

На правах рукописи



Илалова Регина Кашифовна

**ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ, СОСТАВ И
УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ НИКЕЛЕНОСНОЙ
КОРЫ ВЫВЕТРИВАНИЯ ГИПЕРБАЗИТОВ
СЕРОВСКО-МАУКСКОГО ОФИОЛИТОВОГО
ПОЯСА**

Специальность 25.00.01 – Общая и региональная геология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена на кафедре исторической и динамической геологии геологоразведочного факультета Санкт-Петербургского горного университета

Научный

руководитель: **Таловина Ирина Владимировна**,
доктор геолого-минералогических наук, ФГБОУ ВО
«Санкт-Петербургский горный университет»,
кафедра исторической и динамической геологии,
профессор (г. Санкт-Петербург)

Официальные **Ибламинов Рустем Гильбрахманович**,
оппоненты: доктор геолого-минералогических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Пермский государственный
национальный исследовательский университет»,
кафедра минералогии и петрографии, заведующий
кафедрой (г. Пермь)
Алфимова Надежда Аркадьевна,
кандидат геолого-минералогических наук, ФГБОУ
ВО «Санкт-Петербургский государственный
университет», кафедра региональной геологии,
доцент (г. Санкт-Петербург)

Ведущая

организация: ООО «Институт Гипроникель» (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится «14» февраля 2019 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 999.207.02 в ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» по адресу: 614990, г. Пермь, ул. Букирева 15, зал заседаний Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» по адресу: 614990, г. Пермь, ул. Букирева 15.

Электронная версия автореферата размещена на официальном сайте ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ: vak.ed.gov.ru/vak и на сайте ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»: www.psu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



Ольга Юрьевна
Мещерякова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Работа представляется актуальной, поскольку по корам выветривания гипербазитов Серовско-Маукского офиолитового пояса большинство работ было выполнено в 60–70-х годах прошлого столетия (А.В. Вторушин, Л.И. Кононова, Н.А. Журавлева, Е.Н. Куземкина, В.И. Русский), и с того момента крупных научно-исследовательских работ, с учетом последних достижений науки, не проводилось.

В настоящее время никелевая промышленность Урала испытывает острый дефицит никелевого сырья, в значительной мере из-за отсутствия кондиционных гипергенных никелевых руд, что также подчеркивает актуальность проведенного автором исследования. В связи с этим встает вопрос о прогнозировании и поисках глубинных никелевых залежей на месте образования рудных концентраций эндогенного и экзогенного генезиса.

Коры выветривания обладают уникальной геологической природой. Информативность их состава и строения к климатическим, фациальным и тектоническим условиям может быть использована при расшифровке геологической истории региона. Вопрос особенностей формирования никеленосной коры выветривания гипербазитов Серовско-Маукского офиолитового пояса является до конца нерешенным. В работе одним из подходов к решению данного вопроса является метод термометрии хлоритов, который существенно расширяет возможности анализа эволюции Р–Т условий при образовании горных пород и руд.

Таким образом, решение поставленного вопроса значительно приближает исследователей к пониманию специфики литогенеза и связанных с ним процессов на территории Серовско-Маукского офиолитового пояса, позволяет реконструировать процессы перераспределения и накопления рудных компонентов, и наконец, результаты могут использоваться при прогнозных оценках территории на никель.

Объекты исследования

Коры выветривания по дунит-гарцбургитовым породам Кольского, Устейского и Вагранского массивов Серовско-Маукского офиолитового пояса.

Цель работы

Реконструкция главных закономерностей континентального выветривания гипербазитов Серовско-Маукского офиолитового пояса на основе геологического строения и вещественного состава кор выветривания.

Основные задачи исследования

1. Изучить геологическое строение кор выветривания гипербазитовых массивов – Кольского, Устейского и Вагранского, их минералогических и геохимических особенностей.

2. Установить зональность и генетическую принадлежность профилей выветривания гипербазитов на изучаемых объектах.

3. Провести количественную оценку температур образования хлоритов как индикаторов условий образования пород, слагающих коры выветривания гипербазитов.

4. Установить роль и позицию регионального низкоградного метаморфизма в формировании кор выветривания на территории Серовско-Маукского офиолитового пояса.

Методы решения поставленных задач

Решение поставленных задач осуществлялось с использованием аналитических методов исследований, которые проводились в ИГГД РАН (г. Санкт-Петербург), СПГУ (г. Санкт-Петербург), ИХС РАН (г. Санкт-Петербург), ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток), а также в лаборатории Фрайбергской горной академии (Германия). Минеральные фазы диагностировались оптико-микроскопическим, рентгено-дифракционным, термическим, микрорентгеноспектральным и рамановским методами. Содержания редкоземельных элементов в породах кор выветривания определялись методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой.

Научная новизна

1. На основе комплекса геологических, минералогических и геохимических данных обосновано широкое распространение инфильтрационно-метасоматической (шамозитовой) коры выветривания в пределах Устейского, Вагранского и большей части Кольского массивов, и подчиненное развитие остаточной коры выветривания в южной части Кольского массива.

2. Впервые для кор выветривания Серовско-Маукского офиолитового пояса по результатам термометрии хлоритов дана количественная оценка температур их образования, которая указывает на участие гидротермальных растворов в формировании хлоритовой минерализации кор выветривания.

3. Впервые обосновано, что формирование никеленосных кор выветривания Серовско-Маукского офиолитового пояса происходило после регионального низкоградного метаморфизма цеолитовой фации, приводившего к подготовке рудоносного тектонизированного субстрата месторождений.

Практическая значимость работы

Выявление типов профилей выветривания и уточнение их минеральных разновидностей на изучаемых объектах могут

способствовать повышению эффективности геологоразведочных работ на никель. Более того, результаты проведенного исследования могут быть использованы при прогнозировании и поисках глубинных никелевых залежей.

Основные защищаемые положения

1. В пределах Сосьвинской и Замарайской депрессий Кольского массива, а также Устейского и Вагранского массивов развита инфильтрационно-метасоматическая (шамозитовая) кора выветривания, образованная в анаэробных условиях с образованием шамозитовых, миллерит-бриндлейит-шамозитовых, бертьерин-клинохлор-шамозитовых пород, тогда как в пределах Катасьминской депрессии Кольского массива развита остаточная кора выветривания с преобладанием кварц-гетитовых, клинохлор-пеннин-талькохлоритовых, непуит-хризотил-лизардитовых пород.

2. По данным термометрии хлоритов формирование профиля выветривания происходило по гипербазитам, подвергнутых воздействию гидротермальных растворов двух температурных интервалов 75-125°C и 175-300°C. При этом содержание никеля в хлоритах повышается с понижением температуры их образования.

3. Формирование никеленосных кор выветривания гипербазитовых массивов Серовско-Маукского офиолитового пояса, происходило после регионального низкоградного метаморфизма цеолитовой фации, приводившего к подготовке рудоносного тектонизированного субстрата месторождений на раннемезозойском этапе тектоно-магматической активизации региона.

