

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет»

На правах рукописи

Пхарое Бенедикт Литсоняне



**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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:
доктор геолого-минералогических наук
Евдокимов Александр Николаевич

Санкт-Петербург – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 ЭКОНОМИКА МАРГАНЦА В ЮЖНО-АФРИКАНСКОЙ РЕСПУБЛИКЕ.....	11
1.1 Экономический обзор марганца в мире.....	11
1.2 Экономический анализ марганца	12
1.3 Производство и добыча марганца в Южно-Африканской Республике.....	20
1.4 Классификации месторождений и руд марганца.....	23
1.5 Геолого-промышленные типы марганцевых месторождений.....	26
1.6 Выводы по 1 главе.....	30
ГЛАВА 2 ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО РУДОПРОЯВЛЕНИЯ.....	31
2.1 Геологическая обстановка Трансваальской супергруппы	31
2.1.1 Марганцевая минерализация в бассейне Грикваленд-Вест.....	34
2.1.2 Марганцевая минерализация в Трансваальском бассейне.....	40
2.2 Тектоническое развитие Трансваальского бассейна	42
2.3 Тектоническое положение Северо-Западного рудопроявления.....	47
2.4 Геологическое строение Северо-Западного рудопроявления марганца	52
2.5 Стратиграфия рудопроявления марганца на северо-западе ЮАР	55
2.6 Выводы по 2 главе.....	59
ГЛАВА 3 МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ МАРГАНЦЕВЫХ РУД..	61
3.1 Полевые работы и отбор проб.	61
3.2 Камеральные работы.....	62
3.3 Методика подготовки проб	65
3.3.1 Методы анализа химического состав руд.....	65
3.3.2 Методы исследования руд по шлифам и аншлифам	70
3.4. Выводы по 3 главе.....	74
ГЛАВА 4 МИНЕРАЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ И ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РУД СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО РУДОПРОЯВЛЕНИЯ	75
4.1 Описание вмещающих пород и руд	75
4.1.1 Петрографическая характеристика руд	80

4.1.2 Модальный композиционный анализ терригенных отложений	90
4.3 Выводы по 4 главе.....	110
ГЛАВА 5 РУДОГЕНЕЗ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО РУДОПРОЯВЛЕНИЯ МАРГАНЦА	112
5.1 Гипотеза образования марганцевых руд.....	112
5.2 Генетическая модель Северо-Западного рудопроявления марганца.....	114
5.3 Перспективы промышленного освоения марганцевой руды рудопроявления Северо-Западное	126
5.4 Выводы по 5 главе.....	135
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	136
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	139

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

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 Траансваальского 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 [37, 72, 76, 93, 116] начали проводить исследования по отдельным площадям региона. Их находки указывали на возможность обнаружения марганцевых месторождений промышленного значения.

Цели и задачи

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

Для достижения поставленной цели автором были решены следующие задачи:

- Изучены особенности геологического строения неогархейских доломитов для определения возраста проявления и закономерностей локализации карстовых процессов.
- Уточнены минеральный и вещественный составы руд.
- 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.
- Разработана генетическая модель образования рудопроявления Северо-Западное.
- Выполнена статистическая обработка геологоразведочных данных полученных по результатам опробования шурфов и оценен ресурсный потенциал Северо-Западного рудопроявления марганца

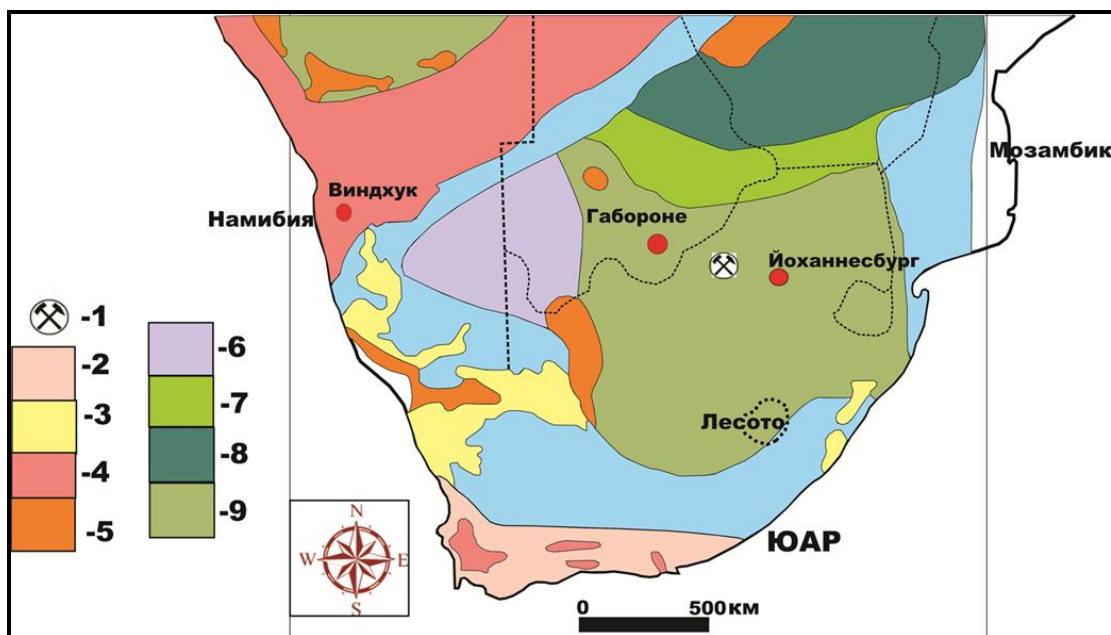


Рисунок 1.1 - Схема геологического строения Южной Африки [56]; где: 1 - участок лицензионной площади «General Nice Mine» на рудопроявлении марганца

Северо-Западное; 2 - кварцевые арены, граувакки, сланцы, алевролиты супергруппы Кейп (P_2); 3 - метаосадочные породы, граниты во время орогенеза Кибаран (R_2); 4 - неопротерозойские панафриканские метаморфические орогенные (амфиболиты, гранулиты, чарнокиты (PR_2^3); 5 - гнейсы, граниты,

сформированные в период Убендианской орогении (PR_1^2); 6 - граниты, гнейсы, риолиты, милониты кратона Ренобот (PR_1^1); 7 - архейские граниты, зеленокаменные формации, карбонатиты, гранулиты, метагаббро пояса Лимпопо (Ar_2); 8 - архейские гранитные, гнейсовые и зеленокаменные комплексы кратона Зимбабве (Ar_1^2); 9 - архейские гранитные, гнейсовые и зеленокаменные комплексы, карбонатиты, коматииты кратона Каапвааль (Ar_1^1). [39]

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

- Установлены условия формирования оксидов марганца в рудопроявлении Северо-Западное.
- Выявлены региональные и локальные факторы накопления рудных элементов в депрессионных структурах марганценосных доломитов.
- Впервые в рудах Северо-Западного рудопроявления обнаружен литиофорит - неизвестный здесь ранее минерал позднедиагенетического образования.
- 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 марганцевоносных 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 исследований

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 спектрометрии (для макро- и микроэлементов), метод масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (для содержаний химических элементов $n \cdot 100$ ppm и менее), метод рентгеновской порошковой дифрактометрии. Геохимические анализы проводились с помощью рентгенофлуоресцентной спектрометрии 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 породы 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 «Arcmap 10».

Положения, выносимые на защиту

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 и апробация результатов

Установлена последовательность формирования рудопроявления марганца от архейского этапа накопления в процессе карбонатного осаждения в морской среде до последующего обогащения в ходе корообразования и аллювиального перемыва рудного вещества. Доказательством достоверности полученных результатов являются: обоснование рекомендаций для промышленного освоения рудопроявления; статистически значимый объем опробования – 428 образцов и последующих аналитических исследований рудного вещества; использование прогрессивных методов исследования образцов минералов и грных пород на современных приборах; сопоставление полученных данных с опубликованными ранее по аналогичным объектам в Южной Африке.

Основные идеи и научные результаты диссертационного исследования были представлены на следующих всероссийских и международных научных конференциях и конкурсах:

1. 2 Международный конгресс «Арабский журнал наук о Земле» в Тунисе (2019 г)

2. XVI Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов (Санкт-Петербург, 2020 г.).

3. IV Международная научно-практическая конференция «Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке» (Санкт-Петербург, 2018 г.).

4. Вебинар «Геология Среднего Востока и Средиземноморья».в Тунисе 2020 г.;

5. XXVI Всероссийская научная конференция «Уральская минералогическая школа по поискам золота и платины», в Екатеринбурге 2020 г.;

6. Ежегодная конференция по наукам о Земле на тему: Наука о Земле - точка опоры человеческого развития «Council for Geoscience Annual Report» в ЮАР 2021 г.

По теме диссертации опубликовано 9 работ.

Публикации

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 диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и библиографического списка. Содержит 152 страницы машинописного текста, 71 рисунок, 9 таблиц, список литературы 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. 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.

ГЛАВА 1 ЭКОНОМИКА МАРГАНЦА В ЮЖНО-АФРИКАНСКОЙ РЕСПУБЛИКЕ

1.1 Экономический обзор марганца в мире

Минералогия марганца. Марганец - светло-серый серебристый металл, имеющий плотность $7,2 - 7,5 \text{ г/см}^3$. Он отличается от железа большей твердостью и хрупкостью при невысокой температуре. В чистом виде марганец в природе не встречается.

