

На правах рукописи



МИНИБАЕВ Александр Минзакирович

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ
КОРЕННОЙ ПЛАТИНОВОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ
КАМЕНУШИНСКОГО МАССИВА**

*Специальность 1.6.10 – Геология, поиски и разведка твердых
полезных ископаемых, минерагения*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук**

Санкт-Петербург – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научный руководитель:

доктор геолого-минералогических наук, доцент

Козлов Александр Владимирович

Официальные оппоненты:

Иванов Кирилл Святославич

доктор геолого-минералогических наук, ФГБУ Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого Уральского отделения РАН, лаборатория региональной геологии и геотектоники, главный научный сотрудник

Петров Сергей Викторович

кандидат геолого-минералогических наук, ФГБУ Санкт-Петербургский государственный университет, кафедра геологии месторождений полезных ископаемых, доцент

Ведущая организация – Институт геологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук имени академика Н.П. Юшкина

Защита диссертации состоится «20» декабря 2022 года в 17:30 на заседании диссертационного совета 24.2.364.02 (Д.212.121.04) на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ) по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23, аудитория 4-73.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на сайте Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе (МГРИ) по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23, <https://mgri.ru/>

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета 24.2.364.02 (Д.212.121.04)



С.Д. Ганова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящий момент коренные платиновые месторождения на Урале отсутствуют. Наиболее перспективными источниками платинометалльного сырья являются зональные массивы Урало-Аляскинского типа, входящие в состав Платиноносного пояса Урала. Проблемы, возникающие при поисках и оценке коренных источников платины в пределах этих массивов, связаны, в первую очередь, со сложностью выделения рудных тел, обусловленной крайней неравномерностью распределения платины в их пределах и отсутствием устойчивых закономерностей размещения участков платиновой минерализации. Тем не менее, высокий россыпеобразующий потенциал, а также малый уровень эрозионного среза некоторых зональных массивов позволяет рассчитывать на выявление коренных зон развития платинометалльного оруденения.

Одним из наиболее крупных россыпных платиновых узлов Урала является Нясьминский, отработка которого началась в 1885 году (Высоцкий, 1913). Потенциал Нясьминских россыпей обязан Каменушинскому концентрически-зональному клинопироксенит-дунитовому массиву (рисунок 1). Несмотря на значительные масштабы проявления россыпной платины данного региона и 130-летнюю историю ее освоения, Каменушинский массив слабо изучен по сравнению с другими зональными массивами Платиноносного пояса Урала, перспективными на выявление коренного платинового оруденения.

За длительную историю изучения коренных платиновых руд зональных массивов Платиноносного пояса Урала появились высоко-технологичная горная техника и оборудование, развилась инфраструктура региона, получен опыт освоения месторождений благородных металлов с низкими концентрациями полезного компонента. Таким образом, выявление закономерностей распределения коренного платинового оруденения Каменушинского массива представляет научный и практический интерес.

Состояние изученности Каменушинского массива и современные проблемы выявления коренных источников платины зональных массивов Платиноносного пояса Урала. В 80-гг. XIX века по речкам Большая и Малая Каменушка была открыта одна из крупнейших россыпей Урала – Нясьминская (Высоцкий, 1913), источником которой является Каменушинский массив. По современным данным из Нясьминской россыпи добыто не менее 15 т платины за весь период эксплуатации (Телегин, 2006ф). Данная россыпь отличалась от других

Уральских россыпных узлов, таких как Исовской и Нижнетагильский, тем, что наряду с высокими содержаниями (до 400 г/т, в среднем составляя от 2,1-2,6 г/т до 6,5-26 г/т) отмечалось полное отсутствие крупных самородков (Высоцкий, 1913). Эту особенность Н.К. Высоцкий объяснял малым уровнем эрозионного среза и, как следствие, подчеркивал высокие перспективы обнаружения коренного оруденения Каменушинского массива.

Несмотря на значительные масштабы проявления россыпной платины и отмеченный высокий потенциал Каменушинского массива, ему не уделялось должного внимания исследователями до XXI века. На основании проведенных в 1904 г. работ в пределах Каменушинского массива Н.К. Высоцкий (1913) выделил участок с платиновой минерализацией – Хромитовый Увал. В 1983 г. О.К. Ивановым (1997) было выделено множество отдельных хромитовых тел в пределах всего массива, а в 2003-2005 Ю.М. Телегиным (2006ф) был околонтурен ряд минерализованных зон хромититов на участке Хромитовый увал. При этом на основе геологических наблюдений на Хромитовом увале, предполагалось, что минерализованные зоны пространственно приурочены к дайкам габброидов, верлитов, клинопироксенитов (Телегин 2006ф; Телегин и др., 2009; Толстых и др., 2011).

При изучении проявлений коренной платиновой минерализации зональных массивов особенно важно выявление закономерностей ее распределения. Так, А.П. Карпинский (1926) на основе изучения столбообразного тела хромититов месторождения Госшахта не исключая возможности выделения какой-то части платины на магматическом этапе, считал, что ведущую роль в распределении хромит-платинового оруденения играют флюидные процессы. Позднее, по результатам масштабных поисково-оценочных работ проводимых А.Н. Алешковым в 1941-1943 гг. в пределах Светлоборского и Вересовоборского массивов (Алешков и др., 1942ф), Ю.М. Телегиным в 2001-2005 гг. и в 2007-2009 гг. в пределах Светлоборского и Вересовоборского (Телегин, 2009ф), а также Каменушинского массивов (Телегин, 2006ф), наметилась закономерность, выражающаяся в приуроченности наиболее богатых рудных зон к полям развития дайковых тел пироксенитов, горнблендитов и габбро. В целом, по итогам столетнего изучения коренного платинового оруденения зональных массивов определилась наиболее известная закономерность, выраженная в приуроченности хромит-платинового оруденения к полям фациального перехода дунитов различных по зернистости, где получили раз-

вите порфировидные дуниты (Высоцкий, 1913; Заварицкий, 1928; Бетехтин, 1935; Кашин, 1956; Иванов О., 1997; Столяров, 2002; Пушкарев, 2007; Малич и др., 2015, 2017; Степанов и др., 2017; Степанов, 2018б; Кузьмин и др., 2020б и др.). Тем не менее, сложность прогнозирования в пределах них зон проявления хромит-платиновой минерализации связана с тем, что ширина полей фациальных переходов дунитов по обобщенным данным варьирует в широких пределах – от 5 до 200 м (Степанов, 2018б).

Определенные закономерности носят общий характер, так как выделялись преимущественно по результатам комплексных исследований ряда зональных массивов. Вместе с тем, не смотря на схожую природу зональных массивов Платиноносного пояса Урала, каждый из них уникален. Таким образом, изучение особенностей размещения зон развития коренной хромит-платиновой минерализации Каменушинского массива имеет научный и практический интерес.

Цель работы. Анализ существующих и выявление новых закономерностей распределения платинометалльной минерализации в пределах Каменушинского массива.

Задачи:

1. Характеристика вещественного состава пород массива с применением минералого-петрографических и геохимических методов.
2. Анализ особенностей проявления хромит-платиновой минерализации в пределах массива.
3. Систематизация пород, слагающих дайки, определение их геологических позиций в структуре массива, выделение наиболее распространенных и геохимически контрастных даек.
4. Выявление индикаторных элементов, в пределах вторичных литогеохимических ореолов рассеяния которых можно фиксировать зоны развития хромит-платинового оруденения в коренном залегании и определять положение даек габбро и гранитоидов.
5. Анализ пространственно-временных взаимоотношений хромит-платиновой минерализации с дайковыми телами габбро и гранитоидов.
6. Выделение литогеохимических ореолов рассеяния, отождествляющих положение рудных зон в нижележащих коренных породах.

Фактический материал и методы исследования. В основу работы легли геологические наблюдения и оригинальный каменный материал, собранные автором в ходе инициативных экспедиций 2014-2015 и 2017 гг. в пределах Каменушинского массива. Литогеохимическая съемка была проведена по сети 200×20 м и покрыла все дунитовое ядро и значительную часть клинопироксенитовой каймы (1948 проб). При проведении опробования по вторичным ореолам рассеяния попутно проводились геологические наблюдения и отбирались штучные образцы коренных пород, а также регистрировались обнаруженные зоны развития хромититов. Для детального картирования коренных пород в центральной части Каменушинского массива было пройдено 54 расчистки. Также осуществлены рекогносцировочные маршруты в пределах южной и западной окраин Павдинского габбрового плутона, обрамляющего Каменушинский массив с севера, востока и юга. Всего было пройдено 56 геологических маршрутов общей протяженностью порядка 270 км, 75 расчисток суммарной площадью около 30 м², описано 680 точек наблюдений, в том числе детальных – 94.

