

На правах рукописи

Пхарое Бенедикт Литсоняне

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'B. Litsoniane', enclosed within a light gray rectangular border.

**ГЕНЕЗИС И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОМЫШЛЕННОГО
ОСВОЕНИЯ НОВОГО РУДОПРОЯВЛЕНИЯ МАРГАНЦА
НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ ЮЖНО-АФРИКАНСКОЙ
РЕСПУБЛИКИ**

*Специальность 1.6.10-Геология, поиски и разведка твёрдых
полезных ископаемых, минерагения*

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

Санкт-Петербург-2021

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

Научный руководитель:

доктор геолого-минералогических наук

Евдокимов Александр Николаевич

Официальные оппоненты:

Брусницын Алексей Ильич

доктор геолого-минералогических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», кафедра минералогии, заведующий кафедрой;

Белозуб Елена Витальевна

доктор геолого-минералогических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии Уральского отделения Российской академии наук, заместитель директора по научным вопросам.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И.С. Грамберга», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится 29 сентября 2021 г. в 15.00 на заседании диссертационного совета ГУ 2021.5 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, ауд. 3321

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 29 июля 2021 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



СЕНЧИНА
Наталия Петровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. С ростом спроса и потребления минерального сырья истощаются известные месторождения полезных ископаемых, возникает острая необходимость в разведке новых рудных районов. В этой связи актуальность исследования еще не освоенного района с рудопроявлениями марганца в Северо-Западном регионе ЮАР не вызывает сомнения. Для оценки перспектив обнаружения крупного месторождения марганцевой руды весьма важным является изучение структурного контроля, минералогических и геохимических особенностей рудопроявления, определение его формационного типа, условий формирования и размещения в пространстве, особенностей залегания рудных тел.

Открытие рудопроявления марганца в Северо-Западном регионе было сделано сотрудником Геологической службы Южно-Африканского союза доктором Де Виллерсом в 1960-ом году. Им было обнаружено несколько рудопроявлений марганца в зоне гипергенеза, в верхней части разреза неоархейских доломитов серии Мальмани Трансваальского бассейна. Полученные результаты по геохимическому анализу проб неоархейских доломитов указали на наличие относительно высокого содержания марганца (около 5 масс. %) в доломитах. Позже, в конце восьмидесятых, середине девяностых и начале 2000-х годов, несколько авторов (Hawker и Thompson, 1988; Gutzmer и Beukes, 1994; Beukes и др., 1999; Van Niekerk и др., 1999; Pask и др., 2000) начали проводить исследования по отдельным площадям региона. Их находки указывали на возможность обнаружения марганцевых месторождений промышленного значения.

Степень разработанности темы диссертации до настоящего времени оставалась не существенной, так как Северо-Западное рудопроявление многие годы не вызывало интерес для изучения и промышленного освоения благодаря наличию в ЮАР ряда крупных месторождений марганцевых руд в пределах района Калахари.

Цель работы. Разработать геолого-генетическую модель рудопроявления Северо-Западное и провести оценку его промышленного потенциала.

Для достижения поставленной цели автором были решены следующие задачи:

1. Изучены особенности геологического строения неоархейских доломитов для определения возраста проявления и закономерностей локализации карстовых процессов.

2. Уточнен минеральный и вещественный состав руд.

3. Определены и проанализированы спектры редкоземельных элементов и средние значения их содержаний в марганценосных породах Северо-Западного рудопроявления и проведено сопоставление их с эталонными спектрами для выяснения генезиса рудных и сопутствующих компонентов.

4. Разработана генетическая модель образования рудопроявления Северо-Западное.

5. Выполнена статистическая обработка геологоразведочных данных полученных по результатам опробования шурфов и оценен ресурсный потенциал Северо-Западного рудопроявления марганца

Научная новизна работы. Впервые современными аналитическими методами изучены минеральный состав и геохимические особенности марганцевых конкреций, марганцевых вадов и марганецсодержащих доломитов.

1. Установлены условия формирования оксидов марганца в рудопроявлении Северо-Западное.

2. Выявлены региональные и локальные факторы накопления рудных элементов в депрессионных структурах марганценосных доломитов.

3. Впервые в рудах Северо-Западного рудопроявления обнаружен литиофорит - неизвестный здесь ранее минерал позднедиагенетического образования.

4. Впервые создана объемная модель данного рудопроявления марганца и проведена оценка его ресурсов.

Теоретическая и практическая значимость работы

Получены новые данные по слабо изученному до сих пор району развития архейских марганценосных доломитов ЮАР.

Теоретическое значение выполненных исследований минералогического и химического составов марганцевых руд позволяет на компьютерной основе моделировать процесс их накопления и обосновывать возможность образования подобных месторождений в других районах Мира.

Разработана генетическая модель Северо-Западного рудопроявления, дающая представление о структурном контроле и закономерностях распределения полезного компонента, что позволяет использовать её при проведении поисковых и разведочных работ. Модель актуальна не только для Северо-Западной провинции Южно-Африканской Республики, но и для других регионов Африканского континента.

Методология и методы исследования. В основу диссертационной работы положен геологический и каменный материал, отобранный автором по прямоугольной сети горных выработок и естественных обнажений. Опробование выполнялось бороздовым методом в 70 разведочных шурфах в ходе полевых работ, проведенных автором в 2018- 2019 годах в регионе Хейфельд.

Для определения химического и фазового составов образцов и проб использовались: метод рентгенофлуоресцентной спектromетрии (для макро- и микроэлементов), метод масс-спектротметрии с индуктивно-связанной плазмой (для содержаний химических элементов $n \cdot 100$ ppm и менее), метод рентгеновской порошковой дифрактометрии. Геохимические анализы проводились с помощью рентгенофлуоресцентной спектromетрии на спектрометре XRF MagiX Fast. Анализы на 22 примесных элемента в рудных образцах были проведены на квадрупольном масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой PerkinElmer NexioN 300X в Университете Йоханнесбурга. Идентификация минеральных фаз и фазовых соотношений проводилась на рентгеновском дифрактометре XRD 6000 фирмы Shimadzu в Центре коллективного пользования (ЦКП) Санкт-Петербургского государственного горного университета. Петрографические исследования проводились в проходящем и отраженном свете на микроскопе Olympus BX-51 на 35 образцах. Морфологически различающиеся образцы исследовались на растровых электронных микроскопах

JSM-6460LV и JSM-7001F в режимах вторичных электронов и композиционного контраста. Микроскопы оснащены энергодисперсионными спектрометрами X-Act и X-MAX80 соответственно.

Оценка ресурсов была выполнена с использованием статистических моделей и блочного моделирования. Блочная модель была построена с использованием программ Micromine 2020, ArcGIS «Агстар 10».

На защиту выносятся следующие положения:

1. Образование марганцевых руд рудопроявления Северо-Западное происходило в результате проявления трех последовательных процессов: накопления марганца в неоархейских доломитах; концентрирования марганца при формировании меловых латеритных кор выветривания по доломитам; перераспределения марганца в перекрывающих коры выветривания неогеновых озерных отложениях.

2. Марганцевые руды рудопроявления Северо-Западное представлены двумя ведущими типами, отличающимися по минеральному составу и структурно-текстурным особенностям: марганцевым вадом, марганцевыми конкрециями, источниками марганца для которых были Мальманийские доломиты.