Впервые он был обнаружен шведским химиком Ю.Г. Ганом в 1774 г. Температура плавления марганца 1244°C . Он (марганец) встречается в природе более чем в 200-х минеральных видах. Однако, лишь немногие из них представляют экономический интерес. К промышленным минералам марганца относятся *оксиды*: манганит ($\text{Mn}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), вернадит ($\text{MnO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), криптомелан ($\text{K}(\text{Mn}^{4+}, \text{Mn}^{2+})_8\text{O}_{16}$), романехит ($(\text{Ba}, \text{H}_2\text{O})_2[\text{Mn}^{4+}, \text{Mn}^{3+}]_5\text{O}_{10}$), псиломелан ($m\text{MnO} \cdot \text{MnO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), голландит ($\text{Ba}^{2+}[\text{Mn}_6^{4+}, \text{Mn}_2^{3+}]_8\text{O}_{16}$), пиролюзит (αMnO_2), бёрнессит ($\text{Na}_4\text{Mn}_{14}\text{O}_{27} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$), литиофорит ($(\text{Al}, \text{Li})\text{Mn}^{4+}\text{O}_2(\text{OH})_2$), гаусманит ($\text{Mn}^{2+}\text{Mn}^{3+}_2\text{O}_4$), тодорокит $[(\text{Ca}, \text{Na}, \text{K})(\text{Mg}, \text{Mn}^{2+})\text{Mn}^{4+}_5\text{O}_{12} \cdot x\text{H}_2\text{O}]$; *силикаты*: браунит $[\text{Mn}^{2+}\text{Mn}_6^{3+}(\text{O}_8)(\text{SiO}_4)]$, родонит $[\text{MnSiO}_3]$, сперссатин ($\text{Mn}_3\text{Al}[\text{SiO}_4]_3$) и *карбонаты*: кутнагорит ($\text{Ca}(\text{Mn}, \text{Mg}, \text{Fe}^{2+})(\text{CO}_3)_2$), родохрозит (MnCO_3), манганокальцит $[(\text{Mn}, \text{Ca})\text{CO}_3]$ и олигонит $[(\text{Mn}, \text{Fe})\text{CO}_3]$ содержащий от 40 до 63% марганца.

Применение марганца. Более 90% марганца в мире идет на производство стали в виде ферросплавов, поэтому неудивительно, что спрос на марганец в основном обусловлен развитием производства стали. В настоящее время потребление марганцевых сплавов возрастает. Львиная доля прироста производства приходится на Китай. Марганцевая руда является основным источником марганца для производства чугуна и стали. На сегодняшний день не существует технологии, которая могла бы заменить роль марганца в производстве стали. Марганец придает сплавам полезные механические свойства, а именно твердость, ударную вязкость и коррозионную стойкость. Добавки марганца в

сплавы осуществляют в виде необработанной руды. В итоге получают ферромарганец (FeMn), силикомарганец SiMn, высокоуглеродистый ферромарганец HC-FeMn, рафинированный средне-низкоуглеродистый ферромарганец (ref. MC-LC FeMn) и марганец металлический, который служит в качестве десульфуратора при производстве стали. Сплавы на основе марганца (+65%) используют, главным образом, в производстве стали, в качестве раскислителя. Согласно З. Бухгольц и С. Фойя [42], марганец также добавляется к стали в форме ферромарганца и служит в качестве закрепителя серы, и в ограниченной степени в качестве легирующего элемента. 8% Mn используется в неметаллических отраслях, таких как сухие аккумуляторы и химическая промышленность. Небольшое количество марганца в форме металла используется для производства цветных сплавов, где он повышает коррозионную стойкость. Способность марганца существовать в шести различных состояниях окисления используется в химической промышленности, где соединения марганца используются в качестве окислителей, красителей и удобрений.

1.2 Экономический анализ марганца

Мировые ресурсы и запасы. Общие мировые ресурсы марганцевой металлической руды оцениваются примерно в 4,9 млрд. т [71, 73], а мировые запасы марганца составляют около 1,3 млрд. т (рисунок 1.2) [114]. Большая их часть заключена в недрах Южно-Африканской Республики, Украины, Австралии, Бразилии, Индии, Китая, Габона и Мексики (таблица 1.1) [113]. В одном только поле Калахари находится более 9 миллиардов тонн марганцевой руды с содержанием марганца от 22 до 45%. Калахари является крупнейшим месторождением марганца в мире [69, 82].

Таблица 1.1 - Мировая добыча Mn по странам в млн. т на 2019 и 2020 годы [144]

Страна	Добыча		Запасы
	2019	2020	2020 г
ЮАР	5,800	5,200	520,000
Бразилия	1,740	1,200	270, 000
Австралия	3,180	3,300	230, 000
Украина	500	550	140, 000
Габон	2,510	2,800	61,000
Китай	1,330	1,300	54,000
Индия	801	640	34,000
Гана	1,550	1,400	13,000
Казахстан	140	130	5000
Мексика	202	190	5000
Мьянма (Бирма)	430	400	-
Кот-Д'Ивуар	482	460	-
Грузия	116	150	-
Малайзия	390	350	-
Вьетнам	158	150	-
Другие страны	270	270	-

Высокоуглеродистый ферромарганец (НС-FeMn). Мировое производство высокоуглеродистого ферромарганца сократилось в 2020 году примерно до 3,7 млн. тонн, что составляет 12%, по отношению к предыдущему году (рисунок 1.5). Сокращение произошло во всех основных странах-производителях, включая Китай, Малайзию, Иран, Вьетнам, Норвегию и в меньшей степени Индию, Японию, Южную Корею, Россию и Украину. В настоящее время на долю Китая приходится 41% мирового производства НС-FeMn, за ним следуют Индия (12%) и Япония (8%) (рисунок 1.6).

Запасы марганцевой руды по основным странам в млн.т и в %
-2021

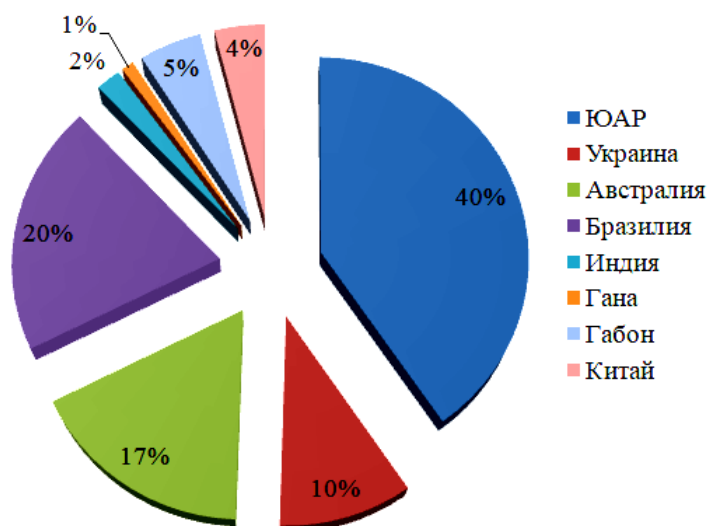
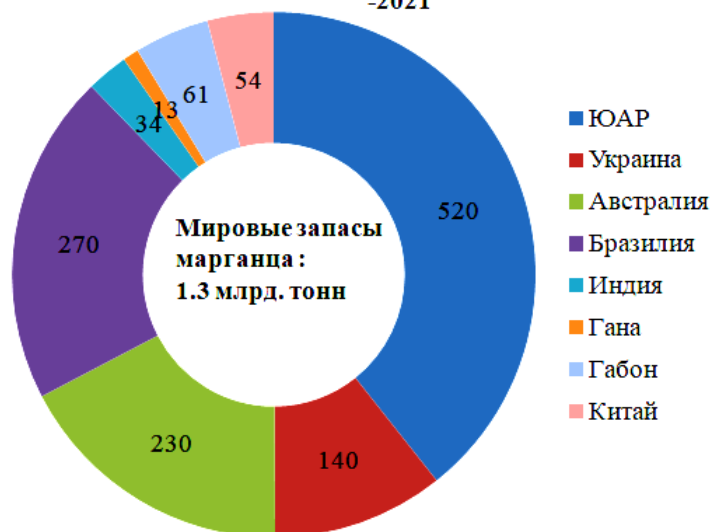


Рисунок 1.2 - Мировые запасы марганца в млн. тонн в 2021 году [144]