Достоверность защищаемых положений и выводов определяется представительностью каменного материала, тщательным анализом результатов предыдущих работ по объектам, детальностью проведенных геологических и минералогических наблюдений, использованием в работе современных методов исследования, надежностью исходных аналитических данных, полученных по сертифицированным методикам в аккредитованных лабораториях, непротиворечивостью полученных геологических и минералогических данных.

Фактический материал

При выполнении диссертационной работы были использованы оригинальный каменный материал (около 500 образцов), собранный автором во время полевых работ в период 2015-2017 гг., и геологические разрезы (150 штук). Также для исследований были привлечены коллекции гипергенных пород И.В. Таловиной, В.Г. Лазаренкова и фондовые материалы Воронцовской геологоразведочной партии (п. Рудный, г. Краснотурьинск, Свердловская область).

Апробация работы

Результаты работы докладывались на всероссийских и международных конференциях: 56-ой международной научной конференции на базе Краковской горно-металлургической академии (Краков, Польша, 2015); международной конференции «Проблемы геологии и эксплуатации месторождений платиновых металлов» (Горный университет, 2016); международной конференции молодых ученых «Freiberg-St.Petersburg Colloquium of young scientists» (Фрайбергская Горная академия, Фрайберг, Германия, 2016); V международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского» (Санкт-Петербург, 2017); юбилейном съезде РМО «200 лет РМО» (Горный университет, 2017).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, в том числе 6 статей в изданиях, входящих в перечень ВАК Министерства образования и науки РФ.

Благодарности

Автор выражает благодарность своему научному руководителю д.г.-м.н. И.В. Таловиной за ее ценные консультации, помощь и поддержку в подготовке диссертации.

Глубочайшую признательность за научные консультации и неоценимую поддержку автор хочет выразить проф. Ю.Л. Гульбину (Горный университет), доц. Н.А. Алфимовой (ИГГД РАН) и чл.-корр. РАН В.Г. Сахно (ДВГИ ДВО РАН).

За возможность участвовать в полевых работах и помощь в сборе полевых материалов автор выражает благодарность главному геологу ОАО «Уфалейникель» и Серовского рудника В.И. Володину. Отдельную благодарность за предоставление фондовых материалов автор выражает сотруднику ООО «Институт Гипроникель» А.В. Шамшеву.

За ценные критические замечания автор очень благодарен чл.-корр. РАН Ю.Б. Марину, проф. Е.Д. Михайловой, доц. Р.А. Щеколдину, доц. М.Г. Цинкобуровой, асс. А.Б. Тарасенко.

Значительную помощь в проведении лабораторных исследований оказали О.Л. Галанкина (ИГГД РАН), к.г.-м.н. Е.А. Васильев (Горный университет), Н.В. Зарубина (ДВГИ ДВО РАН), В.Л. Уголков (ИХС РАН), проф. д-р Г. Хайде и д-р Р. Клееберг (Фрайбергская горная академия) – всем автор выражает искреннюю благодарность. Автор душевно благодарит свою маму М.А. Сагдиеву за постоянную моральную поддержку.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения,

изложенных на 177 страницах машинописного текста, содержит 67 рисунков, 28 таблиц, список использованной литературы из 107 наименований и 3 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится общая характеристика работы, обосновывается ее актуальность, определяются цель, задачи и методы их решения, сформулированы защищаемые положения, научная новизна и практическая значимость.

В первой главе изложены основные термины процесса выветривания в связи с различной трактовкой их в отечественной и зарубежной литературе. Приведены краткие сведения об открытии и истории изучения коры выветривания гипербазитов Серовско-Маукского офиолитового пояса. Отмечено, что в пределах исследуемой территории было выявлено и разведано шесть участков с никеленосной корой выветривания гипербазитов Кольского, Устейского и Вагранского массивов, представляющих промышленный интерес. Также отмечено, что большинство работ по корам выветривания было выполнено в 60-70-х годах прошлого столетия, где обсуждались вопросы формирования уникальных гипергенных силикатно-никелевых месторождений. Одна группа исследователей (И.И. Гинзбург, И.И. Савельев, Н.П. Херасков, Ф.Ф. Сысоев, И.З. Корин, К.К. Никитин, Ю.Ю. Бугельский, И.И. Эдельштейн, А.М. Кудряшов, К.Н. Бородина, И.В. Витовская) была склонна исключительно к элювиально-латеритной теории образования, другая (В.В. Никитин, А.Н. Алешков, Д.Г. Ульянов, Н.В. Разумова, А.С. Вершинин, Б.М. Михайлов) – утверждала участие термальных вод глубинного заложения. Последние крупные публикации в 2000-х годах (В.Г. Лазаренков, И.В. Таловина и др.) были посвящены в основном минеральному составу Еловского месторождения.

Во второй главе приведено описание геологического строения Серовско-Маукского офиолитового пояса (рисунок 1).

Главными региональными структурными элементами территории исследований являются Тагильский мегасинклинорий и Верхотурско-Верхисетский мегаантиклинорий. Граница между этими структурами совпадает с субмеридиональным Серовско-Маукским глубинным разломом, в зоне которого развиты аллохтонные пластины изучаемых серпентинизированных дунит-гарцбургитовых массивов (O_{1-2}) – Устейского, Кольского и Вагранского. Отмечено большое развитие на данных массивах интрузивных образований различного состава, а также разрывных нарушений, оказывающих положительное влияние на скорость формирования и развитие мощных кор выветривания (Т-Ж) (геологические разрезы коры выветривания

приведены в приложении 1).

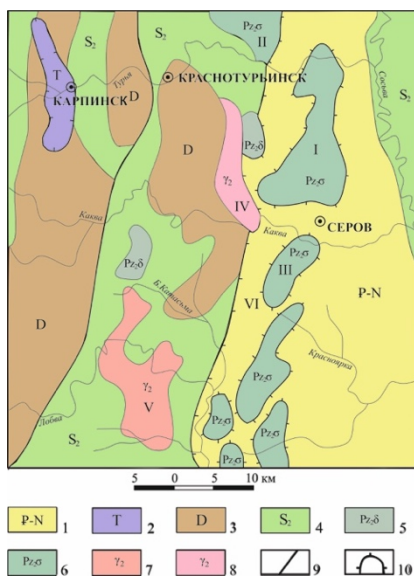


Рисунок 1. Схематическая геологическая карта района развития гипербазитовых массивов (по И.С. Рожкову, 1954, с упрощениями): 1 – отложения палеогена и неогена, 2 – породы триасовой системы, 3 – породы девонской системы, 4 – породы верхнего отдела силурийской системы, 5 – среднепалеозойский комплекс интрузий основного состава, 6 – среднепалеозойский комплекс интрузий ультраосновного состава, 7 – среднедевонский комплекс интрузий среднего состава, 8 – верхнесилурийский комплекс интрузий среднего состава, 9 – стратиграфические несогласия, 10 – тектонические несогласия.

