

На правах рукописи

Митрофанов Александр Феликсович

**ГЕОЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ И ЭКОНОМИКА
ФЕДОРОВОТУНДРОВСКОГО Pt-Pd МЕСТОРОЖДЕНИЯ (КОЛЬСКИЙ
П-ОВ)**

Специальность - 25.00.11. Геология, поиски и разведка твердых полезных
ископаемых, минерагения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва 2013

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

Научный руководитель: доктор геолого-минералогических наук
Старостин Виктор Иванович

Официальные оппоненты: **Дистлер Вадим Вадимович**,
доктор геолого-минералогических наук,
Институт геологии рудных месторождений,
петрографии, минералогии и геохимии – ИГЕМ РАН,
главный научный сотрудник

Монтин Андрей Сергеевич,
кандидат геолого-минералогических наук,
ООО «Рио Тинто Алмазпоиск»,
проектный геолог

Ведущая организация: Институт геологии Карельского научного центра РАН,
(г. Петрозаводск)

Защита состоится «4» октября 2013 г. в 16:00 часов в ауд. 415 на заседании
диссертационного совета Д 501.001.62 Геологического факультета Московского
государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 1192324, Москва,
ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, Геологический факультет

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале Отдела диссертаций
Фундаментальной библиотеки Московского государственного университета имени М.В.
Ломоносова (Ломоносовский просп., 27).

Автореферат разослан «2» сентября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 501.001.62
доктор геолого-минералогических наук

Н.Г. Зиновьева

Введение

Актуальность работы

Металлы платиновой группы являются важнейшим стратегическим сырьем и основой для наиболее перспективных направлений в науке и промышленности, в связи с чем потребность в их обнаружении представляет очень важную задачу для геологической науки. За последние годы на территории Кольского полуострова, Карелии и Восточной Финляндии был выявлен ряд платино-палладиевых (с медью и никелем) месторождений и рудопроявлений малосульфидного типа в расслоенных интрузивах. Крупнейшим из этих объектов является Федоровотундровское месторождение, разработка которого планируется.

Цель работы – выявление особенностей геологического строения, геохимического состава руд, изучение структурных и морфологических особенностей рудных тел и обоснование экономической эффективности освоения Федоровотундровского месторождения Pt-Pd руд.

Задачи исследования:

1. Характеристика Федоровотундровского месторождения на основе геолого-геофизических, геохимических и изотопно-геохронологических данных.
2. Исследование рудных парагенезисов с помощью микрозонда и масс-спектрометрии в индуктивно-связанной плазме с лазерной экстракцией (LA-ICP-MS).
3. Трехмерное моделирование и детальные геостатистические исследования распределения полезных компонентов в пределах Федоровотундровского месторождения. Обоснование применения методов индикаторного кригинга.
4. Проведение экономических исследований и обоснование рентабельности, экономической устойчивости и эффективности инвестиций в Федоровотундровское месторождение.

Фактический материал и методы исследования

В основу диссертации положен фактический материал, собранный автором в полевых условиях и при работе с керновым материалом в 2007-2009 гг., а также - любезно предоставленный компанией ЗАО «Федорово Ресурсес» (с небольшими изменениями в содержаниях полезных компонентов в рудах для соблюдения требований конфиденциальности). В качестве исходных данных для моделирования строения месторождения и проведения расчетов его параметров были использованы данные разведочного бурения: участок Аленка – 49 скважин, уч. Большой Ихтегипахк – 287 скважин, уч. Пахкварака – 219 скважин. Общее количество проб в использованной базе данных составило приблизительно 90 тыс. В процессе разведки автором было задокументировано несколько тысяч погонных метров бурения как в полевых, так и в камеральных условиях, отобрано порядка 5-7 тысяч проб и полностью задокументировано 4 скважины геотехнического бурения. Пробы были проанализированы в

лаборатории Алекс Стюарт Геоаналит (Москва) атомно-адсорбционным методом для определения содержаний всех полезных компонентов: палладия, платины, золота, меди и никеля. Для геохимических исследований автором дополнительно было изучено 25 аншлифов и 20 шлифов, выполнено 54 микрозондовых анализа и 63 масс-спектрометрических анализа в индуктивно-связанной плазме с лазерной экстракцией (LA-ICP-MS). Для исследования распределения полезных компонентов в сульфидных парагенезисах был использован микрозонд CAMECA SX-100, а масс-спектрометрические исследования проводились на масс-спектрометре высокого разрешения Element-XR с ионизацией в индуктивно-связанной плазме LA-ICP-MS с лазером UP-213 в Лаборатории геохронологии и геохимии изотопов ГЕОХИ РАН.

Для моделирования также были использованы геофизические данные наземной магнито- и электроразведки. На основании геостатистических исследований были установлены основные законы распределения полезных компонентов в пределах месторождения, построены трехмерные каркасные и блочные модели участков Большой Ихтегипахк, Пахкварака и Аленка. На основании всех полученных данных автором был проведен экономический анализ рентабельности отработки месторождения. Для трехмерного моделирования была использована интегрированная программная среда DataMine Studio 3, в качестве вспомогательных программ широко использовались AutoCad, ArcGis, Statistica, Microsoft Word, Excel и Access.

Научная новизна

1. На основании геологических и изотопно-возрастных определений установлено, что Федоровотундровское месторождение сульфидных комплексных Cu-Ni-ЭПГ руд и вмещающие его базиты бонинитовой природы являются наиболее ранними образованиями Кольского пояса расслоенных базитовых интрузивов сумия по сравнению с более поздними рифовыми малосульфидными Pt-Pd рудами, связанными с базитами с анортозитовым трендом дифференциации.
2. Впервые посредством использования метода лазерной абляции (лазер UP-213) на масс-спектрометре высокого разрешения Element-XR с ионизацией в индуктивно-связанной плазме LA-ICP-MS были проведены детальные исследования распределения благородных и редких металлов в сульфидных парагенезисах Федоровотундровского месторождения.
3. На основании количественных геохимических данных и анализа распределения элементов в пределах сульфидных парагенезисов рассчитаны температура и фугитивность серы в процессе сульфидного рудообразования.
4. На основании большого количества буровых данных, согласующихся с размерами оптимальной разведочной сети, в

программной среде Datamine Studio 3 созданы трехмерные каркасные и блочные модели месторождения, адекватно отражающие его структуру.

5. Впервые геостатистическими методами изучены основные законы распределения полезных компонентов в пределах месторождения.
6. Произведен новый оперативный перерасчет экономической эффективности освоения Федоровотундровского месторождения (по состоянию на конец 2012), проведен сопутствующий анализ экономической устойчивости проекта его обработки.
7. Обоснованы методологические преимущества применения индикаторного кригинга при моделировании Федоровотундровского месторождения, в частности – предложено новое решение проблемы искусственно заниженных содержаний.

Практическая значимость.

1. Установление пространственно-временного положения сульфидных Co-Cu-Ni (с ЭПГ) месторождений в бонинитовых породах и рифовых малосульфидных Pt-Pd месторождений в лейкогаббро-норит-анортозитовых породах имеет важное значение для базовых поисковых характеристик, связанных с особенностями рудномагматических процессов в базитовых обширных изверженных провинциях.
2. Полученные геохимические данные позволяют определить положение основных полезных компонентов (Pd, Pt, Au, Cu, Ni и др.) в главных минеральных сульфидных фазах, составить представление о термодинамических условиях рудообразования, что имеет важное значение для выбора наиболее оптимальной технологической схемы обогащения.
3. Результаты проведенного трехмерного моделирования и подсчета запасов свидетельствуют об экономической эффективности освоения месторождения в условиях текущей рыночной конъюнктуры и демонстрируют хорошие показатели экономической устойчивости проекта, что является дополнительным плюсом для принятия решения об освоении месторождения.
4. Разработанная методология применения индикаторного кригинга позволяет значительно увеличить представительность результата подсчета запасов и решить проблему заниженных содержаний, получаемых в результате применения обычного кригинга.

Защищаемые положения.

1. На основании геологических, петрологических и изотопно-возрастных данных установлено, что Федоровотундровское месторождение сульфидных комплексных Cu-Ni-ЭПГ руд является специфическим образованием в сравнении с мончегорским контактовым типом сульфидных Co-Cu-Ni руд (с ЭПГ) в

бонинитоподобных базитах и западнопанским типом рифовых малосульфидных Pt-Pd месторождений в породах с анортозитовым трендом дифференциации.

2. В результате изучения количественного распределения полезных компонентов в сульфидных ассоциациях было установлено, что Pt-Pd минерализация тяготеет к пентландитовой, а Au – к халькопиритовой минеральным фазам, при этом температура окончания минералообразования рудных сульфидных ассоциаций определена в 510 °С, а логарифм фугитивности серы равен -4.36.
3. Проведенный экономический анализ показал высокую степень рентабельности Федоровотундровского месторождения в условиях текущей рыночной конъюнктуры. Проект демонстрирует быструю окупаемость вложенных инвестиций (3 года), высокие значения чистой дисконтированной прибыли (3.5 млрд. долл. США) и хорошую степень устойчивости основных экономических параметров (например, значение внутрифирменной нормы прибыли IRR равно 57 %).

Апробация

Результаты работы представлены на следующих конференциях:

1. Всероссийская научная конференция с международным участием «Информационные технологии в горном деле», Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, 2011 г.
2. XXII Молодежная научная конференция, посвящённая памяти чл.-корр. АН СССР К.О. Кратца «Геология, геофизика и геоэкология: исследования молодых», г. Апатиты, 2011 г.
3. Международная конференция «Рудный потенциал щелочного, кимберлитового и карбонатитового магматизма» г. Минск, Белорусия, 2011.
4. XXIII Молодежная научная конференция, посвящённая памяти чл.-корр. АН СССР К.О. Кратца «Актуальные проблемы геологии докембрия, геофизики и геоэкологии», г. Петрозаводск, 2012 г.
5. Международная конференция «Рудный потенциал щелочного, кимберлитового и карбонатитового магматизма», г. Судак, Украина, 2012 г.
6. Результаты выполненной работы изложены в отчетах и в публикации по проекту РФФИ офи.м № 13-05-12055.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, включая 4 статьи – в журналах, входящих в перечень рекомендованных ВАК.

Объем и структура работы

Диссертация, объемом 134 страницы, состоит из введения, трех частей, заключения и списка использованных источников, содержит 19 таблиц и 42 иллюстрации.

Благодарности

Автор выражает искреннюю признательность профессору, доктору геолого-минералогических наук Старостину В.И. за научное руководство проведенными исследованиями; академику РАН, доктору геолого-минералогических наук Когарко Л.Н. за большую консультационную помощь в геохимической части работы и за содействие в проведении микрозондовых и масс-спектрометрических анализов; академику РАН, доктору геолого-минералогических наук Митрофанову Ф.П. за разносторонние консультации в области региональной геологии и металлогении Кольского региона; кандидату геолого-минералогических наук Лобову С.Г. за консультационную помощь и предоставленные данные для моделирования и экономической оценки; Сенину В.Г. за помощь в осуществлении микрозондовых исследований; кандидату химических наук Аносовой М.О. за помощь в осуществлении масс-спектрометрических анализов и содействие в интерпретации результатов; доктору геолого-минералогических наук Костицину Ю.А. за консультацию и предоставление возможности использования современной аналитической аппаратуры. Особую благодарность автор выражает коллективу Кафедры геологии, геохимии и экономики полезных ископаемых Геологического ф-та МГУ им. М.В. Ломоносова за проведенные учебные годы в студенчестве и аспирантуре, а также за ценные рекомендации по проделанной работе.

