

На правах рукописи

**МОНТИН Андрей Сергеевич**

**ОСОБЕННОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ И  
ПЛАТИНОНОСНОСТЬ РАССЛОЕННОГО МАССИВА  
ЛУККУЛАЙСВААРА В СЕВЕРНОЙ КАРЕЛИИ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата геолого-минералогических наук



Москва - 2009

**Работа выполнена на кафедре геологии и геохимии полезных ископаемых геологического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова**

**Научный руководитель:** кандидат геолого-минералогических наук  
Шатагин Николай Николаевич

**Официальные оппоненты:** академик  
Митрофанов Феликс Петрович  
кандидат геолого-минералогических наук  
Криволицкая Надежда Александровна

**Ведущая организация:** Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов (ЦНИГРИ), г. Москва

Защита состоится «6» ноября 2009 г. в 14:30 час. в ауд. 415 на заседании диссертационного совета Д 501.001.62 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, Геологический факультет

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Геологического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (главное здан 6 этаж).

Автореферат разослан «5» октября 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 501.001.62  
доктор геолого-минералогических наук



**Н.Г. Зиновьева**

## Введение

### Актуальность исследований

Металлы платиновой группы являются важнейшим валютным сырьем, возрастающая их потребность в связи с требованиями экономики ставит перед геологией важную и актуальную задачу по выявлению новых месторождений.

На территории Карелии за последние годы выделен ряд месторождений и рудопроявлений сталлов платиновой группы (МПГ), что позволило считать ее новой перспективной платиноносной провинцией на Северо-Западе России. Наиболее перспективными типами платиноидного оруденения в настоящее время являются месторождения малосульфидного типа в слоенных интрузиях и массивах. Таким объектом, в частности, явилось Луккулайсварское платинометальное месторождение.

### Цели и задачи работы

Целью данной работы является выявление особенностей строения и закономерностей распределения руд Луккулайсварского интрузива – типичного объекта для новой потенциально платиноносной провинции северо-запада России.

### Фактический материал и методика исследования (личный вклад автора)

В основу работы положен открытый материал, содержащийся в двух отчетах с предварительной оценкой ресурсов МПГ месторождения Луккулайсваара. А также отчет по геологическим исследованиям платинометальных руд на обогатимость, выполненным в ФГУП «НИГРИ». В качестве исходного материала использовалась полная документация 219 буровых скважин и 142 канав и журналы опробования платинометальных горизонтов и вмещающих пород. Общее число обработанных геохимических проб – 4649. Самим автором было отобрано на участках «Анортозитовый», «Надежда», «Клюнинский», «Перспективный», «Западная КЗ», «Восточная КЗ» – 463 керновых, 618 бороздовых, 48 штучных проб платинометальных руд и вмещающих пород; 5 проб флотационного концентрата. Пробы были проанализированы в лаборатории ООО «Алекс Стюарт ГеоАналитика» пробирным методом для определения содержания платины, палладия и золота; и химическим методом для определения содержания селена, меди и сульфидной серы. Изучено 68 шлифов и 157 шлифов. Также для корректировки результатов использовались геофизические данные. Вся эта информация позволила автору создать базу данных. Исходные данные проверены и отредактированы. Определены причины снижения обогатимости руд на отдельных участках. Произведен статистический анализ результатов химических анализов. Посредством геостатистического анализа определены оптимальные параметры разведочной сети. Построены разнообразные двух- и трехмерные компьютерные модели участка «Надежда».

## **Основные методы исследования**

Трёхмерная горная геометрия, маркшейдерия и геодезия, воплощенные в комплексы программ трёхмерного моделирования месторождений полезных ископаемых. В качестве основного программного комплекса использовалась интегрированная система MicroMine. Но привлекались также DataMine, SurPack, AutoCAD. В качестве подсобных программ широко использовались ArcGIS, Statistica, Excel и др.

### **Научная новизна**

1) В мире на данный момент изучено достаточно большое количество платинометаллических месторождений, связанных с основными и ультраосновными слоистыми массивами, в пределах платинометаллических горизонтов которых, как принято считать, минералы платины имеют непосредственную генетическую связь с сульфидами.

В Луккулайсварском массиве впервые выявлена разобщенность медно-никелевых и платинометаллических горизонтов. Особенно это проявлено в рудных уровнях «КЗ» и «Норитовом». Выявлена закономерность геологического положения платинометаллических горизонтов относительно медно-никелевых руд в разрезе массива (снизу-вверх): рудный уровень «Норитовый» является бессульфидным и сопутствующие ему медно-никелевые руды не установлены (возможно в связи с недостаточной изученностью); в рудном уровне «КЗ» наблюдается наложение платинометаллических и медно-никелевых руд с незначительным их разобщением; в рудном уровне «Надежда» установлено полное перекрытие платинометаллических и медно-никелевых руд.

2) Впервые выявлена закономерная смена платино-палладиевого отношения, как в пределах отдельных платинометаллических уровней, так и в разрезе массива в целом. В рудном уровне «КЗ», соотношение платины и палладия в рудах закономерно изменяется в отдельных рудных горизонтах с увеличением составляющей палладия: от 0,40-0,60 в их подошве до 0,25-0,35 в кровле. Причём, на участках слияния горизонтов происходит двух-, реже трёхкратное повторение указанной зональности. Мощности отдельных ритмов составляют от 2,5 до 3,5 м.

В целом по массиву наблюдается подобная тенденция увеличения составляющей палладия в рудах от краевой зоны к центру массива. Рудный уровень «Норитовый» несет, существенно, платиновую минерализацию (платино-палладиевое отношение составляет 40/1); платино-палладиевое отношение в рудном уровне «КЗ» в среднем составляет 0,3; в рудных зонах рудного уровня «Надежда» платино-палладиевое отношение в среднем составляет 0,2.

3) Создана модель формирования комплекса массивов Олангской группы. В отличие от известных платинометаллических массивов мира (Стиллуотер (Канада), Бушвельд (ЮАР), Бураковский (Россия), в Луккулайсварском массиве отсутствуют горизонты хромитовых руд. Эта характерная особенность связана с этапами формирования системы ультра-основных и основных массивов Олангской группы.

## **Практическая значимость**

1) Создана компьютерная модель участка «Надежда» Луккулайсваарского платинометалльного месторождения, которая позволила уточнить пространственное положение основных разрывных нарушений, и как следствие позволит обойтись оптимальными объемами бурения при дальнейшей изведке.

2) Геостатистическими методами оценена изменчивость содержаний полезных компонентов платинометалльных руд рудной зоны «С» уровня «Надежда», а также вычислена оптимальная звездочная сеть для отдельных блоков участка, что в дальнейшем позволит в значительной степени удешевить геологоразведочные работы.

3) Установлены причины снижения обогатимости платинометалльных руд участка «Ллоининский». Руководствуясь результатами проведенных исследований можно минимизировать затраты средств в разведку участков, в пределах которых располагаются слабо обогатимые руды.

## **Апробация работы**

Основные положения диссертационной работы докладывались: на научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодые – наукам о Земле» в Российском государственном геологоразведочном университете (март 2008г.); на XV Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2008» в Московском государственном Университете им. М.В. Ломоносова (апрель 2008г.); на XVI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2009» в Московском государственном Университете им. М.В. Ломоносова (апрель 2009г.); на Российской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Планета Земля: актуальные вопросы геологии глазами молодых ученых и студентов» в Московском Государственном Университете им. М.В. Ломоносова (апрель 2009г.)

## **Объем и структура работы**

Работа изложена на 122 страницах машинописного текста, состоит из введения, 9-и глав и заключения, сопровождается 15 таблицами, 51 рисунком, списком литературы из 54 наименований и списком сокращений.