3. Образование карста по неоархейским марганценосным доломитам является ведущим рудоконцентрирующим процессом, что позволяет рассматривать рельеф нижней поверхности палеокарстовых структур как важнейший элемент геометризации рудных тел и подсчета ресурсов руд.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена представительным числом – 428 исследованных образцов минералов и горных пород, собранных лично автором в ходе проведения полевых работ на Северо-Западном рудопроявлении, а также качеством и количеством выполненных аналитических исследований. Результаты обрабатывались с помощью программ: Micromine, Grapher 8, Isatis.neo Mining 2020 и Excel. Выводы обоснованы построенными гистограммами и диаграммами. Полученные результаты анализов обладают основным свойством – они легко воспроизводимы.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих всероссийских и международных научных конференциях и конкурсах: Международный конгресс - 2nd Conference of the Arabian Journal of Geoscience (Тунис, 2019 г), XVI Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (Санкт-Петербург, 2020 г), Вебинар по геологии «Mediterranean and Middle-East Geoscience and Remote Sensing Symposium» (Тунис, 2020 г), XXVI Всероссийская научная конференция «Уральская минералогическая школа по поискам золота и платины» (Екатеринбург, 2020 г), Вебинар по геологии и наукам о Земле «Geology and Earth Science» (Индия, 2020 г), Ежегодная конференция по наукам о Земле «Наука о Земле - точка опоры человеческого развития» (Южная Африка, 2021 г).

Личный вклад. Автор дважды самостоятельно проводил полевые работы на площади рудопроявления Северо-Западное, в результате чего были составлены карты опробования и отбора образцов. Была собрана коллекция каменного материала, выполнена пробоподготовка для проведения анализов в лабораториях Санкт-Петербургского горного университета, университета Йоханнесбурга и Минтек («Mintek») в ЮАР. Автором разработана объемная модель оценки ресурсов марганцевого месторождения, типичного для зоны гипергенеза Северо-Западного региона ЮАР.

Публикации по работе. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 9 печатных работах, в том числе в 3 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в 3 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (Scopus).

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 5 глав с выводами по каждой из них, заключения и списка литературы. Диссертация изложена на 152 страницах машинописного текста, содержит 71 рисунок и 9 таблиц. Список литературы состоит из 123 наименований.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю профессору д.г.-м.н. А. Н. Евдокимову за помощь и поддержку, оказанные при проведении исследований и написании диссертационной работы. Автор глубоко признателен заведующему кафедры геологии и разведки месторождений полезных ископаемых д.г.-м.н. А. В. Козлову за конструктивную критику, внимание и поддержку. Автор искренне признателен сотрудникам кафедры ГРМПИ: доц. Я. Ю. Бушуеву, доц. В.А. Степанову, доц. В.И. Леонтьеву., доц. Н.И. Воронцовой., доц. А.Н. Тутаковой., доц. А.И. Колядиной. Наконец, автор хотел бы выразить благодарность Гембицкой И. М., ведущему сотруднику Центра коллективного пользования Горного университета, за помощь в анализе проб для изучения минерального состава.

Описание объекта исследования. Исследуемая территория расположена в пределах региона Хайфельд северного фланга Каапваальского кратона в одном из трех бассейнов Трансваальской супергруппы, называемом Трансваальским бассейном (рисунок 1). В неоархее на этой территории в условиях мелководного морского бассейна накапливались марганценовые доломиты серии Мальмани. Проявления марганца, известные в коре выветривания доломитов подгруппы Мальмани, можно разделить на две группы: 1) марганцевый вад, приуроченный к карстовым структурам верхней части разреза доломитов; 2) марганцевые конкреции, приуроченные к перекрывающим озерным осадкам.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены: экономический обзор производства марганца, генетические классификации месторождений марганца и геолого-промышленные типы марганцевых месторождений в Южно-Африканской Республике. Выполнен обзор и сравнение рудопроявления марганца района Хайфельд с крупными месторождениями в других странах.

Во второй главе рассматривается геологическое строение рудопрооявления Северо-Западное, особенности залегания рудных тел, закономерности распределения руд и стратиграфия рудного разреза.

В третьей главе описываются различные методы, используемые для анализа каменного материала и методика проведения анализов.

В четвертой главе представлены результаты петрографических и геохимических исследований коллекции пород и руд; рассмотрен модальный композиционный анализ для определения источника сноса отложений, содержащих марганцевые конкреции.

В пятой главе представлены генетическая модель рудообразования и компьютерного моделирования (блочная модель) рудопрооявления для оценки ресурсов.

В заключении представлены главные результаты проведенного диссертационного исследования.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях.

1. Образование марганцевых руд рудопрооявления Северо-Западное происходило в результате проявления трех последовательных процессов: накопления марганца в неоархейских доломитах; концентрирования марганца при формировании меловых латеритных кор выветривания по доломитам; перераспределения марганца в перекрывающих коры выветривании неогеновых озерных отложениях.

Марганцевые руды Северо-Западного рудопрооявления представляют собой продукт вторичного обогащения в результате проявления процессов выветривания, наложенного на неоархейские марганценозные доломиты серии Мальмани в Трансваальском бассейне ЮАР (Pharoe и др., 2020). Содержание марганца в доломитах, за редким исключением, не достигали промышленных концентраций; формирование собственно марганцевых руд связано с постседиментационными процессами.

Были выявлены два основных типа руд: марганцевый вад Ватервальского сапролита ($K_2??$), залегающий в карстовых

структурах верхней части разреза доломитов серии Мальмани, и марганцевые конкреции, приуроченные к верхнему ярусу рудного разреза, представленному озерными отложениями (P_1-N_2).

Ввиду отсутствия современных достаточно обоснованных представлений об образовании марганцевых руд в районе Мальмани, были выполнены полевые и аналитические работы по площади распространения и по вертикальным разрезам проявления марганца Северо-Западное.

Содержания редкоземельных элементов в образцах марганцевой руды, нормализованные по хондриту и среднему постархейскому австралийскому глинистому сланцу, приведены на рисунке 2. Относительно эталонных постархейских австралийских сланцев и хондритов $P3Э_{SN}$ и $P3Э_{CN}$ руды характеризуются обогащением легкими редкоземельными элементами.

Средние значения редкоземельных элементов - $MREE_{SN}$ и $MREE_{CN}$ слегка приподняты по отношению к содержаниям легких редкоземельных элементов над эталонными с резким понижением и выравниванием относительных концентраций в спектре тяжелых редкоземельных элементов ($HREE_{SN}$ и $HREE_{CN}$) (рисунок 2). На обоих кривых распределения составов наблюдается выраженная - положительная аномалия Ce_{SN} и отрицательная аномалия Y_{SN} . Такая же тенденция наблюдается и на рис. 2б. Наличие положительной и отрицательной аномалий по относительным содержаниям Ce_{SN} и Y_{SN} соответственно является характерной чертой гидrogenных минеральных осадков (Josso и др., 2016; Цыкин, 2008). Эти аномалии и обогащение руды легкими редкоземельными элементами (LREE) коррелируются с содержаниями гипергенных минералов: криптомелана, голландита и романехита.