На основе собранного материала было изготовлено и изучено 176 петрографических, 41 – прозрачно-полированных шлифов и 45 аншлифов. С целью определения текстурных особенностей пород и хромититовых образований, а также специфики взаимоотношения дайковых тел с вмещающими породами было обработано и приполировано 40 крупных штучных образцов с размером плоскости полировки от 2×5 см до 12×22 см. Изготовленные препараты изучались методами оптической микроскопии на стереомикроскопе Leica M125 и поляризационном микроскопе Leica DM 2700 в Санкт-Петербургском горном университете.

Химический состав пород и руд Каменушинского массива определялся с использованием рентгеноспектрального флуоресцентного анализа (ЦЛ ФГБУ «ВСЕГЕИ», Санкт-Петербург, прибор – ARL Optim`X, аналитик В.Н. Кириллов). Концентрации РЗЭ и редких элементов изучались методом ICP-MS (ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН, Екатеринбург, прибор – ELAN 9000, аналитик Д.В. Киселева). Для определения содержаний элементов платиновой группы (ЭПГ) был также использован метод ICP-MS (ЦЛ ФГБУ «ВСЕГЕИ», Санкт-Петербург, прибор – ELAN-6100 DRC, аналитики В.А. Шишлов и В.Л. Кудряшов). Уточнение содержаний ЭПГ было проведено пробно-атомно-эмиссионным анализом (ЗАО «РАЦ МИА», Санкт-

Санкт-Петербург, атомно-эмиссионный спектрометр ICAP 6300, аналитик Л.А. Ушинская). Химический состав минералов хромититов и дунитов диагностировался на сканирующем электронном микроскопе Carl Zeiss EVO, оборудованном приставками EDS (энергодисперсионный рентгеновский спектрометр) и BSD (детектор обратно рассеянных электронов) (ЗАО «ОПТЕК» Carl Zeiss Group, г. Москва, аналитик А.А. Трифонов).

Содержание Pt, Pd и Au в литогеохимических пробах определялось пробирным анализом (чувствительность 0,002 г/т) на базе лаборатории СТЮАРТ, Москва (Stewart Geochemical & Assay); определение редких элементов проводилось полуколичественным спектральным анализом (чувствительность 0,002 г/т) в аналитической лаборатории МЕХАНОБР, Санкт-Петербург.

Защищаемые положения:

1. Аксессуарные, шпировые и жильные формы проявления хромитовой минерализации клинопироксенит-дунитового Каменушинского массива сингенетичны вмещающим их дунитам и сформировались на различных стадиях их образования.

2. Платинометалльная минерализация в центральной части Каменушинского массива сконцентрирована в телах хромититов, формирующих линейно вытянутые минерализованные зоны, пространственная ориентировка которых согласуется с внутренними неоднородностями дунитового ядра массива и совпадает с залеганием дайковых тел.

3. Аномалии никеля, кобальта, марганца, олова и цинка во вторичных ореолах рассеяния Каменушинского массива, фиксируют поля развития хромит-платиновой минерализации и позволяют рассматривать эту элементную ассоциацию в качестве косвенного поискового признака на платину.

Научная новизна:

1. Систематизированы дайковые тела Каменушинского массива на основе их комплексной минералого-петрографической и геохимической характеристики; определены пространственно-временные взаимоотношения даек.

2. Выявлены геолого-структурные и вещественные особенности хромит-платиновых минерализованных зон Каменушинского массива.

3. Установлено, что совпадение ориентировок хромит-платиновых минерализованных зон с дайками габбро и гранитоидов

связано с их общей приуроченностью к внутренним неоднородностям дунитового ядра Каменушинского массива.

4. В результате изучения вторичных ореолов рассеяния установлено, что Ni, Co, Mn, Sn и Zn являются элементами-индикаторами хромит-платиновых зон.

Практическая значимость. Выявленные закономерности проявления платиновой минерализации в пределах Каменушинского массива и разработанные на их основе рекомендации могут быть использованы в геологических организациях для повышения эффективности поисковых работ на коренное платиновое оруденение в пределах зональных массивов Урало-Аляскинского типа.

Достоверность защищаемых положений и выводов определяется тщательным анализом материалов предшественников; систематическим отбором штучных проб и представительностью коллекции оригинального каменного материала; большим количеством точек наблюдений; детальностью при проведении петрографических исследований; использованием современных методов исследования по сертифицированным методикам в аккредитованных лабораториях в ходе диссертационных исследований.

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены на международных и всероссийских конференциях: V Российская молодежная школа с международным участием «Новое в познании процессов рудообразования» (ИГЕМ РАН, Москва, 2015), XXII Всероссийская научная молодежная конференция «Уральская минералогическая школа», посвященная 80-летию со дня рождения академика Н.П. Юшкина (ИГГ УрО РАН, Екатеринбург, 2016), XXIII Всероссийская научная молодежная конференция «Уральская минералогическая школа» (ИГГ УрО РАН, Екатеринбург, 2017), VIII Российская молодежная школа с международным участием «Новое в познании процессов рудообразования» (ИГЕМ РАН, Москва, 2018), 14th International Congress on Applied Mineralogy (BSTU, Belgorod, 2019).

По теме диссертации опубликовано 8 работ, из них 3 работы в изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и представлена на 142 страницах, включает 53 иллюстрации, 17 таблиц и библиографический список из 275 наименований. Во *введении* определены актуальность, цели и задачи работы, ее научная новизна и практическая значимость, указаны методы исследования, а

также сформулированы защищаемые положения. В *первой главе* содержатся сведения об истории изучения платиноносного потенциала Каменушинского массива и связанных с ним россыпей. Также рассмотрены основные проблемы изучения коренного платинометаллогенного оруденения зональных массивов Платиноносного пояса Урала и обоснована необходимость раздельного изучения подобных массивов с целью определения устойчивых закономерностей проявления коренной платиновой минерализации. *Вторая глава* содержит информацию о положении Каменушинского массива в структуре Платиноносного пояса Урала. Рассмотрено его геологическое строение и дана структурно-вещественная характеристика клинопироксенитов и дунитов, слагающих массив. В *третьей главе* приведены результаты изучения дайковых пород Каменушинского массива, дана их геологоструктурная, минералогическая-петрографическая и геохимическая характеристики. На основании результатов наблюдений сделаны выводы о природе дайковых тел, определено их место в структуре массива, а также предложена схема их пространственно-временных взаимоотношений. В *четвертой главе* всесторонне охарактеризованы формы проявления хромитовой минерализации, включающей акцессорные хромшпинелиды, шпировые и жильные хромиты. По результатам комплексных исследований установлена последовательность формирования выделенных типов хромитовой минерализации на фоне эволюции Каменушинского массива. Также приведены сведения о платиноносности хромититовых тел и характере их распространения. В *пятой главе* рассмотрены геохимические особенности вторичных ореолов рассеяния Каменушинского массива. Определены элементы, ассоциирующие с коренным платинометаллогенным оруденением, а также элементы, позволяющие выделять поля развития даек. На основании изучения положения ореолов аномалий и статистических анализов установлен характер взаимоотношений платинового оруденения с дайковыми телами. *Заключение* содержит главные выводы работы и основную информацию о возможности практического применения результатов исследования.

Благодарности.