Массивы: I – Кольский, II – Устейский, III – Вагранский; IV – Дмитриевский диоритовый массив (S_2-D_1), V – Ауэрбаховский габбро-диорит-гранодиоритовый комплекс (D_{1-2}); VI – Серовско-Маукский разлом.

Коры выветривания на территории имеют разобщенное распространение и расположены на шести рудоносных участках (объекты №№ 2, 3, 4, 6, 7, 8) (рисунок 2).

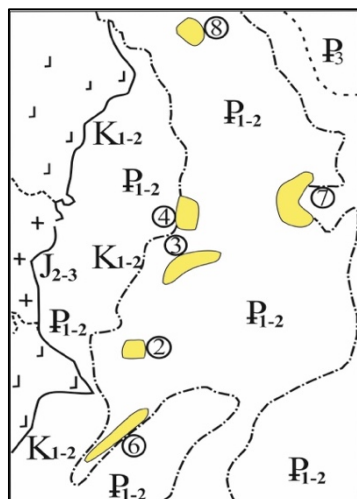


Рисунок 2. Схематическая геологическая карта участков развития никеленозной коры выветривания с размещением объектов исследования (№№ 2, 3, 4, 6, 7, 8).

Отличительной особенностью сформировавшейся коры выветривания является ее последующее преобразование в анаэробных условиях в связи с заболачиванием территории и воздействием на латериты болотных вод.

На рубеже позднего триаса и ранней юры на территории развития латеритной коры выветривания были образованы депрессии – Сосьвинская, Замарайская и Катасьминская, которые частично сохранили ее от последующего размыва.

В ходе мезозойско-кайнозойских глыбовых движений кора выветривания была перекрыта платформенными отложениями.

В третьей главе представлены результаты изучения вещественного состава пород коры выветривания для выявления зональности и генетической принадлежности профилей выветривания на шести объектах исследования.

Исследование основано на комплексном минералогическом, петрографическом и геохимическом изучении гипергенных пород (около 500 образцов), а также анализе 150 геологических разрезов коры выветривания на изучаемых объектах. Выделение измененных пород производилось посредством петрографического изучения прозрачных шлифов (400 штук). Для уточнения минеральных фаз применялись микрорентгеноспектральный (218 определений), рентгеноструктурный (60 определений), рамановский (60 определений), термический методы исследования (40 определений). Содержания редкоземельных элементов (60 проб) были определены методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой.

Для сравнения степени преобразования пород коры выветривания на изучаемых объектах были рассчитаны коэффициенты изменения валового химического состава этих пород (Алфимова, 2007). Коэффициенты представляют собой отношения содержаний элемента в выветренном горизонте к содержанию этого элемента в субстрате (1):

$$K_{\text{оксид}} = \left(\frac{(K_{\text{эл.кв}} - K_{\text{эл.суб}})}{K_{\text{эл.суб}}} \right) \cdot 100, \quad (1)$$

Расчеты были произведены по семи оксидам: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO , MgO , NiO , CoO . Результаты расчетов отражены на рисунке 3 (а-е) в виде кривых линий по каждому изученному объекту.

Наиболее значимая особенность химического состава пород коры выветривания гипербазитов Серовско-Маукского офиолитового пояса выражается в повышенных содержаниях FeO , Al_2O_3 , NiO , CoO в верхних горизонтах профиля выветривания на всех объектах, за исключением единственного объекта в южной части Кольского массива, где наблюдается обратная зависимость – пониженные содержания соответствующих оксидов в верхних его горизонтах.

Повышенные содержания FeO и Al_2O_3 в верхних горизонтах профиля выветривания свидетельствуют об участии восстановительного процесса в истории развития кор выветривания.

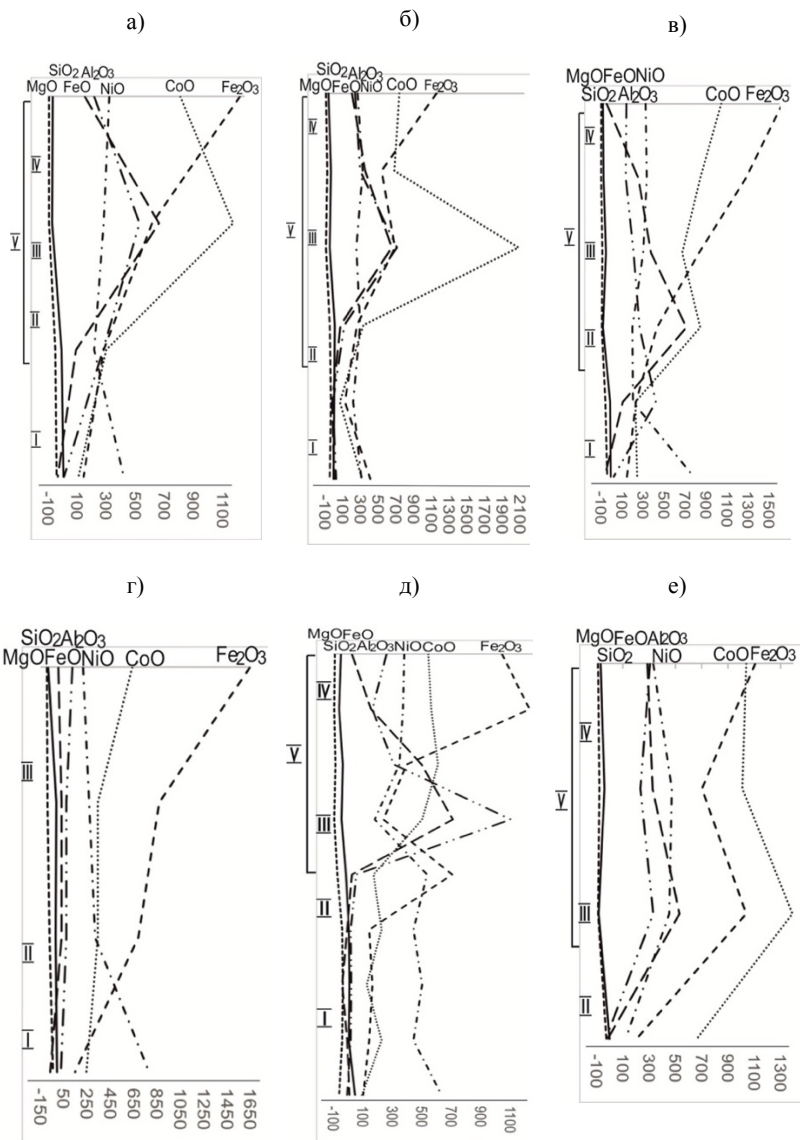


Рисунок 3. Изменение содержаний оксидов (%) в породах коры выветривания на объектах №2 (а), №3 (б), №4 (в), №6 (г), №7 (д), №8 (е).
Примечание: I – зона дезинтеграции, II – серпентинитовая зона, III – нонтронитовая зона, IV – оксидно-железная зона, V – шамозитовая зона.