Образцы марганцевого вада (WAD) характеризуются положительной аномалией по содержанию Y и отрицательной – по содержанию Ce . Это свидетельствует о раннем формировании марганцевого вада во время Постафриканского I (верхний мел) события. Химический состав марганцевого вада ближе к

особенностям составов черных углистых сланцев морского происхождения. Результаты анализов образцов из рудопроявления Северо-Западное были вынесены на тройную диаграмму с вершинами - Mn, Fe и Cu+Ni+Co, где выделяются поля составов руд, образованных в озерной среде, в условиях континентального шельфа (рисунок 3). Бо и др. (Bau и др., 2014) и Джосо и др. (Josso и др., 2016) предложили дополнительные критерии для генетической классификации рудного вещества, учитывающие соотношения между аномалиями Ce и Y и концентрацией Nd (рисунок 3в). На основе наблюдаемых закономерностей распределения редкоземельных элементов и составов руд генетическая модель Северо-Западного рудопроявления может быть определена следующим образом:

1. В неогархее на платформенном этапе образовалась преимущественно карбонатная толща марганценосных Мальманийских доломитов, марганец в которые мог поступать из гидротермальных флюидов, извергавшихся в период предшествовавшего Вентерсдорпского вулканического события (2,7 млрд. лет), и за счет эрозии близлежащей континентальной суши (рисунок 4: Этап 1).

2. В позднем мелу и среднем кайнозойе были зафиксированы два периода поднятия территории (Burke и Gunnell, 2008; Partridge и Maud, 1987) известные как постафриканские поверхности эрозии (Pask и др., 1999). Эксгумированные в позднем мелу марганценосные доломиты проходили процесс интенсивного химического выветривания, что привело к образованию марганцевого вада за счет разрушения доломитов и углистых сланцев (рисунок 4: Этап 2).

3. Во время миоценового подъема территории и региональной эрозии произошло заполнение карстовых полостей озерными и аллювиальными отложениями (рисунок 4: Этап 3). Образование марганцевых конкреций в них происходило за счет выщелачивания и растворения марганценосных доломитов серии Мальмани (рисунок 4: Этап 4). Рудные компоненты поступали в

вышележащую озерную водную толщу в виде марганцевых коллоидов. Это видно из графиков распределения содержаний редкоземельных элементов (составы образцов доломита идеально совпадают с составами марганцевых конкреций, рисунок 2).

2. Марганцевые руды рудопроявления Северо-Западное представлены двумя ведущими типами, отличающимися по минеральному составу и структурно-текстурным особенностям: марганцевым вадом, марганцевыми конкрециями, источниками марганца для которых были Мальманийские доломиты.

Марганценозные доломиты образуют мощный слой, до 2000 м с содержанием MnO от 0,5 до 8,0 мас.%, на котором развивалась кора выветривания. Доломиты включают участки обогащения черными сланцами и известняками. Эти участки представлены переслаиванием доломитов и маломощных слоев известняков и сланцев. Петрографический анализ аншлифов доломитов на сканирующем электронном микроскопе (SEM) с энергодисперсионным рентгеновским спектрометром (EDS) показали наличие марганцевых карбонатов и силикатов в небольших количествах, что согласуется с мнением Roy (1992, 2006) о том, что первоначальное присутствие карбонатов марганца в качестве первичных минералов может преобразоваться в условиях низкой температуры и интенсивного окисления, приводит к образованию пиролюзита и криптомелана. Первичными минералами здесь могли бы быть: кутногорит и браунит.

Выветрелые верхние части разреза доломитов представлены карстовыми структурами, в которых залегают богатые вторичные руды. Марганцевый вад образует часть базального сапролита, сохранившегося в карстовых структурах в верхней части разреза выветрелых доломитов. Марганцевые конкреции приурочены к озерным отложениям, перекрывающим сапролит с резким эрозионным контактом (Евдокимов и Пхарое, 2021).

Было установлено, что в составе руды преобладают высоковалентные оксиды марганца, в основном состоящие из группы минералов с общей кристаллической структурой: $[A^{+}(^{2+})Mn^{4+}_6Mn^{3+}_2O_{16}]$, где А - катионы K^{+} , Ba^{2+} , Pb^{2+} . Обычно это комплекс минералов, включающий: криптомелан

($K^+[Mn^{4+}_6Mn^{3+}_2]_8O_{16}$), голландит ($Ba^{2+}[Mn^{4+}_6Mn^{3+}_2]_8O_{16}$), романехит ($(Ba, H_2O)_2[Mn^{4+}, Mn^{3+}]_5O_{10}$), литиофорит ($(Al, Li)Mn^{4+}O_2(OH)_2$) и пиролюзит ($\alpha-MnO_2$). В подчиненном количестве присутствуют манганит $MnO(OH)$ и вернадит ($Mn^{4+}, Fe^{3+}, Ca, Na)(O, OH)_2 \cdot nH_2O$). Акцессорные минералы представлены оксидами железа, гематитом (Fe_2O_3) и гетитом [$FeO(OH)$]. В руде отмечаются также включения детритового циркона и ильменита.

Оксидные марганцевые фазы встречаются в основном в виде тонких концентрических оболочек вокруг ядер или обломков других горных пород, совместно с разнородным цементирующим материалом (рисунок 5а, б). В результате процессов выветривания и растворения марганценосных доломитов и повышенной степени окисления окружающей среды, на поздней стадии рудообразования преобладали оксиды марганца с высоким его валентным состоянием (Mn^{4+}): пиролюзит, литиофорит, криптомелан и романехит (рисунок 5). Формирование минералов на этой стадии рудообразования происходило преимущественно путем их прямого осаждения из богатых марганцем водных растворов и в результате трансформации ранее образованных минералов (манганита, вернадита). В частности, наблюдается развитие романехита по пиролюзиту (рисунок 5в, г). Еще одной характерной особенностью руды является процесс обрастания детритовых зерен минералов оксидами марганца (рисунок 5а). Литиофорит присутствует преимущественно в виде тонких слоев с игольчато-волокнистой структурой и внутри поровых пространств (рисунок 5е).

Для понимания пространственного распределения минералов и их сопутствующих примесей в образцах было проведено их элементное картирование на микроструктурном уровне методом SEM с энергодисперсионной рентгеновской спектрометрией. На рисунке 7 показаны профили (А-В), проходящие через различные части образцов. Положительная корреляция между интенсивностями спектров марганца и бария отражает преобладание романехита. Участки с высокой концентрацией алюминия, кремнезема и натрия отражают спектры составов глинистых минералов. Низкое содержание кремнезема, равномерно распределенного по внутриминеральным зонам, является следствием присутствия

остатков детритового кварца и, возможно, зерен кремня в оксидном марганцевом цементе. Высокая интенсивность спектра кремнезема ближе к концу профиля представляет собой силикатное ядро образца.

В разрезе рудопоявления Северо-Западное по глубине залегания, морфологическим признакам, размерам марганцевых конкреций и литологическим признакам, было выделено 8 различных стратиграфических зон (рисунок 6). Нижняя зона состоит из марганцевого вада и крупноконкреционных марганцевых руд с прослоями калькретов в почвенной матрице. Центральная зона представлена средне- и крупноконкреционными марганцевыми рудами, а верхняя зона – мелкоконкреционными марганцевыми рудами в ассоциации с мелкими обломками кварцитов. Геохимические исследования составов проб на широкий ряд основных, редких и редкоземельных элементов, показали обогащение Ba, V, La, Ce, Ni, Co, Cr, Cu, Zn и Zr. Содержание MnO колеблется от 0,8 до 20 масс.%, и в среднем составляет 12 масс. %. В минеральной фазе отобранной исключительно из оболочек марганцевых конкреций содержание марганца (Mn) варьируется от 30 до 70 масс.%. На рисунке 6 показано распределение содержаний основных элементов по вертикальному разрезу. Отмечено, что содержание марганца увеличивается с глубиной. Концентрация MnO показывает сильную положительную корреляцию с содержаниями La, Ce, Cu, Ba, Co и Ni, что, вероятно, свидетельствует о сорбции этих элементов из водных растворов в туннельную структуру оксидов Mn (таблица 1). Значительная корреляция отмечается и по содержаниям всех микроэлементов (рисунок 8). Это говорит о том, что элементы осаждаются из одних и тех же рудных водных растворов.