Автор искренне благодарен своему научному руководителю профессору, доктору геолого-минералогических наук Александру Владимировичу Козлову за неоценимую помощь и поддержку в подготовке диссертации, обсуждение результатов по ходу исследования, совместную работу и неоценимый вклад в развитие личности. Автор

глубоко признателен старшему научному сотруднику Института геологии и геохимии УрО РАН, кандидату геолого-минералогических наук Сергею Юрьевичу Степанову за ценные советы, конструктивную критику, помощь в экспедиционных и полевых исследованиях. За консультации и обсуждения результатов соискатель благодарен профессору, доктору геолого-минералогических наук Ирине Владимировне Таловиной (Горный университет). Особую благодарность автор выражает доктору геолого-минералогических наук, члену-корреспонденту РАН Юрию Борисовичу Марину (Горный университет) за мотивационную поддержку и ценные комментарии. Глубокую признательность автор выражает руководителю геологоразведочных работ «Светлоборской площади» главному геологу АО «Урал-МПГ» Андрею Валерьевичу Корнееву за возможность участвовать в полевых работах и полученный бесценный производственный опыт.

Отдельную благодарность за поддержку и профессионально выполненные аналитические работы автор выражает Людмиле Александровне Ушинской (ЗАО «РАЦ МИА», г. Санкт-Петербург), Александру Андреевичу Трифонову (ЗАО «ОПТЕК» Carl Zeiss Group, г. Москва), Дарье Владимировне Киселевой (ЦКП «Геоаналитик», г. Екатеринбург).

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ИХ ОБОСНОВАНИЕ

1. Акцессорные, шлировые и жильные формы проявления хромитовой минерализации клинопироксенит-дунитового Каменушинского массива сингенетичны вмещающим их дунитам и сформировались на различных стадиях их образования.

В ходе изучения структурно-текстурных особенностей хромитовой минерализации, было определено, что в пределах Каменушинского массива, как и в пределах других зональных ультрамафитовых массивов Среднего Урала, она представлена акцессорными хромшпинелидами, шлировыми и массивными жильными хромититами. Руководствуясь опытом предшественников по типизации различных форм проявления хромитовой минерализации по количественному соотношению в них зерен хромшпинелида и силикатной составляющей (по Сидорову и др., 2004; Пилюгину, 2014; Степанову, 2018б), определено, что:

1. в качестве *акцессорной* хромитовой минерализации рассматриваются редкие (до 3%) включения в дуните (до 10% в порфири-

видных дунитах) мелких идиоморфных, гипидиоморфных и ксеноморфных кристалликов хромшпинелида;

2. *шлировые* хромититы определяются содержанием хромшпинелида 10-90% и включают в себя разновидности хромшпинелидов редко-, средне-, густовкрапленного и прожилково-вкрапленного типов. Редковкрапленные хромшпинелиды локализуются только в краевых частях хромититовых тел, и не образует скопления превышающие первые сантиметры;

3. *массивные жильные* хромититы определяются содержанием хромшпинелида > 90% и выполняют трещины.

Детальное изучение хромитовой минерализации Каменушинского массива показало, что существует достаточно постепенный переход между аксессуарными хромшпинелидами, шлировыми и массивными жильными хромититами. Выделяются все переходные формы проявления хромитовой минерализации, образующие непрерывный ряд аксессуарные хромшпинелиды → шлировые хромититы → массивные жильные хромититы (рисунок 2).

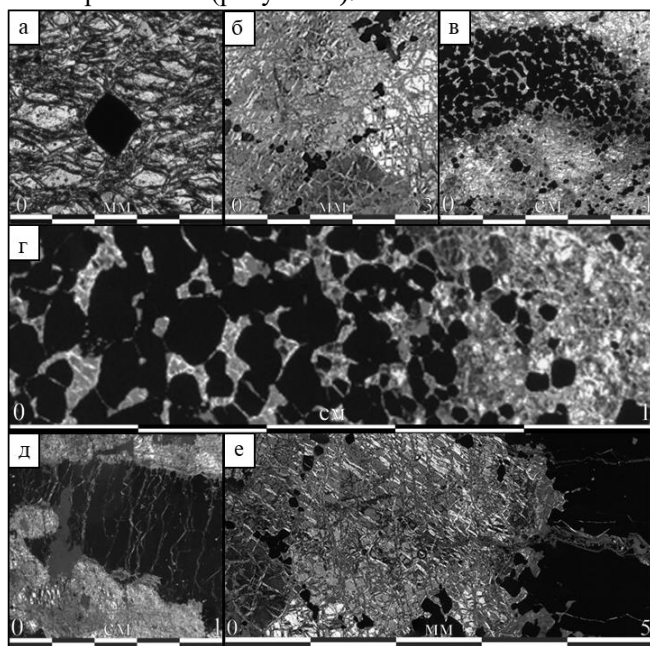


Рисунок 2 – Типы хромитовой минерализации, иллюстрирующие непрерывный переход от аксессуарного хромшпинелида (а, б, в) к шлировому (г, д) и массивному жильному (е) хромититам, где а – идиоморфный аксессуарный хромшпинелид

внутри кристалла оливина дунитов; б – скопление гипидиоморфных и ксеноморфных акцессорных хромшпинелидов в интересиционном пространстве оливинов дунитов; в – шлировой хромитит в порфиroidных дунитах; г – постепенный переход шлирового хромитита во вмещающие порфиroidные дуниты; д – массивный жильный хромитит в порфиroidных дунитах; г – постепенный переход массивного жильного хромитита во вмещающие порфиroidные дуниты

Примечание. Снимки в проходящем свете при скрещенных николях: хромшпинелид – черный; серпентинизированный оливин – оттенки серого

Несмотря на спорные вопросы генезиса дунитов, хромититов и ассоциированного с ними платинометалльного оруденения комплексов Урало-Аляскинского типа, большинство авторов не высказывает сомнений о сингенетичности акцессорных хромшпинелидов дунитов (Высоцкий, 1913; Заварицкий, 1928; Бетехтин, 1935; Irvine, 1974; Гурович и др., 1994; Лазаренков и др., 1994; Иванов О., 1997; Генкин, 1997; Осипенко и др., 2002; Garuti et al., 2002, 2003; Johan, 2002, 2006; Округин, 2004, 2011; Сидоров и др., 2004, 2012; Auge et al., 2005; Batanova et al., 2005; Пушкарев и др., 2007, 2017; Burg et al., 2009; Толстых и др., 2011; Симонов и др., 2017; Ферштатер, 2013; Мочалов, 2013; Zaccarini et al., 2018; Степанов, 2018б; Козлов и др., 2019 и др.). Очевидно совместное образование акцессорных хромшпинелидов с вмещающими дунитами, причем хромшпинелид образуется как раньше оливина (идиоморфные кристаллы в монозернах оливина), так и позже его (выделения хромшпинели в межзерновом пространстве оливинов дунитов). Постепенный переход от акцессорного хромшпинелида к шлировым и массивным жильным хромититам указывает в целом на общую сингенетичность хромитовой минерализации вмещающим дунитам.

В пользу данного вывода свидетельствует и весьма схожий состав хромшпинелидов шлировых и массивных хромититов, а также акцессорных хромшпинелидов дунитов на диаграмме Н.В. Павлова (рисунок 3а), что предопределяет единый процесс их становления с унаследованием химизма первичного источника.

Анализ распределения элементов группы железа (рисунок 4а), группы крупноионных литофилов (рисунок 4в) и группы высокозарядных элементов (рисунок 4г) демонстрирует высокую степень корреляции хромититов с дунитами, включающими акцессорные хромшпинелиды, что также подчеркивает единство их генезиса.