## **Благодарности**

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю кандидату геолого-минералогических наук Н.Н. Шатагину за постоянную внимательную опеку, а также за помощь в освоении таких программ, как MicroMine и Statistica. Автору были очень полезны консультации старшего научного сотрудника Геологического факультета МГУ К.И. Воскресенского без которых не удалось бы выявить характерные особенности платинометалльных руд и их изменений. Автор благодарит своих коллег сотрудников ЗАО «НОРИТ» В.М. Шашкина, Ю.Н. Сидорова, М.О. Бандуркина, А.В. Фатеева за дружескую помощь и поддержку в работе над диссертацией. Особую благодарность за опыт при организации и проведении полевых работ автор выражает начальнику Луккулайсваарской геологической партии В.Н. Скворцову.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Луккулайсварский массив располагается в северо-западной части Лоухского района Республики Карелия (рис. 1). В геологическом плане он расположен в Панаярви-Ципрингской рифтогенной структуре субширотного простирания, находящейся в пределах архейского кратона и относится к Олангской группе массивов. Интрузия прорывает породы архея и с размывом перекрывается вулканогенно-осадочными отложениями протерозоя (рис. 2). Возраст массива, по данным уран-свинцового метода, определен в  $2437 \pm 11$  млн лет. Массив представляет собой фрагмент изометричного тела, длина которого составляет более 8км, а ширина - 5км. По гравиметрическим данным подошва массива находится на глубине около 2км. Породы массива, как правило, имеют крутое падение ( $60-70^\circ$ ) и ориентированы в субширотном направлении.

Геологические исследования массива охватывают период с 1940 г по настоящее время. Впервые массив был закартирован Ю.С. Неуструевым в 1940г. повышенные содержания платиноидов были установлены Кравцовым Д.И в 1971 г. С 1983 по 1993 гг. были выполнены значительные объемы поисковых работ, в результате которых на массиве был получен большой фактический материал, уточняющий особенности строения расслоенных серий массива.

В строении массива можно выделить 4 зоны, сводный разрез которых представлен в таблице 1. Ультрамафитовая зона залегает в основании расслоенной серии, далее вверх по разрезу следует Норитовая зона, Габбро-норитовая зона и завершает разрез Габбровая зона, которая с севера перекрывается вулканитами ятулия.

Наиболее интересными представляются Норитовая и Габбро-норитовая зоны, поскольку являются рудоносными. Остановимся на них подробнее.

В Норитовой зоне выделено пять субзон. В составе нижней норитовой субзоны широко развиты ортопироксен-плагиоклазовые разности пород с самыми различными соотношениями этих кумулятивных фаз от ортопироксенитов до анортозитов. Нижняя критическая субзона характеризуется преобладающим развитием мелко-тонкозернистых микрогаббро-норитов, микроноритов, микрогаббро, реже микрозернистых пироксенитов и перидотитов. Средняя норитовая субзона, разделяет нижнюю и верхнюю критические субзоны и характеризуется наличием прослоев оливинсодержащих пород. В верхней части субзоны оливиновые нориты переслаиваются с норитами, габбро-норитами и анортозитами, в нижней - наблюдается ритмичное переслаивание перидотитов, оливиновых норитов, пироксенитов, норитов, габбро-норитов и анортозитов. Верхняя критическая субзона характеризуется развитием в ее основании оливинсодержащих пород незначительной мощности, а в основном сложена микрогаббро-норитами. Верхняя норитовая субзона представлена мелко - среднезернистыми норитами и микропироксенитами с редкими прослоями оливин-содержащих пироксенитов и оливиновых норитов.



Рис. 1. Схема расположения Луккулайсварского платинометалльного месторождения, квадрат — ании Луккулайсварской площади.

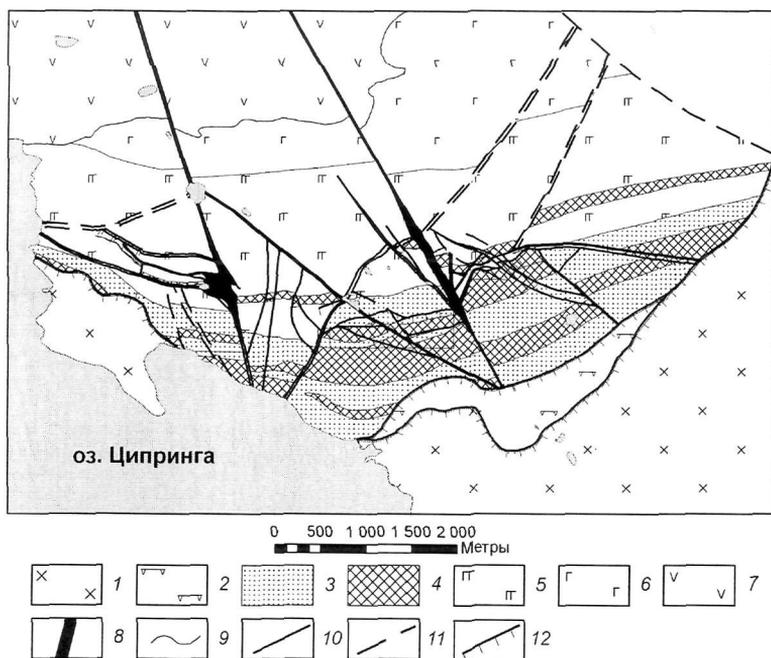


Рис. 2. Схематическая геологическая карта Луккулайсварского массива: 1 — гранодиориты; 2 — диопсидовые габбро; 3 — нориты; 4 — микрогаббро-нориты; 5 — габбро-нориты; 6 — габбро; 7 — андезиты; 8 — основные породы; 9 — геологические границы; 10 — установленные разломы; 11 — предполагаемые разломы; 12 — надвиги.

Таблица № 1

## Сводный схематический разрез массива Луккулайсваара

Мошн. зоны, м	Мошн. субзоны, м	Название зон, субзон, пачек и краткая характеристика их разреза
1000		Габбровая зона. Габбро среднезернистое амфиболизированное с реликтами инвертированного пижонита, с редкими прослоями среднезернистых габбро-норитов и мелкозернистых титаномагнетитовых габбро
1200	до 800	Габбро-норитовая зона. Верхняя субзона, верхняя пачка: переслаивание мезо - лейкократовых габбро-норитов с анортозитами и трахитоидными габбро-норитами. Нижняя пачка: переслаивание габбро-норитов, норитов, оливиновых норитов и анортозитов.
	150	Дайкообразное тело микрогаббро-норитов.
	до 400	Нижняя субзона, верхняя пачка: переслаивание лейкократовых габбро-норитов и анортозитов. Нижняя пачка: переслаивание габбро-норитов, норитов с оливинсодержащими и оливиновыми габбро-норитами
1500	до 300	Норитовая (критическая) зона. Верхняя субзона. Расчленяется на 3 пачки с прослоями оливинсодержащих пород. В нижней и верхней преобладают нориты с прослоями пироксенитов, в средней - прослойки анортозитов.
	до 350	Верхняя критическая субзона: преобладающее развитие микро- и мелкозернистых габбро-норитов и норитов, сопровождающихся комплексом пород, осложняющих нормальную расслоенность
	150-300	Средняя норитовая субзона: в верхней части - переслаивание оливиновых норитов с норитами, габбро-норитами и анортозитами; в нижней-ритмичное переслаивание перидотитов, оливиновых норитов, пироксенитов, норитов, габбро-норитов, пироксенитов.
	250	Нижняя критическая субзона: преобладающее развитие мелко тонкозернистых пород, проявление микрорасслоенности, сопровождающееся развитием пород, осложняющих нормальную расслоенность.
	до 600	Нижняя норитовая субзона: переслаивание среднезернистых норитов, пойкилитовых авгитовых норитов и анортозитов. В нижней части (70 м) - тонкое ритмичное переслаивание перидотитов, пироксенитов, троктолитов, норитов и анортозитов
900	более 20	Ультраосновная зона Верхняя субзона: тонкое ритмичное переслаивание оливинитов, перидотитов и троктолитов.
	380	Средняя субзона: переслаивание оливинитов, троктолитов, перидотитов.
	400	Нижняя субзона: ритмичное переслаивание оливинитов, перидотитов, плагиопироксенитов и, редко, норитов.
	100	Предполагаемая (невскрытая) часть ультраосновной зоны.