Содержание редких и редкоземельных элементов в марганцевых конкрециях совпадает с их составом в рудных образцах из подстилающей толщи неоархейских марганценосных доломитов серии Мальмани (GNR DD и DOL) (рисунок 8).

Отношения Co/Zn в конкрециях относительно близки по значениям друг к другу, изменяются в диапазоне от 1,01 до 2,84,

среднее 2,00, а марганцевый вад имеет отличные значения около 0,24. Это указывает на более высокое содержание кобальта в марганцевых конкрециях, чем в ваде. Отношения $(Y/No)_{SN}$ в руде повышены и колеблются от 7,72 до 11,78, в среднем - 8,81. Отношения $(La/Yb)_{SN}$ варьируют в тех же образцах от 1,44 до 1,98 и составляют в среднем 1,65. Коэффициенты $(Eu/Eu^*)_{SN}$ изменяются от 1,13 до 1,19, в среднем составляют 1,17 и коэффициенты Ce/Ce^*_{SN} варьируют от 1,13 до 3,33, в среднем равны 1,61. Из коэффициентов видно, что образцы руды более обогащены легкими редкоземельными элементами, что характерно для гипергенных оксидов марганца, таких как криптомелан и голландит.

3. Образование карста по неогаргейским марганцевым доломитам является ведущим рудоконцентрирующим процессом, что позволяет рассматривать рельеф нижней поверхности палеокарстовых структур как важнейший элемент геометрии рудных тел и подсчета ресурсов руд.

С целью оценки промышленного потенциала Северо-Западного рудопоявления на площади рудопоявления марганца была запроектирована прямоугольная геологическая сеть (200 x 150 м) из 70 разведочных шурфов (рисунок 9). Подсчеты ресурсов марганцевой руды производились на базе компьютерной программы моделирования (Micromine 2020). Характерной особенностью распределения мощностей рудного вещества на площади рудопоявления является отчетливая приуроченность наибольших из них к субширотной зоне активизации карстового процесса. На рисунке 9 представлена гипсометрическая карта лицензионной площади General Nice Mine, на которой показаны области структурных максимумов и минимумов. Структурные понижения рельефа представлены впадинами и карстовыми воронками, к которым приурочены толщи богатых руд, представленные марганцевым вадом и крупноконкреционными марганцевыми рудами.

Блочная модель (БМ), построенная на основе выявленных закономерностей распределения полезного компонента, при принятой геометрии и плотности разведочной сети наиболее полно иллюстрирует морфологические особенности и объемы рудных тел.

Применение блочного моделирования дает возможность оценивать запасы отдельно для различных доменов в пределах месторождения. Использование статистически определенного и геологически обоснованного бортового содержания в качестве граничного параметра при оконтуривании рудных тел марганцевой руды позволило выявить однородные домены и обосновать оптимальный метод подсчета ресурсов.

Гистограмма распределения марганца по абсолютным значениям содержаний марганца (рисунок 10) выделяется пять отдельных популяций руд, где MnO: от 1 до 2 %, от 2 до 4%, от 4 до 7%, от 7 до 11%, 11 до 18%. Первые две совокупности отвечают бедной мелкоконкреционной руде из верхней части рудного разреза (рисунок 12). Сравнивая эти графики, можно сделать вывод, что логарифмический масштаб позволяет четко выделять группу составов руд с низкими, некондиционными содержаниями марганца.

Нами был применен метод индикаторного крикинга для классификации ресурсов рудопроявления марганца Северо-Западное (таблица 3). Подсчет количества полезного компонента в каждом блоке был произведен с использованием результатов геостатистического анализа, количества горных выработок. В наиболее изученную часть рудопроявления был отнесен блок с поисковым эллипсоидом самого меньшего радиуса. Здесь учитывались данные по 4 шурфам из 4 секторов. Этот блок был оценен как измеренные ресурсы категории P_1 . Второй блок с радиусом поискового эллипсоида равном длинной оси вариограммы, также учитывал данные по 4 шурфам из 4 секторов, но расстояние между ними больше. В итоге ресурсы этого блока отнесены к категории исчисленных- P_2 . Остальной блок ресурсов марганца имеет разбросанные точки опробования и классифицируется как предполагаемые, категории P_3 (рисунок 11).

Существует ряд методов интерполяции показателей качества полезного ископаемого в БМ. При использовании методов обратных расстояний и обычного кригинга для интерполяции содержаний каждый однородный статистический домен рассматривают отдельно. Оба метода были применены для интерполяции содержаний Mn в рудопроявлении Северо-Западное.

По результатам блочного моделирования Северо-Западного рудопоявления марганца были подсчитаны ресурсы по различным категориям (таблица 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается решение актуальной научной проблемы - выявление закономерностей проявления марганцевой минерализации на северо-западе Южно-Африканской Республики. В процессе ее решения было уточнено геологическое строение Северо-Западного рудопоявления, определен минеральный и химический состав руд, выявлены закономерности размещения и формирования марганцевой минерализации, проведено определение промышленного потенциала Северо-Западного рудопоявления марганца в ЮАР. Основные результаты работы сводятся к следующему.

1. Установлено, что первичное накопление марганца началось в неоархее в мелководном эпиконтинентальном морском бассейне, где накапливались марганценовые доломиты с прослоями черных углистых сланцев.

2. Развитие карстового процесса вызвало увеличение локальной мощности рудного слоя. К карстовым впадинам приурочены концентрации порошкообразного марганцевого вада, марганцевых конкреций и марганцевых корок.

3. Индикаторные свойства редких и редкоземельных элементов в марганцевых конкрециях и ваде позволили восстановить последовательность формирования залежей марганцевой руды. Выделяется 4 основных этапа рудообразования:

- На платформенном этапе сформировалась толща неоархейских Мальманийских доломитов в условиях эпиконтинентального морского бассейна; марганец поступал из гидротермальных флюидов, извергавшихся в период предшествовавшего Вентерсдорпского вулканического события (2,7 млрд. лет) и, вероятно, за счет эрозии близлежащей континентальной суши.

- В позднем мелу и среднем кайнозое были зафиксированы два поднятия и эрозии поверхности суши, которые привели к денудации Мальманийских доломитов и прослоев, углистых сланцев.

- Отступление уровня моря в миоценовый период привело к образованию озерных отложений и их частичному накоплению в карстовых впадинах вдоль региона Хайфельд.

- Во время последующего миоценового поднятия и выветривания доломитов происходило образование марганцевых конкреций с рудным веществом, сформированным за счет выщелачивания и растворения марганценовых доломитов Мальманийской подгруппы в озерной обстановке.

4. В минеральном составе руды установлена группа оксидных минералов марганца с общей кристаллической структурой: $[A^{+}(^{2+}) (Mn^{4+}_6Mn^{3+}_2)O_{16})]$, где А - K^+ , Ba^{2+} , Pb^{2+} : криptomелан, голландит, романехит, пиролюзит, манганит, вернадит и впервые здесь обнаруженный – литиофорит.

5. Компьютерная модель рудопроявления, составленная в программе Micromine 2020 позволила выявить закономерности распределения содержаний полезного компонента на площади исследования. Характерной особенностью распределения мощностей рудного вещества на площади рудопроявления является отчетливая приуроченность наибольших из них к субширотной зоне активизации карстового процесса. Используя метод индикаторного кригинга блочных моделей рудных тел была выполнена геометризация и подсчет ресурсов отдельных промышленных сортов руд, что позволяет отнести Северо-Западное рудопроявление марганца к категории средних по масштабу.