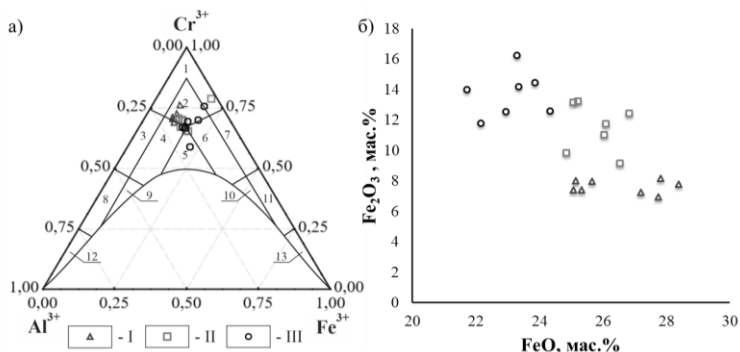


Рисунок 3 – Положение фигуративных точек анализа хромшпинелидов Каменушинского массива на диаграмме Н.В. Павлова (а), где I – акцессорный хромшпинелид дунитов, II – хромшпинелид шлировых хромитов, III – хромшпинелид массивных жильных хромитов. Обозначения полей: 1 – хромит; 2 – субферрихромит; 3 – алюмохромит; 4 – субферриалюмохромит; 5 – ферриалюмохромит; 6 – субальюмоферрихромит; 7 – феррихромит; 8 – хромпикотит; 9 – субферрихромпикотит; 10 – субальюмохроммагнетит; 11 – хроммагнетит; 12 – пикотит; 13 – магнетит; б) расположение фигуративных точек анализов хромитов в координатах $FeO-Fe_2O_3$

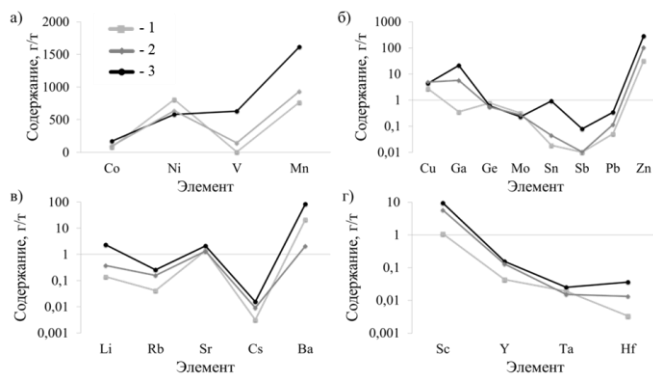


Рисунок 4 – Спектры распределения средних содержаний элементов-примесей в дунитах (1), шлировых хромитах (2), массивных жильных хромитах (3): а – элементы группы железа, б – группа транзитных элементов, в – группа крупноионных литофильных элементов, г – группа высокозарядных элементов

Для хромшпинелидов Каменушинского массива установлена тенденция изменения химического состава, заключающаяся в постепенном увеличении в них доли Fe^{3+} с попутным уменьшением Fe^{2+} от акцессорной хромшпинели к шлировым и массивным жильным хро-

мититам (рисунок 3б). Это свидетельствует об увеличении окислительного потенциала рудообразующей среды в ходе процесса становления массива и достижении его максимума на заключительных стадиях его формирования, что в целом отмечалось ранее для других массивов Уральского Платиноносного пояса (Чашухин и др., 2002). Отсюда следует, что, акцессорные хромшпинелиды образовались на ранних стадиях становления дунитов Каменушинского массива в условиях пониженного окислительного потенциала. Затем, в ходе развития породообразующей системы и увеличения ее окислительного потенциала формируются сначала шлировые хромититы, а после – массивные жильные хромититы в еще не окончательно консолидированных дунитах.

Особенности химизма и фугитивности кислорода среды породообразования также находят отражение в составе первичных Pt-Fe минералов, которые в пределах Каменушинского массива по стехиометрии близки к Pt_3Fe (рисунок 5а). Изоферроплатина из массивных жильных хромититов характеризуется более низкими концентрациями железа по сравнению с аналогичным минералом из шлировых хромититов (рисунок 5б), что обусловлено возрастанием фугитивности кислорода в ходе эволюции рудообразующего расплава (Amosse et al., 2000), и также подчеркивает становление массивных жильных хромититов на наиболее поздних стадиях формирования Каменушинского массива.

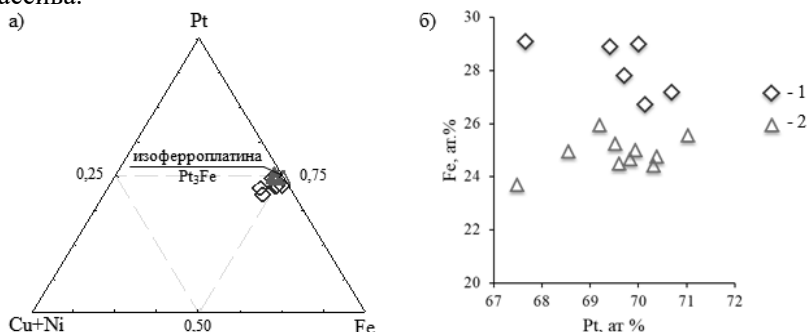


Рисунок 5 – Особенности химического состава первичных Pt-Fe сплавов шлировых (1) и массивных жильных (2) хромититов: а – диаграмма составов Pt-Fe сплавов в координатах Cu+Ni – Pt – Fe ат.%; б – положение фигуративных точек составов минералов соответствующих изоферроплатине в координатах Pt – Fe ат.%

Выявленные структурно-текстурные особенности хромитовой минерализации, химический состав дунитов, акцессорных хромшпи-

нелидов, шлировых и массивных жильных хромититов свидетельствуют об их образовании в ходе единого процесса формирования Каменушинского массива. В этом смысле все разновидности проявления хромитовой минерализации следует рассматривать как сингенетические дунитам, возникшими на различных стадиях их формирования.

2. Платинометалльная минерализация в центральной части Каменушинского массива сконцентрирована в телах хромититов, формирующих линейно вытянутые минерализованные зоны, пространственная ориентировка которых согласуется с внутренними неоднородностями дунитового ядра массива и совпадает с залеганием дайковых тел.

Основной проблемой при поисках коренных месторождений платины, как уже было сказано во введении, является отсутствие устойчивых закономерностей ее распределения. С целью выявления особенностей размещения платинометалльной минерализации Каменушинского массива проведено картирование участка в центральной части дунитового ядра. В результате изучения ранее пройденных горных выработок, анализа архивных материалов (Высоцкий, 1913; Иванов О., 1997; Телегин, 2006ф), их уточнения путем проходки дополнительных расчисток, а также заверки литогеохимических аномалий в центральной части Каменушинского массива составлен геологический план участка Хромитовый Увал – северный склон г. Соколиная (рисунок 6). Участки, перспективные на выявление коренной хромит-платиновой минерализации, были выделены по результатам литогеохимических работ и заверены горными выработками.

По результатам определения элементов залегания хромититовых тел была выявлена их преимущественно субмеридиональная ориентировка. Установлено, что в пределах локальных участков общее простирание хромититовых обособлений достаточно выдержано и позволяет проследить пространственное размещение этих тел на данной площади. Также отмечены особенности вмещающих порфировидных дунитов, которые заключаются в повышенном содержании акцессорной хромшпинели и сильной серпентинизации вблизи хромититовых тел.

На основе полученных данных были выделены минерализованные хромит-платиновые зоны Каменушинского массива, чья ориентировка отражена в простирании тел хромититов. Отсюда, в рамках настоящей работы под *хромит-платиновой минерализованной зоной* понимается локальный линейно вытянутый участок, который включа-

ет в себя группу сближенных сонаправленных к нему тел шлировых и массивных жильных хромититов во вмещающих сильно серпентинизированных дунитах с повышенной концентрацией акцессорного хромшпинелида (рисунок 7). Минерализованные зоны имеют субмеридиональную ориентировку и приурочены к порфировидным дунитам, отождествляющим участки фациального перехода их петрографических типов различных по зернистости. Подобная закономерность указывает на приуроченность хромит-платиновых минерализованных зон к участкам развития первичных неоднородностей дунитового ядра массива, отраженных в его зональном строении.

Ранее отмеченная пространственная совмещенность платиноносной минерализации с дайками габбро и гранитоидов в центральной части Каменушинского массива на Хромитовом увале (Телегин 2006ф; Телегин и др., 2009; Толстых и др., 2011) в целом подтверждается результатами картирования данного участка (рисунок 6). Ввиду ограниченной обнаженности проанализировать пространственные взаимоотношения даек и зон хромит-платиновой минерализации в пределах всего массива возможно только с привлечением геохимических методов. По итогам литогеохимических исследований в пределах Каменушинского массива обнаружено пространственное совпадение полей развития даек габбро и гранитоидов с аномалиями U и Ba (Минибаев, 2018б), что характерно для зональных массивов Платиноносного пояса Урала (Дурягина, 2015).