Содержание работы

Во *введении* обоснована актуальность темы диссертации сформулированы цель и решаемые задачи, отмечена научная новизна, практическая значимость работы, сформулированы главные защищаемые положения.

Часть I. Геологическое строение Федоровотундровского рудоносного базитового массива

Федорово-Панский интрузивный комплекс, в состав которого входит Федоровотундровский массив с его месторождением Cu-Ni-ЭПГ руд, расположен в восточной, Кольско-Лапландско-Карельской части Балтийского щита, сложенной архейскими мигматитами высокометаморфизованных пород и гнейсо-гранитами в основании и включенными в них энсиалическими раннепротерозойскими рифтогенными поясами, выполненными осадочно-вулканогенными толщами сумия, сариолия, ятулия, дайковыми сериями, и многочисленными массивами интрузивных пород пироксенит-норит-габбро-анортозитовой формации.

Сложный Федорово-Панский интрузивный массив этой формации залегает в северном контакте Имандра-Варзугского палеорифтогенного пояса, имеет эруптивные контакты с подстилающими архейскими гнейсами, мигматитами, амфиболитами и гранитами на севере и перекрывается осадочно-вулканогенными породами верхней половины сумия на юге (рис. 1).



Рис. 1. Геологическая схема строения платиноносного расслоенного Федорово-Панского интрузивного комплекса (Субботин и др., 2012)

В современном эрозионном срезе комплексный интрузив протягивается более чем на 80 км при ширине до 6-7 км. Он имеет плитообразную форму, вытянут в северо-западном направлении, погружается на юго-запад под углом в 30° и разобчен зонами поперечных разломов на крупные блоки, которые, в силу существенных различий в строении, составе и возрасте формирования, рассматриваются в настоящее время исследователями как самостоятельные интрузивные камеры (Грошев, 2010) (рис. 1). С востока на запад в строении массива выделяется Восточно-Панский блок, имеющий гетерогенное латеральное строение, в разрезе которого преобладают габбро, а в нижней части выявлено присутствие расслоенного горизонта с преобладающими лейкогаббро и анортозитами, содержащего промышленное рифовое Pt-Pd оруденение. Следующим к западу является Западно-Панский блок, который является самой мощной и хорошо изученной частью массива, сложенный в основном габбро-норитами. В его пределах выделяются два основных расслоенных горизонта (рифа), содержащих Pt-Pd малосульфидное промышленное месторождение Киевей: верхний (ВРГ) и нижний (НРГ). Самым западным является рассматриваемый подробнее ниже Федоровотундровский блок ультраосновных и основных пород. От Западно-Панского блока он отделен мощной Ластьяврской зоной разломов. В целом, Федорово-Панский массив продолжается на глубину 4-5 км, что установлено по геофизическим данным (Седых и др., 1998). Породы массива являются слабометаморфизованными. Повышение метаморфизма устанавливается только в зонах нижних контактов, где распространены слабосульфидизированные эндоконтактовые плагиоклаз-амфиболовые сланцы.

Форма Федоровотундровского массива по геофизическим и буровым данным считается лополитообразной. В его нижней части выделяется зона

такситовых габбро-норитов, мощность которой возрастает в восточном направлении от 30 до 300 м. Породы обладают характерной текстурой, названной крупнопятнистой (Schissel et. al, 2002). Их перекрывают породы зоны мезо и меланократовых мелкозернистых норитов (pbCa) и плагиопироксенитов (bCr) (в работе здесь и ниже используются буквенные обозначения кумулусных минералов). Мощность этой зоны достигает 200 м. В нижней части этой зоны установлены эруптивные брекчии, ксенолиты которой представлены пироксенитами, гарцбургитами, норитами и габбро-норитами, цементированные такситовыми габбро-норитами. Остальная основная часть разреза Федоровотундровского массива сложена мощными (около 1000 м) габбро-норитами (pbaC) и габбро (pCa, paC). В этих породах встречаются прослойки сингенетических с ними лейкократовых габбро и анортозитов (Грошев, 2010). Таким образом, общий разрез массива состоит из более ранней грубо расслоенной серии и более поздних пород, в целом, габбро-норитового состава. Необходимо отметить, что многие участки зоны такситовых габбро-норитов, наиболее обогащенные рудными компонентами, часто имеют пегматоидное строение, свидетельствующее об обогащенности этих пород летучими компонентами. По изотопно-возрастным данным (U-Pb изохронный метод по цирконам и бадделиитам – Bayanova et. al, 2009) основная часть массива сформирована в период 2526-2507 млн. лет, а оруденелые такситовые габбро-нориты нижней зоны формировались в интервале времени 2493-2485 млн. лет. На основании этих изотопно-возрастных данных и наличия эруптивных взаимоотношений установлено, что породы такситовой зоны и расположенное в них Cu-Ni-ЭПГ сульфидное Федоровотундровское месторождение являются не донным (базальным) образованием единой интрузивной камеры, а более поздней оруденелой габбро-норитовой интрузией, подстилающей более древний расслоенный массив (Schissel et.al., 2002; Дубровский, Рундквист, 2008; Грошев, 2009).

Для зоны такситовых габбро-норитов характерна текстурная неоднородность, выраженная в пестром чередовании участков пород разной зернистости (от мелкозернистых до пегматоидных), реже – в изменчивости минерального состава. Наиболее ярко эта неоднородность проявлена в верхних частях зоны, где повсеместным распространением пользуются оруденелые крупнозернистые и пегматоидные разности, а также участки, сложенные гарцбургитами, пироксенитами и базитами. Последние чаще всего являются оруденелыми ксенолитами пород ранней фазы в более поздних рудоносных габбро-норитах. В составе пород зоны наибольшим распространением пользуются плагиоклаз-бронзитовые кумулаты с интеркумулусным авгитом, встречаются также ультрамафические породы с оливином в кумулусе, отвечающие по составу гарцбургитам. Таким образом, главными минералами пород зоны являются плагиоклаз, бронзит и авгит, а второстепенными и аксессуарными – кварц, апатит и гранат. Вторичные минералы представлены амфиболами, минералами группы эпидота, тальком, хлоритом, карбонатами,

иногда, серпентином. Рудообразующие сульфидные минералы будут описаны ниже.

Механизм двухфазного становления Федоровотундровского интрузива на основе геологических данных недавно был обоснован Н.Ю. Грошевым (Грошев, 2010). В начальную стадию (А) происходило заполнение магматической камеры первым расплавом. В результате гравитационного осаждения минералов первой фазы кристаллизации формировались ультрамафические породы в основании разреза. Следующая стадия (Б) характеризуется образованием габбровой и габбро-норитовой зон с участками более тонкого расслоения и появления в них лейкогаббровых и анортозитовых пород. В этих лейкократовых прослоях – зародышах рифовых горизонтов - результаты анализов показывают незначительное обогащение пород элементами Pt и Pd. В стадию интрузии второй фазы (В) произошло внедрение в кристаллизующиеся породы основания ранней серии новых порций расплава, более обогащенного серой и летучими, в результате чего происходило брекчирование, перекристаллизация ранних пород расслоенной серии и их обогащение рудными компонентами. Результат этих процессов представлен в зоне такситовых габбро-норитов в виде ксенолитов различных размеров и даже провесов кровли размером до 100 м. Эта часть, обогащенная ксенолитами, является наиболее богатой частью Федоровотундровского месторождения (рис 2).

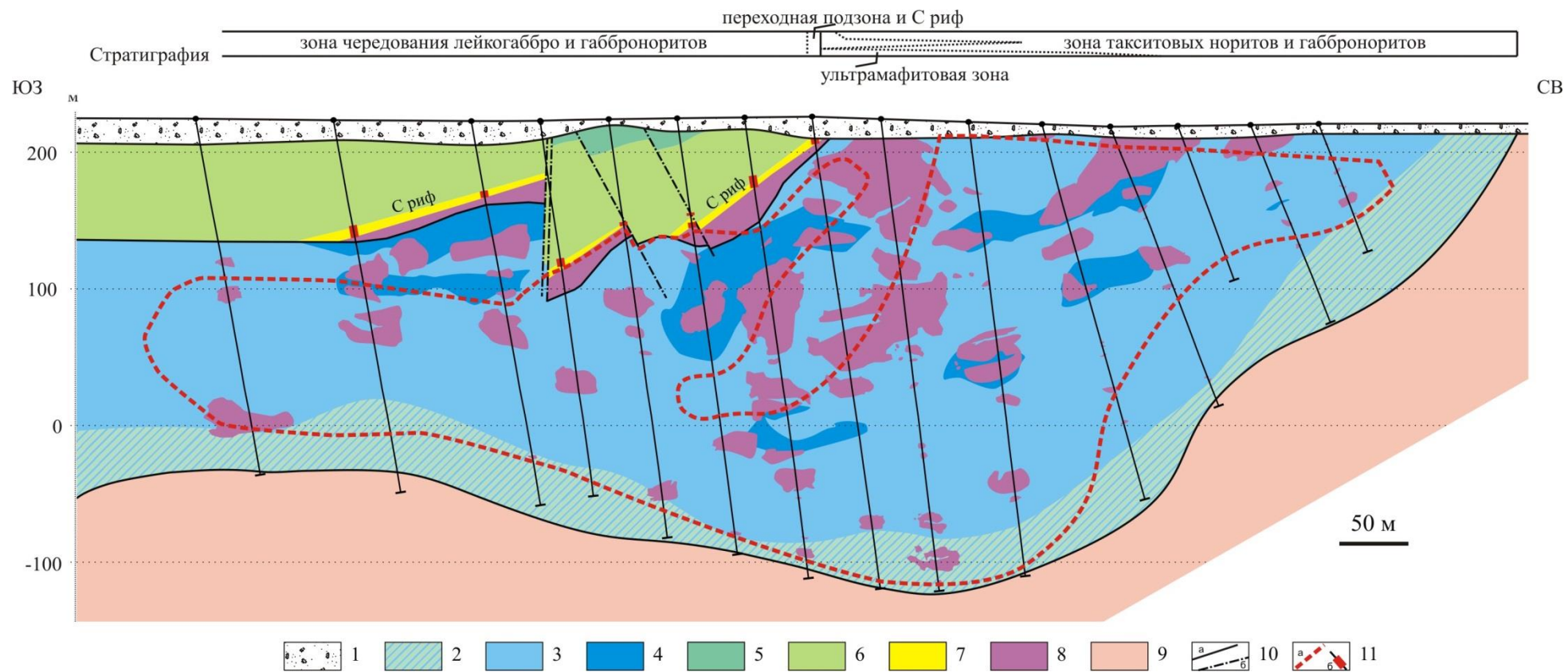


Рис. 2. Геологический разрез через Федоровотундровское месторождение (Грошев, Савченко, 2011)

Условные обозначения: 1 – рыхлые моренные отложения; 2 – 4 породы краевой серии: 2 – такситовые метагаббронориты, 3 – такситовые габбронориты с подчиненными плагиопироксенитами bC , 4 – меланократовые такситовые нориты и габбронориты, насыщенные мелкими обломками плагиопироксенитов; 5 – 8 расслоенная серия: 5 – габбронориты $rabC$, 6 – лейкогаббро $pCab$, 7 – переходная подзона: чередование плагиоклазовых гарцбургитов oC , троктолитов poC и лейкогаббро pC , 8 – плагиопироксениты bC с подчиненными оливковыми пироксенитами bC и гарцбургитами obC ; 9 – архейские гнейсы; 10 – важнейшие геологические границы (а) и разломы (б); 11 – интервалы ЭПГ-минерализации контактового (а) и рифового (б) типа.