Полученные новые данные по ресурсам рудопроявления Северо-Западное позволяют рекомендовать добычным национальным компаниям начать здесь производственные разведочные работы для отработки выявленных объемов марганцевых руд.

Генетическая модель рудопроявления составляет теоретическую часть диссертационной работы и может быть использована в дальнейшем для определения перспектив

марганцевоносности новых, еще не изученных районов африканского континента.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из перечня ВАК

1. **Пхарое, Б.Л.** Состав и реконструкция источников сноса терригенных отложений на северо-западе ЮАР/ Б.Л. Пхарое., А.Н. Евдокимов// Геология и геофизика юга России. -2020. -Т.10. –С. 124-149.

2. Евдокимов, А.Н. Особенности минерального и химического составов Северо-Западного рудопроявления марганца в районе Хайфельда, ЮАР/ А.Н. Евдокимов., **Б.Л. Пхарое**// Записки Горного Института. -2021. -Т.248. –С.1-14.

3. Евдокимов, А.Н. Индикаторная роль редкоземельных и микроэлементов Северо-Западного рудопроявления марганца (ЮАР) в генетической модели гипергенных марганцевых месторождений/ А.Н. Евдокимов., **Б.Л. Пхарое**// Записки Горного Института. -2021. -Т.260.

Публикации в изданиях, входящих в базы данных и системы цитирования (Scopus)

1. **Pharoe, B.K.** Mineralogy, geochemistry and genesis of the post-Gondwana supergene manganese deposit of the Carletonville-Ventersdorp area, North West Province, South Africa/ B.K. Pharoe., A.N. Evdokimov, I.M. Gembitskaya, Y.Y. Bushuev// Ore Geology Reviews. - 2020. –Vol.120. P. 103372.

2. **Pharoe, B.K.** Mineral composition and reconstruction of the source areas of manganese-bearing alluvial deposits in the Ventersdorp area, South Africa/B.K. Pharoe., A.N. Evdokimov, Y.Y. Bushuev// Journal of African Earth Sciences. -2020. –Vol.168. P. 103841.

3. **Pharoe, B.K.** Mineralogy, geochemistry and geological occurrence of supergene manganese ore mineralization in North West Province, South Africa/B.K. Pharoe., A.N. Evdokimov, I.M. Gembitskaya, C. Baiyegunhi, Z. Nxantsiya // Russian Journal of earth Sciences. -2020. –Vol.20. P. 1-19.

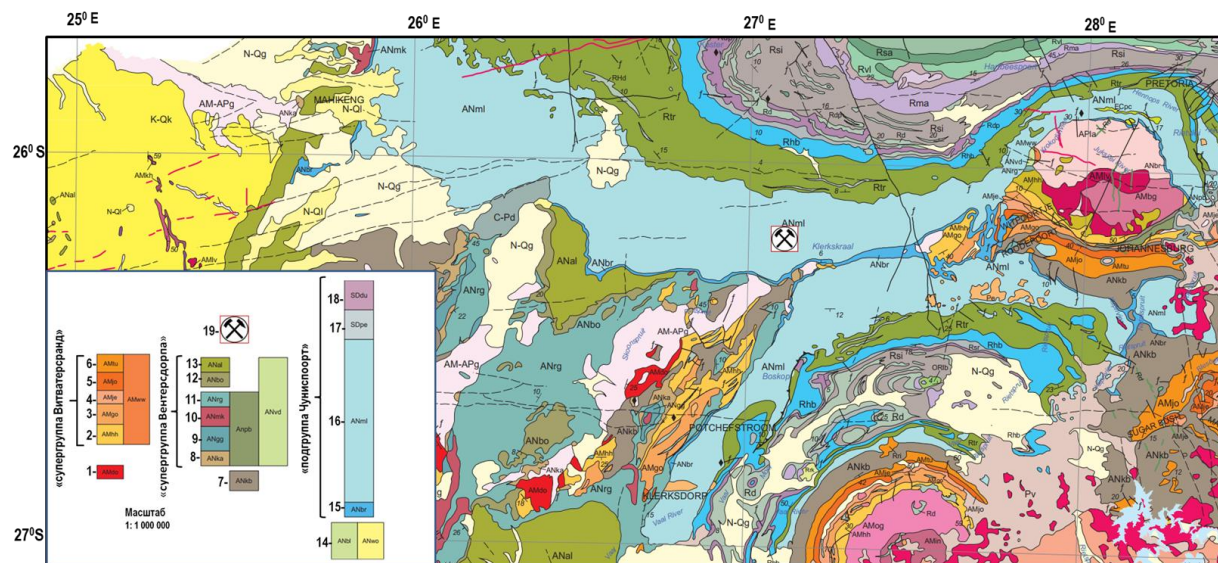


Рисунок 1 - Схема геологического строения северо-западной части Каапваальского кратона к западу от Йоханнесбурга (Council for Geoscience, 2019). Где: 1 - мафические и фельзитические лавы, кварцевые конгломераты и сланцы группы Доминион (Ar_1^1); 2, 3, 4 - морские сланцы, песчаники и конгломераты группы «West Rand» (Ar_1^2); 5, 6 - золотосные конгломераты, сланцы, песчаники и кварциты группы «Central Rand» (Ar_1^3); 7 - мафические лавы супергруппы Вентерсдорпа (Ar_1^4); 8, 9, 10, 11, 12, 13 - базальтовые лавы, алевролиты, туфовые сланцы супергруппы Вентерсдорпа (Ar_1^5); 14 - песчаники, алевролиты и вулканиты нижнего Трансвааля (Ar_1^6); 15 - кварциты серии Черного Рифа (Ar_1^7); 16 - площадь Мальманийской доломитовой подгруппы (Ar_2); 17 - железистые фации формации Пенге (Pr_1^1), 18 - доломиты и известняки формации «Deutschland» (Pr_1^2); 19 - объект исследования («лицензионная площадь: General Nice Mine L.t.d») на доломитах серии Мальмани.

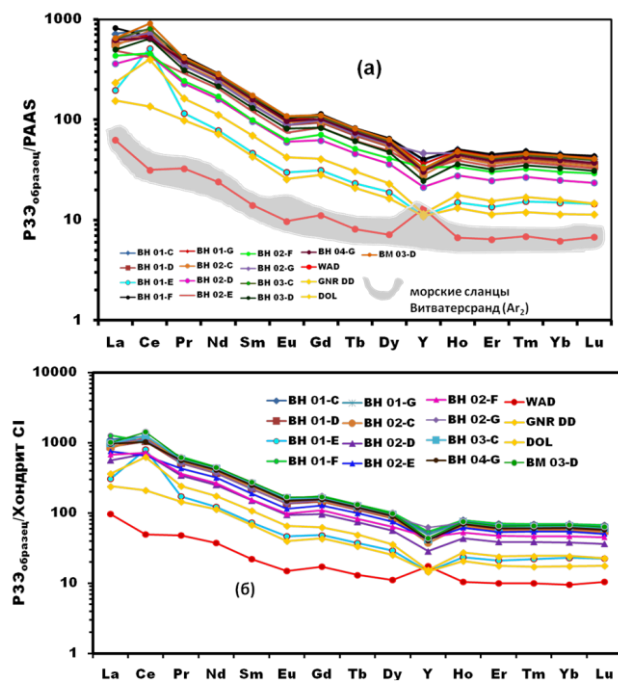


Рисунок 2 - Спектры распределения содержаний редкоземельных элементов, нормированных по средним значениям PAAS [Taylor и McLennan, 1985] и хондриту [Sun и McDonough, 1989] для рудных образцов. Где: WAD – марганцевый вад, GNR DD, DOL – неоархейские марганценовые доломиты серии Мальмани, и остальные образцы – марганцевые конкреции.