Габбро-норитовая зона подразделяется на две субзоны (нижняя и верхняя), практически идентичные по составу. Они представлены мелко- и среднезернистыми лейко- и мезократовыми габбро-норитами прослоями анортозитов. Верхняя и нижняя габбро-норитовые субзоны разделяются телом крогаббро-норитов значительной мощности, к кровле и подошве которого приурочены оторочки /доносных анортозитов.

Строение массива осложняют дайки основного состава.

На территории массива в 2002–2008 гг. ЗАО «НОРИТ» проведены геологоразведочные работы, целью которых было выявление и последующее детальное изучение платинометалльных горизонтов. Работы включали геологическое картирование м-ба 1:1000, проходку канав и бурение скважин, отбор штучных, разовых и керновых проб. Работы велись в пределах шести участков: «Анортозитовый», «Надежда», «Лонинский», «Перспективный», «Западная КЗ» и «Восточная КЗ». В результате было выявлено три платинометалльных уровня «Надежда», «КЗ» и «Норитовый».

**Рудный уровень «Надежда».** В геологическом плане платинометалльная минерализация контролируется пластообразным телом микрогаббро-норитов, которое разделяет габбро-норитовую зону на нижнюю и верхнюю субзоны (рис. 3). Тело хорошо дифференцировано на крогаббро-нориты и анортозиты, которые отличаются выдержанностью по простиранию и географической однородностью. Рудная минерализация ассоциирует с метасоматически измененными плагноклазитами и лейкократовыми габбро-норитами экзоконтактных зон тела крогаббро-норитов и прослежена примерно на 6,5 км. Эти рудные горизонты представлены астообразными зонами вкрапленной сульфидной минерализации. Мощность зон варьирует от 0,5 до 6,5 м.

Нижняя зона представляет собой горизонт вкрапленной сульфидной минерализации. Количество сульфидов в рассматриваемом горизонте обычно не превышает 1-2% и редко достигает 5%. Размер вкрапленных зерен варьирует от 0,5 до 1-2 мм.

Состав сульфидных парагенезисов зависит от степени преобразования и состава пород. В измененных анортозитах преобладает тонкая вкрапленность халькопирита, замещенного по краям зерен и трещинкам спайности халькозинном и ковеллином, иногда встречаются пирит, никелин. Такой характер вкрапленности сульфидов отмечается в более свежих, не измененных породах. В породах преобладает интерстициальная вкрапленность пентландит-пирротин-халькопиритового парагенезиса.

Минералы платиновых металлов отмечаются как в сростаниях сульфидов, так и силикатной матрице пород и представлены в основном висмута-теллуридами палладия, в подчиненном количестве отмечаются селениды и антимонида палладия. Характерным является стиллуотерит, образующий выделения размером 10-300 мкм в сростаниях с изомертитом, котульскитом, Sb-котульскитом, сперрилитом.

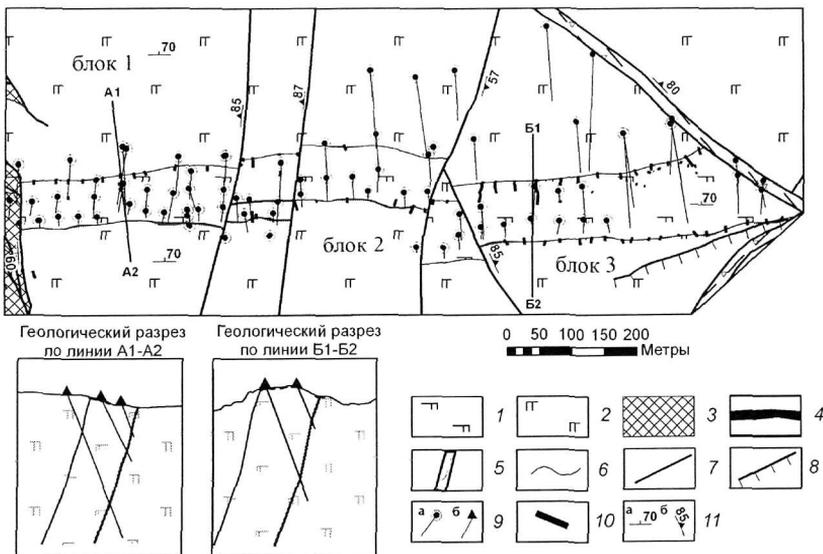


Рис. 3. Схематическая геологическая карта участка «Надежда» и разрезы к ней: 1 – микрогабронориты; 2 – габбро-нориты; 3 – долериты; 4 – рудные тела; 5 – зоны дробления; 6 – геологические границы; 7 – крутонападающие разломы; 8 – надвиги; 9 – скважины и их направление бурения (а – на карте; б – на разрезе); 10 – каналы; 11 – элементы залегания (а – литологических разностей; б – разрывных нарушений).

Верхняя рудная зона по ряду признаков сопоставима с нижней, но отличается низкими содержаниями платиноидов. Она как самостоятельный объект не представляет промышленного значения. Однако при разработке нижней зоны, может рассматриваться как объект второй очереди.

Содержания полезных компонентов в рудах верхней зоны уровня «Надежда» в среднем составляет: Pt – 0,22 г/т; Pd – 0,78 г/т; Au – 0,06 г/т; Cu – 0,1%; Ni – 0,04%; в нижней зоне: Pt – 0,79 г/т; Pd – 3,21 г/т; Au – 0,23 г/т; Cu – 0,2%; Ni – 0,08%. Платинопалладиевое отношение в верхней зоне в среднем составляет – 1/5, в нижней – 1/4.

**Рудный уровень «КЗ»** приурочен к выходу пород верхней критической субзоны расслоенного интрузива. Он ориентирован согласно расслоенности и протягивается в субширотном направлении почти на 3,5 км при мощности до первых десятков метров. Главными особенностями разреза верхней критической субзоны являются высокая изменчивость петрографического состава, большие вариации текстурно-структурных характеристик пород (от микрозернистых до пегматоидных разновидностей при резком преобладании микро- и мелкозернистых разностей: микрогаббро-норитов, образующих слои и линзы мощностью от 3 до 80 м).

Распределение платинометальной минерализации в пределах рудной зоны носит струйчатый характер. Струи имеют значительную (первые сотни метров) протяжённость и образуют от одного до четырёх рудных горизонтов мощностью от 0,6 – 5,7 м. Сульфидная медно-никелевая минерализация распространена как в пределах платинометальных струй, так и в пустых,

...длинах струи, прослоях пород. Уровень характеризуется наличием сульфидной вкрапленности интерстиционного характера, представленной пентландит-халькопирит-пирротиновой ассоциацией. В породах рудного горизонта присутствует магнетит. Количество сульфидов в рассматриваемом горизонте не превышает 1-2%.

Соотношение платины и палладия в рудах закономерно изменяется в отдельных рудных зонах от 1/4 в кровле прослоев до 3/5 в их подошве.