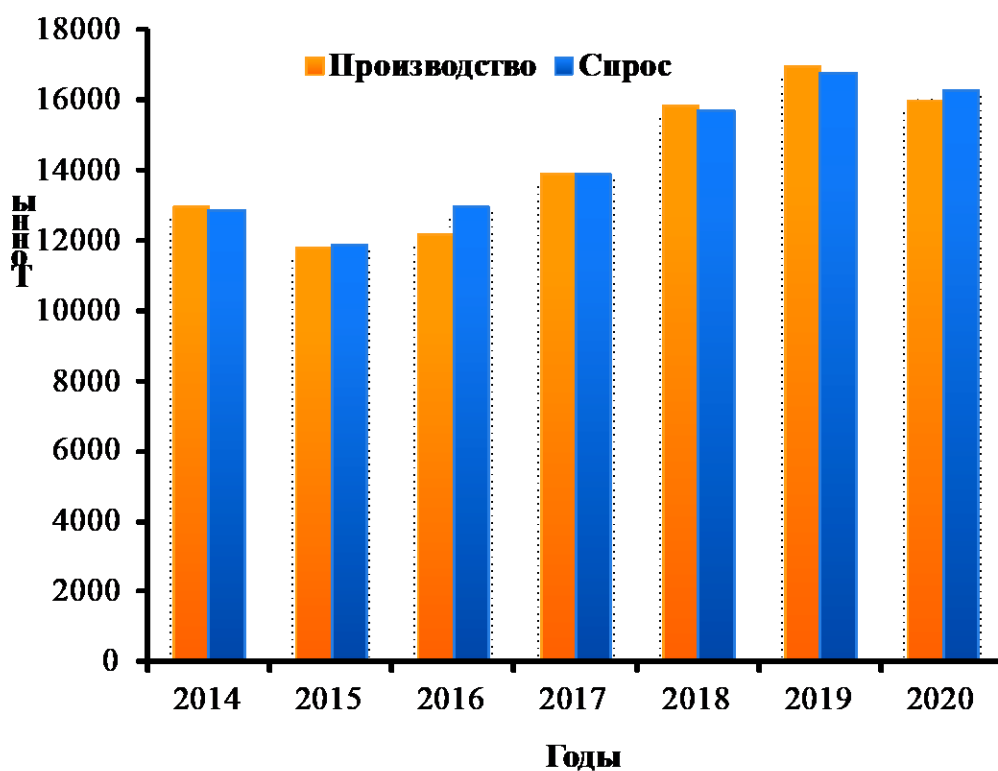


Рисунок 1.3 - Мировое производство и спрос на силикомарганец [79]

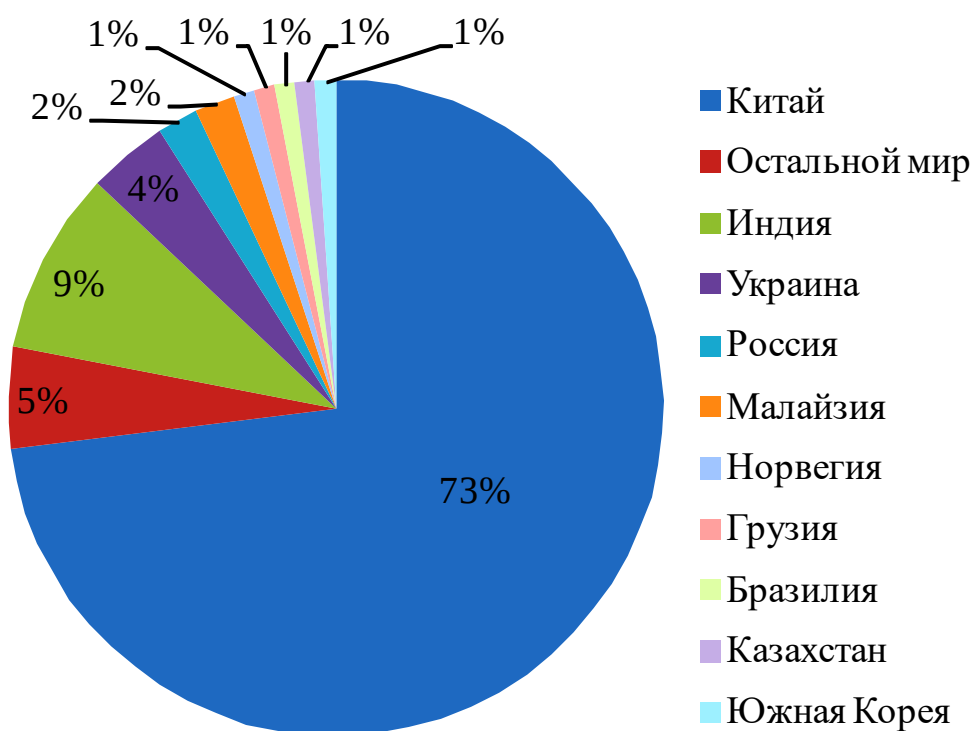


Рисунок 1.4 - Крупнейшие страны-производители силикомарганца в 2020 году.

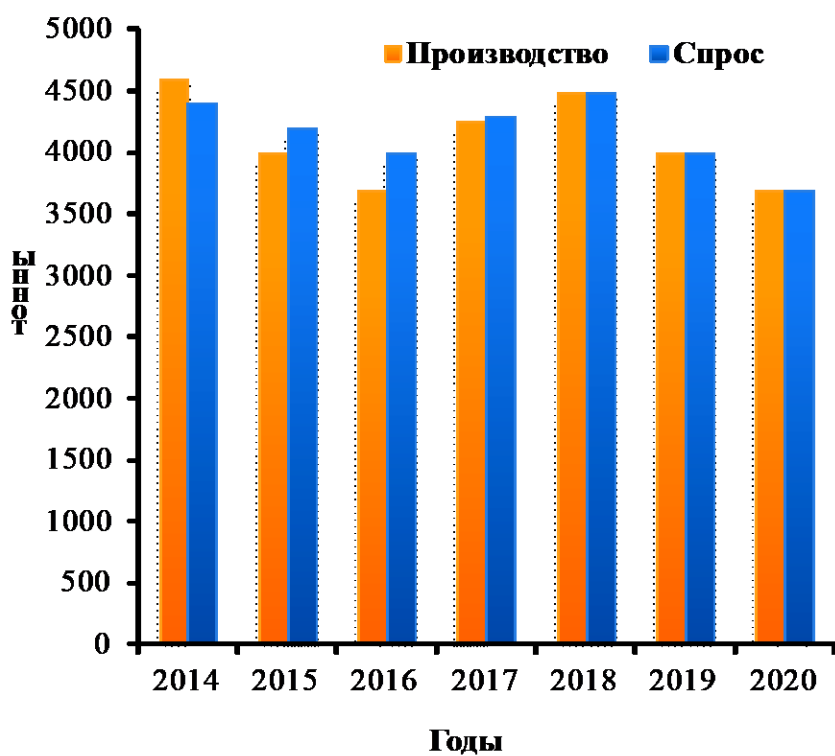


Рисунок 1.5 - Мировое производство и спрос на высокоуглеродистый ферромарганец-НС-FeMn [79]

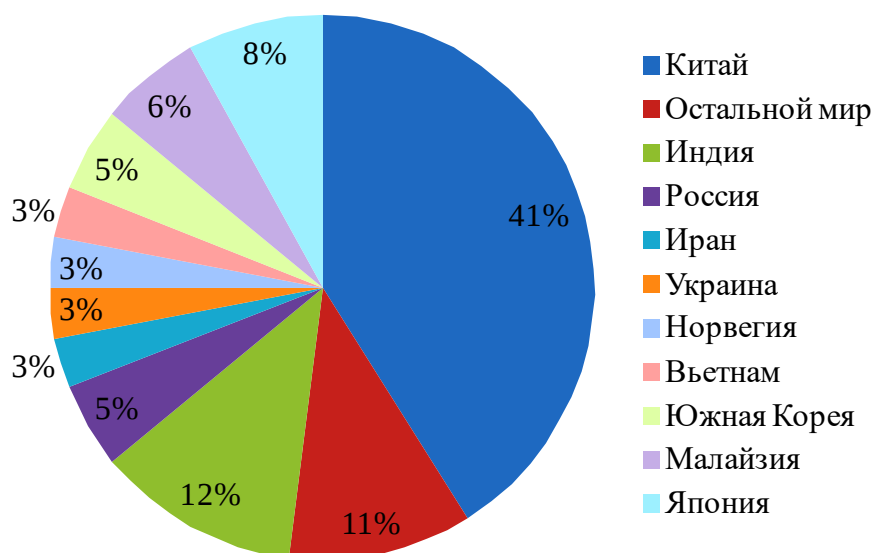


Рисунок 1.6 - Крупнейшие страны-производители НС-FeMn в 2020 году [79].

Рафинированный ферромарганец (Ref-FeMn). Мировое производство рафинированного ферромарганца уменьшилось в 2020 году до 1,2 млн. тонн, что на 18% меньше, чем в 2019 году (рисунок 1.7). Все страны-производители рафинированного ферромарганца, включая Китай (-11%) и Южно-Африканскую Республику (-50%), сократили его производство. В настоящее время на долю Китая приходится 40% мирового производства Ref- FeMn, за ним следуют Норвегия (15%) и Корея (14%) (рисунок 1.8).