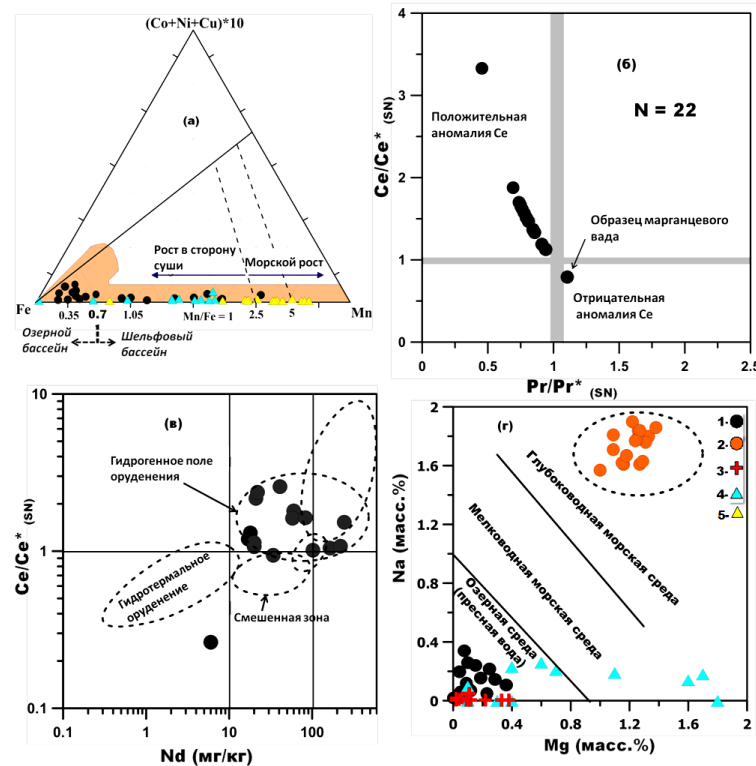


Рисунок 3 - Диаграммы генетической классификации марганцевого рудообразования: а) тройная диаграмма - Fe - Mn - (Co+Ni+Cu)*10 «На графике видно, что тенденция роста исследуемых образцов соответствует озерной обстановке» (Nicholson и др. 1997); б) график $Ce_{SN}/Ce^*_{SN} - Pr_{SN}/Pr^*_{SN}$, указывает на наличие сильной положительной аномалии по содержанию Ce в исследуемых образцах (Bau и Dulski, 1996); в) аномалия $Ce_{SN}/Ce^*_{SN} - Nd$, подтверждает гидрогенетический характер исследуемых образцов, образованных в ходе осаждения рудных веществ из коллоидных зольей выщелачиваемых и растворенных марганценовых доломитов (Hein и др. 2016); г) график для разделения геосфер образования марганцевых залежей; 1 - объект исследования, 2 - образцы из океанических ферромарганцевых конкреций (Острова Кука), 3 - образцы из рудопоявления марганца Рейдел (ЮАР), 4 - образцы из рудопоявления Уэст-Виц (ЮАР), 5 - образцы из марганцеворудного поля Калахари (Nicholson, 1992; Rasmeni 2012)

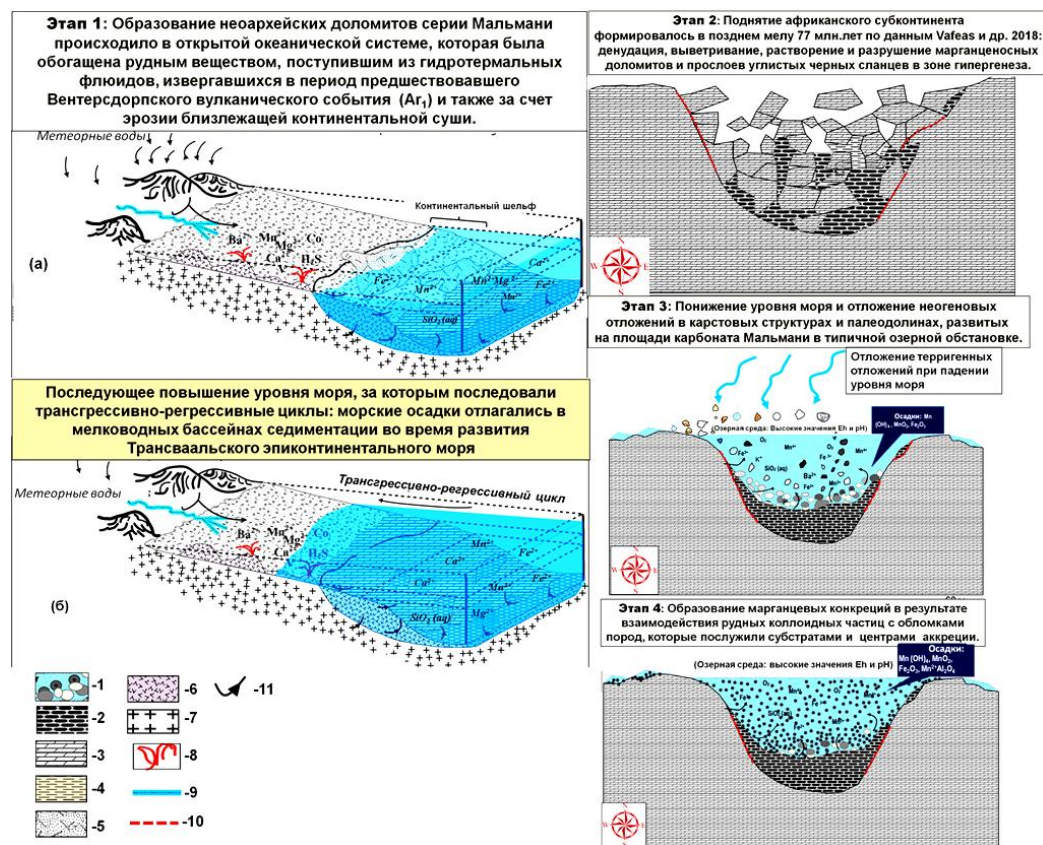


Рисунок 4 - Модель образования Северо-Западного рудопоявления марганца; где: 1 - марганцевые конкреции (N_1), 2 - марганцевый вад ($K_2??$), 3 - неогарейские Мальманийские доломиты (Ar_2), 4 - черный углистый сланец ($??$), 5 - кварцит серии Черного Рифа (Ar_1), 6 - базальтовые лавы Вентерсдорпа (Ar_1), 7 - граниты, гранито-гнейсы Каапваальского кратона, 8 - вулканическое извержение, 9 - речные системы (первый, второй и четвертый этапы), 10 - разломы, 11 - гидротермальные растворы, связанные с предыдущим вулканическим событием Вентерсдорпа.