Содержания полезных компонентов в рудах уровня «КЗ» в среднем составляет: Pt – 0,31 г/т; Ag – 1,10 г/т; Au – 0,07 г/т; Cu – 0,1%; Ni – 0,09%. Платинопалладиевое отношение в среднем – 29.

**Рудный уровень «Норитовый»** приурочен к выходу пород средней норитовой субзоны слоистого интрузива, к верхней ее части. Он ориентирован согласно слоистости и вытягивается в субширотном направлении почти на 3,5 км при мощности 5-6 метров. Главными особенностями разреза средней норитовой субзоны являются: в верхней части - переслаивание ильменитовых норитов с лейконоритами и норитами, габбро-норитами и анортозитами мощностью 0,5 - 15 м; в нижней - ритмичное переслаивание перидотитов, оливиновых норитов, норитов, рохсенитов (от 0,3 до 70 м).

Уровень представляет собой рудную зону мощностью от 4,7 до 7,5 м, которая состоит из двух рудных горизонтов, разделённых прослоем пустых пород мощностью 1 - 2 м, и характеризуется наличием сульфидной вкрапленности представленной преимущественно пиритом, пирротином и пентландитом, в меньшей степени распространён халькопирит. Содержание сульфидов в породе крайне низкие. Платинометаллическая минерализация представлена сперрилитом.

Содержания полезных компонентов в рудах уровня «Норитовый» в среднем составляет: Pt – 0,01 г/т; Pd – 0,05 г/т; Au – 0,01 г/т; Cu < 0,01%; Ni < 0,01%. Платинопалладиевое отношение в среднем – 40/1.

Содержания полезных компонентов в рудах платинометаллических уровней показаны на графиках (рис. 4).

Проведены статистические исследования, которые демонстрируют пространственную связь между платинометаллическим и медно-никелевым оруденением. Рассчитаны корреляционные матрицы элементов (табл. 2). Высокие значения корреляции между серой, никелем и медью свидетельствуют о том, что медь и никель находятся в сульфидной форме, а именно в виде халькопирита и пентландита, что подтверждают результаты изучения шлифов. Высокие значения коэффициентов корреляции элементов платиновой группы и золота с медью, никелем и серой, указывают на то, что перечисленные элементы драгоценных металлов непосредственно ассоциируют с сульфидными минералами.

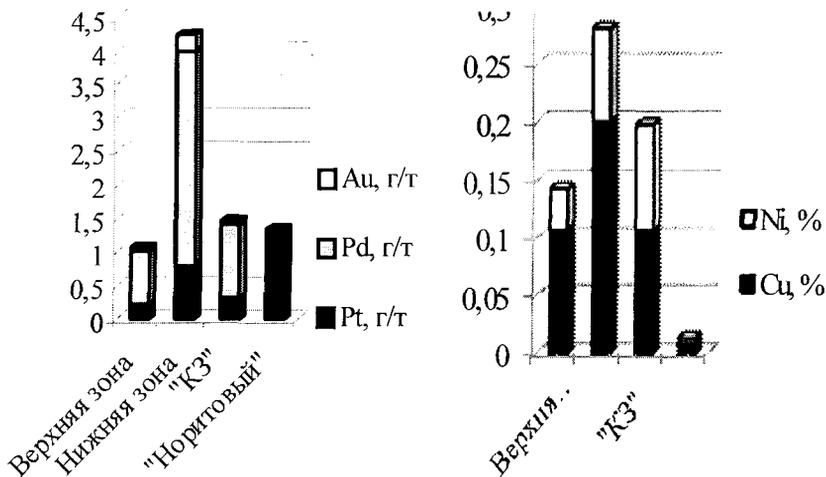


Рис. 4. Сравнительные блочные гистограммы распределения полезных компонентов по рудным уровням.

Таблица № 2  
Корреляционная матрица элементов участка Надежда (борт 2,5 г/т Pd условного)

	Pt	Pd	Au	Cu	Ni	S
Pt	1,00	0,97	0,92	0,79	0,68	0,69
Pd	0,97	1,00	0,93	0,84	0,66	0,72
Au	0,92	0,93	1,00	0,89	0,71	0,75
Cu	0,79	0,84	0,89	1,00	0,87	0,90
Ni	0,68	0,66	0,71	0,87	1,00	0,90
S	0,69	0,72	0,75	0,90	0,90	1,00

n=188  $p < 0,05$

Характер взаимосвязи элементов можно представить в виде дендрограмм (рис. 5). На графике видно, что среди элементов можно выделить две группы: группу ЭПГ и золота, и сульфидную группу, к которой можно отнести медь, никель и серу.

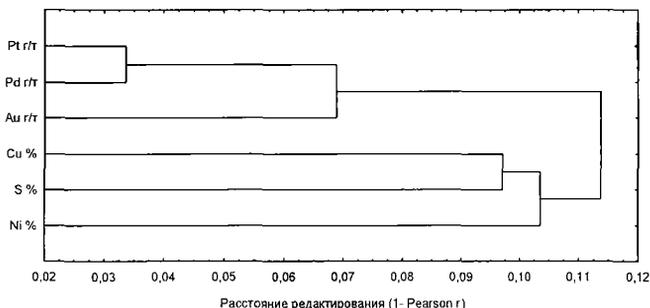


Рис. 5. Дендрограмма корреляционных связей между содержаниями химических элементов на участке «Надежда» (борт 2,5 г/т Pd условного)

Рудные уровни имеют ряд сходств и различий, которые позволяют предположить, что формированию уровня «Надежда» предшествовало становление уровней «КЗ» и «Норитового».

Рудные уровни «Норитовый» и «КЗ», как было ранее сказано, отличаются высокой изменчивостью петрографического состава и большими вариациями текстурно-структурных характеристик пород. Платинометальные горизонты, как правило, представляют собой то и дело выклинивающиеся зоны, состоящие из нескольких горизонтов, разделённых прослоями пустых пород. Эти структурные характеристики присущи всему массиву в целом. Кроме того, петрографический состав вмещающих руденение пород также характерен для соответствующих уровней расслоенных серий. Существенно иные структурные и минералогическо-химические особенности присущи рудоконтролирующему телу микрогаббро-норитов, к которому приурочен платинометальный уровень «Надежда».

Силлообразное тело, контролирующее рудные зоны платинометального уровня «Надежда», хорошо дифференцировано на микрогаббро-нориты и анортозиты, отличающиеся устойчивостью по простиранию и петрографической однородностью, резко отличающейся от значительной петрографической изменчивости пород массива. В ходе детальных исследований были выявлены секущие микрорасслоенность вмещающих пород контакты тела, интенсивные доконтактные изменения микрогаббро-норитов в области выклинивания в западной части массива (участок «Анортозитовый»), обнаруженной автором и наличие зон метасоматических изменений, прослеженных вдоль подошвы тела на незначительном расстоянии от контакта, во вмещающих габбро-норитах.

Эти факты могут свидетельствовать о том, что уровень «Надежда» сформировался в результате внедрения новой порции насыщенного флюидами расплава в остывающий массив. На это также могут указывать факты магматического брекчирования, установленные исследователями.

Однако исследования О.В. Казанова свидетельствуют о том, что формирование платинометального руденения за счет собственно расплава микрогаббро-норитов невозможно в силу дефицита масс. Этот факт свидетельствует о внутрикамерном происхождении вещества микрогаббро-норитов.