В то время как повышенные содержания Fe_2O_3 в верхних и в меньшей степени средних горизонтах коры выветривания отражают процесс вторичного обогащения.

Следовательно, развитие кор выветривания на объектах №№ 2, 3, 4, 7, 8 и объекте № 6 происходило не одинаково при схожих условиях – состав и возраст субстрата на всех изучаемых объектах идентичен.

В ходе исследований в строении изучаемых профилей была выявлена зональность (снизу-вверх): серпентинитовая, нонтронитовая, окисдно-железная и шамозитовая зоны. Последняя зона не обнаружена на объекте №6, по-видимому, в связи с эрозийными процессами. Переход от одной зоны к другой постепенный, резких границ не наблюдается. Только шамозитовая зона резко выделяется по темно-синему (до черного) окрасу слагающих ее пород, в которых главный породообразующий и рудный минерал – железистый хлорит шамозит (рисунок 4). Структурное взаимоотношение шамозита с замещающими им минералами свидетельствует о его инфильтрационно-наложенном генезисе (рисунок 5). Помимо шамозита к данной группе минералов относятся сидерит, родохрозит, пирит. В таблице 1 приведена классификация пород коры выветривания исследуемых массивов (по [Таловина, 2012] с дополнениями).



Рисунок 4. Шамозитовые метасоматиты преобразованной коры выветривания объекта №7.

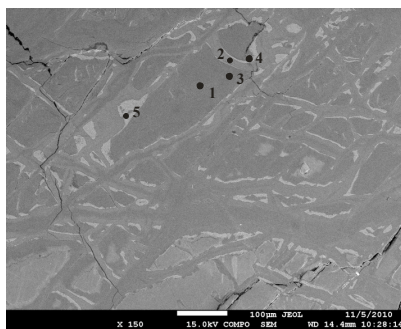


Рисунок 5. Взаимоотношение клинохлора и шамозита в шамозитовых метасоматитах. (Точки 2,4,5 – клинохлор, точки 1,3 – шамозит).

Изучая минеральный состав пород, особое внимание было уделено последовательности минералообразования, позволяющая расшифровать геологические процессы, связанные с развитием

массивов и корами выветривания по ним. Таковыми являются гидротермальные процессы и низкоградный метаморфизм.

Таблица 1. Классификационная схема гипергенных пород коры выветривания гипербазитов Серовско-Маукского офиолитового пояса (по [Таловина, 2012] с дополнениями).

Зона выветривания	Происходящий процесс	Разновидности пород	Минеральные разновидности
Шамозитовая	Шамозитизация	Шамозитовые породы	Шамозитовые, миллерит- бриндлейит -шамозитовые, клинохлор- бертьерин -шамозитовые, шамозит-лизардитовые
Оксидно-железная	Окисление	Гетитовые породы	Гетитовые, кварц-гетитовые, клинохлор-гетитовые
Нонтронитовая	Гидратация	Нонтрониты, нонтронитизированные породы	Нонтронитовые, талькохлорит -нонтронитовые
Серпентинитовая	Выщелачивание	Лизардитовые породы	Клинохлор-тальк-лизардитовые, непуит-кварц-лизардитовые, клинохлор- пеннин -лизардитовые
	Дезинтеграция	Хризотилитовые породы	Клинохлор-хризотилитовые, тальк-хризотилитовые, диабантит-брунсвигит-пикнохлорит -хризотилитовые

Примечание. Жирным шрифтом выделены впервые обнаруженные автором смешаннослойные образования и хлориты по Хею (Heu M.H., 1954).

Генетическая классификация основных минералов коры выветривания представлена в таблице 2 приложения 2.

Многие исследователи кор выветривания (Таловина, 2012; Алфимова, 2011; Пилюгин, 2011; Рыжкова, 2010; Скублов, 2005; Перельман, 1972) считают, что анализ распределения и поведения редкоземельных элементов (РЗЭ) в профиле выветривания является достаточно информативным с точки зрения уточнения генезиса. На рисунке 6 приложения 2 изображены графики нормализованных к мантийному гарцбургиту содержаний РЗЭ в породах остаточного и преобразованного типов кор выветривания. Полученные зависимости позволяют утверждать, что увеличение степени преобразования гипергенных пород приводит к увеличению в них концентрации РЗЭ, вызванному процессами выщелачивания РЗЭ из первичных минералов

пород и последующим их накоплением в виде новообразованных минералов.

Генезис шамозитовой минерализации был установлен по изотопным данным $\delta^{34}\text{S}$ в миллерите, $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{13}\text{C}$ в кальците (Мезенцева, 2011). Полученные данные по величинам $\delta^{34}\text{S}$ в миллерите хорошо согласуются с условиями анаэробной озерно-болотной обстановки, существовавшей на изучаемой территории в альб-сеноманское время (Вторушин, Журавлева, 1967). Значения $\delta^{18}\text{O}$ в кальците попадают в область средних величин метеорных вод и не перекрываются со значениями океанической воды, магматических, осадочных и метаморфических пород. Данные по изотопам $\delta^{13}\text{C}$ в кальците соответствуют гипотезе их пресноводного осадочного генезиса.

Таким образом, по результатам проведенного исследования установлено, что в пределах Сосьвинской и Замайской депрессий Кольского массива, а также Устейского и Вагранского массивов развита инфильтрационно-метасоматическая (шамозитовая) кора выветривания (объекты №№ 2, 3, 4, 7, 8), образованная в анаэробных условиях, тогда как в пределах Катайминской депрессии Кольского массива развита остаточная кора выветривания (объект №6).

В четвертой главе представлены результаты изучения температурной зависимости состава хлоритов для оценки условий образования пород, слагающих кору выветривания гипербазитов.

Для изучения состава хлоритов были отобраны представительные образцы из зон дезинтегрированных и выщелоченных серпентинитов остаточной и преобразованной кор выветривания. Минеральный состав пород и структурно-текстурные особенности изучались с помощью поляризационного микроскопа. Для диагностики минералов использовались данные лазерной рамановской спектроскопии. Состав хлоритов анализировался при помощи растрового электронного микроскопа.

В никеленосных корах выветривания хлориты тесно ассоциируют с серпентином, тальком, смектитами, смешаннослойными силикатами. Поэтому при изучении состава хлоритов специальное внимание было уделено разбраковке микрозондовых анализов. С этой целью были использованы следующие ограничения: 1) в расчет включены только анализы достаточно крупных ($> 0,05$ мм) пластинчатых кристаллов и исключены анализы тонкозернистых ($< 0,01$ мм) смесей, 2) исключены анализы с содержанием $\text{Al}^{\text{IV}} < 0,6$ к.ф. и суммой $\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} > 1$ мас. %.