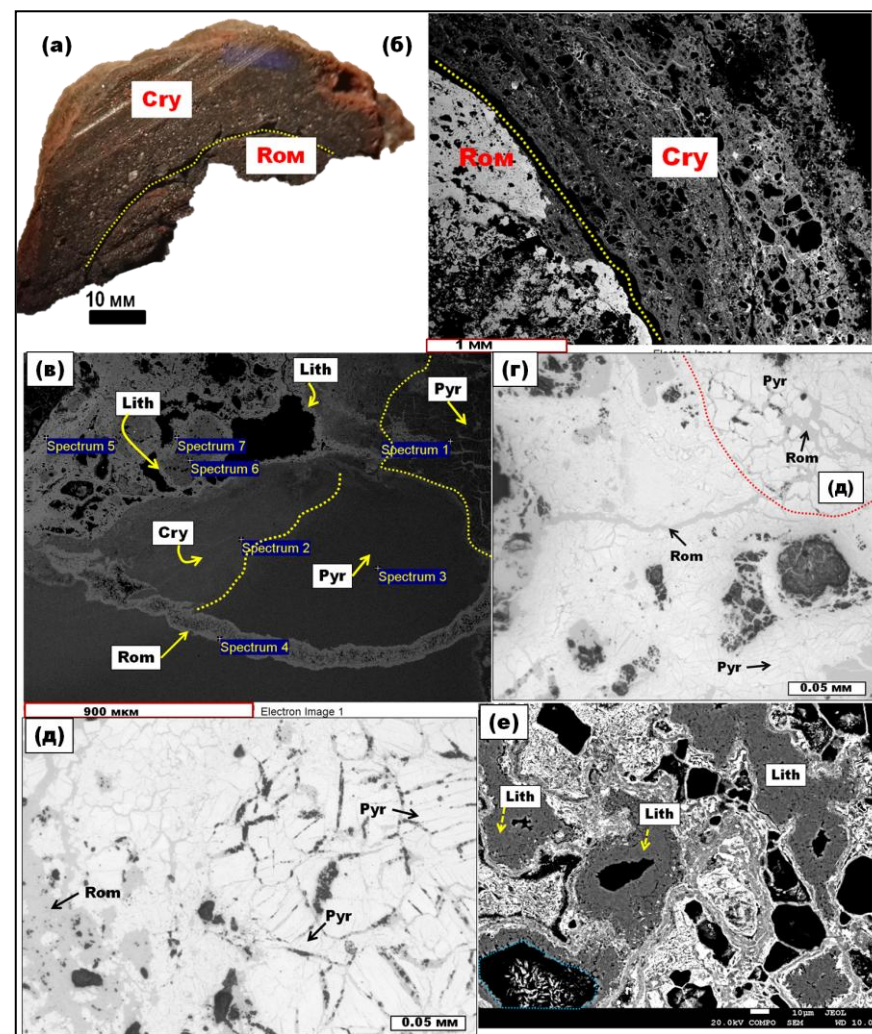


Рисунок 5 - Минералы оксидных марганцевых руд: а - внутренняя морфологическая характеристика марганцевых конкреций, показывающая различные породы ядер, б, в - образцы криптомелана и романехита, г - марганцевая корка, д, е - почковидная текстура концентрических пластов оксидов марганца: Cry-криptomелан, Pyr- пиrolюзит и Rom- романехит.

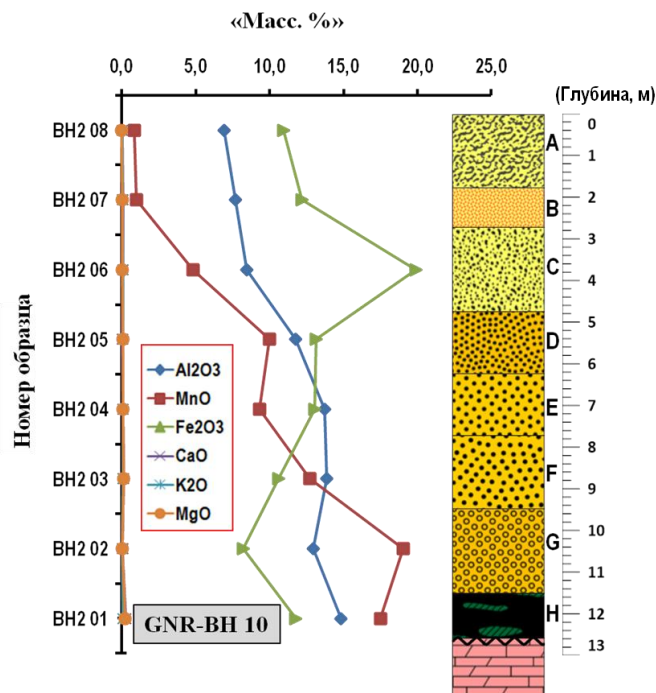


Рисунок 6 – Содержание оксидов марганца, алюминия, железа, кальция, магния и натрия в различных зонах по шурфам GNR-BH 10

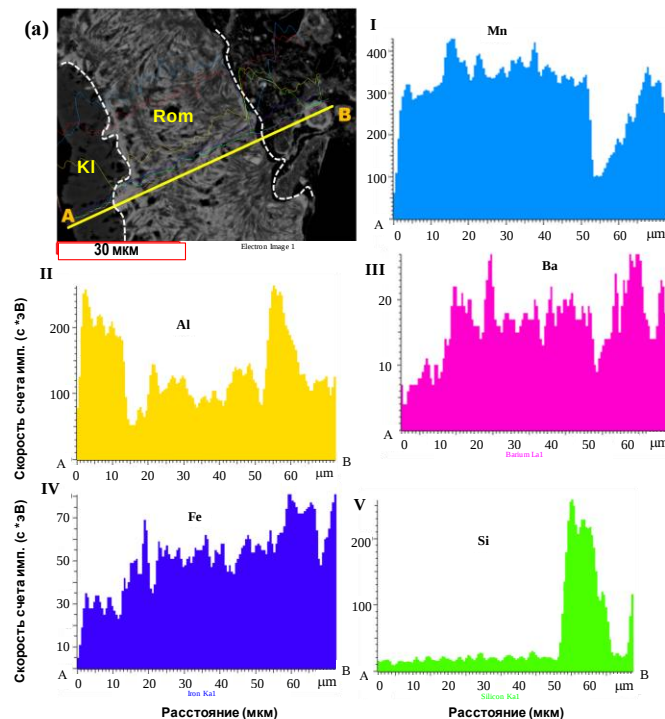


Рисунок 7 - Минералы (романехит «Rom», криптомелан «Скрыт», каолинит «Kl» (а, б) и картирование пространственного распределения преобладающих элементов в образцах горных пород. На рисунке видно, что яркие участки отражают оксиды марганца, с преобладанием Ba, I Mn. Более темные участки в основном связаны с положительными пиками Al – участки, обогащенные глинистыми минералами.

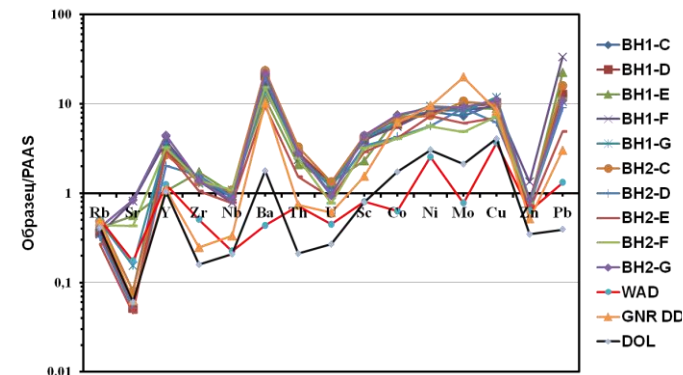


Рисунок 8 – Распределения содержаний микроэлементов рудных образцов [нормированных по средним содержанием PAAS –Taylor и McLennan, 1985

Таблица 1 – Корреляционная матрица коэффициента Пирсона для РЗЭ рудных образцов (n=22) (анализ ICP-MS)