В последние годы для Кольско-Лапландско-Карельской провинции разрабатываются представления о том, что она является существенной частью Восточно-Скандинавской базитовой обширной изверженной провинцией (ВСкБОИП) (Митрофанов Ф.П., 2012). Для ее магматизма характерна длительность и многофазность формирования интрузивных массивов, многие из которых являются расслоенными и рудоносными. Федорово-Панский комплекс является частью Кольского пояса раннепротерозойских расслоенных базитовых интрузивов. Формирование пояса, состоящего из осадочно-вулканогенных пород сумия, сариолия и ятулия, роев даек и многочисленных интрузивов ультрабазит-базитового состава, по данным изотопно-возрастных определений, происходило пульсационно в интервал времени 2530-2400 млн. лет. Соответственно, формирование Федоровотундровского массива в интервалах 2526-2507 и 2493-2485 млн. лет представляет собой ранние интрузивные фазы этого магматизма. При этом известно, что в таких расслоенных базитовых интрузивах по всему миру наиболее ранние фазы являются по составу бонинитовыми (Alapieti, 1982; Налдретт, 2003; Шарков, 2006) и наиболее часто обогащенными сульфидами меди, никеля и кобальта в ассоциации с платиновыми и палладиевыми минералами, а поздние фазы – часто лейкогаббровые и анортозитовые с малосульфидным Pt-Pd оруденением (Митрофанов Ф.П., 2006). Так, в Кольском регионе самый ультраосновной (перидотиты, нориты, габбро-нориты) и ранний (2505-2500 млн. лет) Мончегорский массив преимущественно бонинитовой природы содержит знаменитые Co-Cu-Ni сульфидные месторождения с платиноидами, а наиболее поздние (2470-2450 млн. лет) существенно анортозитовые рифы Западно-Панского массива известны своими малосульфидными Pt-Pd залежами (месторождение Киевей). В этом ряду Федоровотундровское месторождение (2493-2485 млн. лет) комплексных Cu-Ni-ЭПГ руд является рудно-магматической системой, более близкой к сульфидному бонинитовому мончегорскому типу, чем к малосульфидному анортозитовому западно-панскому.

Часть II. Минералого-геохимические особенности оруденения Федоровотундровского месторождения

В пределах Федоровотундровского месторождения установлены несколько морфологических типов минерализации: пользующийся наибольшим распространением вкрапленным, реже встречающиеся гнездово-вкрапленный и жильный, определенный в единичных случаях. Общая мощность минерализованных пород колеблется от 80 до 200 м, достигая наибольших значений на участках Малый и Большой Ихтегипахк.

Зоны сульфидной минерализации образуют согласные с общим простиранием пород массива пластообразные и линзоподобные залежи,

мощность которых колеблется от первых метров до 50-60 м, которые разделяются прослоями практически пустых пород. Количество сульфидов в минерализованных прослоях колеблется в пределах 0.2-5 %, достигая в ряде случаев значений в 10 и даже 20 %.

Сульфидная минерализация представлена тремя минеральными типами: пирротиновым, пирротин-халькопиритовым и пентландит-халькопирит-пирротиновым. Первый наиболее распространен в пределах участков Малый, Средний и Большой Ихтегипахк. Пирротин-халькопиритовый тип является вторым по распространенности после пирротинового и проявлен в основном в средней и верхней частях разреза минерализованной зоны участков Большой Ихтегипахк и Пахкварака. В нижней же ее части наибольшим распространением пользуется пентландит-халькопирит-пирротиновый тип. Комплексная ЭПГ-минерализация тяготеет преимущественно к пентландит-халькопирит-пирротиновому минеральному типу.

Наиболее масштабная в Федоровотундровском массиве комплексная минерализация выявлена в его восточной части, на участке Большой Ихтегипахк, где она практически не выходит за пределы зоны такситовых габбро-норитов. Явного литологического контроля распределения платинометальной минерализации выявлено не было, границы рудной зоны могут быть определены только опробованием. Стоит отметить только то, что существенно габбро-норитовые участки часто оказываются более платиноносными, чем породы захваченных эруптивных брекчий.

В рамках настоящей работы были детально исследованы три пробы из различных участков месторождения: BGF-237-132 из габбро-норитов участка Большой Ихтегипахк; BGF-487-50.5 и BGF-495-76.5 из габбро-норитов участка Пахкварака. Для исследований были изготовлены полированные пластинки для анализа образцов на микрозонде CAMECA SX-100 и посредством лазерной абляции in-situ ICP-MS с индуктивно связанной плазмой.

На основании всех полученных результатов оказалось возможным оценить распределение всех элементов в каждом из минеральных типов, рассчитать соответствующие коэффициенты сокристаллизации, произвести расчеты значений фугитивности серы.

Распределение элементов в пределах основных минеральных фаз представлено в виде круговых (рис. 3-6) диаграмм, иллюстрирующих качественное сродство каждого компонента к пентландиту, халькопириту и пирротину.

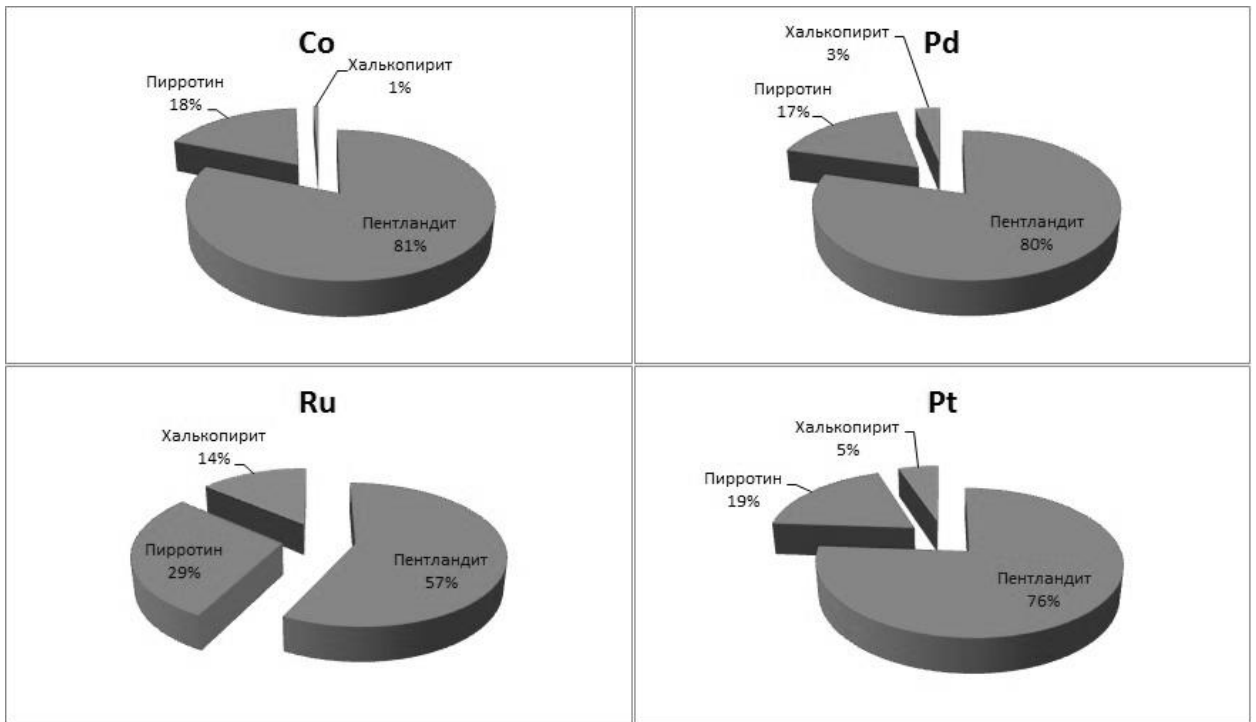


Рис. 3. Распределение элементов, имеющих средство к пентландиту, среди основных минеральных фаз

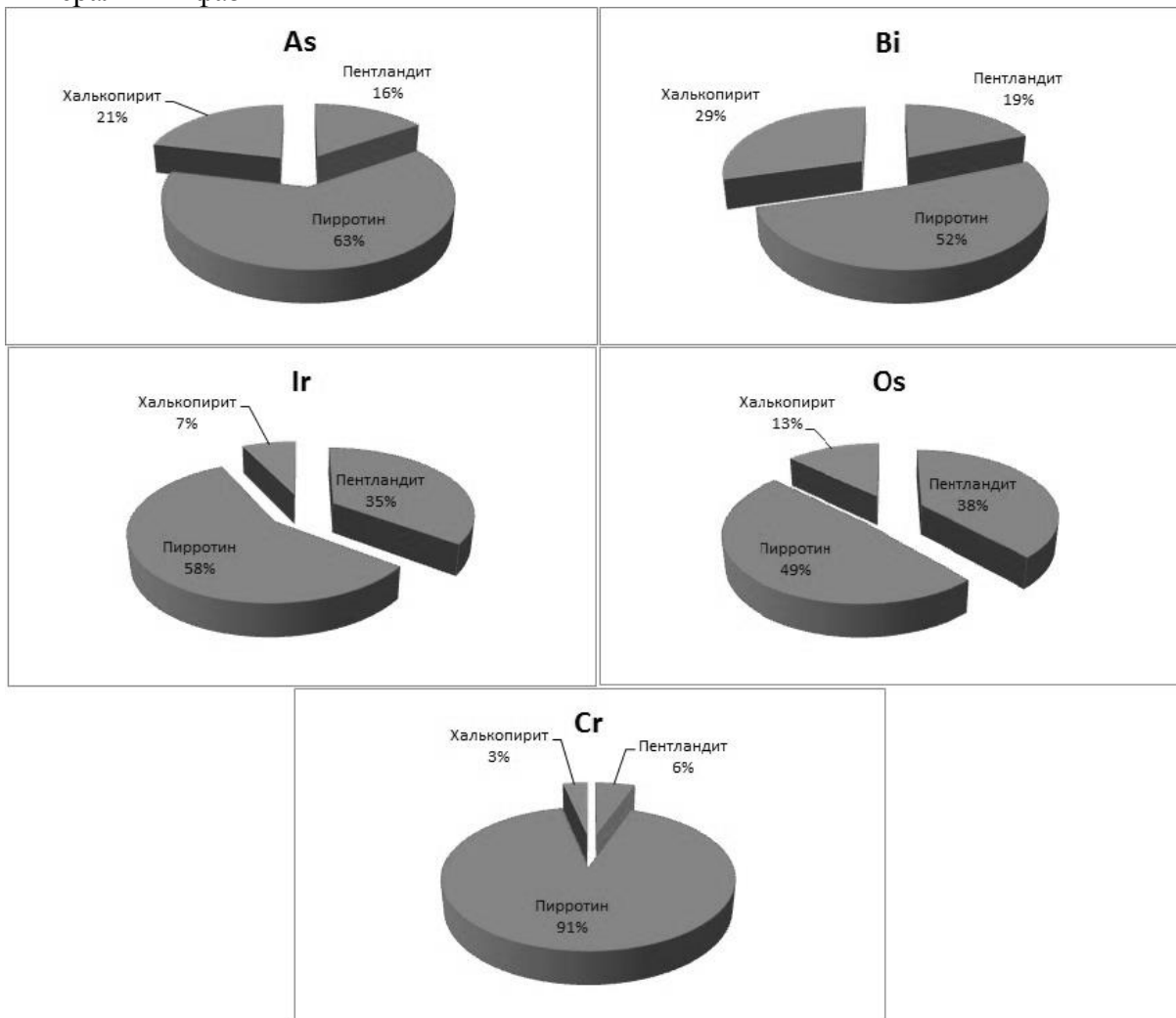


Рис. 4. Распределение элементов, имеющих средство к пирротину, среди основных минеральных фаз