## Основные защищаемые положения

1. В Панаярви-Ципрингской субширотной рифтогенной зоне, рассекающей Карело-Кольский архейский кратон, расположен Олангский комплекс основных-ультраосновных массивов. В северо-восточной части комплекса находится Луккулайсваарская расслоенная габбро-норитовая интрузия. К ней приурочено промышленное платинометальное малосульфидное оруденение, которое представлено тремя рудными уровнями. Уровни образуют крутопадающие (60-70°) пластообразные тела, расположены этажно, залегают согласно с расслоенностью массива и ориентированы в субширотном направлении.

2. Рудная минерализация представлена висмута-теллуридами, арсенидами и антимонидами палладия. Установлена тесная связь платиноидов с сульфидной минерализацией, которая имеет ингерстиционный и тонко-вкрапленный характер и представлена пентландит-пирротин-халькопиритовой ассоциацией. Количество сульфидов обычно не превышает 1-2% и редко достигает 5%. Содержания платины в промышленно значимых рудах в среднем составляют 0,79 г/т; палладия – 3,21г/т; золота – 0,23 г/т; меди – 0,2%; никеля – 0,08%. В платинометальных горизонтах снизу вверх по разрезу наблюдается закономерное изменение платино-палладиевого отношения с постепенным увеличением в составе МПГ доли палладия: от существенно платиновых до платино-палладиевых руд (Pt/Pd от 40/1 до 1/5).

3. Формирование платинометальных уровней происходило в два этапа. Одновременно со становлением основной части массива были сформированы уровни «КЗ» и «Норитовый». Уровень «Надежда» сформировался в результате внедрения новой порции насыщенного флюидами расплава, сформировавшегося внутри материнской камеры, в остывающий массив.

4. Проведенные исследования позволили создать геологическую модель малосульфидного платинометального оруденения в пределах Карело-Кольского кратона. Модель может быть использована в прогнозно-поисковых исследованиях в Карело-Кольском регионе для обнаружения как вскрытых, так и не вскрытых на дневной поверхности платинометальных месторождений. Это позволит существенно увеличить минерально-сырьевой потенциал. Кроме того разработанная модель может быть использована для изучения подобной обстановки в пределах других архейских кратонов.

### **Дополнительные исследования**

Кроме основного направления работы были проведены дополнительные исследования, которые позволили оценить технологические свойства руд и разработать трехмерную компьютерную модель наиболее разведанного участка.

#### ***Ухудшение качества платинометаллических руд в связи с разложением сульфидов под действием гипергенных процессов.***

Технологические исследования показали, что коэффициенты извлечения полезных компонентов из руд участка «Надежда» составили 80-85%, а из руд участка «Клонинский» – 60-75%. Для определения направления геологоразведочных работ важной задачей стало изучение причин снижения обогатимости руд.

В результате изучения каменного материала установлена крайняя неоднородность распределения сульфидов в платинометаллических горизонтах участка «Клонинский». Сульфидная минерализация наблюдалась в нормальных для неизмененных руд количествах (0,5 – 5,0 %), представленная халькопиритом, пирротинитом и пентландитом; в заниженных количествах (<0,5 %), представленная преимущественно тончайшей вкрапленностью вторичных минералов меди – борнитом, халькозином, веллином и другими; и не наблюдалась вообще.

В результате лабораторных исследований было установлено, что на содержание платиноидов в рудах снижение сульфидной минерализации повлияло в незначительной степени. Также было установлено, что платинометаллические руды на участке «Клонинском», отличаются пониженным количеством сульфидной серы.

Проведенные исследования показали, что в областях проявления процессов, повлекших снижение обогатимости руд, происходит разложение сульфидных минералов, в сростании с которыми в пределах рудных горизонтов, находятся минералы элементов платиновой группы. Сульфиды играют важную роль в процессе обогащения, так как хорошо выделяются при флотации, их разложение в значительной степени приводит к снижению обогатимости.

Замещение халькопирита ковеллином и халькозином может свидетельствовать о разложении сульфидов в процессе гипергенеза. Для выявления достоверности этого суждения и выявления зон, подверженных гипергенезу был применен дискриминантный анализ данных опробования по часткам «Надежда» и «Клонинскому».

Для выявления неоднородностей распределения полезных компонентов, связанных с влиянием гипергенных процессов в платинометаллических рудах пробы с участка «Надежда», были дифференцированы по признаку «канавные» - «скважинные». Значениями, определяющими различия групп, были содержания Pt, Pd, Au, Al, Ba, Ca, Co, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, P, S, Sr, Zr. Перед применением дискриминантного анализа значения содержаний были стандартизированы. Это необходимо, поскольку содержания элементов представлены в различных единицах. Расчет дискриминантной функции производился в программе Statistica версии 6.0.

Постериорный анализ показал, что разделение аналитических данных по указанному признаку происходит с точностью 97,02%, т.е. из 149 анализируемых проб 2 пробы были ошибочно отнесены к несоответствующим им группам. Это указывает на наличие значительных различий между содержаниями указанных элементов в пробах, отобранных из рудного тела, выходящего на поверхность, и скважинных пробах, что говорит о значительном проявлении гипергенных процессов в приповерхностной части рудных тел.

Полученную дискриминантную функцию, можно применить и для других участков месторождения для определения степени влияния гипергенных процессов. Условившись, что группа проб «канавные» отражает пробы, в которых проявлено выветривание, а группа проб «скважинные» отражает пробы, в которых не проявлено, полученная функция была применена для участка «Клюнинский». Полученные данные вынесены на проекцию рудного тела на вертикальную плоскость (рис. 6). Полученное изображение показывает, что области проявления гипергенных процессов приурочены к приповерхностным участкам рудного тела и наиболее глубоко проникают по разломным зонам.

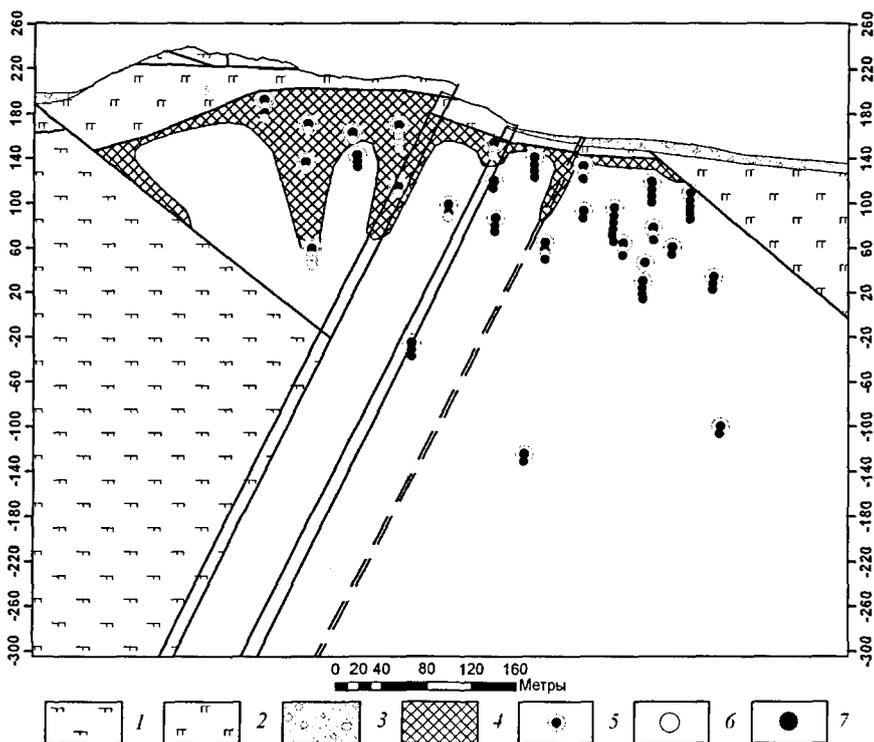


Рис. 6. Проекция на вертикальную плоскость восточного блока рудного тела участка «Клюнинский»: 1 – микрогаббро-нориты; 2 – габбро-нориты; 3 – четвертичные отложения; 4 – области проявления гипергенных процессов; 5 – скважины; 6 – пробы, относящиеся к группе «канавные»; 7 – пробы, относящиеся к группе «скважинные».