Следует отметить, что породы верхних горизонтов остаточной коры выветривания объекта № 6 содержат единичные зерна таких

новообразованных минералов как пирит, сидерит, манганокальцит, что свидетельствует о присутствии шамозитовой зоны в профиле выветривания данного объекта до того, как она была эродирована в олигоцене (Кононова, 1974).

На первом этапе исследования были изучены вариации химического состава хлоритов, фигуративные точки которых отмечены на классификационной диаграмме состава хлоритов по М. Хею (рисунок 7). Подавляющее большинство точек попадает в области пеннина, талько-хлорита, клинохлора. Подчиненное значение имеют точки в области диабантита, брунсвигита и пикнохлорита.

Второй этап исследования включал расчет температурных зависимостей с использованием геотермометров М. Кателино (1988) и Ф. Бурделя, М. Кателино (2015). Температуры кристаллизации хлоритов, оцененные с помощью геотермометра Кателино (рисунок 8), заключены в интервале от 50 до 270 °С. При этом наиболее высокотемпературными (170–310 °С) оказываются низконикелистые хлориты. Высоконикелистые хлориты демонстрируют постепенное уменьшение температуры образования (от 250 до 50 °С) с ростом содержания никеля.

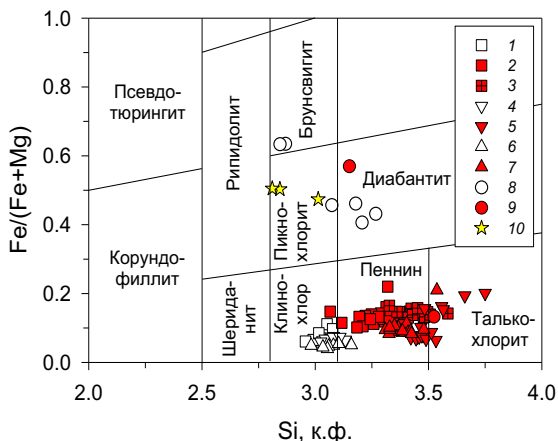


Рисунок 7. Классификационная диаграмма состава хлоритов по Хею (Hey M.H., 1954). 1–7 – хлориты из остаточной коры выветривания: 1–2 – обр. 6-7-54, $Ni < 3$ мас. % (1), $Ni > 3$ мас. % (2); 3 – обр. 6-9-65; 4–5 – обр. 6-9-95, $Ni < 3$ мас. % (4), $Ni > 3$ мас. % (5); 6–7 – обр. 6-9-97, $Ni < 3$ мас. % (6), $Ni > 3$ мас. % (7); 8–9 – хлориты из преобразованной коры выветривания: $Ni < 3$ мас. % (8), $Ni > 3$ мас. % (9); 10 – хлорит из образца роговообманкового габбро (обр. 7-14-2/5).

Температурные оценки, полученные с помощью геотермометра Бурделя и Кателино (рисунок 9), продемонстрировали близкие

свойства. Большинство из них заключено в пределах от 50 до 300 °C.

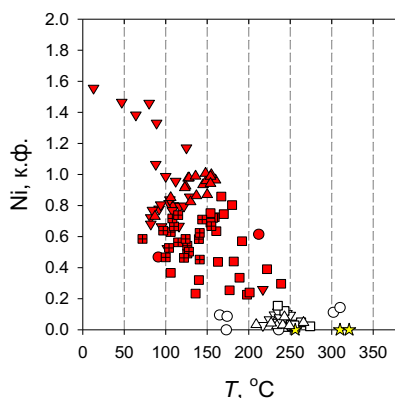


Рисунок 8. Зависимость между содержанием никеля в хлоритах и температурой их образования, оцененная с помощью хлоритового геотермометра (Кателино, 1988). Условные обозначения – см. на рисунке 7.

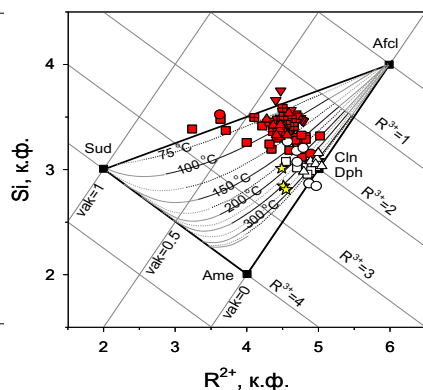


Рисунок 9. Диаграмма R^{2+} -Si (Wiewióra, 1990) с изотермами, построенными при помощи хлоритового геотермометра (Бурдель, Кателино, 2015). Условные обозначения – см. на рисунке 7.

Для высоконикелистых хлоритов температурный интервал кристаллизации составляет 50–250 °C со статистическим максимумом в области 75–125 °C, для низконикелистых хлоритов – 125–300 °C и более с максимумом в области 175–300 °C.

Показано, что в одних и тех же образцах могут быть как высоконикелистые, так и низконикелистые хлориты, т.е. с глубиной содержание никеля в хлоритах (а также температура их образования) изменяется не закономерно. Это связано с тем, что никеленосная кора выветривания развивалась по подготовленному и проработанному гидротермальной деятельностью неоднородному гипербазитовому субстрату, о чем также свидетельствуют «очаговый», штокверковый характер рудных зон, брекчиевые текстуры руд и крайне неоднородный минеральный и химический состав оруденения.

Таким образом, результаты термометрии хлоритов поднимают верхний температурный предел кристаллизации никеленосных силикатов, слагающих коры выветривания изучаемых массивов, до 150 °C и более. Обратная зависимость между содержанием никеля в хлоритах и температурой их образования свидетельствует о важной роли температуры как одного из факторов рудогенеза в корях выветривания.

В пятой главе представлены выводы о формировании никеленосной коры выветривания гипербазитов Серовско-Маукского офиолитового пояса после регионального низкоградного метаморфизма (НГМ) цеолитовой фации, приводившего к подготовке рудоносного тектонизированного субстрата месторождений, в раннемезозойском этапе тектоно-магматической активизации региона.

Данные выводы основаны на результатах исследования, а также на многочисленных фактах и анализе работ предшественников относительно проявления раннемезозойской тектоно-магматической активизации структуры Урала и признаков размещения продуктов НГМ. Полученные автором результаты изучения последовательности минералообразования в гипербазитах и химизма хлоритов не противоречат общим выводам.

Составленные автором генетическая классификация основных минералов субстрата (таблица 2 приложения 2) и последовательность преобразования реликтовых минералов являются первичными признаками проявления НГМ. При микроскопическом изучении пород из зоны дезинтегрированных серпентинитов и частично из зоны выщелоченных серпентинитов отмечается полное или частичное замещение серпентина, бастита, амфибола такими минералами, как хлорит и тальк:

- 1) серпентин→хлорит→тальк,
- 2) бастит→хлорит→тальк,
- 3) амфибол→хлорит→тальк.