	MnO	La	Ce	Ni	Co	Cu	Ba
MnO	1	0,973	0,907	0,728	0,796	0,833	0,951
La	0,973	1	0,9449	0,7809	0,8536	0,8879	0,9663
Ce	0,907	0,945	1	0,874	0,945	0,964	0,969
Ni	0,728	0,781	0,874	1	0,954	0,927	0,777
Co	0,796	0,854	0,945	0,954	1	0,963	0,882
Cu	0,833	0,888	0,964	0,927	0,963	1	0,898
Ba	0,951	0,966	0,969	0,777	0,882	0,898	1

Таблица 2 - Статистика данных опробования

Параметр	Mn (%)
Количество проб	428
Минимум	0,3
Максимум	23,51
Среднее	10,71
Медиана	8,79
Коэффициент вариации	0,44
Стандартное отклонение	4,76

Таблица 3 - Ресурсы марганца Северо-Западного рудопроявления

Категории	Руда, Mn (млн.т)
Оцененные (Measured) P ₁	30,9
Вывявленные (Indicated) P ₂	39,9
Предполагаемые (Inferred) P ₃	73,5
Всего	144,3

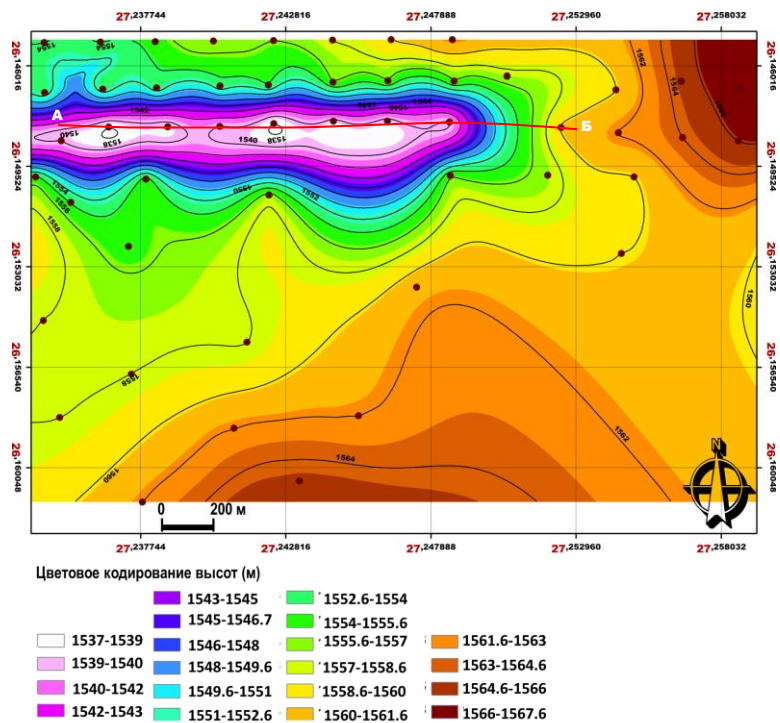


Рисунок 9 - Схема расположения геологоразведочных выработок (шурфов) на гипсометрической карте Северо-Западного рудопоявления

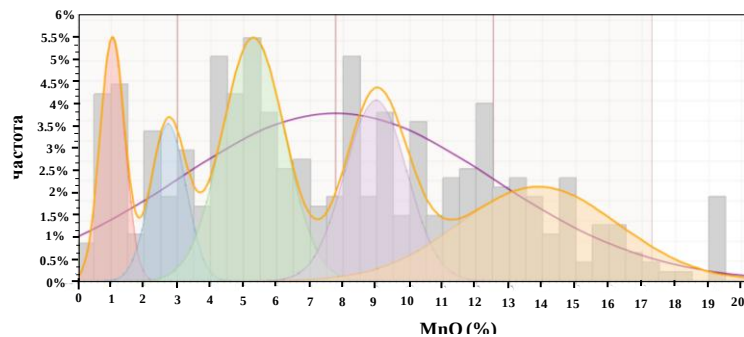


Рисунок 10 - Гистограмма, показывающая распределение содержания марганца.

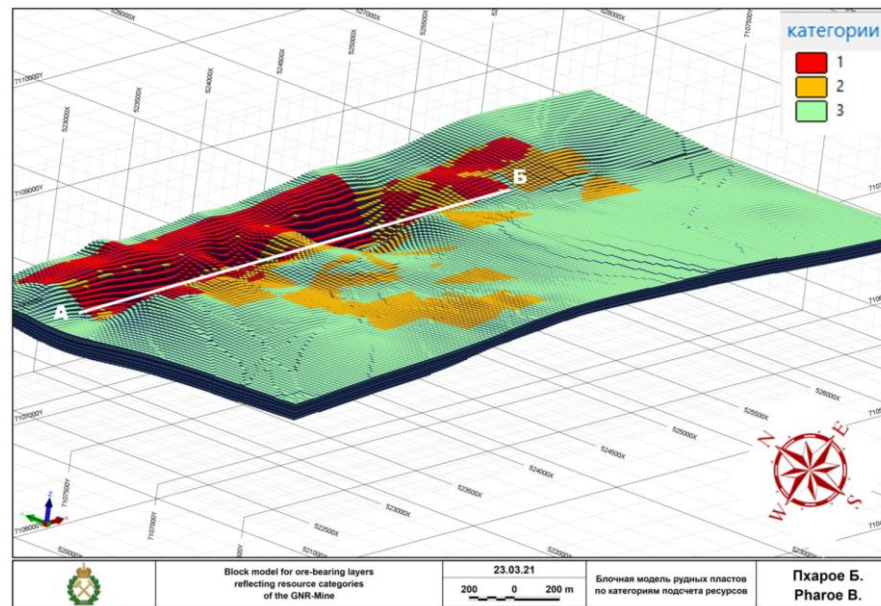


Рисунок 11 - Блочная модель ресурсов Северо-Западного рудопоявления по категории. Где: 1- оцененные ресурсы (P_1), 2- выявленные ресурсы (P_2), 3- предполагаемые ресурсы (P_3).

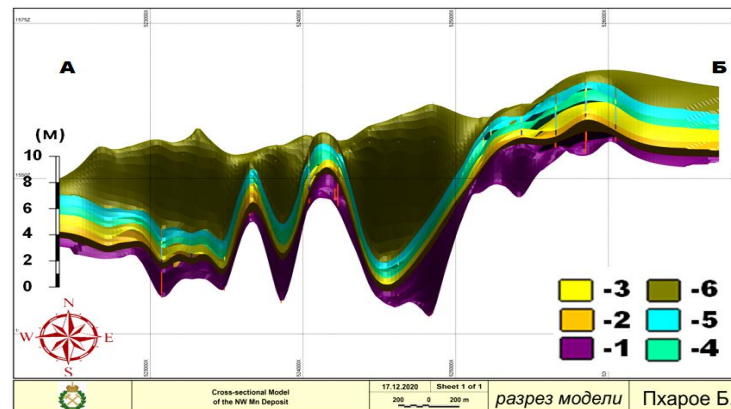


Рисунок 12 - Геологический разрез Северо-Западного марганцевого рудопоявления по линии А-В на рисунках 10 и 13. Где: 1 - марганцевый вад; 2 - крупноконкреционные марганцевые руды с прослоями калькретов; 3 - крупно - и среднеконкреционные марганцевые руды; 4 - среднеконкреционные марганцевые руды; 5 - средне - и мелкоконкреционные марганцевые руды; 6 - мелкоконкреционные марганцевые руды.