Судя по полученным данным руды участка «Клюнинского» более затронуты гипергенезом, чем другие участки, поскольку более трещиноватые. Разложение сульфидов в процессе пергенеза также могло сказаться на извлекаемости руд в пределах участка.

Установлено, что участки распространения руд с пониженным коэффициентом извлекаемости (участок «Клюнинский») пространственно связаны с зонами развития метасоматических процессов.

На территории массива, в пределах участка «Клюнинский» фиксировались редкие кварц-лишпатовые жилы и прожилки мощностью до 1 м, кварцевые жилы, сопровождающиеся зонами оплотнения вдоль контактов с вмещающими породами, а также кварц-карбонатные жилы. Кроме визуально наблюдавшихся кварца, калиевых полевых шпатов и карбоната, слагающих жилы, в породах массива в ходе петрографических исследований были определены минералы группы юрита, биотит и светлые слюды, которые могли образоваться в результате процессов метасоматического метасоматоза. Повышенные концентрации апатита, отмеченные на этом участке, как же могут быть связаны с дегазацией очага гранитной магмы, так как она содержит значительное количество хлора. Наличие Au – Cu минерализации выявленной в кварцевых метасоматитах также может свидетельствовать о проявлении кислого магматизма.

В целях выявления закономерностей пространственного распределения гидротермально-метасоматических минеральных ассоциаций было изучено более 6000 прозрачных шлифов, собранных за все годы исследований расслоенного массива. На основании этих исследований были составлены схемы распределения вторичных минералов. Особенно информативными в этом отношении стали схемы распределения апатита и плагиоклаза магнетитсодержащего (рис. 7, 8), максимумы которых тяготеют к восточной части рудопроявления (участок «Клюнинский»).

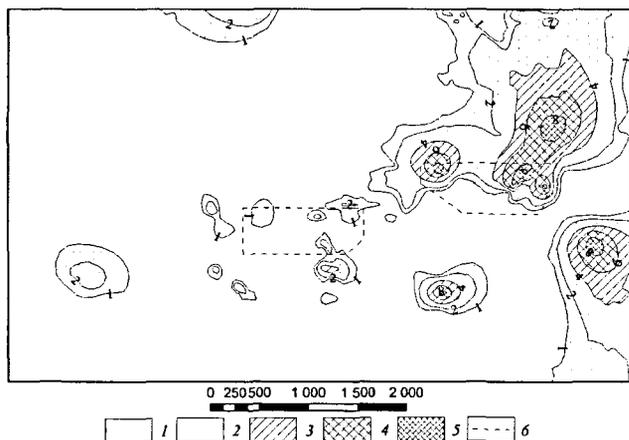


Рис. 7. Схема распределения апатита в пределах Луккулайсваарского месторождения: 1 – 1 зерно в шлифе; 2 – 2-3 зерна в шлифе; 3 – 4-5 зерен в шлифе; 4 – 6-7 зерен в шлифе; 5 – 8-9 зерен в шлифе; 6 – границы участков (участок «Надежда» (слева), участок «Клюнинский» справа).

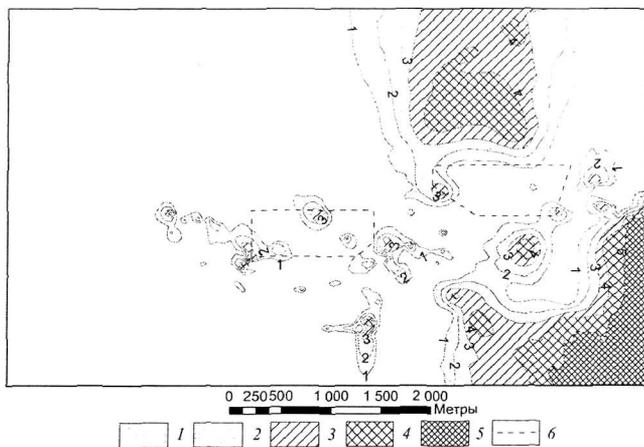


Рис. 8. Схема распределения плагиоклаза магнетитсодержащего в пределах Луккулайсварского месторождения: 1 – 1 зерно в шлифе; 2 – 2 зерна в шлифе; 3 – 3 зерна в шлифе; 4 – 4 зерна в шлифе; 5 – 5 зерен в шлифе; 6 – границы участков (участок «Надежда» (слева), участок «Клюнинский» справа)

Применительно к участкам рудопроявления можно подчеркнуть, что в пределах «Клюнинского» наблюдается значительное количество разрывных нарушений, по которым мог проникать кислый флюид, что в значительной степени отразилось на породах, вмещающих оруденение.

Петрографические исследования шлифов указывают на развитие метасоматических процессов, связанных как с основными, так и с агрессивными кислыми флюидами. Пространственно участки развития этих метасоматических процессов приурочены к ослабленным проницаемым разломным зонам, в пределах которых выявлены руды с пониженным коэффициентом извлекаемости платиноидов.

Таким образом, технологические исследования показали наличие участков с пониженными коэффициентами извлекаемости платиноидов. Эти участки приходятся на зоны интенсивного развития гипергенных процессов (площадные и разломные коры выветривания). Ослабленные проницаемые разломные зоны часто наследуют области развития метасоматических изменений. Руководствуясь результатами проведенных исследований можно минимизировать вложения средств в разведку месторождения, исключив участки, в пределах которых располагаются слабо обогатимые руды.

### *Трехмерное компьютерное моделирование*

С целью наиболее полного представления о геологическом строении и особенностях распределения полезных компонентов в рудах были созданы компьютерные трехмерные каркасные модели участка «Надежда» Луккулайсварского месторождения. С помощью этих моделей прояснены многие детали геологического строения, уточнено положение разрывных

рушений, произведен геостатистический анализ геологических и геохимических параметров, построены блочные модели, демонстрирующие распределение в пределах участка содержаний железных компонентов.

На основании первичных геологоразведочных данных о моделируемом объекте была создана база данных. База данных – это набор данных, состоящий из следующих файлов: файла координат устьев всех скважин и горных выработок; файла инклинометрии; файла геологической документации; файла данных опробования - представленных в табличной форме.

Построение модели топографической поверхности производилось посредством создания цифровой модели поверхности (ЦМП) по топографической базе данных, к цифровой поверхности были подгружены смоделированные в объеме скважины и канавы (рис. 9).

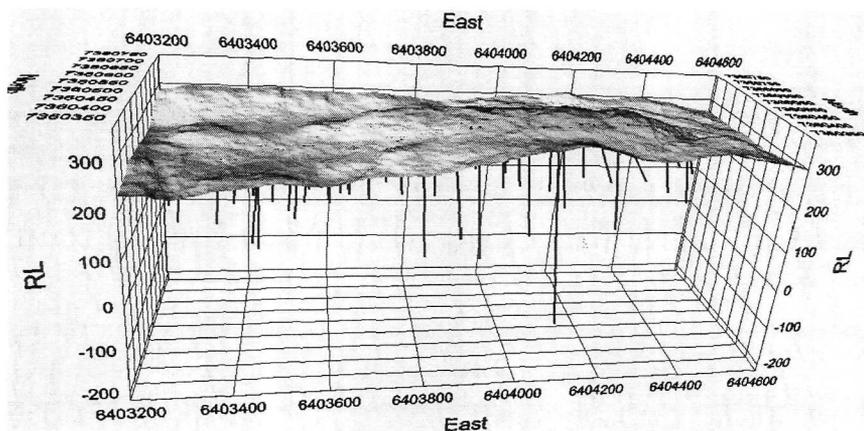


Рис. 9. Поверхность рельефа с подгруженными скважинами и канавами.