Эти результаты были дополнены данными хлоритовой термометрии, которые позволили конкретизировать условия НГМ. Произведенные расчеты свидетельствуют о том, что образование хлоритов происходило в двух температурных интервалах 75-125 °С и 175-300 °С, что соответствует условиям цеолитовой фации. Кроме того, получена обратная зависимость между температурой образования хлоритов и содержанием в них никеля, что свидетельствует о важной роли температуры как одного из факторов рудогенеза.

Автор разделяет идею М.С. Рапопорта о значительном вкладе раннемезозойской тектоно-магматической активизации (ТМА) и сопровождавших ее эндогенных рудно-магматических и рудно-метасоматических процессов в минерагению Урала (Рапопорт, 1998). ТМА была проявлена сменой напряжений сжатия и растяжения, которая впоследствии оказала значительное влияние на активизацию тафrogenного внутриплитного магматизма и эндогенных рудообразующих процессов.

По мнению автора ТМА структуры Урала способствовала развитию гидротермальных процессов, привнесшим в изучаемые

массивы рудные компоненты, а также перераспределявшим их в пределах данных массивов. Кроме того, она способствовала проявлению регионального НГМ цеолитовой фации, способствовавшему масштабной проработке субстрата и подготовке его для развития последующих процессов выветривания. В данном контексте региональный НГМ является рудоподготовительным процессом.

В целом, продукты НГМ по мнению Э.М. Спиридонова достаточно широко проявлены в орогенных областях (Спиридонов, 1999). Отмечено, что поскольку НГМ является флюидодоминирующим процессом (Спиридонов, 2009), то метаморфозы обычно не раздавлены и не рассланцованы, степень метаморфических преобразований крайне изменчива, даже на коротких расстояниях. Данные признаки были отмечены в процессе исследования.

К числу минералогических свидетельств участия эндогенных процессов в формировании никеленосных кор выветривания Урала могут быть отнесены некоторые результаты изучения минералов группы серпентина (Таловина, 2015; Лазаренков, 2010), кварца и опала (Петрухова, Вершинин, 1982; Михайлов, 1997; Ульянов, 1932), а также геохимические данные и структурно-геологические выводы Н.И. Воронцовой (1999) по Уфалейскому месторождению (Средний Урал).

Вышесказанное позволяет рассматривать процесс формирования гипергенных никелевых месторождений, ассоциированных с массивами Серовско-Маукского офиолитового пояса как многостадийный, с развитием по крайней мере на ранних стадиях этого процесса проявлений НГМ цеолитовой фации, связанных с раннемезозойским этапом ТМА региона. При этом сами месторождения можно считать эпигенетическими или месторождениями комбинированного генезиса (Сагдиева, 2016).

Основные события, связанные с эволюцией гипербазитовых массивов Серовско-Маукского офиолитового пояса, развитых по ним никеленосных кор выветривания, а также поведением рудного никеля сведены в таблице 3.

Таблица 3. Важнейшие эпизоды становления гипербазитовых массивов Серовско-Маукского офиолитового пояса и развитых по ним никеленосных кор выветривания.

№ п/п	Время	Процессы	Эволюция массивов / коры выветривания / рудного никеля
1	Є3-О1	Континентальный рифтогенез.	

2	O ₂	Океанский спрединг, формирование массивов Серовско-Маукского офиолитового пояса - Кольского, Устейского и Вагранского.	Первичная серпентинизация массивов, перераспределение рудного никеля.
3	O ₃	Заложение палеозоны субдукции.	
4	D ₁	Прекращение активной вулканической деятельности в островных дугах, формирование поднятий.	
5	C ₂	Прекращение субдукции, коллизия двух плит - Восточно-Европейской и Сибирской.	
6	P ₃	Завершение коллизии, обдукция, в т.ч. массивов Серовско-Маукского офиолитового пояса.	Вторичная серпентинизация массивов (?), перераспределение рудного никеля.
7	T ₁	Начало развития коллизионного Уральского орогена с наложенным трансрегиональным рифтогенезом, следствием чего предположительно явился региональный низкоградный метаморфизм цеолитовой фации	Привнос и перераспределение рудного никеля в массивах гидротермальными растворами. Предполагается рудоподготовление массивов региональным низкоградным метаморфизмом.
8	T ₂₋₃ -J	Латеритное корообразование. Заболочивание территории. Анаэробная обстановка.	Образование шамозитовой зоны в профиле выветривания гипербазитов.
9	T ₃ -J ₁	Режим тангенциального сжатия, образование складчато-блоковых структур и предскладчатых надвигов. Образование депрессий - Катасьминской, Сосьвинской, Замарайской.	

10	K ₂	Первая морская трансгрессия (отложения камышловской свиты).	
11	P ₁₋₂	Три морские трансгрессии (отложения марсятской, ивдельской, серовской, ирбитской и чеганской свит).	Погребение коры выветривания под толщей осадков.
12	P ₃	Разноамплитудное поднятие территории, эрозионные процессы.	Отсутствие шамозитовой зоны в профиле выветривания объекта №6.
13	N ₁₋₂	Медленное затухание эрозионных процессов, выполаживание рельефа, заболачивание водоемов.	
14	N ₂ -Q	Новейший орогенез. Интенсивная денудация.	Коры выветривания частично выводятся на поверхность.

Основные результаты исследований

1. В результате проведенных комплексных исследований дана генетическая характеристика кор выветривания гипербазитов Серовско-Маукского офиолитового пояса. Показано, что на шести объектах (№№ 2, 3, 4, 6, 7, 8) с развитием кор выветривания прослеживается различная гипергенная метасоматическая зональность. Различие заключается в развитии шамозитовой зоны, образованной в условиях анаэробной обстановки и замещающей полностью или частично нижележащие оксидно-железную, нонтронитовую и серпентинитовую зоны. Данная зона отсутствует в южной части Кольского массива в пределах Катасьминской депрессии, что связано с эрозионными процессами, проявленными в олигоцене. Таким образом, на объектах №№ 2, 3, 4, 7, 8 выявлена преобразованная инфильтрационно-метасоматическая (шамозитовая) кора выветривания, на объекте №6 – древняя остаточная.

2. Впервые по результатам термометрии хлоритов конкретизированы температурные условия формирования хлоритовой минерализации в корах выветривания (50-300 °С). Полученные расчеты указывают на несомненное участие гидротермальных растворов в формировании никеленосного субстрата. Выявленная отчетливая обратная зависимость между температурой образования хлоритов и содержанием в них никеля подчеркивает важную роль температуры, как одного из факторов рудогенеза.

3. Впервые сделан вывод о проявлении на изучаемой территории регионального низкоградного метаморфизма цеолитовой фации в результате раннемезозойской тектоно-магматической

активизации региона, который способствовал проработке субстрата для образования последующих высоконикеленосных кор выветривания. Отмечена важность данного этапа в истории развития гипербазитов, поскольку он связан с рудоподготовительным процессом.