В центральной части Каменушинского массива, на участке Хромитовый увал, действительно наблюдается совпадение полей аномалий Pt и Сг, характеризующих хромит-платиновую минерализацию, и дайки габбро и гранитоидов (рисунок 8а,г). Однако анализ карт аномалий по всему массиву позволяет заключить, что пространственная совмещенность аномалий ассоциированных с платиновой минерализацией и дайковыми телами выражена слабо. Так, в восточной части массива наблюдается широкое развитие даек габбро, гранитоидов и связанных с ними аномалий урана и бария, но отсутствуют следы проявления хром-платиновой минерализации. Также в западной части массива, в клинопироксенитовой кайме, в пределах которой не наблюдаются аномалии хрома и платины, аномалии урана и бария совмещаются с выделенными в ходе геологических наблюдений дайками гранитоидов и габбро.

Выделенные особенности свидетельствуют о том, что частичная совмещенность аномалий платины и хрома с бариевой и урановой

аномалиями, вероятней всего, связана с общей приуроченностью даек и хромит-платиновых минерализованных зон к полям развития фациальных контактов дунитов различных по зернистости. Отсюда, наблюдаемое в отдельных случаях пространственное совмещение аномалий платины и хрома с барием и ураном при отрицательных корреляционных связях этих групп элементов (рисунок 10) свидетельствует о случайном характере подобных совмещений. Они могут быть обусловлены приуроченностью части даек к первичным неоднородностям дунитов, которые сформировались на магматическом этапе их становления, когда возникли и хромит-платиновые минерализованные зоны.

3. Аномалии никеля, кобальта, марганца, олова и цинка во вторичных ореолах рассеяния Каменушинского массива, фиксируют поля развития хромит-платиновой минерализации и позволяют рассматривать эту элементную ассоциацию в качестве косвенного поискового признака на платину.

Литогеохимическая съемка по вторичным ореолам рассеяния осуществлялась по известной методике (Беус и др., 1975; Поликарпочкин, 1976; Сает, 1982; Григорян и др., 1983; Соловов, 1985) путем отбора песчано-глинистого и глинистого элювиально-делювиального материала массой 200-300 г по прямоугольной сети 200×20 м. По 23 профилям было отобрано, а затем проанализировано 1948 проб. Данные проведенных геохимических исследований обрабатывались методами математической статистики и графического моделирования согласно рекомендациям (Шарапов, 1971; Каждан и др., 1979; Fletcher, 1981; Овчинников, 1983; Loon et al., 1989; Waelder, 2008).

Геоморфологическая оценка Каменушинского массива на основе геологических наблюдений и характера изогипс позволяет отнести его к массиву с волнистым типом рельефа, где вторичные ореолы развиваются путем перемещения обломков и диффузии растворенных веществ в горной влаге и размещаются непосредственно над первичными ореолами (по Беус и др., 1975; Поликарпочкин, 1976; Соловов, 1985). Выделенный волнистый тип рельефа обуславливает слабо проявленные процессы дефлюкции, получившие преимущественное развитие на склонах, что указывает на незначительное смещение вторичных от первичных ореолов рассеяния. Это позволяет заключить, что вторичные ореолы рассеяния Каменушинского массива являются преимущественно остаточными, в которых в существенной степени сохраняются взаимосвязи химических элементов, свойственные корен-

ной минерализации (Поликарпочкин, 1976; Григорян и др., 1983; Соловов, 1985).

При использовании геохимических методов, направленных на выявление коренного платинометалльного оруденения клинопироксенит-дунитовых массивов Платиноносного пояса Урала, помимо определения в пробах содержаний элементов платиновой группы (ЭПГ) традиционно устанавливалось содержание хрома как элемента-индикатора (Лазаренков и др., 1992; Иванов О., 1997; Золоев и др., 2001; Телегин, 2006ф, 2009ф; Дурягина, 2015).

Следы платины обнаруживаются в подавляющем количестве проб (83,07%). Из оставшихся проб около 15% приходится на элювиально-делювиальные отложения, отобранные в пределах развития клинопироксенитовой каймы. Это указывает на повсеместное распространение платины в пределах всего дунитового ядра массива. Среднее содержание платины во вторичных ореолах рассеяния составляет 0,032 г/т. Ее повышенные содержания (0,30-1,26 г/т) обнаруживаются в северной и центральной частях массива, в частности на Хромитовом увале и северном склоне г. Соколиная, где получили распространение крупнозернистые дуниты и дунит-пегматиты. Хром, как элемент-индикатор платинового оруденения, имеет наибольшие содержания (среднее 1023,4 г/т) среди проанализированных элементов-примесей в элювиально-делювиальных отложениях. В пробах с высокими (>4000 г/т) содержаниями хрома также обнаруживаются наибольшие концентрации платины.

Результатами факторного анализа отчетливо выделяется ассоциация Ni-Co-Mn-Zn-Sn, тесно связанная с Pt-Cr (рисунок 9), что позволяет сделать вывод о совместном накоплении этих элементов. Основанием для такого заключения также являются значительные положительные корреляционные связи (рисунок 10): Pt-Cr ($r=+0,67$), Pt-Mn ($r=+0,46$), Pt-Ni ($r=+0,48$), Pt-Co ($r=+0,58$), Pt-Sn ($r=+0,57$), Pt-Zn ($r=+0,39$) и Cr-Mn ($r=+0,71$), Cr-Sn ($r=+0,90$), Cr-Ni ($r=+0,65$), Cr-Co ($r=+0,60$) и Cr-Zn ($r=+0,62$).

В совокупности со статистической характеристикой результатов литогеохимического опробования, целесообразно, рассмотреть особенности пространственного размещения элементов во вторичных ореолах рассеяния. Так, поля платиновых аномалий в значительной степени совмещены с полями хромовых аномалий, несмотря на более широкое развитие последних (рисунок 8а). Также в результате сопоставлений контуров геохимических аномалий сделан вывод о том, что

при наложении аномалий олова, цинка (рисунок 8б), марганца, никеля и кобальта (рисунок 8в) на карту вторичных ореолов рассеяния хрома и платины (рисунок 8а) наблюдается их отчетливая пространственная совмещенность.

Учитывая, что в остаточных вторичных ореолах рассеяния в значительной степени сохраняются взаимосвязи химических элементов, свойственные коренным породам, полученные результаты позволяют выделить элементную ассоциацию Ni-Co-Mn-Zn-Sn как косвенный признак хромит-платиновой минерализации.

Заключение

В результате комплексных исследований дана характеристика хромит-платиновой минерализации Каменушинского массива. Обосновано, что все структурно-текстурные типы хромитовой минерализации сингенетичны дунитам в том смысле, что они образовались в рамках единого и непрерывного процесса становления дунитового ядра массива. Результаты исследований указывают на то, что кристаллизация аксессуарных хромшпинелидов проходила на раннемагматическом этапе развития системы; затем в еще слабо консолидированном оливиновом агрегате формировались шпировые хромититы, содержащие значительное количество силикатных минералов; в заключительную стадию развития рудообразующей системы в условиях повышенного окислительного потенциала в еще не окончательно закристаллизованной дунитовой матрице образовались массивные жильные хромититы.

Совокупность результатов картирования центральной части Каменушинского массива и исследований по взаимоотношениям платины и хрома в коренном залегании и элювиально-делювиальных отложениях позволяют сделать вывод о концентрировании платиноидов в хромититах, формирующих линейно-вытянутые минерализованные зоны. Особенности поведения во вторичных ореолах рассеяния U и Ва, ассоциирующих с телами габбро и плагиигранитов, а также характер размещения самих даек свидетельствуют о совпадении ориентировок полей развития дайковых тел с хромит-платиновыми минерализованными зонами при их общей пространственной разобщенности. Это свидетельствует об общей приуроченности хромит-платиновых минерализованных зон и даек к полям развития первичных неоднородностей Каменушинского массива, проявленных в его зональном строении.

Изучение вторичных ореолов рассеяния методами сопоставления полей геохимических аномалий и статистического анализа позво-

лило выделить ассоциацию Ni-Co-Mn-Zn-Sn как вспомогательную при проведении работ, направленных на выявление коренной хромит-платиновой минерализации.

Сделанные выводы о размещении платинометалльного оруденения в виде линейно-вытянутых хромит-платиновых минерализованных зон могут быть положены в основу проектирования поисковых и оценочных работ на коренное платиновое оруденение Каменушинского массива.