На основе файлов устьев скважин, канав, данных по их опробованию и файлу геологии, по буровым профилям, были созданы контуры геологических тел, таких как: разрывные нарушения, геологические разности пород, рудные тела.

Для построения каркасной модели были загружены все интерпретационные контура, созданные по разрезам буровых профилей, и соединены в единый и непрерывный каркас. Разломные границы контуров достигались пересечением каркасов тех или иных геологических тел, предварительно созданными, контурами разломов.

Каркасные модели всех геологических тел объекта были собраны в единую каркасную модель. Результатом трехмерного моделирования участка «Надежда» месторождения Луккулайсваара стали трехмерные геологическая (рис. 10) и рудная модели.

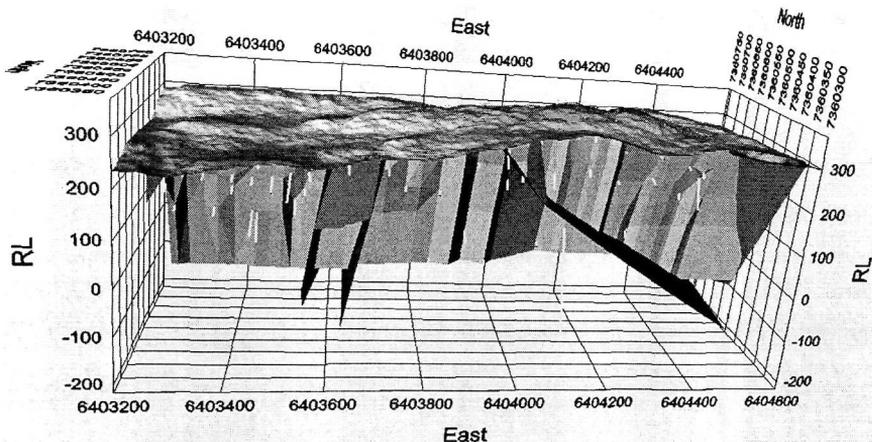


Рис. 10. Геологическая модель участка «Надежда»

Были созданы блочные модели рудных тел. В связи с тем, что способ добычи и производительность рудников для моделируемого объекта еще не определены, размер блока был выбран на основании геологических данных. С учетом средней мощности рудных тел равной 2-2,5 м, размер блоков выбран равным 2×2×2 м. Далее методом обратных расстояний интерполировались содержания полезных компонентов в пределах отдельных рудных тел (рис. 11).

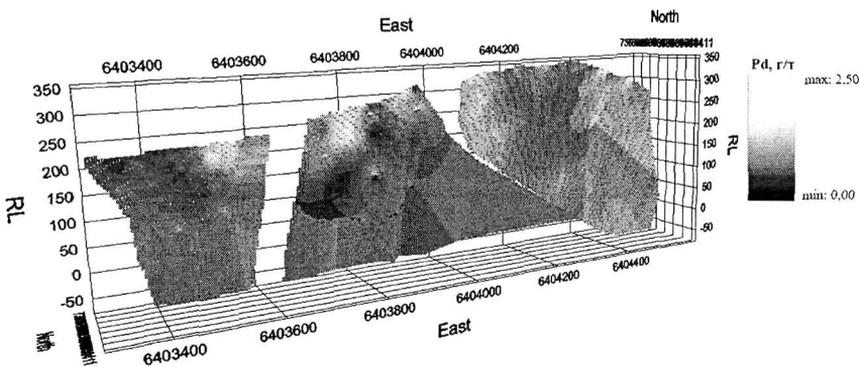


Рис. 11. Распределение палладия на участке «Надежда» рудопроявления Луккулайсваара.

Созданная модель показала, что оруденение представляет собой протяженные зоны, согласные с расслоенностью массива; позволила точнее выделить промышленные блоки; продемонстрировала благоприятность геоморфологических условий для открытой отработки месторождения; подготовила исходные данные для подсчета запасов.

**Расчет оптимальной разведочной сети на участке «Надежда» месторождения Луккулайсваара с применением статистических и геостатистических методов.**

Для большинства полезных ископаемых отнесение месторождений к той или иной группе регулируется «Методическими рекомендациями по применению классификации запасов полезных ископаемых». Однако для рудных месторождений металлов платиновой группы (МПГ), такой регламентирующий документ отсутствует, так как до недавнего времени, их коренные месторождения на территории СССР и затем России не разведывались.

Наиболее характерным аналогом Луккулайсваарского месторождения прошедшим робацию в государственной комиссии по запасам полезных ископаемых (ГКЗ) с поставленными балансом запасами является месторождение Вуручайвенч, расположенное в пределах анчегорского расслоенного массива. Оно также характеризуется «рифовым» пластовым типом атинометального оруденения, которое, в отличие от платинометалльных горизонтов месторождения Луккулайсваара, не имеет четкого литологического контроля. При оценке и звездке основной части этого месторождения использовалась сеть с квадратной ячейкой стороной 200м и 100м соответственно для запасов  $C_2$  и  $C_1$  и с ячейкой на участках детализации м.

В целях отнесения Луккулайсваарского месторождения к той или иной группе сложности по геологическому строению, на стадии оценки были рассчитаны статистические параметры, коэффициенты сложности геологического строения и рудоносности для бортовых содержаний палладия условного 2,68 г/т, 3,75 г/т и 4,82 г/т. Коэффициент сложности геологического строения определялся как отношение количества скважин пересекающих рудное тело к общему количеству скважин в пределах участка. Коэффициент рудоносности определялся как отношение суммы длин интервалов к суммарной длине пересечений рудной зоны, включая рудные и безрудные прослои. Расчет коэффициента вариации рассмотрен ниже. Полученные значения коэффициентов, разделяющих сложность геологического строения, отвечают значениям месторождений второй группы (табл. 3). Несмотря на выдержанные по простиранию и падению мощности рудных тел и содержания полезных компонентов в них, сложное строение разведываемых участков, обуславливает применять плотность разведочной сети, которая должна обеспечивать надежное деление геологических блоков.

Таблица 3

Параметры для определения группы сложности месторождения на участке Надежда

Расчетные параметры	Бортовое содержание Pd усл			II группа
	2,68 г/т	3,75 г/т	4,82 г/т	
Коэффициент рудоносности	0,89	0,91	0,77	0,7-0,9
Коэффициент сложности геологического строения	0,79	0,79	0,79	0,6-0,8
Коэффициент вариации мощности рудного тела	75,9	88,5	81,5	40-100%
Коэффициент вариации содержания палладия условного	59,4	51,7	48,7	40-100%

Характерной особенностью пластообразных платинометаллических рудных тел «рифового» типа является отсутствие ярко выраженной зональности и близкая изменчивость параметров руд, как по падению, так и по простиранию, в пределах всего платинометаллического горизонта, т.е. коэффициент анизотропии близок к 1. Это указывает на целесообразность применения квадратной разведочной сети.

На стадии оценки Луккулайсварского месторождения, учитывая особенности месторождений аналогов и индивидуальные особенности геологического строения, была принята квадратная сеть с величиной ячейки 80м для запасов категории C<sub>1</sub> со сгущением на отдельных участках до 40м.