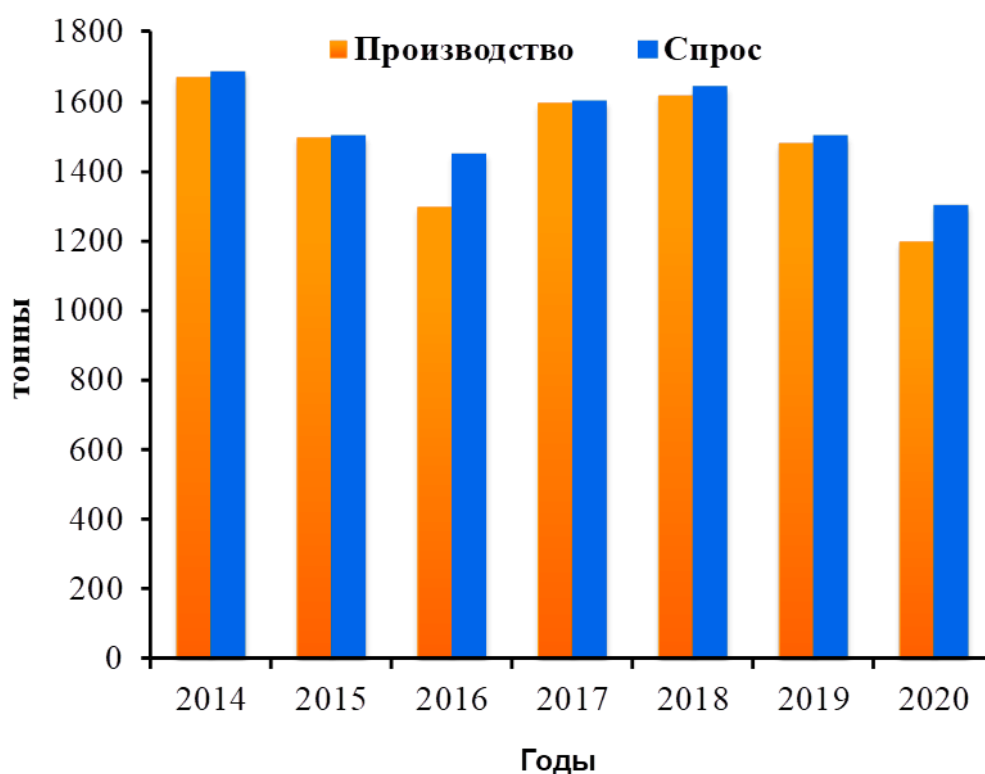


Рисунок 1.7 - Мировое производство и спрос на рафинированный ферромарганец - Ref- FeMn [79]

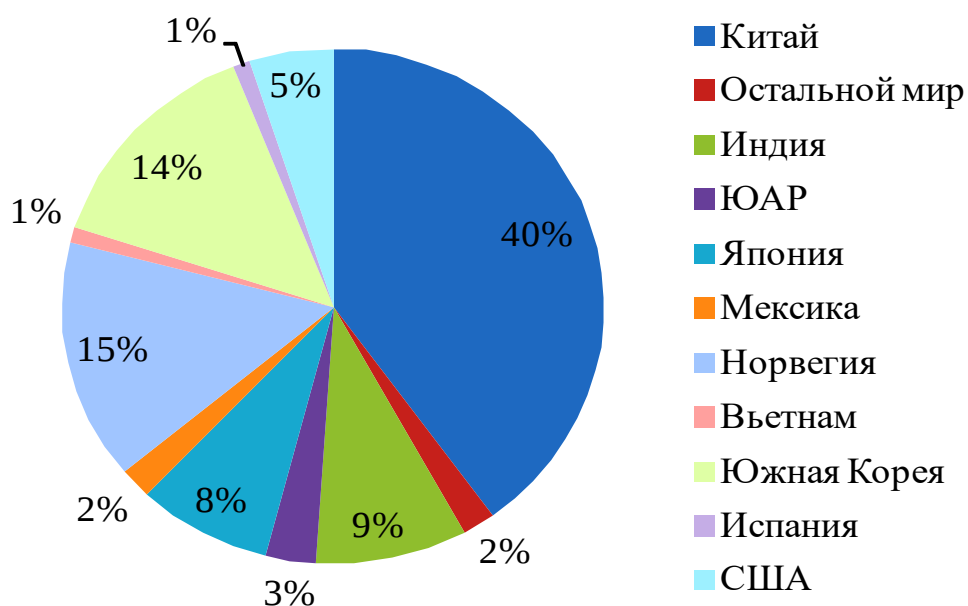


Рисунок 1.8 - Крупнейшие производители Ref-FeMn в 2020 году [79]

Мировое производство марганцевой руды (2014-2020). Мировое производство марганцевой руды в 2020 году сократилось до 20,3 млн. тонн, что на 7% меньше, чем в предыдущем году (рисунок 1.9). Снижение в значительной степени связано с сокращением добычи низкосортной руды (-39%), в то время как поставки среднесортной и высокосортной руды оставались стабильными с 2019 года. Производство снизилось в Южно-Африканской Республике, Бразилии, Китае, на Украине, в Гане, Малайзии и других странах мира, в то время как производство выросло в Австралии, Габоне и Кот-д'Ивуаре. В настоящее время на долю Южно-Африканской Республики приходится 35% мирового производства марганцевой руды, за ней следуют Австралия (16%) и Габон (15%) (рисунок 1.10).

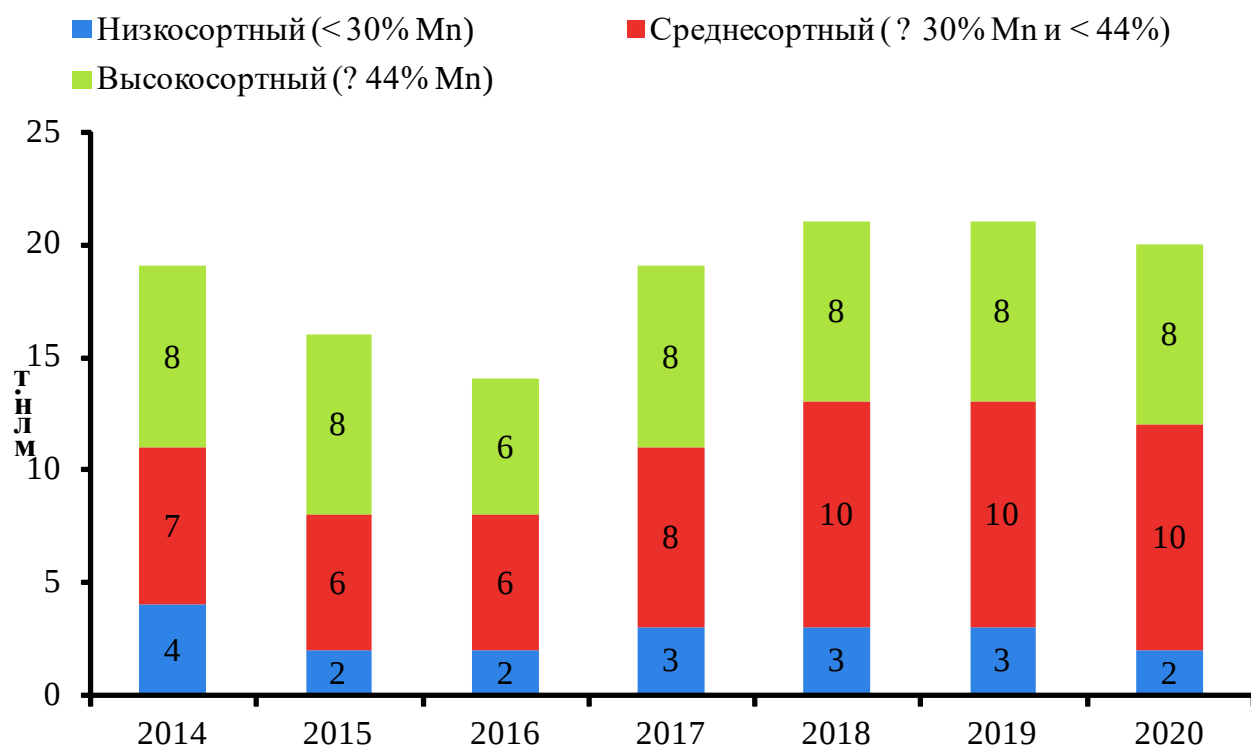


Рисунок 1.9 - Мировое производство марганцевой руды по сортам [79]

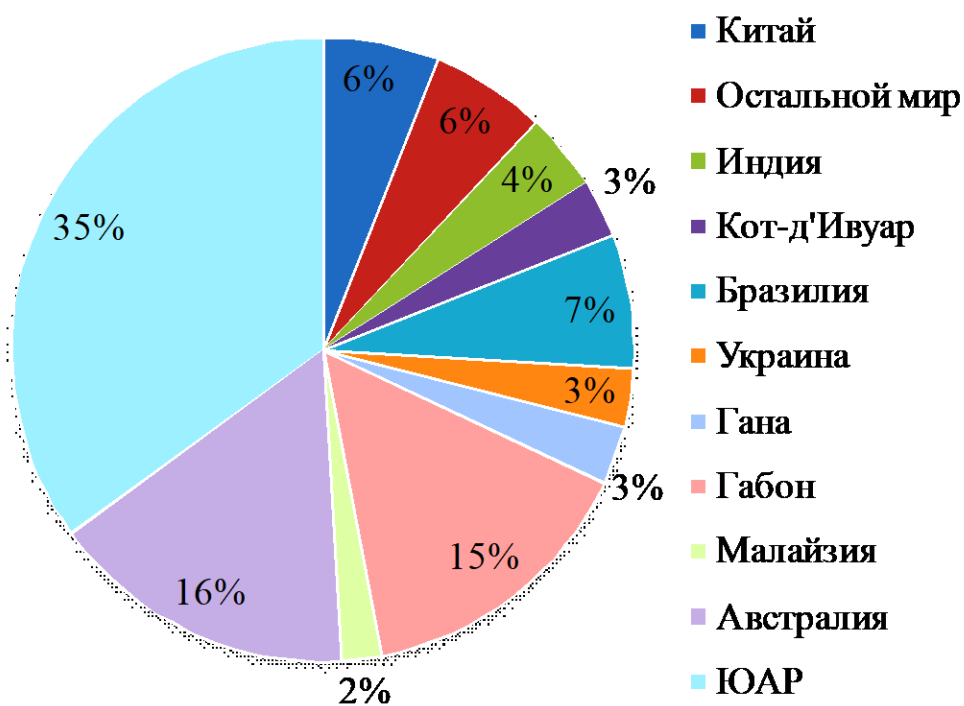


Рисунок 1.10 - Крупнейшие производители руды в 2020 году [79]

1.3 Производство и добыча марганца в Южно-Африканской Республике

Южноафриканскими производителями марганцевых ферросплавов являются компании: Металлой («Metalloys»), Ассманг («Assmang»), а для силикомарганца – Трансллой («Transalloys») и Могале аллой («Mogale Alloys») (таблица 1.2).