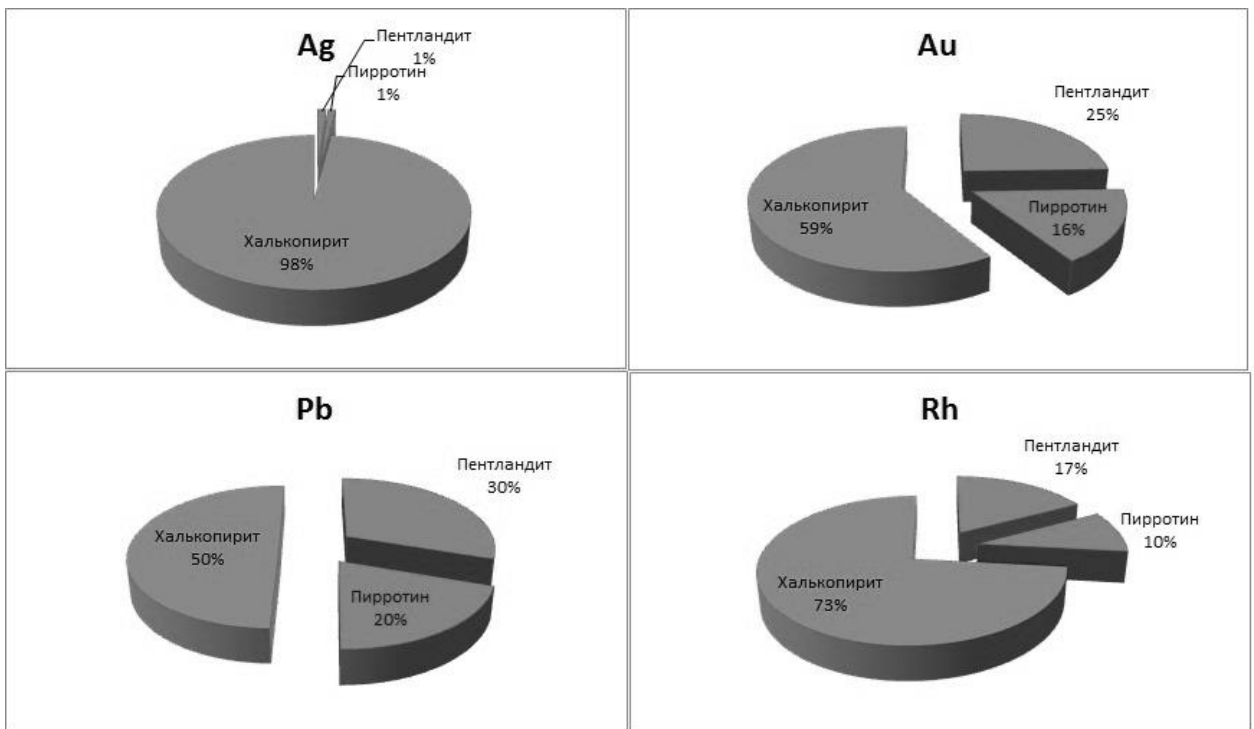


Рис. 5. Распределение элементов, имеющих сродство к халькопириту, среди основных минеральных фаз

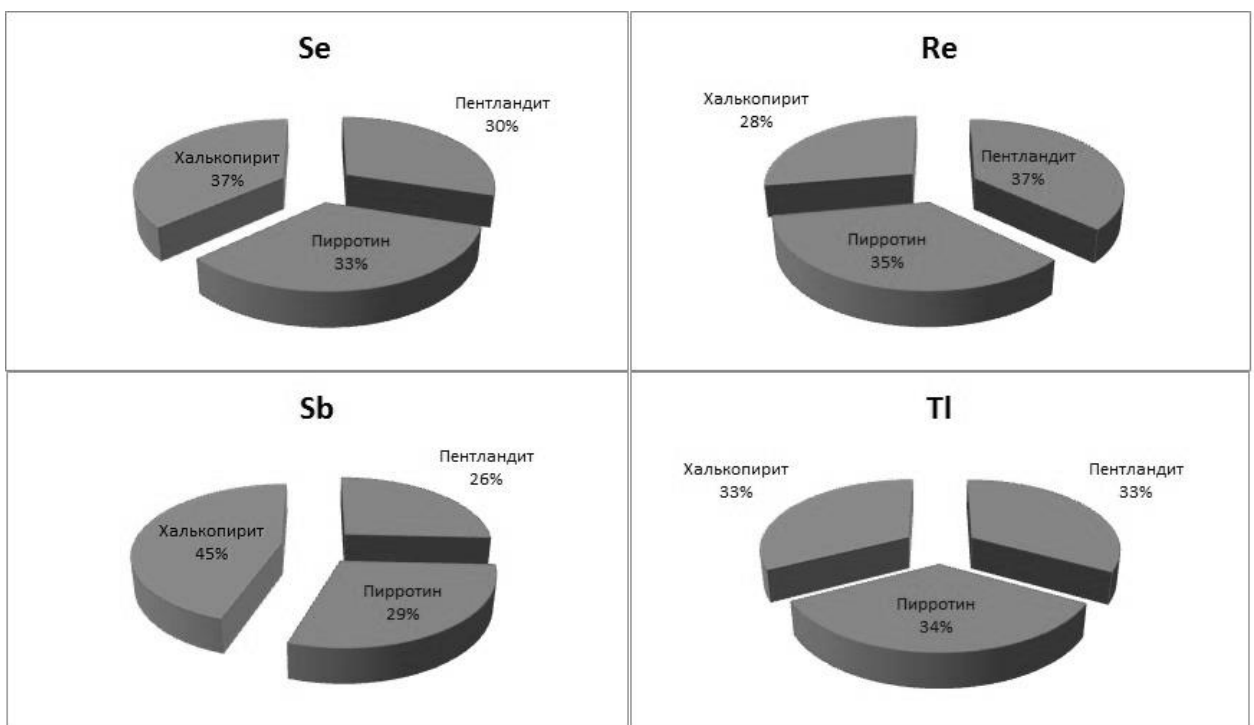


Рис. 6. Распределение элементов, не имеющих ярко выраженного минерального сродства, среди основных минеральных фаз

Пентландит, по результатам исследования, является основным концентратором трех из шести металлов платиновой группы: палладия, рутения и платины, а также основным концентратором кобальта. С учетом того факта, что платина и палладий являются важнейшими и наиболее экономически ценными металлами месторождения Федорова Тундра, можно

сделать вывод о том, что пентландит является наиболее значимым из промышленных сульфидных минералов данного месторождения, помимо собственных минералов платиновой группы, однако распространенность пентландита во много раз выше.

Пирротин включает в себя значительную долю хрома, а также двух из оставшихся трех элементов платиновой группы: иридия и осмия. Также он является главным концентратором мышьяка и висмута.

Проведенные исследования показали, что халькопирит концентрирует практически все серебро, а также значительную часть золота. Помимо этого в данном минерале наблюдаются повышенные содержания свинца и родия.

К элементам, которые довольно равномерно распределяются среди всех трех минеральных фаз, можно отнести селен, рений, олово и таллий.

Ассоциация пирротин-пирит, широко развитая в пределах месторождения Федорова Тундра, дает возможность оценить температуру и активность серы в минералообразующей среде. Использовалась реакция: $2 \text{FeS} + \text{S}_2 = 2 \text{FeS}_2$.

$K_{\text{реакции}} = (a_{\text{FeS}_2})^2 / (a_{\text{S}_2} \times (a_{\text{FeS}})^2)$, активность твердых фаз равняются единице. Состав пирротина в природной системе нестихиметричен и вследствие этого необходимо оценить концентрацию серы в этом минерале из проведенных нами анализов. Экспериментальные исследования (Toulmin et. al, 1964) установили зависимость состава пирротина, который находится в термодинамическом равновесии с пиритом, от температуры и активности (фугитивности) серы в системе. Эти зависимости в диссертации были составлены автором в виде уравнений линейной регрессии.

$$T (^{\circ}\text{C}) = 9663.75 - 9854.56 \times N^{\text{pyrr}}_{\text{FeS}} \text{ (уровень допуска 0.99)}$$

$$\log f_{\text{S}_2} = 247.015 - 270.755 \times N^{\text{pyrr}}_{\text{FeS}} \text{ (уровень допуска 0.96)}$$

В результате проведенных расчетов можно сделать вывод о том, что температурный интервал формирования наиболее поздней парагенетической рудной ассоциации пирротин-пирит с появлением пирита в виде самостоятельной минеральной фазы составляет $514^{\circ}\text{C} - 134^{\circ}\text{C}$. Температура 514°C является максимальной, так как в процессе остывания рудной системы в результате диффузионного обмена между серой, пиритом и пирротинном, концентрация серы в пирротине возрастала, фиксируя понижение температуры. 134°C – это предельное значение температуры, при которой еще происходил диффузионный обмен серы между пирротинном, флюидной фазой и пиритом.

Рассчитанная фугитивность серы при температуре 514°C , составила $\log f_{\text{S}_2} -4.96$. В реальной природной системе при более высокой температуре эта величина значительно возрастет. Следовательно, оцененное значение фугитивности серы в системе является минимальным. В процессе охлаждения рудной системы фугитивность серы падала и при 134°C составила $\log f_{\text{S}_2} = -14.8$.

В дополнение к проведенным исследованиям было выдвинуто предположение о том, что верхний предел температуры (514°C) маркирует

верхнюю температурную границу, соответствующую, скорее всего, времени начала кристаллизации пирита. Для установления условий фугитивности серы, соответствующих более высоким температурам, мы проследили изменение режима активности серы для среды с фиксированным шагом смещения температуры в 100 градусов при условии существования одного пирротина. В результате проведенных расчетов можно сделать вывод, что для более ранних стадий минералообразования был характерен режим с достаточно высокой активностью серы.