Основываясь на полученных, в результате проведенных на участке «Надежда» геологоразведочных работ, аналитических данных, можно вычислить относительные погрешности средних содержаний палладия условного для каждого из блоков, рассчитав обратную математическому методу задачу. Расчет производился для трех тектонически-разобленных блоков участка «Надежда».

Относительная погрешность среднего ( $\delta_{отн}$ ) вычисляется по формуле:

$\delta_{отн} = t_{\alpha} \times V / \sqrt{N}$ , где  $t_{\alpha}$  – значение стандартного нормального распределения для доверительной вероятности  $\alpha$ ,  $V$  – коэффициент вариации,  $N$  – количество необходимых рудных пересечений, отвечающих заданным коэффициенту вариации и погрешности среднего при выбранной доверительной вероятности  $\alpha$ .

Пусть доверительная вероятность ( $\alpha$ ) будет равна 95%, тогда значение стандартного нормального распределения ( $t_{\alpha}$ ) будет равно: для блока 1 – 2,093 (19 рудных пересечений), для блока 2 – 2,131 (15 рудных пересечений), для блока 3 – 2,042 (30 рудных пересечений).

$V = 100 \times S / x_{ср}$ , где  $S$  – среднеквадратическое отклонение,  $x_{ср}$  – среднее содержание условного палладия

$S = \sqrt{\sigma}$ , где  $\sigma$  – дисперсия среднего

$\sigma = \sum (x_i - x_{ср})^2 / (n-1)$ , где  $x_i$  – содержание палладия условного в  $i$ -ом пересечении,  $n$  – количество рудных пересечений.

Вычисленные статистические параметры согласно описанным выше формулам необходимые для расчета относительных погрешностей средних содержаний палладия условного, для каждого из блоков, приведены в таблице 4.

Таблица 4

Статистические параметры блоков			
	Блок 1	Блок 2	Блок 3
n	19	15	30
$x_{ср}$	7,40	8,93	7,89
$\sigma$	8,52	16,77	16,19
S	2,92	4,10	4,02
V	39,43	45,84	51,03
$t_{\alpha}$	2,093	2,131	2,042

Чтобы проследить снижение достоверности определения средних содержаний по блоку, были считаны относительные погрешности средних содержаний палладия условного для каждого из ячеек при густоте разведочной сети 20×20, 40×40, 80×80, 120×120 и 160×160. Результаты приведены в таблице 5.

Количество необходимых рудных пересечений (N) было рассчитано по формуле:

$N = P/l^2$ , где P – площадь рудного тела в пределах блока, l – расстояние между пробами, а  $l^2$ , соответственно, – площадь элементарной ячейки разведочной сети.

Таблица 5

Таблица расчета относительных погрешностей средних содержаний палладия условного

l	Блок 1			Блок 2			Блок 3		
	P (м <sup>2</sup> )	N	$\delta_{отн}$	P (м <sup>2</sup> )	N	$\delta_{отн}$	P (м <sup>2</sup> )	N	$\delta_{отн}$
20	42631	106,58	7,99	40214	100,54	9,74	78940	197,35	7,42
40	42631	26,64	15,99	40214	25,13	19,48	78940	49,34	14,83
80	42631	6,66	31,97	40214	6,28	38,97	78940	12,33	29,67
120	42631	2,96	47,96	40214	2,79	58,45	78940	5,48	44,50
160	42631	1,67	63,95	40214	1,57	77,93	78940	3,08	59,34

Вычисленные погрешности средних для разведочных сетей с размерами ячейки 20×20, 40×40, 80×80 и 120×120 удовлетворяют достоверности категории запасов C<sub>1</sub>.

Кроме того, по окончании геологоразведочных работ, на данном участке к полученным данным был применен геостатистический анализ (или вариография), в результате чего была определена оптимальная плотность разведочной сети.

Вариограммы были построены для трех тектонически-разобнесенных блоков участка «Надежда» по платине, палладию, золоту, меди, никелю и сере. Кривые вариограмм позволили выделить ряд важных параметров: порог, зону влияния и эффект самородков (табл. 6). Вариограммы, рассчитанные по блокам 1 и 2, демонстрируют «ступенчатый» характер кривых – обусловлено малым объемом наблюдений. Судя по моделям этих вариограмм, зоны влияния важны в пределах 1 и 2 блоков составляют 48-49м. Кривая вариограммы блока 3 демонстрирует достаточно однородное распределение полезных компонентов, а зоны влияния скважин составляют 141м.

Таблица 6

Параметры всенаправленных вариограмм участка «Надежда» по палладию условному

	Эффект самородков	Порог	Зона влияния
Блок 1	0	29,6	48
Блок 2	0	12,3	49
Блок 3	3,3	4,4	141

Приведенные данные показывают, что следует учесть значения зон влияния скважин в пределах ячеек при определении оптимальных параметров разведочной сети. На основании геостатистического анализа можно рекомендовать квадратную разведочную сеть с величиной ячейки 120 метров, со сгущением отдельных участках до 50 – 60 метров.

В целом, проведенные математические и геостатистические исследования показывают достаточно схожие результаты. На основании которых можно заключить, что для дальнейшей

разведки Луккулайсваарского месторождения до категории С<sub>1</sub>, целесообразно использовать квадратную разведочную сеть с величиной ячейки 100 – 120 метров, со сгущением на отдельных участках до 50 – 60 метров. Эта более редкая сеть по сравнению с выбранной на этапе оценки позволит в значительной степени минимизировать затраты.

### **Заключение**

Проведенные исследования позволили достаточно полно охарактеризовать рудный объект Луккулайсваара с точки зрения его строения, закономерностей размещения рудных тел, минералогических особенностей руд, а также геохимических особенностей распределения полезных компонентов руд. Полученные характеристики можно использовать на других потенциально рудных платинометалльных объектах, связанных с расслоенными массивами северо-запада России.

### **Список работ, опубликованных по теме диссертации**

1. А.С. Монтин. Платиноносность расслоенного массива Луккулайсваара в Северной Карелии // «Молодые науки о земле». Материалы конференции РГГРУ. – М.: Изд-во ЗАО ИД Экономическая литература, 2008. – с.26-27.
2. А.С. Монтин. Платиноносность расслоенного массива Луккулайсваара в Северной Карелии // Материалы докладов XV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» / Отв. ред. И.А. Алешковский, П.Н. Костылев.— М.: Издательство МГУ; СП МЫСЛЬ, 2008. – с.11.
3. А.С. Монтин. Значение сульфидности платинометалльных руд месторождения Луккулайсваара при их обогащении // Материалы докладов XVI Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» / Отв. ред. И.А. Алешковский, П.Н. Костылев, А.И. Андреев. — М.: МАКС Пресс, 2009. – с.6-7
4. А.С. Монтин. Влияние метаморфических процессов на технологические качества руд месторождения Луккулайсваара // Планета Земля: актуальные вопросы геологии глазами молодых ученых и студентов. Материалы российской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной «Году Планеты Земля», г.Москва, том 3. – М.: Изд-во МГУ, 2009. – с.28-33.
5. **Монтин А.С. Платиноносность расслоенного массива Луккулайсваара в Северной Карелии. Вестник Московского университета. Сер.4. Геология. 2009. №4. С. 60-62**
6. **Montin A. S. Platinum Potential of the Lukkulajswaara Layered Massif in North Karelia. ISSN 0145\_8752, Moscow University Geology Bulletin, 2009, Vol. 64, No. 4, pp. 262–264.**

Подписано в печать 25.09.09  
Формат 60x88 1/16. Объем 1 п.л.  
Тираж 100 экз. Заказ № 844  
Отпечатано в ООО «Соцветие красок»  
119991 г.Москва, Ленинские горы, д.1  
Главное здание МГУ, к. А-102