Таблица 1.2 - Марганцевые заводы в Южной Африке

Наименование компании	Местоположение	Производственная мощность
Металлой «Metalloys»	Мэйертон , в провинция Гаутенг	410 кт/год НС-FeMn
Ассманг «Assmang»	Като-Ридж , в провинции Квазулу Натал	200-240 кт/год НСFeMn
	Мачадодорп , в провинции Мпумаланга	400 кт/год НС-FeMn
		50 кт/год МС-FeMn
Трансллой «Transalloys»	Эмалахлени , в провинции Мпумаланга	50 кт/год МС-FeMn
		180 кт/год SiMn
Могале аллой «Mogale Alloys»	Крюгерсдорп , в провинции Гаутенг	55 кт/год SiMn

Металлой является крупнейшим производителем марганцевых ферросплавов в Южно-Африканской Республике. В 2012 году Металлой вывел из эксплуатации пять полузакрытых печей производства SiMn и заменил производственную мощность этих печей одной большой печью по производству НС-FeMn [105]. Ассманг является вторым по величине производителем НС-FeMn в ЮАР; компания увеличила производство марганцевых сплавов с 291 тыс. т в 2010 году до 350 тыс. т в 2015 году. Компания «Ассманг» владеет двумя подземными шахтами в марганцеворудном поле Калахари - шахты «Nchwaning» и «Gloria». Шахта «Nchwaning» разрабатывает высокосортную марганцевую руду с содержанием марганца в пределах 42-48%. Шахта «Gloria» добывает более низкосортную руду класса «полу-карбонатные руды». Марганцевые сплавы производятся на двух действующих заводах, расположенных в районе города

Катон-Ридж в провинции Квазулу-Натале и города Мачадодорп в Мпумаланге [102]. Предприятие в Мачадодорпе первоначально было введено в эксплуатацию, как завод по производству феррохрома (FeCr), но в 2011 году было переоборудовано для производства HC-FeMn.

Компания «Ассманг» экспортирует около 85% своей марганцевой продукции, используя остальные 15% на собственных заводах [102, 105].

Компания «Трансллой» (Transalloys) является крупнейшим производителем SiMn. Завод по его производству расположен недалеко от г. Эмалахлени (Emalahleni) в провинции Мпумаланга. Компания первоначально, в 1960-х годах, ввела в эксплуатацию завод по производству феррохрома (FeCr), но вскоре, в 1967 году, он был переоборудован для производства SiMn [105]. Завод компании «Могале Аллой», расположенный недалеко от г. Крюгерсдорпа в провинции Гаутенг производит, главным образом, феррохром (FeCr) с использованием технологии дуговой печи постоянного тока, а с 1990-х годов занимается производством силикомарганца (SiMn) [105].

Хотя Южная Африка располагает запасами крупнейших в мире месторождений марганца (Калахари, Постмасбург), темпы добычи остаются низкими в течение многих лет. За последние восемь лет, лидером в производстве марганца является Китай (рисунок 1.11). Основными проблемами, с которыми сталкиваются южноафриканские производители марганцевых ферросплавов, обусловлены повышением тарифов на электроэнергию, низкой производительностью труда и влиянием недавней пандемии [105]. Основными задачами производителей марганца на сегодняшний день являются повышение энергоэффективности путем выработки электроэнергии с использованием отработанного газа, модификация конструкций печей. В 2015 году ЮАР экспортировала около 360 тыс. т ферромарганца в США, Нидерланды и Германию. Несколько меньшее количество экспортировалось в Китай, Швецию и Австрию (рисунок 1.12).

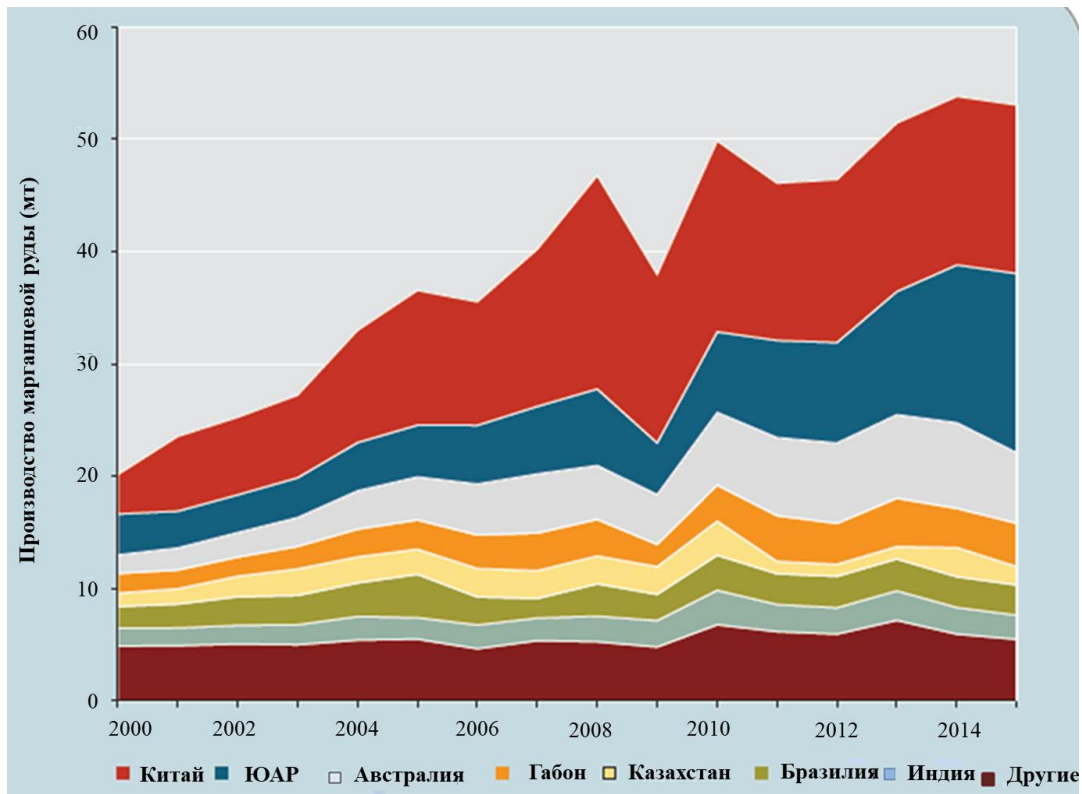


Рисунок 1.11 - Глобальные тенденции производства марганцевой руды в млн. т (вес брутто) [47]

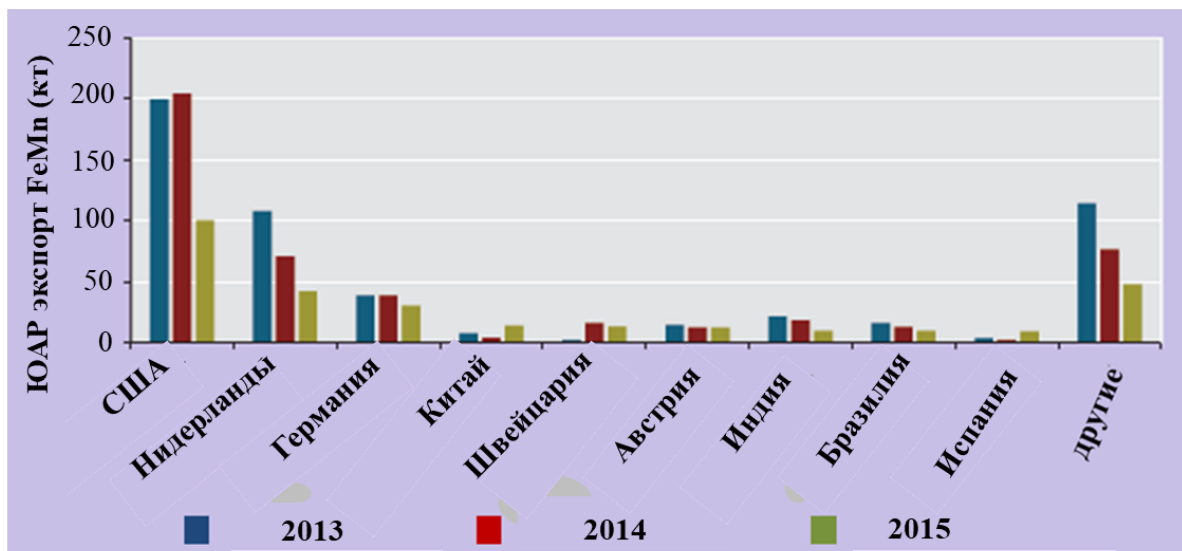


Рисунок 1.12 - Южноафриканский экспорт ферромарганца с содержанием углерода более 2%, за период с 2013 по 2015 год (в килотоннах) [75]

1.4 Классификации месторождений и руд марганца

Большая часть самой ранней литературы по геологии месторождений марганца была опубликована в Индии, Советском Союзе и Южной Африке. Среди выдающихся ученых, которые в течение ряда лет занимались исследованием марганцевых месторождений в этих трех странах - Суприя Рой, Игорь Михайлович Варенцов и Николас Йоханнес Беукес.