Таблица 1. Результаты расчета фугитивности серы

Начальная температура	Шаг температуры	T (°C)+шаг смещения	T (°K)	log f _{S2}
514	100	614	888	-2.49
	200	714	988	-1.39
	300	814	1088	-0.49
	400	914	1188	0.26
	500	1014	1288	0.89

Часть III. Методика геостатистических исследований, подсчет запасов и экономическая оценка Федоровотундровского месторождения

К 2008 году все разведочные работы на месторождении в основном были завершены, был произведен подсчет запасов меди, никеля, платины, палладия, золота и утверждение их в ГКЗ РФ.

С целью обновления экономических данных на 2012 год в настоящей работе была произведена полная экономическая переоценка и подсчет запасов в пределах трех основных участков (Большой Ихтегипахк, Пахкварака и Аленка) с учетом новых данных, к которым можно отнести цену на металлы, значения капитальных и операционных затрат. Для того, чтобы избежать нарушения внутренней политики конфиденциальности компании Barrick Gold Corp – владельца лицензии на разведку и разработку Федоровотундровского месторождения - исходные содержания полезных компонентов в используемой базе данных были несколько изменены, что, однако, не повлияет качественно на репрезентативность полученных результатов.

Рассматриваемое месторождение является многокомпонентным. Список металлов в порядке убывания их экономической значимости представляется следующим: палладий, платина, никель, медь и золото. Учитывая большое количество извлекаемых полезных компонентов, а также наибольшую экономическую значимость палладия представляется целесообразной унификация и приведение всех металлов к условному палладию, что также будет являться благоприятным фактором для облегчения последующих расчетов.

Расчет веса извлекаемых компонентов определялся по формуле:

$$K = \frac{P_i \times U_i}{P_{Pd} \times U_{Pd}};$$

в настоящей формуле:

K – переводной коэффициент, использующийся для приведения металла к условному палладию;

P_i – цена товарного металла (\$/г, \$/т);

U_i – извлечение при обогащении i -го компонента (доли единицы);

P_{Pd} – цена палладия (\$/г);

U_{Pd} – извлечение палладия при обогащении (доли единицы).

Результаты расчета переводных коэффициентов для каждого из 5-ти компонентов приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты расчета переводных коэффициентов для условного палладия

Металлы	Цена одного грамма металла в долларах США	Сквозное извлечение - технологические данные	Переводной коэффициент	Минимальное учитываемое содержание в хвостах
Pd	21.93	0.777	1.000	0.2
Pt	53.1	0.7246	2.258	0.075
Ni	0.020604	0.5452	0.0006592	200
Cu	0.00723946	0.8075	0.0003431	400
Au	46.84	0.666	1.831	0.03

Несмотря на то, что в большинстве случаев принято оконтуривание рудных тел по условному полезному компоненту, этот метод предполагает сильную связь с экономическими параметрами, которые могут варьировать в достаточно широких пределах даже в небольшом промежутке времени. Для обеспечения максимального учета всех геологических особенностей и недопущения потерь полезных рудных участков в рамках настоящей работы предлагается предварительное выделение нулевого контура рудного тела по соответствию содержания полезного компонента в скважине условию превышения содержания в технологических хвостах по любому из полезных компонентов. Данная мера позволит в полной мере учесть все геологические особенности распределения полезных компонентов и не допустить их выпадения из контура.

Целью построения каркасной модели месторождения является получение замкнутого тела, оконтуренного поверхностью с определенными геометрическими параметрами. Простейшим элементом подобной

поверхности является треугольник, что обусловлено уникальностью и единственностью существования этой геометрической фигуры для любых трех точек в пространстве. Соответственно, каркасная модель месторождения представляет собой поверхность, ограничивающую рудную область пространства и состоящую из большого количества элементарных треугольников, как показано на рис 7.

В результате были построены каркасные модели для всех участков месторождения: длина по простиранию рудного тела участка Большой Ихтегипах составляет 1500 м, по падению – 1000 м, размах по вертикали – 400 м, участка Пахкварака – 2000x1200x500 м, а участка Аленка – 1000x700x400 м, соответственно.

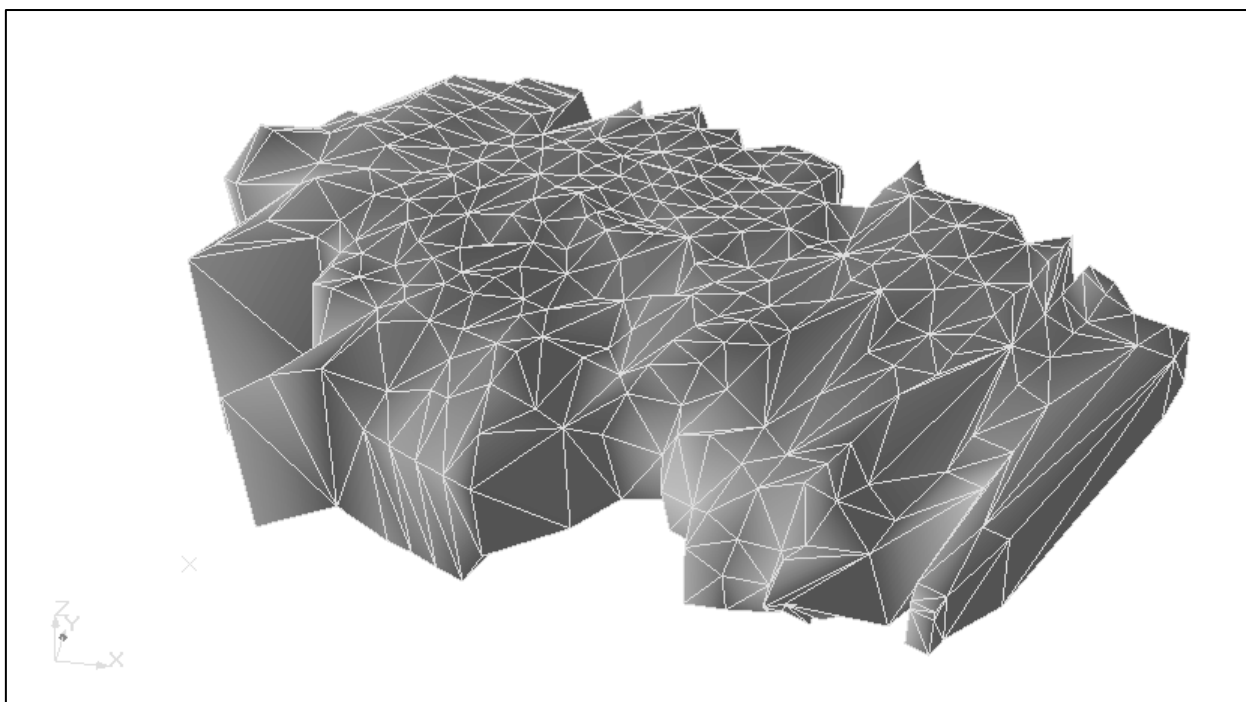


Рис. 7. Каркасная модель участка Большой Ихтегипах

Следующим этапом в моделировании месторождения является создание блочной модели, необходимой для последующего подсчета и категоризации запасов, определения контура карьера, сроков и порядка отработки полезных ископаемых. Исходя из принятого решения о высоте стенки будущего карьера, равной 5 метрам, размер элементарной ячейки по вертикали был аналогичным. Размеры ячейки по горизонтали составляют 15×15 метров, что соответствует приблизительно одной четверти от расстояния между разведочными скважинами. Такие размеры ячейки с наибольшей точностью соответствуют поставленным целям максимизации достоверности проводимых подсчетов.

Наиболее важным и основным инструментом в геостатистическом анализе является вариограмма, используемая для определения

пространственной корреляции между произвольно размещенными реальными данными наблюдений (Капутин, 2007).

В подавляющем большинстве случаев вариограмма является зеркальным отражением ковариационной функции и определяется как разность значений дисперсии и ковариации для данного интервала расстояний. Структура вариограммной модели должна в наибольшей степени отражать истинную структуру изменчивости объекта. Как только экспериментальные вариограммные данные будут аппроксимированы математической функцией, последняя может быть использована для оценки неизвестных значений исследуемого параметра (в большинстве случаев – содержания полезного компонента) в любой точке пространства.

Таким образом, вариограмма измеряет степень корреляционной связи между пробами в пространстве и в большинстве случаев может быть полностью охарактеризована тремя главными параметрами.

- Эффект самородка (Nugget effect) – случайная составляющая в дисперсии проб, отражающая количественную разницу измеряемого параметра в очень близко расположенных образцах. Величина этого параметра в первую очередь зависит от степени изменчивости месторождения и сети его опробования.
- Порог вариограммы (Sill) – величина дисперсии проб. По мере достижения этого значения вариограмма выполаживается.
- Зона влияния (Range) – максимальное расстояние, на котором между пробами все еще существует корреляционная связь. На расстояниях меньших зоны влияния предсказания значения параметра являются статистически допустимыми, на больших расстояниях – нет. Вариограмма достигает порога на расстоянии, равном зоне влияния.

В качестве значения для шага вариограммы было выбрано значение 5 метров, количество шагов было принято равным 30. Анализ производился по всем направлениям, как в пределах плоскости, так и по вертикали. В первом случае шаг поворота 10° , во втором – 10° . Начальным азимутом и углом падения первичной вариограммной оси было принято геологическое положение Федоровотундровского массива: азимут падения 225° и угол падения 30° , соответственно.

Примеры результатов получившихся экспериментальных вариограммных моделей отражены на рис. 8.

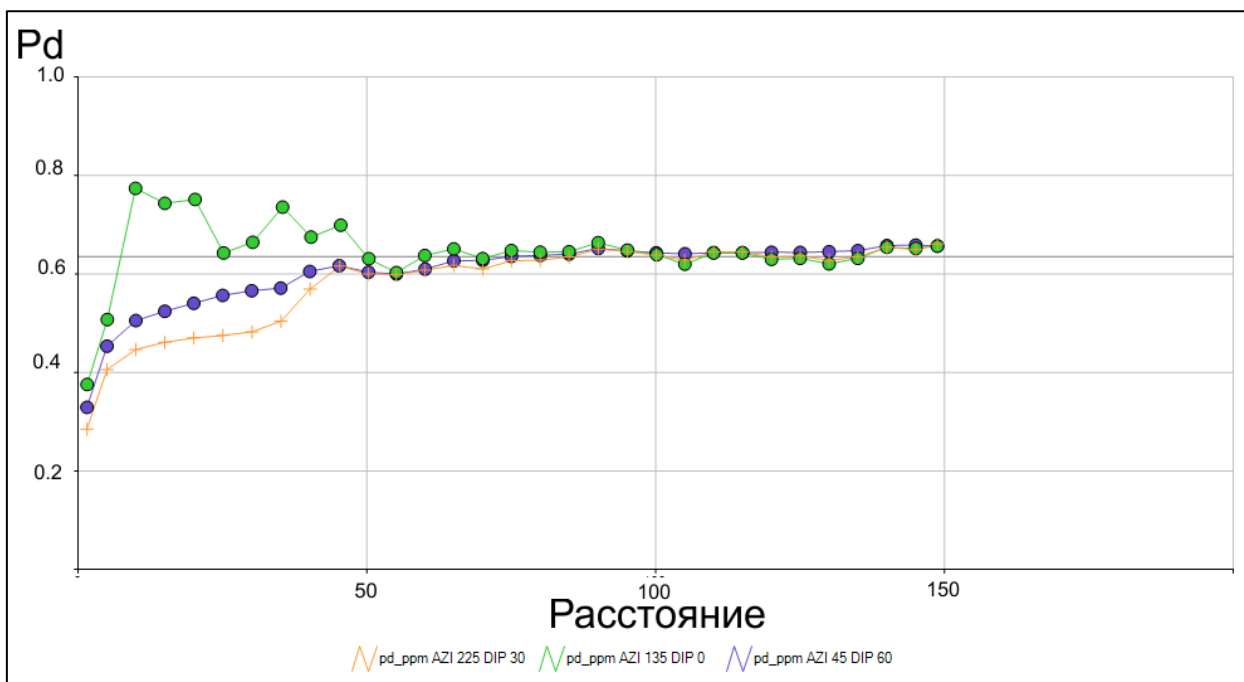


Рис. 8. Пример экспериментальных вариограммных моделей участка Большой Ихтегипахк по содержаниям натурального палладия

Как видно из представленной иллюстрации, распределение полезных компонентов имеет анизотропный характер. В результате проведенных исследований было установлено наличие следующих взаимно перпендикулярных осей анизотропии, согласующихся с общим геологическим строением массива: $225^{\circ}/30^{\circ}$, $45^{\circ}/60^{\circ}$ и $135^{\circ}/0^{\circ}$. Подобная мера в наилучшей степени позволила учесть геологическое строение и особенности распределения всех полезных компонентов. Для аппроксимации результатов были использованы сферические вариограммные модели.