По теме диссертации опубликованы следующие основные работы:

1. *Минибаев А.М.* Особенности размещения платинометалльного оруденения Каменушинского интрузива (Средний Урал)// Материалы XXIII Всероссийской научной молодежной конференции «Уральская минералогическая школа-2016», посвященная 80-летию со дня рождения академика Н.П. Юшкина, ИГГ УрО РАН, Екатеринбург, 2016, № 22. С. 57-59

2. *Минибаев А.М.* Особенности классификации дайковых и жильных пород Каменушинского массива (Средний Урал) // Материалы XXIII Всероссийской научной молодежной конференции «Уральская минералогическая школа-2017», ИГГ УрО РАН, Екатеринбург, 2017, № 23. С. 114-118.

3. *Минибаев А.М.* Геолого-структурные и петрологические особенности дайковых и жильных пород Каменушинского массива (Средний Урал) / А.М. Минибаев, Е.Л. Котова // Вестник института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. 2017. № 12 (276). С. 31-38.

4. *Минибаев А.М.* О природе хромит-платиновых минерализованных зон клинопироксенит-дунитового Каменушинского массива на Среднем Урале // Материалы Восьмой Российской молодежной школы с международным участием «Новое в познании процессов рудообразования», Москва, ИГЕМ РАН, 2018, С. 255-258.

5. *Минибаев А.М.* Вторичные ореолы рассеяния как прогнозно-поисковый признак платинометалльной минерализации на примере Каменушинского массива (Средний Урал) // Записки Горного института, СПГУ, Т. 234. 2018. С. 508-515.

6. *Козлов А.В.* Онтогенетические ориентиры для выбора модели формирования платинового оруденения в зональных дунит-клинопироксенитовых массивах / А.В. Козлов, С.Ю. Степанов, Р.С. Паламарчук, А.М. Минибаев // Записки Российского минералогического общества, №2, т. 148, 2019. С. 115-130.

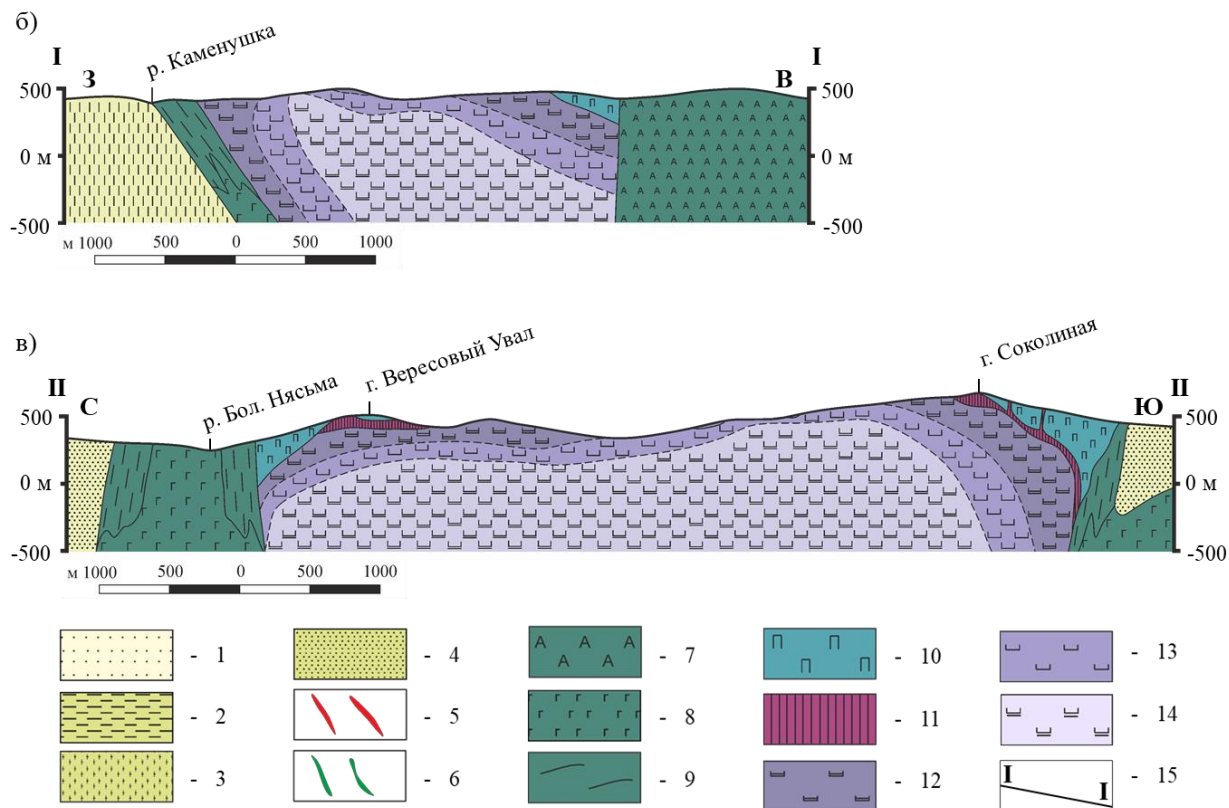
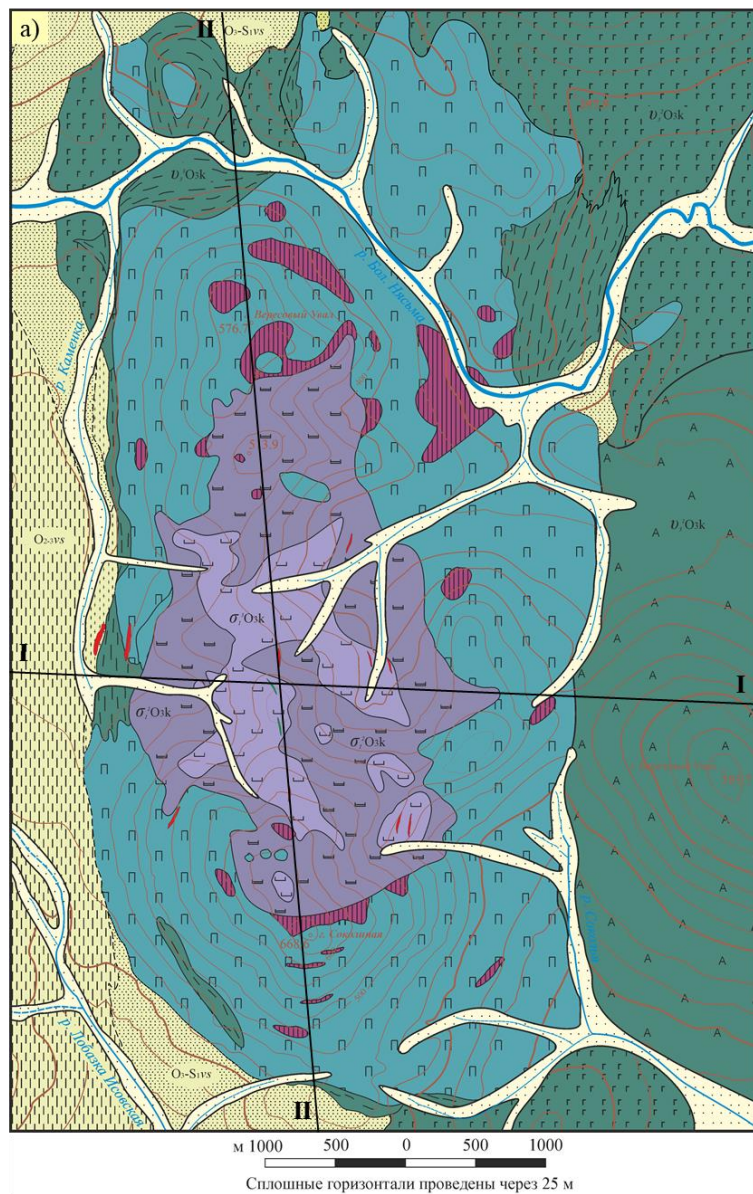
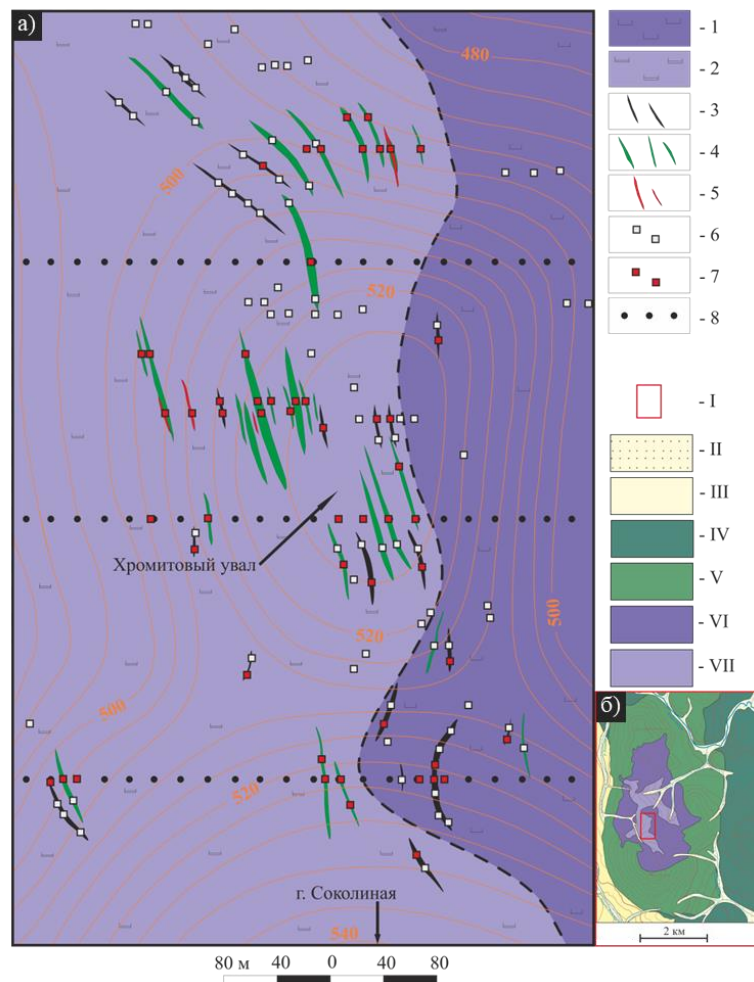