Традиционно, классификации марганцевых месторождений основаны на разновидностях их минерального состава и химических особенностей. С другой стороны, в современной литературе более широко используется классификация марганцевых месторождений по их генетическим признакам. В этой классификации выделяют четыре генетические группы месторождений марганца: 1) осадочные (собственно осадочные и вулканогенно-осадочные), 2) магматогенные (гидротермальные и контактово-метасоматические), 3) метаморфизованные (образованные в результате регионального и контактового метаморфизма осадочных и магматогенных рудных скоплений), 4) месторождения кор выветривания (остаточные, инфильтрационные, а также, возникшие в результате заполнения карстовых полостей) [5, 103].

Большинство мировых запасов марганцевых руд содержится в месторождениях, находящихся в осадочных бассейнах. В зависимости от состава залежи и источника марганца среди них выделяют собственно осадочные и вулканогенно-осадочные [5].

Собственно-осадочные месторождения марганца формируются в морских бассейнах в условиях жаркого и влажного климата обычно с активным участием органического вещества. Марганцевые руды часто ассоциируют с кремнистыми хемогенными осадками, диатомитами, спонголитами и опоками, и в меньшей степени, по мнению И.М. Варенцова с тонкозернистым кластическим материалом кварц-глауконитовой и песчанисто-глинистой формации. К этому типу относится более 70% запасов марганцевых руд - месторождения Никопольское (Украина), Чиатурское (Грузия), Полуночное (Северный Урал, Россия), Моанда (Габон), Грут-Айланд (Австралия) и др.

Вулканогенно-осадочные месторождения образовались в активных участках земной коры. Осадконакопление в морских средах этого типа сопровождается интенсивными вулканическими процессами [4]. Вмещающие породы чаще всего представлены кремнисто-глинистыми сланцами с вкраплениями туффитов, туфов и пластообразными залежами эффузивных пород. Месторождения этого типа имеют небольшие масштабы и обычно характеризуются низким качеством руд. Рудные тела залегают в виде небольших быстро выклинивающихся линз, сложенных преимущественно карбонатами марганца и железа. Предполагается, что эти месторождения образовались в результате осаждения в морской воде соединений марганца, вынесенных из недр газами и растворами вулканического происхождения.

Особое место в генетических классификациях вулканогенно-осадочных месторождений занимают железомарганцевые конкреции (ЖМК), представляющие собой современные диагенетические формации сложного генезиса. Они образуются на обширных территориях дна мирового океана и встречаются на глубинах от 2000 до 8000 м. Кроме марганца и железа, в них присутствуют Ni, Co, Cu и другие металлы. В последнее время интерес к ЖМК возрастает в связи с ассоциирующими с ними редкоземельными элементами.

Магматогенные месторождения подразделяется на гидротермальные и контактово-метасоматические. Они не имеют большого промышленного значения. Месторождения контактово-метасоматического генезиса представляют собой рудные тела в виде пластообразных залежей, штоков и гнезд, расположенных на контакте гранитоидов с карбонатными породами - известняками и доломитами. К этому типу относятся месторождения: Франклин (США), Лонгбан (Швеция), Сапальское, Липовая Гора и Казанское (на Урале).

Рудные тела средне- и низкотемпературного гидротермального типа, связанного с магматизмом и эффузивами встречаются обычно в виде жил и гнезд. Гидротермальные месторождения марганца известны в США, Турции, ФРГ, в Мексике и на Филиппинах.

Метаморфогенные месторождения. В результате регионального метаморфизма первичных марганцевых руд образуются метаморфогенные месторождения. Породы и руды становятся плотными, возникают кристаллически-зернистые безводные соединения браунита Mn_2O_3 и гаусманита Mn_3O_4 . В результате дальнейшего интенсивного воздействия повышенных давления и температуры, первичные окислы и карбонаты марганца целиком переходят в силикаты марганца - родонит, бустамит, браунит. Такие руды относятся к низкосортным (30-40% Mn) и требуют металлургического обогащения. Примерами месторождений подобного типа могут служить Парнокское месторождение РФ, марганцеворудное поле Калахари ЮАР.

Месторождения кор выветривания представлены чаще всего оксидами и гидроксидами марганца, которые могут развиваться по исходным марганецсодержащим породам различного генезиса. Главной особенностью зоны гипергенеза, приводящей к минералообразованию, является присутствие свободного кислорода в грунтовых водах. Процесс окисления исходной породы наиболее интенсивно протекает в верхней части залежей, где часто образуются марганцевые шляпы. Карбонаты и силикаты марганца относительно легко изменяются в зоне окисления, превращаясь на ранней стадии выветривания в гидроксиды марганца - манганит, вернадит и псиломелан. Браунит и гаусманит замещаются сначала псиломеланом, который затем переходит в пиролюзит - самый стабильный минерал в коре выветривания. Глубина зоны окисления зависит от уровня стояния грунтовых вод и колеблется от нескольких метров до нескольких десятков метров. Такие коры выветривания формируются в условиях субтропического, теплого влажного климата. Часто скопления марганцевых руд наблюдаются под мощными наносами глинистых осадков в карстовых углублениях карбонатных пород, обычно в тесной ассоциации с железными рудами.

Примерами месторождений этого типа являются Морро-да Минна (Бразилия), Нсута (Гана), Кентукки (США), Окинавское (Япония),

Постмасбургское (ЮАР). К ним же, по нашему мнению, относится и рудопоявление Северо-Западное (ЮАР).

1.5 Геолого-промышленные типы марганцевых месторождений

По минеральному составу и химическому характеру соединений марганцевые руды подразделяются на оксидные, карбонатные, силикатные и смешанные, представляющие собой, по сути, промышленные типы марганцевых месторождений, по которым ведется учет запасов и прогнозных ресурсов [3]. Большая часть мировых разведанных запасов марганцевых руд сосредоточена в шести месторождениях - Никопольском и Большетокмакском на Украине, Урукум и Навиу в Бразилии, Калахари в ЮАР, Грут-Айланд в Австралии, Моанда в Гобоне.

Согласно классификации П.Д. Яковлева [23] основные промышленные типы месторождений марганца можно разделить на 4 группы:

- 1) Родохрозит-гидроокисные пластовые осадочные месторождения в песчано-глинистых породах: Чиатурское (Грузия), Никопольское и Большетокмакское (Украина), Грут-Айланд (Австралия), Моанда (Габон).
- 2) Железомарганцевые пластовые месторождения в вулканогенно-осадочных породах: марганцеворудное поле Калахари (в ЮАР), Балагхат (Мадхья-Прадеш, Индия), Атасуйский район (в Казахстане).
- 3) Силикатно-оксидные гондитовые месторождения: Серраду-Навиу (в Бразилии).
- 4) Марганцевые гидроксидные пластообразные латеритные месторождения (карстовое месторождение Постмасбургское (в ЮАР)).

В.И. Синяков [15] предлагает выделять лишь два основных типа промышленных месторождений марганца:

- 1) морские осадочные месторождения пластовых и линзообразных рудных тел окисных и карбонатных руд в терригенных породах;
- 2) месторождения остаточных латеритных кор выветривания.

В зависимости от условий формирования различают первичные и вторичные марганцевые руды. К первичным относятся руды (оксидные, карбонатные) в осадочных отложениях, а также, возникшие в ходе регионального метаморфизма (оксидные, карбонатные, силикатные). Вторичные руды возникают в результате процессов гипергенеза, наложенных на первичные марганецсодержащие образования различного происхождения и состава.

Как правило, в пределах одного месторождения одновременно присутствуют руды разных технологических типов и сортов, что дополнительно усложняет технологические схемы их отработки и обогащения [2].

Кроме того, существует промышленная классификация марганцевых руд по содержанию марганца, железа и различных примесей. Основными типами являются высокосортные (металлургические) руды, содержащие более 35% (до 50%) марганца и низкосортные (железистые), содержащие 15-35% марганца и большое количество железа.