На основании данных исследований распределения всех полезных компонентов оказалось возможным проведение интерполяции их содержаний в ранее созданную блочную модель. Для этого был использован поисковый эллипсоид, базовый угол поворота которого совпадал с направлением основной оси анизотропии массива – $225^{\circ}/30^{\circ}$. Данная мера обеспечила выделение в интерполируемую выборку наиболее связанных с блоком данных опробования.

Размер поискового эллипсоида выбирался на основании наибольшей представительности получаемой выборки. Поскольку максимальное сгущение ячейки разведочной сети равно 50 метров, то первичный поисковый эллипсоид, соответствующий максимальной степени достоверности, имел следующие размеры: 50 x 50 x 10 метров. Минимальное количество проб, характеризующих элементарный объем ячейки для максимальной степени достоверности блока принималось равным четырем пробам минимум из двух выработок для исключения эффекта «бычьих глаз», когда для интерполяции в ячейку используются только ближайšie пробы всего из одной скважины.

В случае невыполнения условия необходимого минимального количества проб поисковый эллипсоид увеличивался в 2 раза. Минимальное количество проб сокращалось до двух, а блоки, в которые интерполировались содержания, получали более низкую степень достоверности. В последнем случае, для самых отдаленных участков блочной модели поисковый эллипсоид увеличивался в 10 раз с сокращением минимального количества проб до одной. Соответствующие ячейки получали самую низкую категорию достоверности.

В качестве основного метода интерполяции был использован кригинг, базой для которого служили ранее созданные вариограммные модели для всех основных компонентов. Проверочным методом был метод обратных расстояний, который показал достаточно близкие результаты (хоть и заниженные) корреляции по данным перекрестной проверки. Поэтому в качестве основного метода был выбран именно кригинг в том числе еще и за счет того, что в результате его применения получаются минимальные значения дисперсии в результирующей выборке.

Пример полученных блочных моделей представлен на рис. 9.

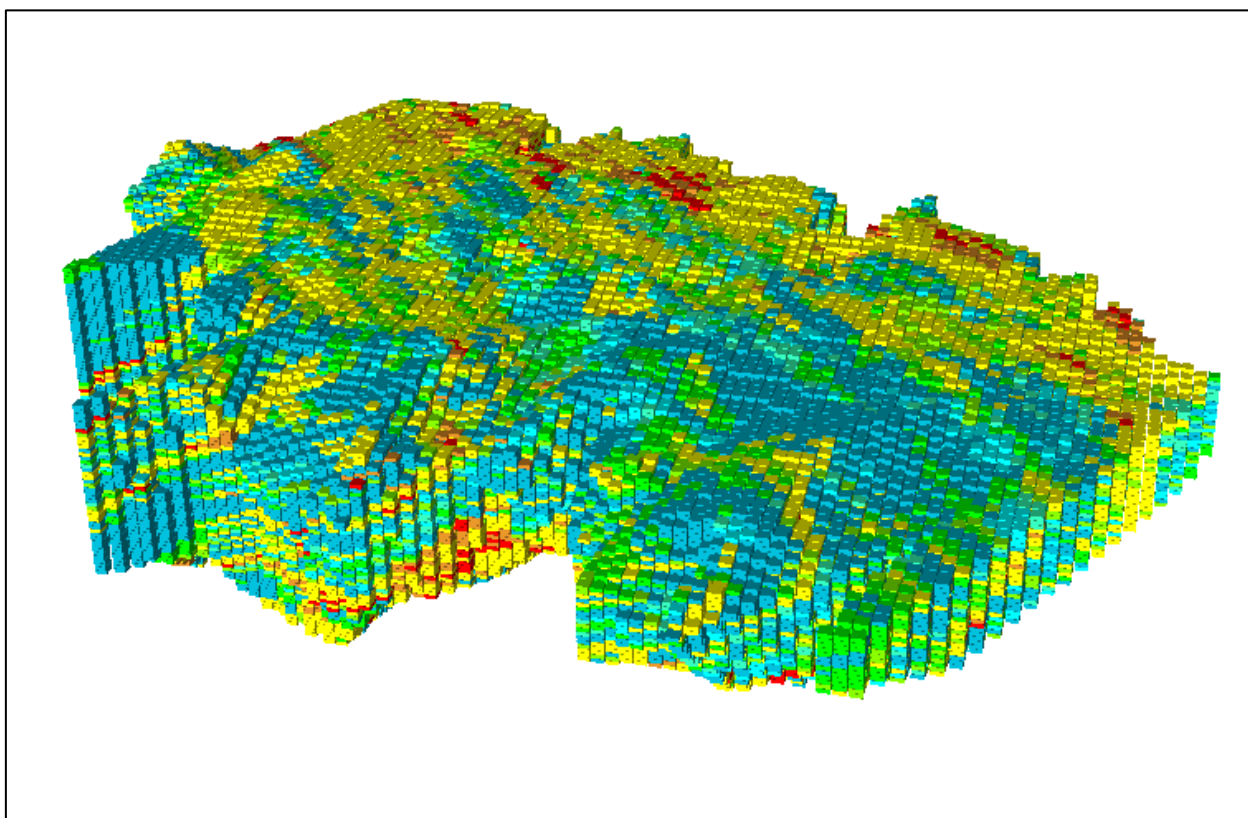


Рис. 9. Общий вид блочной модели участка Большой Ихтегипахк. Цветом показано увеличение содержаний палладиевого эквивалента в ряду: синий (наиболее низкие содержания), зеленый, желтый и красный (наиболее высокие содержания)

После проведения необходимых расчетов и интерполяции производился повариантный подсчет ресурсов модели по зарубежной классификации с учетом принятых экономических параметров (табл. 3), в

результате чего было выбрано наиболее оптимальное значение бортового содержания: 1.5 г/т условного палладия (табл. 4), максимизирующее NPV (чистая дисконтированная стоимость) и оптимизирующее размер запасов и срок отработки месторождения.

Таблица 3. Принятые для расчетов экономические параметры

Параметры	Цены
Капитальные затраты	1.5 млрд. долл. США
Цена металла	21.93 долл. США за грамм
Стоимость добычи руды	1.5 долл. США за тонну
Стоимость добычи вскрыши	1.5 долл. США за тонну
Разубоживание	0 %
Потери	0 %
Затраты на обогащение	10.5 долл. США за тонну
Удорожание добычи с углублением карьера	С третьего уступа на 0.015 долл. США за тонну
Производительность фабрики	12 000 000 тонн в год
Ставка дисконтирования	10%
Количество рабочих дней в году	340
Предельный угол уступа карьера	50°

Таблица 4. Повариантный подсчет запасов месторождения Федорова Тундра

Борт (рд экв, г/т)	Тоннаж руды, т	NPV, \$ США	Срок эксплуатации, лет	Срок окупаемости, лет
-	1 186 255 125	1 341 159 993	99	7.80
1	552 889 125	2 996 303 739	47	4.04
1.3	425 958 750	3 359 712 531	36	3.32
1.5	349 808 625	3 538 454 510	30	3.00
1.9	229 199 625	3 488 237 722	20	2.64

Повариантный расчет контура предельного карьера осуществлялся с использованием алгоритма максимизации денежного потока (алгоритм Лерча-Гроссмана) программы NPV Scheduler. Полученный контур карьера обеспечил достаточно высокую степень отработки запасов месторождения более 95 %), что говорит о достаточно равномерно распределенных высоких содержаниях полезных компонентов.

Следующим этапом работы являлось проведение всех экономических расчетов, включавших в себя анализ экономической устойчивости проекта (рис. 10), подтвердившим высокую рентабельность (значение внутрифирменной нормы прибыли равно 57 %), быструю окупаемость вложенных в месторождение средств (первичные капитальные вложения в размере 1.5 млрд. долл. США окупаются в течение трех лет), а также достаточно высокую степень экономической устойчивости проекта (по результатам анализа паукообразных диаграмм, а также проведенного трехвариантного расчета, в котором значения капитальных, операционных

затрат и цены на металл изменялись на 20 %, соответственно выбранному варианту) (Дергачев, 2010).