Список основных работ по теме диссертации

Статьи в научных журналах перечня ВАК

1. Илалова Р.К. Региональный низкоградный метаморфизм как рудоподготовительный процесс при формировании никеленосных кор выветривания восточного склона Северного Урала / Илалова Р.К., Таловина И.В., Дуягина А.М., Никифорова В.С. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – №6. Специальный выпуск 29. Вопросы региональной геологии. – С. 3-9.
2. Илалова Р.К. Раннемезозойская тектоно-магматическая активизация восточного склона Северного Урала и ее влияние на формирование никеленосных кор выветривания / Илалова Р.К., Таловина И.В., Дуягина А.М., Никифорова В.С. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – №6. Специальный выпуск 29. Вопросы региональной геологии. – С. 10-16.
3. Илалова Р.К. Термометрия никеленосных хлоритов Кольского массива (Северный Урал) / Илалова Р.К., Гульбин Ю.Л. // Записки РМО. – 2018. – №5. – Том 147. – С. 1-17.
4. Илалова Р.К. Особенности строения триас-юрских никеленосных кор выветривания ультраосновных массивов на Северном Урале (Серовский район) / Илалова Р.К., Таловина И.В. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – №5. – С. 281-291.
5. Илалова Р.К. Характеристика дайкового комплекса жильных пород и его влияние на никелевое оруденение в триас-юрских корях выветривания ультраосновных массивов на Северном Урале (Серовский район) / Илалова Р.К. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – №6. – С. 283-290.
6. Сагдиева (Илалова) Р.К. Современные взгляды на формирование никеленосных кор выветривания ультраосновных массивов на Урале / Сагдиева (Илалова) Р.К., Таловина И.В., Воронцова Н.И. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – №6. – С. 278-288.

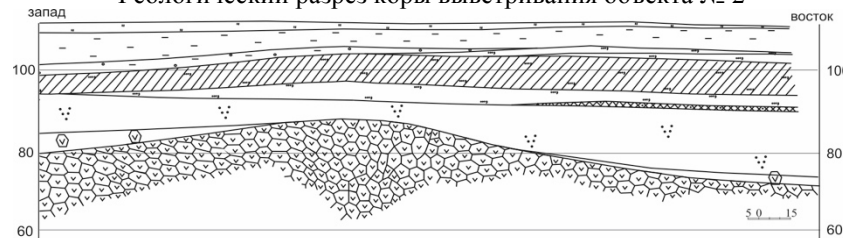
Статьи в других журналах и материалах международных и всероссийских конференций

7. Илалова Р.К. Пекораит гипергенных никелевых месторождений Урала / Илалова Р.К. // Международная конференция: материалы международной научно-практической конференции. – Москва: РИО ЕФИР, 2015. – С. 188-191.
8. Sagdieva (Ilalova) R.K. The role of the dikes in the formation of the nickeliferous weathering crust on the example of Sahara and Elov deposits (Urals) / Sagdieva (Ilalova) R.K., Nikolaeva E.S., Vorontsova N.I. // Freiberg – St.Petersburger interdisziplinäres Kolloquium junger Wissenschaftler. Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2015. – P. 34-37.
9. Илалова Р.К. Анализ строения и генезис триас-юрских никеленосных кор выветривания в южной части Северного Урала / Илалова Р.К. // V Международные научные чтения (памяти В.Ф. Петрушевского): материалы международной научно-практической конференции. – Москва: РИО ЕФИР, 2016. – С. 92-98.
10. Илалова Р.К. Характеристика дайкового комплекса жильных пород и его влияние на никелевое оруденение в триас-юрских корах выветривания ультраосновных массивов на Северном Урале (Серовский район) / Илалова Р.К. // V Международная конференция молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского: материалы международной конференции. – СПб, 2017. – С. 47-51.
11. Илалова Р.К. Особенности химического состава и термометрия хлоритов остаточной коры выветривания Кольского массива (Северный Урал) / Илалова Р.К., Гульбин Ю.Л. // Юбилейный съезд РМО «200 лет РМО»: материалы конференции. – СПб: Горный университет, 2017. – С. 226-228.
12. Илалова Р.К. Генезис коры выветривания гипербазитов в южной части Северного Урала: специфика континентального выветривания в мезозойскую эру геологической истории Земли / Илалова Р.К. // IX Международные научные чтения (памяти В.В. Петрова): материалы международной научно-практической конференции. – Москва: РИО ЕФИР, 2017. – С. 21-27.

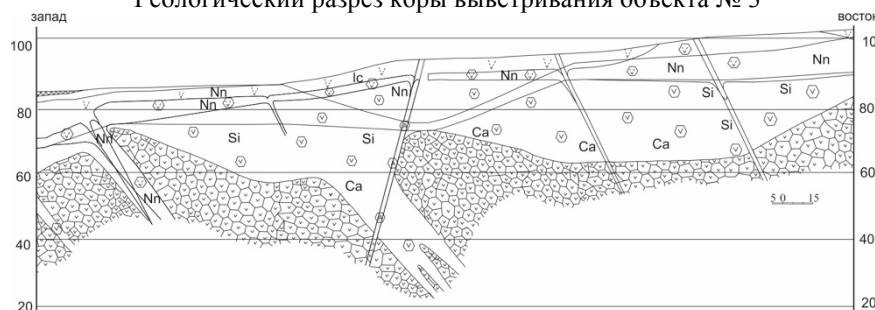
Геологические разрезы коры выветривания гипербазитов Серовско-Маукского офиолитового пояса.

Приложение 1

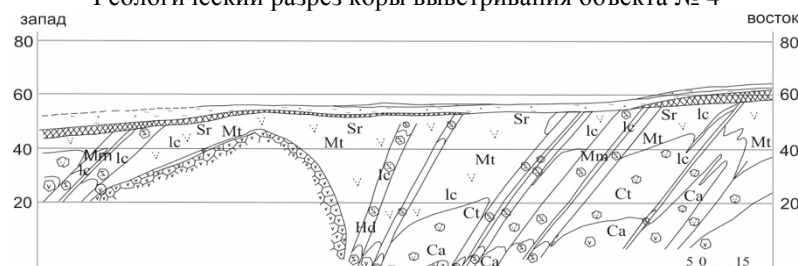
Геологический разрез коры выветривания объекта № 2



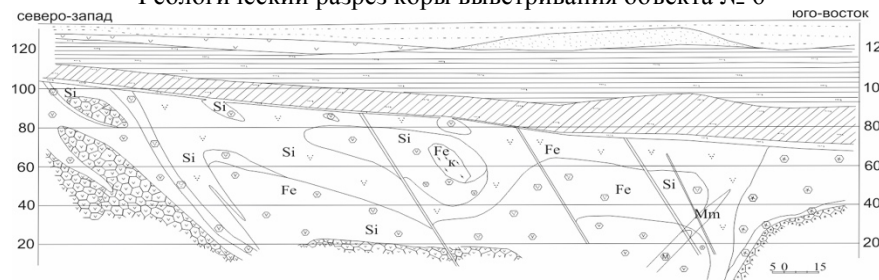
Геологический разрез коры выветривания объекта № 3