Наибольшее предпочтение во всем мире отдается *оксидным рудам*, сложенным оксидами и гидроксидами марганца. Наиболее ценными минералами в них являются пиролюзит, псиломелан, криптомелан, голландит, литиофорит и манганит. Первичные и вторичные оксидные руды существенно различаются по своему агрегатному состоянию, минеральному составу и, соответственно, технологическим свойствам, поэтому их необходимо четко разделять [18-19].

Карбонатные руды сложены преимущественно родохрозитом, манганокальцитом, марганцовистым кальцитом и кутнагоритом. Основными минералами *силикатных руд* являются родонит, бустамит, спессартин и браунит марганцеворудного поля Калахари [73].

Карбонатные руды широко распространены, но в металлургии применяются достаточно ограничено, в частности, марганцовистые известняки используются в качестве флюсовых добавок с попутным легирующим эффектом. В большинстве случаев они имеют низкие содержания марганца (20-30%) и, нередко, повышенные количества фосфора (0,005% и выше), поэтому ценятся не

высоко. Они находят применение в качестве строительных материалов, облицовочных и поделочных камней [14].

Металлургические руды содержат от 40% до 50% марганца. Другим важным параметром качества марганцевых руд является отношение марганца к железу. Для производства стандартного ферромарганцевого сплава с содержанием марганца 78% требуется весовое соотношение $Mn/Fe=7,5$. Также есть ограничения по количеству примесей кремния и алюминия, поскольку чрезмерное образование шлака в печи увеличивает потребление электроэнергии.

В России марганцевые руды, используемые в металлургии, делятся на следующие виды по содержанию Mn и Fe и их отношению: 1) марганцевые руды со значительным преобладанием марганца над железом и коэффициентом Mn/Fe от 30 до 15. Для богатых руд допустимы значения 6-7; 2) железомарганцевые руды, содержащие железо в сопоставимых или даже равных марганцу количествах, отношение Mn/Fe доходит до единицы, а для богатых руд допускается 0,6; 3) марганцовистые железные руды с резко подчиненным содержанием марганца (5-10% в руде).

Железо в марганцевых рудах является полезной примесью при выплавке относительно бедных марганцевых сплавов, но для выплавки сплавов с высоким содержанием марганца количество его в рудах нормируется. Помимо железа и марганца, на качество руд влияют содержания кремнезема, глинозема, оксидов магния и кальция, которые относятся к шлакообразующим компонентам. Высокие уровни содержаний шлакообразующих компонентов приводят к увеличению потерь марганца, так как он имеет тенденцию частично переходить в шлак в виде силикатных соединений. Такие потери могут достигать 60% начального содержания марганца в шихте. Таким образом, чем выше содержания шлакообразующих компонентов в составе руды, тем выше потери марганца и расход кокса. Наиболее вредной примесью в рудах является фосфор и его количество строго лимитируется. Допустимым считается содержание фосфора 0,003-0,005% на 1% марганца. Требования к содержанию серы в марганцевых

рудах менее строгие, так как в значительной мере она переходит в шлак или сгорает.

По мнению О.С. Борзых [2] и В.И. Синякова [15] классификация геолого-промышленных типов месторождений, исходя из сложившейся практики включает в себя следующие типы: промышленные, потенциально-промышленные, перспективно-промышленные (рисунок 1.13). К последним относятся выявленные рудные объекты новых типов на ранней стадии изучения, представляющие промышленную ценность по предварительным технико-экономическим расчетам или экспертной оценке.

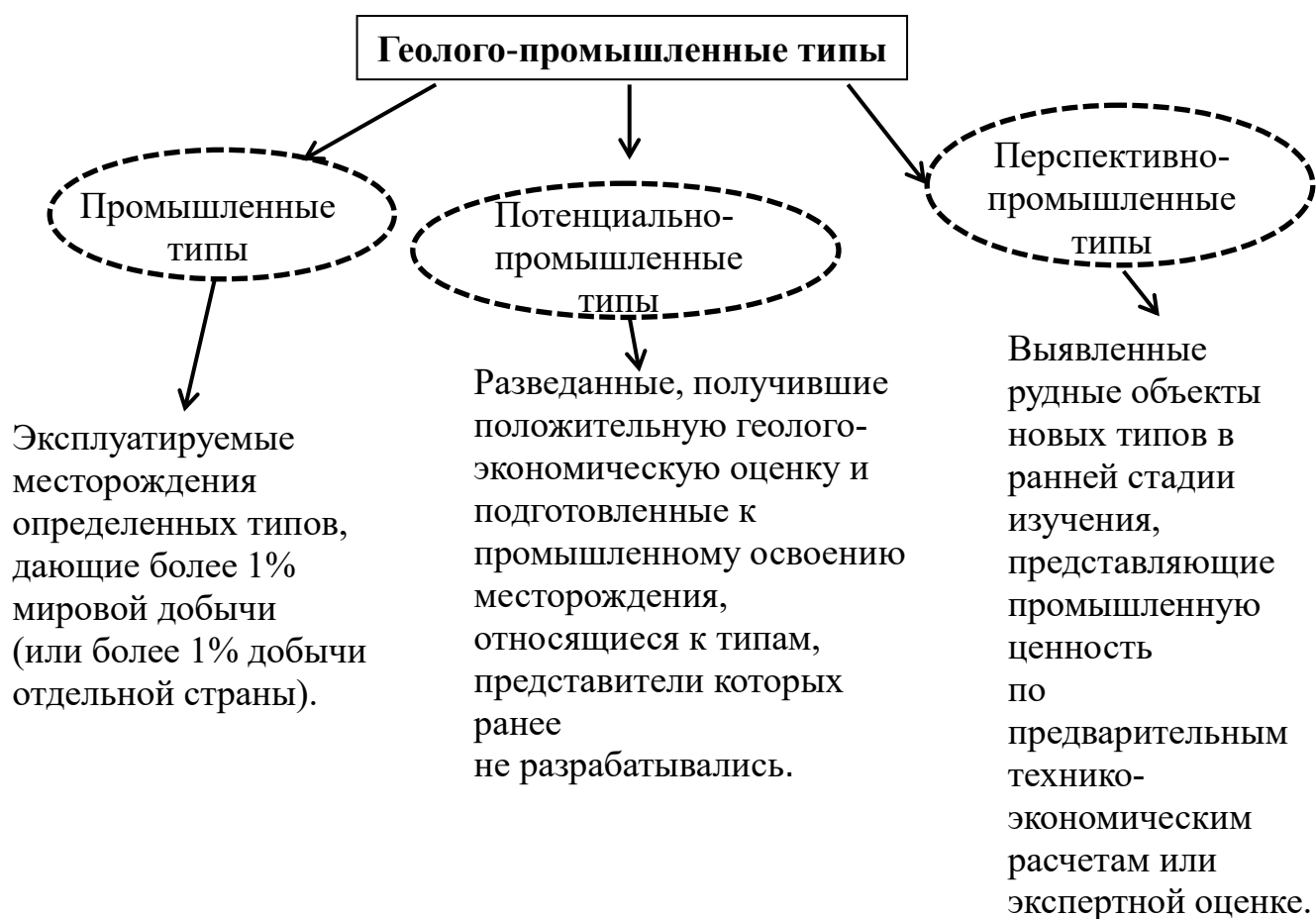


Рисунок 1.13 - Геолого-промышленные типы месторождений [15]

1.6 Выводы по 1 главе

В заключение первой главы необходимо подчеркнуть следующее. Примерно 90-95% мировой добычи марганцевых руд используется в черной металлургии для производства ферромарганца. В качестве легирующей добавки марганец придает стали вязкость, ковкость, твердость. В процессе металлургического передела он ускоряет и облегчает процессы доменной плавки. Существенная часть разведанных мировых запасов марганца сосредоточена в шести крупных месторождения. К ним относятся марганцеворудное поле Калахари в ЮАР, заключающее в себе около 77% ресурсов этого металла, Никопольское и Большетокмакское на Украине, Урукум и Навиу в Бразилии, Грут-Айланд в Австралии и Моанда в Габоне.

Существуют различные способы классификации марганцевых месторождений, но наиболее часто используется генетическая, которая выделяет четыре основных типа месторождений марганца:

- 1) осадочные (собственно осадочные и вулканогенно-осадочные);
- 2) магматогенные (гидротермальные и контактово-метасоматические);
- 3) метаморфизованные (региональный и контактный метаморфизм осадочных и магматогенных рудных скоплений);
- 4) месторождения кор выветривания (остаточные, инфильтрационные, заполнение карстовых полостей).

К осадочному типу относится основная часть месторождений марганцевых руд (более 70% мировых запасов). Магматогенные месторождения имеют небольшие масштабы и обычно характеризуются низким качеством руд. Месторождения третьей группы невелики по масштабу, связаны с постседиментационными процессами минерального преобразования, наложенными на раннеобразованные марганцевые породы. Четвертая группа включает в себе марганцевые месторождения кор выветривания, имеющие большое экономическое значение.