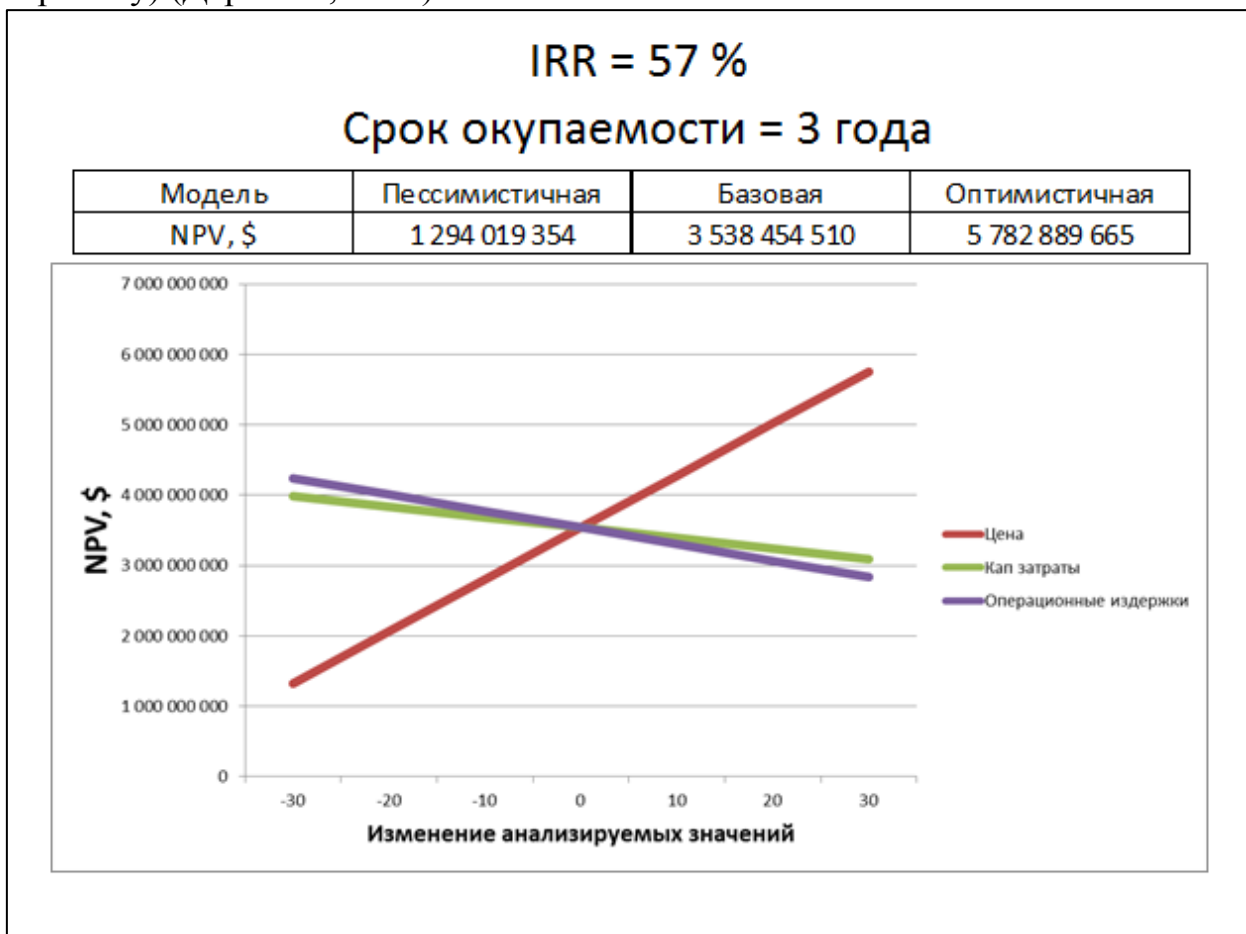


Рис. 10. Результаты анализа экономической устойчивости проекта

Несмотря на многие очевидные преимущества использования кригинга, многочисленными практикующими геологами в процессе их работы неоднократно отмечалось главное «узкое место» использования кригинга – избыточное сглаживание распределения полезного компонента по совокупности и связанное с ним занижение среднего содержания. Это особенно актуально с точки зрения традиционного подхода к подсчету запасов ГКЗ РФ, в котором использовались простые приемы и формулы вариационной статистики, в результате чего всегда достигалась ярко выраженная дискретизация рудных тел.

Для устранения этого противоречия в рамках настоящей работе была предпринята попытка унификации и подробного описания методики индикаторного кригинга.

В рамках такой предлагаемой методики предполагается исследование индикаторных вариограмм, отражающих поведение полезного компонента с учетом выбранного значения бортового содержания. Иными словами, в результате подобных исследований выясняется характер поведения исключительно рудных проб для каждого из вариантов подсчета.

После получения этих результатов каждая проба из массива данных кодируется на предмет принадлежности ее к ранее выделенным рудным

интервалам, созданным с учетом текущих кондиций. Рудные пробы получают значение 1, безрудные – 0. В нашем случае выбрано бортового содержание - 1.5 г/т по палладиевому эквиваленту.

Далее, по выделенным ранее в процессе индикаторной вариографии законам распределения полезных компонентов, осуществляется интерполяция по законам кригинга, в результате чего каждый из имеющихся в блочной модели элементарных ячеек получает свое значение рудной вероятности от 0 до 1. Затем блочная модель ранжируется по порядку увеличения вероятности и по достижении нужного объема отсекается ее критическое значение. Иными словами, именно выделенная часть модели имеет наибольшую вероятность оказаться рудной, согласно проведенным исследованиям, при этом ее объем в точности наследует необходимый объем, который был получен ранее при использовании обычного кригинга. Здесь стоит отметить, что зачастую в этом случае в качестве целевого значения объема используется объем каркасного тела, модифицированный с помощью коэффициента рудоносности. В рамках же данной работе с учетом наличия уже проведенного кригинга, представляется целесообразным рассмотрение именно этого объема рудной части в качестве целевого. Эта мера в том числе облегчит процесс сравнения результатов.

После этого весь массив исходных проб разделяется на 2 части, рудные интервалы интерполируются в рудную часть модели, безрудные – в безрудную. Как видно из полученных результатов, использование индикаторного кригинга успешно решает проблему заниженных значений содержаний полезных компонентов, при этом обеспечивая большую геологическую достоверность блочной модели, что предопределяется ее предварительным разбиением на рудную и безрудную части на основании данных вероятности, как это показано на рис. 11-12 и в табл. 5.

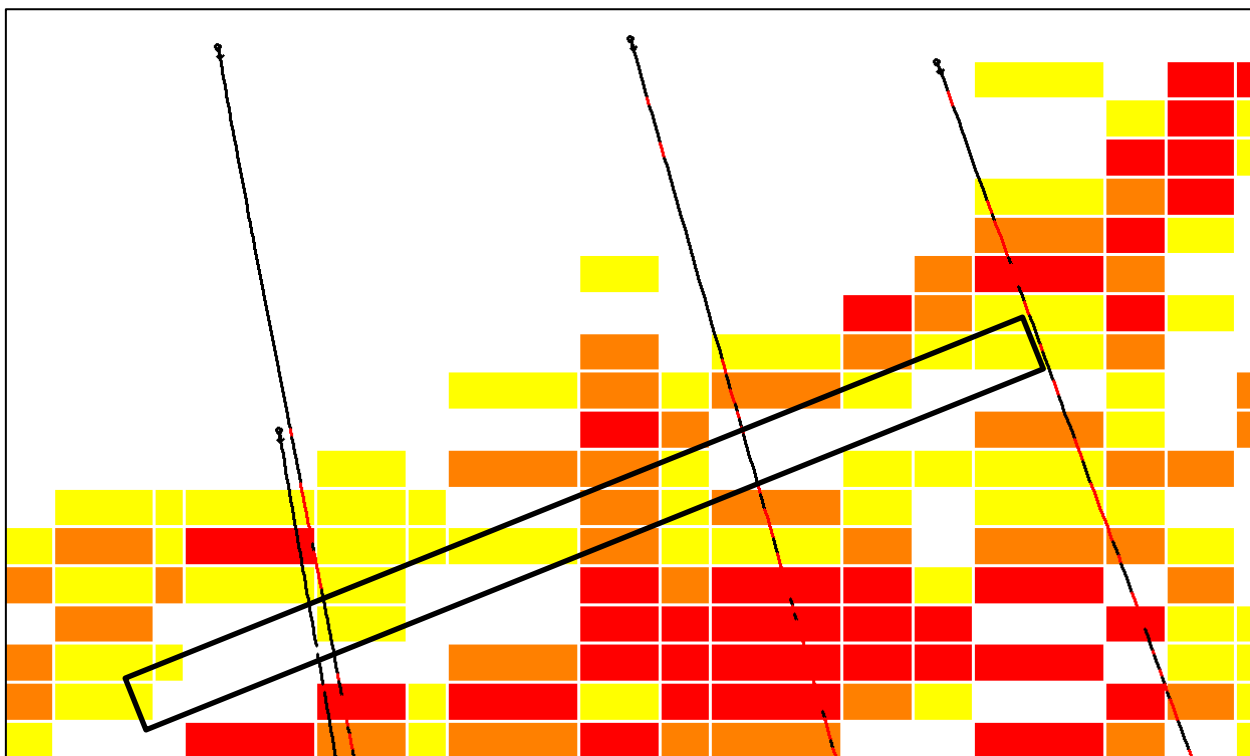


Рис. 11. Участок блочной модели, полученной с помощью использования обычного кригинга. Цветом показано увеличение содержания палладиевого эквивалента. Красный цвет скважины – пробы с содержанием палладиевого эквивалента более 1.5 г/т, черный – менее

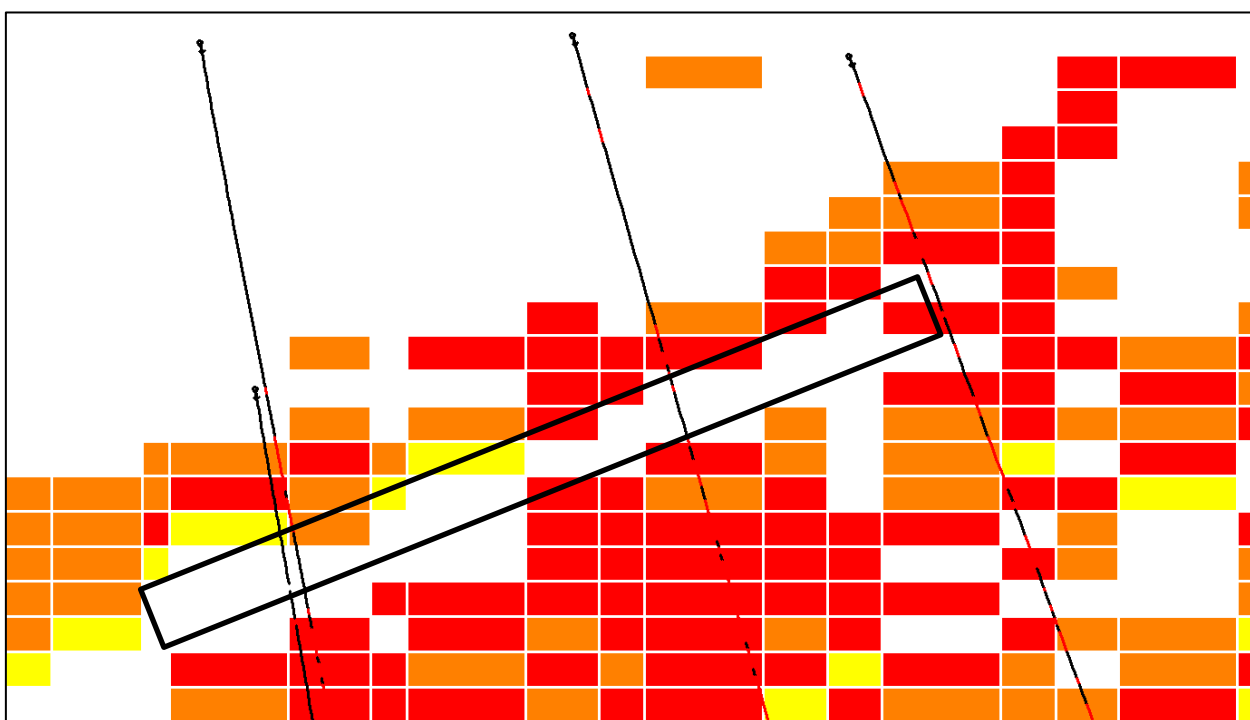


Рис. 12. Тот же участок блочной модели, полученной с использованием индикаторного кригинга. Налицо лучшее отображение геологических данных в виде выделения безрудного прослоя и в целом более высокие содержания

Таблица. 5. Сопоставление результатов подсчета запасов с использованием обычного и индикаторного видов кригинга

