуются пёстрым составом: дуниты, верлиты, лерцолиты, метапикриты, клинопироксениты и габброиды. Отличительной особенностью является наличие кумулятивных и порфировых структур. Для ранних дифференциатов кингашского комплекса характерно наличие оливина с долей Fa не менее 12%, для поздних – не менее 18 %. Ключевые петрохимические отличия пород кингашского комплекса заключаются в следующем: широкие вариации состава с образованием трендов, отражающих эволюцию исходного расплава; повышенная железистость и пониженная магниальность в сравнении с идарскими породами; относительная железистость ( $FeO_{общ}/(FeO_{общ}+MgO)$ ) варьирует в пределах 25-45%, характерна прямопропорциональная зависимость  $Fe^*$  от концентраций  $SiO_2$  и в целом в 2-4 раза более высокие концентрации  $Al_2O_3$ , CaO и  $TiO_2$  в сравнении с породами идарского комплекса. Породы кингашского комплекса характеризуются пологнаклонными редкоземельными спектрами с  $La_n/Lu_n \sim 1$ , в ранних дифференциатах отмечается повышенное  $La_n/Lu_n$  до 3-5. Ранние дифференциаты существенно обеднены Nb, Sr, Zr, Hf, Ti, но при этом в сравнении с ультрамафитами идарского комплекса обогащены PЗЭ и Y, концентрации которых существенно ниже. Ранние дифференциаты кингашского комплекса характеризуются слабой отрицательной корреляцией между Ni и Cu, Ni и Ti, резко изменчивыми концентрациями Pd при близких Cr и Ni. По разрезу ранних дифференциатов отмечается накопление Cr, Ni, Co; благородные металлы коррелируют с титаном, однако их наиболее высокие концентрации зафиксированы в приподошвенных частях. Поздние дифференциаты характеризуются отчётливым антиподным распределением Ni с Cu и Ti, положительной корреляцией между концентрациями Pd и Cr с Ni. В разрезе поздние дифференциаты характеризуются изрезанным геохимическим профилем, схожим с «платиноидным горизонтом» Кингашского месторождения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе впервые выполнено комплексное изучение мафит-ультрамафитовых комплексов Кулибинского ПРУ, включающее: геологическую и геолого-структурную характеристику массивов и толщ; изучение их петрографических особенностей и характеристику состава породообразующих минералов; описание петрохимических и геохимических особенностей их строения. Выделено два интрузивных комплекса (кингашский магматический и идарский реститовый) и четыре серии вулканитов (пикрит-базальтовая, толеитовая, бимодальная, известково-щелочная). Каждое из выделенных подразделений охарактеризовано и разработан комплекс критериев, по которым их можно классифицировать.

По результатам минераграфического изучения образцов каждого из выделенных комплексов и серий, охарактеризовано 11 породных ассоциаций, которые различаются по характеру рудной минерализации. Выделено пять потенциально значимых типов продуктивной минерализации. Впервые установлено, что перспективы освоения Кулибинского ПРУ связаны с малосульфидными платинометалльными рудами в базальных частях мафит-ультрамафитовых массивов и толщ, а также с офсетными медь-серебро-палладиевыми рудами метасоматического происхождения, связанными с дайками габброидов и гранитоидов в зоне их взаимодействия с породами кингашского комплекса и вулканитов пикрит-базальтовой и бимодальной серий. Описаны особенности размещения обоих типов руд в продуктивных толщах, дана их качественная и количественная характеристика по ряду ключевых параметров.

Впервые проведено моделирование P-T условий формирования мафит-ультрамафитовых образований и палеогеодинамическая реконструкция обстановок формирования продуктивных толщ. Установлено, что Канский и Идарский ЗКП

представляют собой неопротерозойские коллизионно-аккреционные орогены, образованные на месте окраинно-континентальной палеосубдукционной зоны. На основании всего комплекса проведённых исследований разработана геолого-генетическая модель формирования продуктивного мафит-ультрамафитового вулканоплутонического комплекса.

Разработан комплекс критериев выделения площадей, толщ и массивов, продуктивных на обнаружение малосульфидных платинометаллических и сульфидных медь-никель-платиноидных руд. На основании комплекса критериев впервые созданы прогнозно-поисковые модели для двух ключевых в регионе типов оруденения. Исходя из созданной модели, обосновано направление дальнейшего изучения Кулибинского ПРУ. Перспективы рудоносности узла связаны с Адралкинским и Куйгинским ареалами ультрамафитов, в пределах которых прогнозируется среднее по размерам месторождение палладия.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **В журналах и изданиях рекомендованных ВАК РФ:**

1. Бабинцев Н.А., Чернышов А.И. Типизация платиноносных пикритов северо-запада Канского зеленокаменного пояса (Восточный Саян) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов: 2018. Т. 329. № 6. С. 118-127
2. Бабинцев Н.А., Чернышов А.И. Перспективы платиноносности кулибинского потенциального рудного узла (Восточный Саян) // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН: 2018. № 6 (282). С. 9-15.
3. Бабинцев Н.А., Чернышов А.И. Петрогеохимические особенности платиноносных метапикритов Кулибинского потенциального рудного узла (Восточный Саян) // Известия Иркутского Государственного Университета. Серия: Науки о Земле: 2018. Т. 26. С. 3-17.
4. Чернышов А.И., Бабинцев Н.А., Ворошилов В.Г. Петрографические и минералогические особенности ультрамафитов Кирельского фрагмента Канского зеленокаменного пояса (СЗ Восточного Саяна) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов: 2017. Т. 328. № 1. С. 75–88.

### **В других журналах и изданиях:**

1. Бабинцев Н.А., Чернышов А.И. Малосульфидные платинометаллические рудопроявления северо-запада Восточно-Саянской платино-никеленоносной провинции как аналог платинометаллических месторождений комплекса Портимо (Финляндия) // Ультрамафит-мафитовые комплексы: геология, строение, рудный потенциал. Материалы V международной конференции. Улан-Удэ: 2017. С. 30-32.
2. Бабинцев Н.А., Чернышов А.И. Платиноносные пикриты северо-запада Канского зеленокаменного пояса // Петрология магматических и метаморфических комплексов. Материалы IX международной конференции. Томск: 2017. С. 45-52.
3. Бабинцев Н.А. Составы оливинов в ультрамафитах Кулибинской платино-никеленоносной площади (Восточный Саян) // Проблемы геологии и освоения недр: труды XX Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня основания Томского политехнического университета. Том I. – Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. С. 110-112.
4. Бабинцев Н.А. Сравнительная петрохимическая характеристика ультрамафитов Канского зеленокаменного пояса (Восточный Саян) // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXI Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня основания Томского политехнического университета. Том I. – Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2017. С. 91-93.