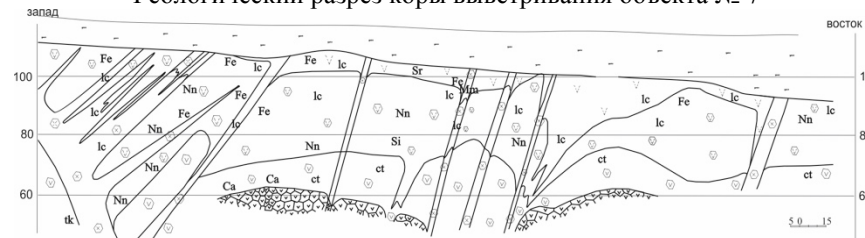
Геологический разрез коры выветривания объекта № 4



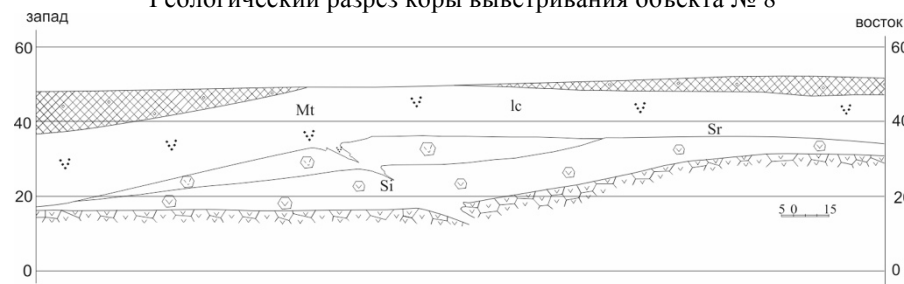
Геологический разрез коры выветривания объекта № 6



Геологический разрез коры выветривания объекта № 7



Геологический разрез коры выветривания объекта № 8



Условные обозначения:

	1		6		11		Sr 16		K 21
	2		7		12		Mt 17		Nn 22
	3		8		13		Si 18		Mn 23
	4		9		14		Fe 19		Fe 24
	5		10		15		Ca 20		Ca 25

1-6 – мезокайнозойские отложения; 7 – охры и обохренные серпентиниты; 8 – выщелоченные породы, развитые по гранодиоритам и кварцевым диоритам (а – плотные, б – рыхлые); 9 – керолитизированные серпентиниты (1 – плотные, 2 – рыхлые); 10 – гидрохлоритовые породы по диоритам (1 – плотные, 2 – рыхлые); 11 – гидрохлоритовые породы по диабазам (1 – плотные, 2 – рыхлые); 12 – гидрохлорит-монтмориллонитовые породы (1 – по амфиболитам, 2 – по спессаритам); 13 – дезинтегрированные серпентиниты; 14 – дезинтегрированные гранодиориты; 15 – дайки диоритов и других пород; 16-25 – эпипородные изменения: сидеритизация (16), магнетитизация (17), силицификация (18), обохривание (19), керолитизация (20), каолинизация (21), нонтронитизация (22), монтмориллонитизация (23), лептохлоритизация (24), карбонатизация (25).

Таблица 2. Генетическая классификация основных минералов коры выветривания гипербазитов Серовско-Маукского офиолитового пояса.

Гипогенные				Гипергенные		
Магматогенно-реликтовые	Минералы океанического выветривания	Низкоградно-метаморфогенно-реликтовые	Гидротермально-реликтовые	Остаточные		Инфильтрационно-наложенные
				Диффузионные	Инфильтрационные	
Оливин, пироксен, хромшпинелид	Лизардит, хризотил, пекораит, амфибол, бастит, магнетит	Хлорит, тальк	Миллерит, пирит, халькопирит, пирротин, хлорит, тальк	Нонтронит, монтмориллонит, гидрохлорит, галлуазит, каолинит	Гетит, гидрогетит, гематит, нонтронит, тальк, кварц, опал, халцедон, кальцит, магнетит, доломит, гидраргиллит	Шамозит, сидерит, родохрозит, пирит

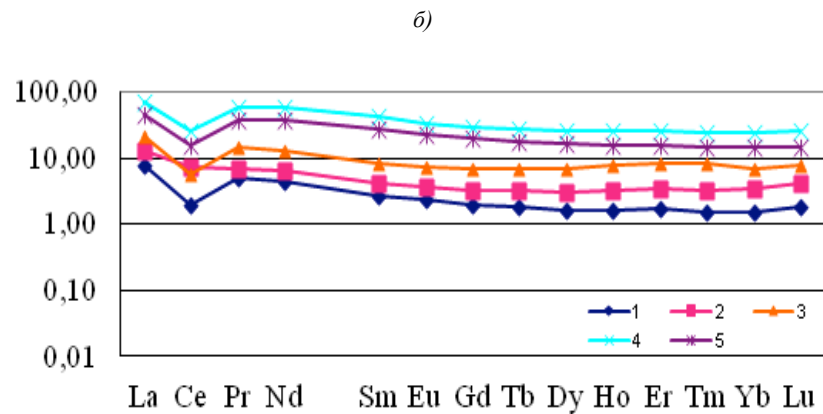
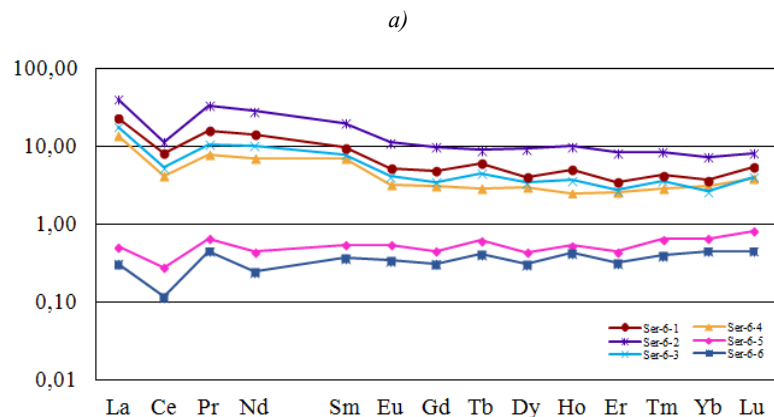


Рисунок 6. Графики нормализованных к мантийному гарцбургиту содержаний РЗЭ в породах остаточного (а) и преобразованного (б) типов кор выветривания.

Условные обозначения: ser-6-1-гетитовые породы; ser-6-2-тальк-гетитовые породы; ser-6-3,4-клинохлор-пеннинные, клинохлор-тальк-пеннинные породы; ser-6-5,6-хризотил-лизардитовые и непуит-хризотил-лизардитовые серпентиниты.

Условные обозначения: 1-хризотил-серпентиниты; 2-лизардитовые серпентиниты; 3-миллерит-бриндлейит-шамозитовые породы; 4-шамозитовые породы; 5-шамозит-гетитовые породы.