Кригинг																
Участок	Категория	Объем руды, куб. м	Тоннаж руды, тонн	Объемная масса, т/куб. м	Среднее содержание						Запасы металла					
					Pd экв, г/т	Pd, г/т	Pt, г/т	Au, г/т	Cu, %	Ni, %	Pd экв, кг	Pd, кг	Pt, кг	Au, кг	Cu, т	Ni, т
Большой Ихтегилахк	Измеренные (measured)	37 589 625	112 768 875	3	2.59	1.11	0.27	0.07	0.100	0.064	292 197	125 457	30 518	7 987	113 128	71 893
	Исчисленные (indicated)	22 744 125	68 232 375	3	2.27	0.97	0.23	0.06	0.091	0.058	154 550	65 885	15 823	4 239	61 856	39 360
	Предполагаемые (inferred)	110 250	330 750	3	2.00	0.92	0.21	0.06	0.074	0.046	662	304	69	19	245	153
Пахкварака	Измеренные (measured)	14 389 875	43 169 625	3	2.61	1.00	0.25	0.06	0.115	0.084	112 791	43 330	10 582	2 803	49 441	36 384
	Исчисленные (indicated)	24 436 125	73 308 375	3	2.50	1.01	0.25	0.06	0.104	0.072	183 359	73 691	18 249	4 737	76 517	52 525
	Предполагаемые (inferred)	3 112 875	9 338 625	3	1.82	0.67	0.18	0.04	0.078	0.064	17 000	6 213	1 643	397	7 241	6 012
Аленка	Измеренные (measured)	650 250	1 950 750	3	2.03	0.72	0.16	0.04	0.107	0.075	3 953	1 410	321	86	2 087	1 464
	Исчисленные (indicated)	14 193 000	42 579 000	3	2.20	0.81	0.19	0.05	0.111	0.074	93 806	34 541	8 137	2 290	47 287	31 666
	Предполагаемые (inferred)	380 250	1 140 750	3	1.73	0.63	0.15	0.05	0.086	0.057	1 978	722	174	52	982	653
Всего	Измеренные (measured)	52 629 750	157 889 250	3	2.59	1.08	0.26	0.07	0.104	0.070	408 941	170 197	41 421	10 876	164 655	109 741
	Исчисленные (indicated)	61 373 250	184 119 750	3	2.34	0.95	0.23	0.06	0.101	0.067	431 715	174 117	42 209	11 266	185 659	123 551
	Measured+indicated	114 003 000	342 009 000	3	2.46	1.01	0.24	0.06	0.102	0.068	840 656	344 314	83 630	22 142	350 315	233 292
	Предполагаемые (inferred)	3 603 375	10 810 125	3	1.82	0.67	0.17	0.04	0.078	0.063	19 640	7 239	1 887	468	8 468	6 819
Индикаторный кригинг																
Участок	Категория	Объем руды, куб. м	Тоннаж руды, тонн	Объемная масса, т/куб. м	Среднее содержание						Запасы металла					
					Pd экв, г/т	Pd, г/т	Pt, г/т	Au, г/т	Cu, %	Ni, %	Pd экв, кг	Pd, кг	Pt, кг	Au, кг	Cu, т	Ni, т
Большой Ихтегилахк	Измеренные (measured)	31 640 625	94 921 875	3	3.34	1.45	0.35	0.09	0.128	0.077	316 928	137 361	33 012	8 439	121 420	73 552
	Исчисленные (indicated)	28 521 000	85 563 000	3	3.19	1.38	0.33	0.08	0.123	0.074	272 645	117 743	28 550	7 122	105 531	63 447
	Предполагаемые (inferred)	290 250	870 750	3	3.00	1.34	0.32	0.08	0.113	0.065	2 612	1 164	276	70	984	569
Пахкварака	Измеренные (measured)	11 048 625	33 145 875	3	3.51	1.39	0.34	0.08	0.150	0.106	116 356	45 970	11 117	2 800	49 576	35 180
	Исчисленные (indicated)	28 233 000	84 699 000	3	3.62	1.47	0.37	0.09	0.147	0.100	306 518	124 610	31 178	7 294	124 579	84 397
	Предполагаемые (inferred)	2 657 250	7 971 750	3	3.37	1.30	0.36	0.07	0.129	0.104	26 882	10 364	2 889	548	10 320	8 272
Аленка	Измеренные (measured)	379 125	1 137 375	3	2.49	0.90	0.20	0.05	0.129	0.090	2 834	1 024	231	61	1 471	1 028
	Исчисленные (indicated)	14 526 000	43 578 000	3	2.67	0.99	0.23	0.06	0.134	0.088	116 225	43 298	10 150	2 787	58 237	38 228
	Предполагаемые (inferred)	303 750	911 250	3	2.57	0.96	0.27	0.06	0.115	0.074	2 340	879	246	58	1 049	678
Всего	Измеренные (measured)	43 068 375	129 205 125	3	3.38	1.43	0.34	0.09	0.133	0.085	436 118	184 356	44 360	11 300	172 468	109 760
	Исчисленные (indicated)	71 280 000	213 840 000	3	3.25	1.34	0.33	0.08	0.135	0.087	695 387	285 650	69 877	17 202	288 348	186 072
	Measured+indicated	114 348 375	343 045 125	3	3.30	1.37	0.33	0.08	0.134	0.086	1 131 505	470 006	114 237	28 502	460 815	295 832
	Предполагаемые (inferred)	3 251 250	9 753 750	3	3.26	1.27	0.35	0.07	0.127	0.098	31 835	12 407	3 410	676	12 352	9 519
Разница																
Всего	Измеренные (measured)	82%	82%	100%	130%	132%	131%	127%	128%	122%	107%	108%	107%	104%	105%	100%
	Исчисленные (indicated)	116%	116%	100%	139%	141%	143%	131%	134%	130%	161%	164%	166%	153%	155%	151%
	Measured+indicated	100%	100%	100%	134%	136%	136%	128%	131%	126%	135%	137%	137%	129%	132%	127%
	Предполагаемые (inferred)	90%	90%	100%	180%	190%	200%	160%	162%	155%	162%	171%	181%	144%	146%	140%

Заключение

В известных обобщающих публикациях (Налдретт, 2003; Mitrofanov et al. 2005; Pijina and Hanski, 2005; Лихачев, 2005 и др) и в учебных пособиях (Старостин, 2010; Robb, 2005 др.), посвященных металлогении расслоенных гипербазит-базитовых интрузивов, в число основных типов промышленных платиноносных месторождений включают сингенетические магматические скопления придонных (базальных) Co-Cu-Ni руд и их эпигенетические жильные аналоги, а также разновозрастные (стратиформные) малосульфидные Pt-Pd месторождения.

В восточной части Балтийского щита к первым двум типам относят Мончегорские месторождения, а к малосульфидному типу – месторождения Западно-Панского массива (Митрофанов, 2005). По своим главным геолого-геохимическим параметрам Федоровотундровское месторождения отличается от обоих этих типов.

Это предопределяет, для целей детальной разведки и разработки промышленной технологии освоения такого нового типа месторождений, необходимость специального изучения рудных компонентов в минералах и в общем пространстве месторождения, исследование возможностей использования специальных методик геометризации рудных тел, корректного подсчета запасов и экономической оценки рентабельности отработки месторождения в современных условиях.

Полученные в этом направлении новые данные, изложенные в работе, должны быть учтены при будущей эксплуатации Федоровотундровского месторождения.

Список публикаций по теме диссертации

Монографии

1. **Митрофанов А.Ф.** «Геологическое строение и экономическая оценка месторождения Большой Ихтегипахк (Федорово-Панский массив, Кольский п-ов)», изд. LAP Lambert Academic Publishing, 2010 г., ISBN 978-3-8433-0210-4, 84 с.

Статьи в реферируемых журналах из списка ВАК

1. **Митрофанов А.Ф., Малютина М.Ю.** «Трёхмерное моделирование и методика подсчета запасов месторождений Федоровотундровского рудного поля (Кольский полуостров)», Маркшейдерский вестник, №3, 2010 г., с. 51-58.

2. **Митрофанов А.Ф.** «Методика трёхмерного моделирования, повариантный подсчет запасов и современная экономическая оценка участков Большой Ихтегипахк, Пахкварака и Алёнка Федоровотундровского месторождения (Кольский п-ов)», Маркшейдерский вестник, №1, 2012 г, с. 23-30.

3. **Митрофанов А.Ф., Когарко Л.Н., Аносова М.О., Костицын Ю.А.** «Особенности распределения благородных металлов в сульфидных парагенезисах месторождения Федорова Тундра (Кольский п-ов)», Доклады Академии Наук, том 451, №6, 2013.

4. **Митрофанов Ф.П., Баянова Т.Б., Корчагин А.У., Грошев Н.Ю., Малич К.Н., Жирова Д.В., Митрофанов А.Ф.** «Восточно-Скандинавская и Норильская плюмовые базитовые обширные изверженные провинции Pt-Pd руд: геологическое и металлогеническое сопоставление», Геология рудных месторождений, №5, 2013.

Тезисы докладов научных конференций

1. **Митрофанов А.Ф.** «Трёхмерное моделирование, оценка точности различных методов интерполяции, подсчет запасов и современная экономическая оценка участков Большой Ихтегипахк и Пахкварака Федоровотундровского месторождения (Кольский п-ов)» // Тез. докл. Всероссийской научной конференция с международным участием «Информационные технологии в горном деле», Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, 12-14 октября 2011 г.

2. **Митрофанов А.Ф.** «Геология, трёхмерное моделирование, оценка точности различных методов интерполяции, подсчет запасов и современная экономическая оценка участков Большой Ихтегипахк, Пахкварака и Алёнка Федоровотундровского месторождения (Кольский п-ов)» // Тез. докл. XXII Молодежной Научной Конференция, посвящённая памяти чл.-корр. АН СССР К.О. Кратца «Геология, геофизика и геоэкология: исследования молодых», г. Апатиты, 8-10 ноября 2011 г.

3. **Митрофанов А.Ф.** «Геологическое строение и современная экономическая оценка участков Большой Ихтегипахк и Пахкварака

Федоровотундровского месторождения (Кольский п-ов)» //Тез. докл. международной конференции «Рудный потенциал щелочного, кимберлитового и карбонатитового магматизма» г. Минск, Белорусия, 2011.

4. **Митрофанов А.Ф., Когарко Л.Н., Аносова М.О., Костицын Ю.А.** «Особенности распределения редких и благородных металлов в сульфидных парагенезисах месторождения Федорова Тундра (Кольский п-ов)» //Тез. докл. XXIII Молодежной Научной Конференции, посвящённой памяти чл.-корр. АН СССР К.О. Кратца «Актуальные проблемы геологии докембрия, геофизики и геоэкологии», г. Петрозаводск, 8-12 октября 2012 г.

5. **Митрофанов А.Ф., Когарко Л.Н., Аносова М.О., Костицын Ю.А.** «Расчет коэффициентов сокристаллизации и исследование распределения редких и благородных металлов в сульфидных парагенезисах месторождения Федорова Тундра (Кольский п-ов)» // Тез. докл. Международной конференции «Рудный потенциал щелочного, кимберлитового и карбонатитового магматизма», г. Судак, Украина, 14-22 сентября 2012 г.