Рисунок 1 – Геологическая карта Каменушинского массива (а) и геологические разрезы по профилям (б, в) (по Иванову О. (1997) с упрощениями и дополнениями): 1 – техногенные и аллювиальные отложения, 2 – зелёные аповулканогенные сланцы, 3 – амфиболиты, 4 – кытлымиты, 5 – дайки плагногранитов, 6 – дайки роговообманкового габбро, 7 – габбро пироксен-анортитовое и оливинное, 8 – габбро роговообманковое, 9 – конжакиты (фельдшпатизированные пироксениты), 10 – пироксениты нерасчлененные, 11 – верлиты, 12 – дуниты мелкозернистые серпентинизированные, 13 – дуниты среднезернистые серпентинизированные, 14 – дуниты крупнозернистые, 15 – линии разрывов

Примечание. Поля развития среднезернистых серпентинизированных дунитов, включают в себя локальные участки с проявлениями крупнозернистых серпентинизированных дунитов и дунитовых пегматитов. Контакты между дунитами различными по зернистости являются фаціальными и повсеместно сопровождаются порфировидными разностями этих пород.



Сплошные горизонталы проведены через 4 м

Рисунок 6 – Геологический план участка Хромитовый увал - северный склон г. Соколиная (а) и его положение на схематичной геологической карте Каменушинского массива (б) (по Иванову О., 1997)

Рисунок 6а: 1 – дуниты мелкозернистые; 2- дуниты среднезернистые; 3 – хромит-платиновые минерализованные зоны; 4 – дайки габбро, 5 – дайки гранитоидов; 6 – горные выработки предшественников (Высоцкий, 1913; Иванов О., 1997; Телегин, 2006ф); 7 – горные выработки соискателя; 8 – точки литогеохимического опробования

Рисунок 6б: I – участок Хромитовый увал - северный склон г. Соколиная на схематичной геологической карте Каменушинского массива, II – техногенные и аллювиальные отложения, III – аповулканические сланцы, IV - габброиды, V - клинопироксениты, VI - дуниты мелкозернистые, VII - дуниты среднезернистые

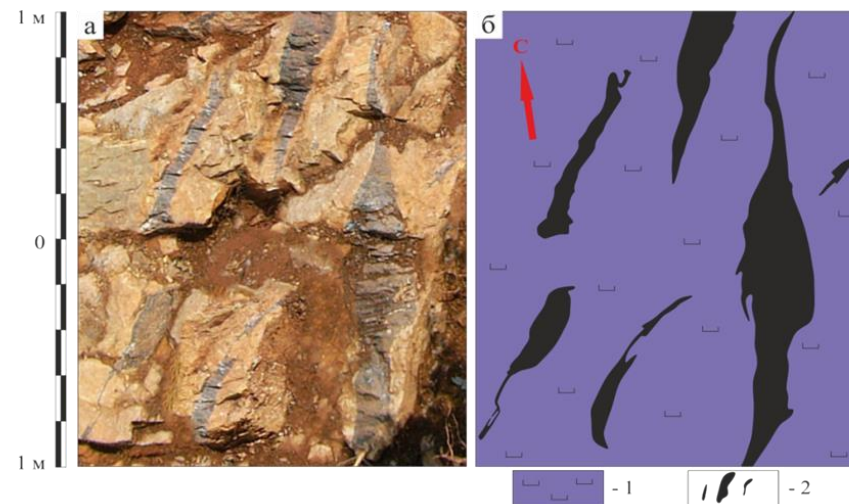


Рисунок 7 – Участок минерализованной зоны массивных жильных хромититов на северном склоне г. Соколиной: а – фотография, где хромититы - темно-серые; дуниты сильно серпентинизированные - буровато-коричневые, светлые; б – схематичный план размещения тел хромититов в дунитах, где 1 – дуниты сильно серпентинизированные среднезернистые порфировидные, 2 – тела массивных жильных хромититов

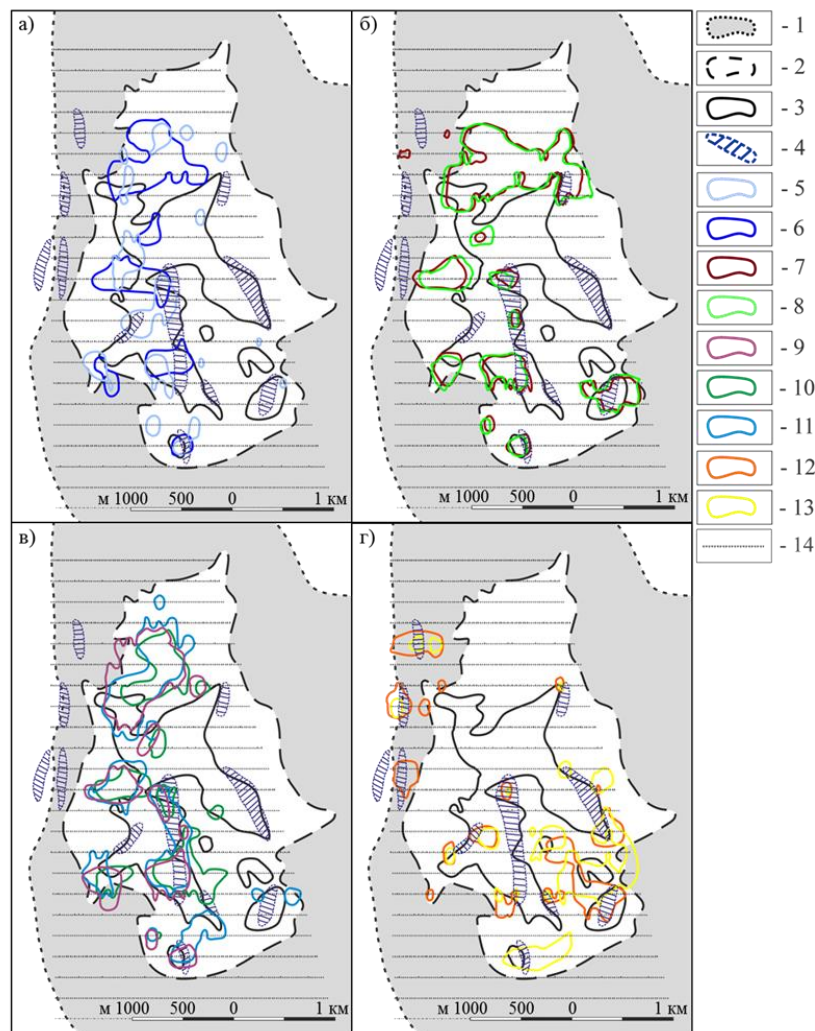


Рисунок 8 – Вторичные ореолы рассеяния Каменушинского массива: а) Pt, Cr; б) Sn, Zn; в) Ni, Co, Mn; г) U, Ba, где: 1 – контур Каменушинского массива (клинопироксенитов); 2 – контур мелкозернистых серпентинизированных дунитов; 3 – контур среднезернистых серпентинизированных дунитов; 4 – поля развития даек габбро и гранитоидов; вторичные ореолы рассеяния: 5 – платины ($Pt > 0,07$ г/т), 6 – хрома ($Cr > 1600$ г/т), 7 – олова ($Sn > 8$ г/т), 8 – цинка ($Zn > 90$ г/т), 9 – марганца ($Mn > 1300$ г/т), 10 – никеля ($Ni > 400$ г/т), 11 – кобальта ($Co > 140$ г/т), 12 – урана ($U > 8$ г/т), 13 – бария ($Ba > 800$ г/т); 14 – точки геохимического опробования

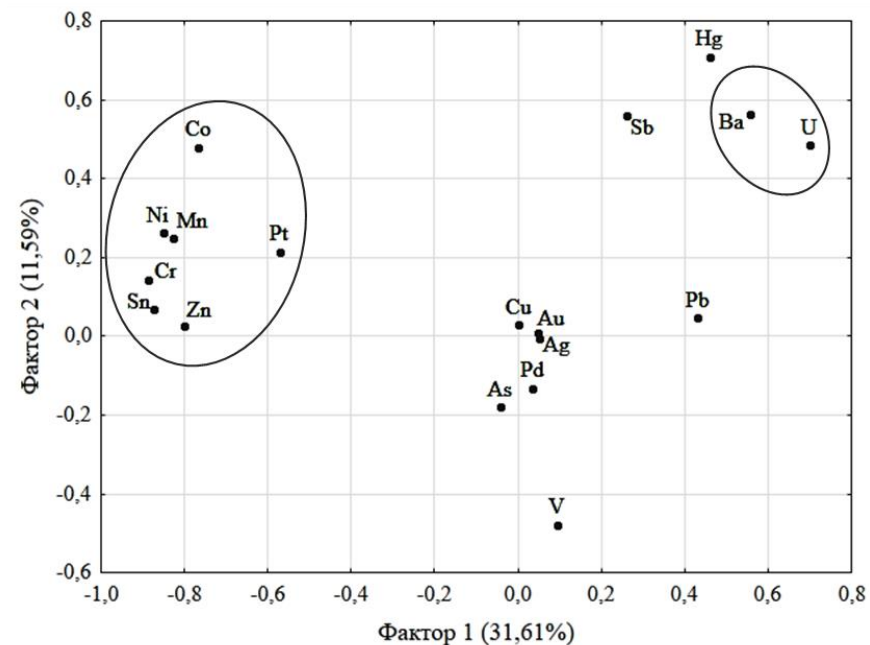


Рисунок 9 – Диаграмма факторных нагрузок на элементы во вторичных ореолах рассеяния Каменушинского массива

	lgAu	lgPd	lgPt	lgAg	lgAs	lgB	lgBa	lgBi	lgCd	lgCo	lgCr	lgCu	lgGe	lgHg	lgLi	lgMn	lgMo	lgNi	lgP	lgPb	lgSb	lgSn	lgU	lgV	lgW	lgZn
lgAu	1,00																									
lgPd	0,09	1,00																								
lgPt	-0,09	-0,04	1,00																							
lgAg	0,08	-0,03	-0,10	1,00																						
lgAs	0,00	0,01	0,02	-0,02	1,00																					
lgB	0,00	-0,02	0,12	-0,04	0,20	1,00																				
lgBa	0,07	0,01	-0,38	0,12	-0,04	-0,22	1,00																			
lgBi	0,07	-0,10	0,17	0,10	-0,04	0,09	0,26	1,00																		
lgCd	0,00	0,06	-0,20	-0,03	-0,20	-0,07	0,12	-0,12	1,00																	
lgCo	-0,07	-0,08	0,58	-0,05	-0,03	0,07	-0,08	0,63	-0,18	1,00																
lgCr	-0,08	-0,09	0,67	-0,09	0,07	0,30	-0,52	0,32	-0,24	0,60	1,00															
lgCu	0,11	0,15	-0,09	0,01	0,12	0,52	0,12	0,29	0,10	0,07	-0,02	1,00														
lgGe	-0,02	0,02	0,22	-0,06	0,17	0,47	-0,42	0,23	-0,14	0,14	0,50	0,23	1,00													
lgHg	-0,05	-0,03	-0,03	-0,02	-0,08	-0,10	0,49	0,03	0,11	0,09	-0,20	0,01	-0,26	1,00												
lgLi	0,05	-0,05	-0,12	0,03	-0,09	-0,08	0,44	0,32	0,10	0,36	-0,26	0,29	-0,47	0,34	1,00											
lgMn	-0,01	-0,05	0,46	0,01	0,07	0,25	-0,26	0,57	-0,20	0,75	0,71	0,16	0,41	-0,20	0,09	1,00										
lgMo	0,00	0,01	0,05	0,08	-0,10	0,10	0,12	0,18	0,13	0,11	0,09	0,14	0,10	0,21	0,03	0,09	1,00									
lgNi	-0,03	-0,14	0,48	-0,01	0,01	0,34	-0,24	0,69	-0,18	0,77	0,65	0,29	0,37	-0,15	0,23	0,71	0,10	1,00								
lgP	0,09	-0,03	0,24	0,08	0,09	0,33	0,08	0,62	-0,14	0,50	0,44	0,41	0,31	-0,02	0,18	0,61	0,15	0,57	1,00							
lgPb	0,11	0,05	-0,28	0,13	0,05	0,39	0,36	-0,11	0,13	-0,35	-0,27	0,35	0,07	0,26	-0,04	-0,28	0,16	-0,27	0,04	1,00						
lgSb	0,00	0,04	0,06	-0,13	-0,25	-0,02	0,21	0,01	0,19	0,10	-0,06	0,02	-0,15	0,45	0,21	-0,08	0,13	-0,06	0,02	0,12	1,00					
lgSn	-0,03	-0,08	0,57	-0,04	0,15	0,46	-0,56	0,33	-0,24	0,52	0,90	0,13	0,57	-0,29	-0,23	0,70	0,07	0,69	0,48	-0,20	-0,17	1,00				
lgU	0,07	0,09	-0,46	0,08	-0,07	-0,11	0,69	-0,05	0,26	-0,38	-0,60	0,15	-0,24	0,47	0,17	-0,49	0,15	-0,49	-0,12	0,53	0,33	-0,63	1,00			
lgV	0,04	0,21	-0,20	-0,03	0,09	0,40	-0,08	-0,04	0,07	-0,30	0,02	0,39	0,49	-0,19	-0,39	0,00	0,13	-0,12	0,08	0,37	-0,04	0,10	0,24	1,00		
lgW	0,03	-0,09	0,43	-0,01	0,11	0,24	-0,26	0,56	-0,24	0,63	0,70	0,13	0,34	-0,17	0,13	0,74	0,06	0,67	0,54	-0,33	-0,12	0,75	-0,48	-0,03	1,00	
lgZn	0,04	-0,04	0,39	0,04	0,09	0,50	-0,35	0,46	-0,17	0,51	0,62	0,35	0,46	-0,29	0,01	0,65	0,06	0,67	0,58	-0,05	-0,13	0,70	-0,42	0,13	0,58	1,00

- 1
 - 2
 - 3
 - 4
 - 5
 - 6

Рисунок 10 – Корреляционная матрица взаимоотношений элементов-примесей элювиально-делювиальных отложений Каменушинского массива (n=1948, $r_{0,95}>0,044$)

Примечание. Характер связей рассчитан на основе критерия Стьюдента (по Каждан и др., 1979), где: 1-3 – прямая связь: 1 – слабая, 2 – средняя, 3 – сильная; 4-6 – обратная связь: 4 – слабая, 5 – средняя, 6 – сильная