ГЛАВА 2 ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО РУДОПРОЯВЛЕНИЯ

Аннотация. Данная глава посвящена характеристике тектонической позиции, условий залегания и стратиграфии Северо-Западного рудопроявления марганца в пределах Трансваальского бассейна. Показаны особенности геологического строения Северо-Западного рудопроявления марганца по данным, полученным автором при проведении полевых геологоразведочных работ в Хайфельдском регионе ЮАР. Документация 70 разведочных шурфов на площади рудопроявления позволила получить систематизированные по разведочной сети данные для понимания структуры и закономерностей накопления рудного материала. Учтены и проанализированы опубликованные данные исследователей, изучавших тектонические структуры Северного Фланга Каапваальского Кратона [33, 45, 48, 49, 58, 61, 62, 67, 106, 110].

2.1 Геологическая обстановка Трансваальской супергруппы

Неоархейско-палеопротерозойская Трансваальская супергруппа (ТСГ) в которой расположены марганцевые месторождения ЮАР сохранилась в пределах трех бассейнов: Трансваальский, бассейн Грикваленд-Вест, бассейн Канье в Ботсване на кратоне Каапвааль в Южной Африке. Эти три бассейна имеют заметное литологическое сходство, особенно в составах базальных горизонтов. Эти горизонты состоят из хемогенных и терригенных осадочных пород с подчиненным количеством материала вулканогенных формаций [58]. Нижняя часть разреза ТСГ представляет собой один из самых ранних крупных карбонатных платформенных комплексов на Земле, известный, как «карбонатная последовательность Кэмпбеллранда-Мальмани» [33]. ТСГ была образована примерно 2,68 – 2,50 млрд. лет назад вследствие обширного рифтообразующих процессов и проседания кратона Каапвааль (рисунок 2.8), вызванного термическим эффектом магматической интрузии Вентерсдорп 2,74-2,69 млрд. лет назад [106]. Площадь распространения карбонатной толщи первоначально занимала около 600 000 км² (рисунок 2.1) [33], в то время как сегодняшние ее размеры около 190 000 км². Это эрозионные останцы, сохранившиеся в

Трансваальском районе в восточной части и районе Грикваланд-Вест в западной части кратона Каапвааль, а также в районе Канье в северной части платформы.

Карбонатные отложения в этих трех районах делятся на несколько формаций, которые могут быть выделены по седиментологическим характеристикам, а иногда и по U-Pb геохронологическим датировкам цирконов из редких песчанистых слоев в пределах карбонатной толщи [49, 83, 106]. Мальманийская подгруппа Трансваальского района мощностью около 2000 м на северном фланге Каапваальского кратона состоит в основном из перитидальных карбонатов, в то время как современные мелководные шельфовые карбонаты Кэмпбеллрандской подгруппы района «Грикваланд-Вест» на юго-западном фланге кратона были образованы в мелководных субтидальных условиях. Дальний, юго-западный склон и базальная часть разреза подгруппы Кэмпбеллранд в западном районе Грикваланд-Вест были отнесены к категории фаций Приеска, мощность которых составляет всего 500 м по сравнению с мелководной карбонатной шельфовой частью разреза, мощностью иногда более 2400 м (рисунок 2.1). Такая большая разница в мощностях карбонатной толщи произошла вследствие значительной разницы скоростей осаднения в разных частях морского бассейна [34,106]. Реконструкции перехода между шельфовой и глубинной фациями в подгруппе Кэмпбеллранд региона Грикваланд-Вест были установлены по результатам детальных геохимических и седиментологических исследований керн скважин GKP01 и GKF01 Приискской фации региона Грикваланд-Вест и керн скважины ВН-1 из отложений шельфовых фаций Кэмпбеллранд на ферме Саша («Sacha»,) вблизи от Сишена (Грикваланд) (рисунок 2.1) [63, 83, 104].

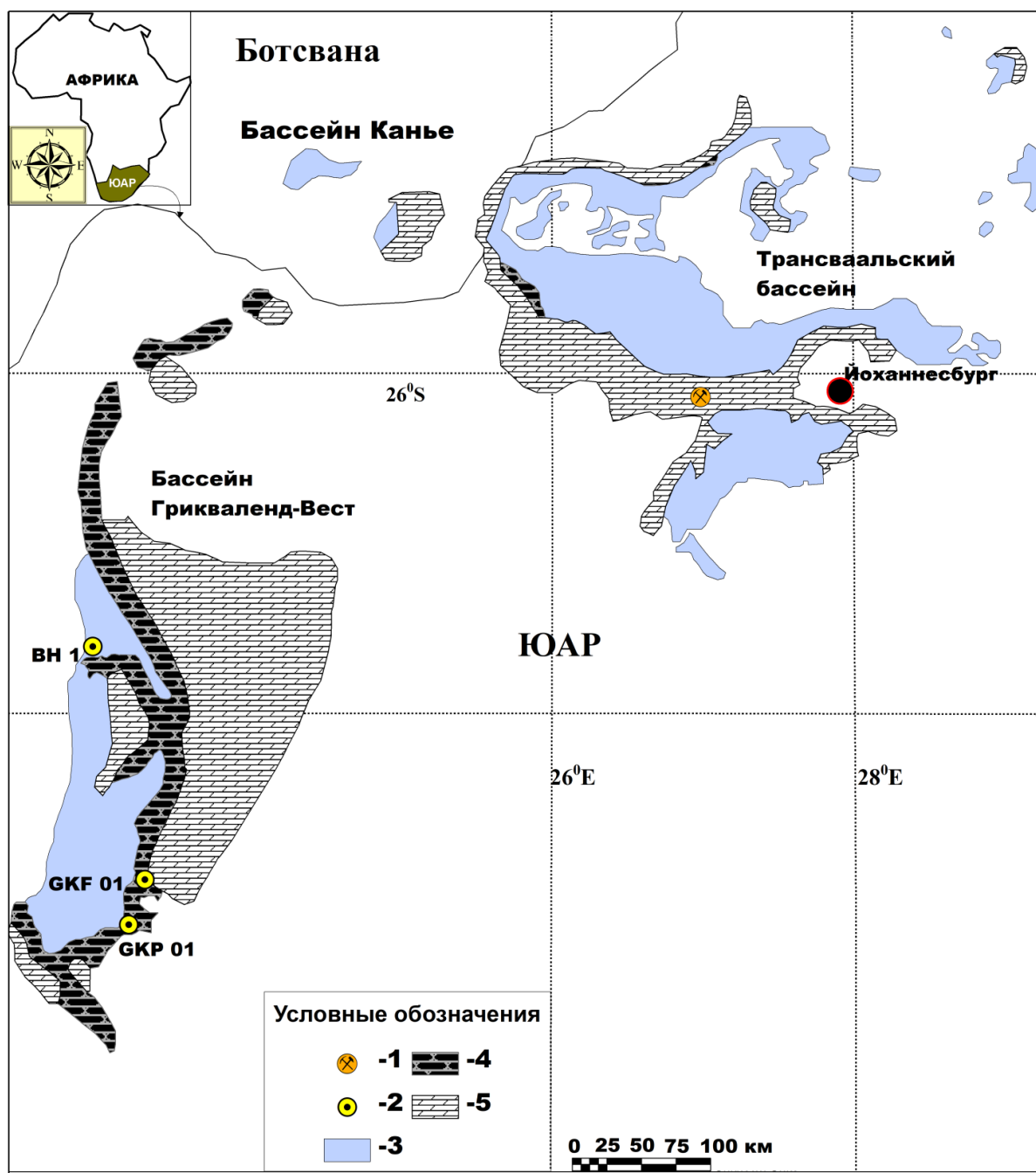


Рисунок 2.1 - Тектоническая схема Трансваальской супергруппы, показывающая распределение основных стратиграфических единиц в районах Грикваленд-Вест и Трансвааля в Южной Африке и бассейн Канье в Ботсване; где: 1 - шахта «General Nice Manganese Mine» в районе Хайфельда, в марганценосных доломитах серии Мальмани, 2 - керны скважин ВН-1, GKF01 и GKP01, 3 - терригенные, вулканические породы (PR_1), 4 - железорудные формации (PR_1), 5 - марганценосные доломиты бассейнов Грикваленд-Вест, Трансвааль и Канье Трансваальской супергруппы (AR_2^m/PR_1) [63]

2.1.1 Марганцевая минерализация в бассейне Грикваленд-Вест

Бассейн Грикваленд-Вест занимает большую малонаселенную территорию в провинции Северный Кейп ЮАР и расположен между небольшим городом Приеска на юге и границей Ботсваны на севере. Район расположен между меридианами 22° и 25° ВД, и широтами $30^{\circ} 00'$ и $27^{\circ} 30'$. Климат здесь континентальный полусухой, со средним количеством осадков около 300-350 мм в год, в основном происходящих в летний сезон [73]. Средняя высота над уровнем моря в этом районе составляет от 1100 м до 1500 м; в ландшафте преобладают пологие равнины. Равнины разделены субмеридианальными хребтами холмов, такими как Асбестовые холмы, холмы Клипфонтейн и хребет Гамагара.

Здесь расположены два экономически важных района марганцевых месторождений - гигантское марганцеворудное поле Калахари (рисунок 2.2) и Постмасбургское марганцевое месторождение (рисунок 2.2). Кроме того, к югу от Постмасбурга, расположены небольшие месторождения марганца в районе Ройнекке. Их географическая близость привела многих авторов к предположению о возможной генетической связи между ними [40; 57]. Однако, целый ряд исследований [64, 70, 73, 74, 82] доказал, что эти месторождения генетически не связаны между собой.

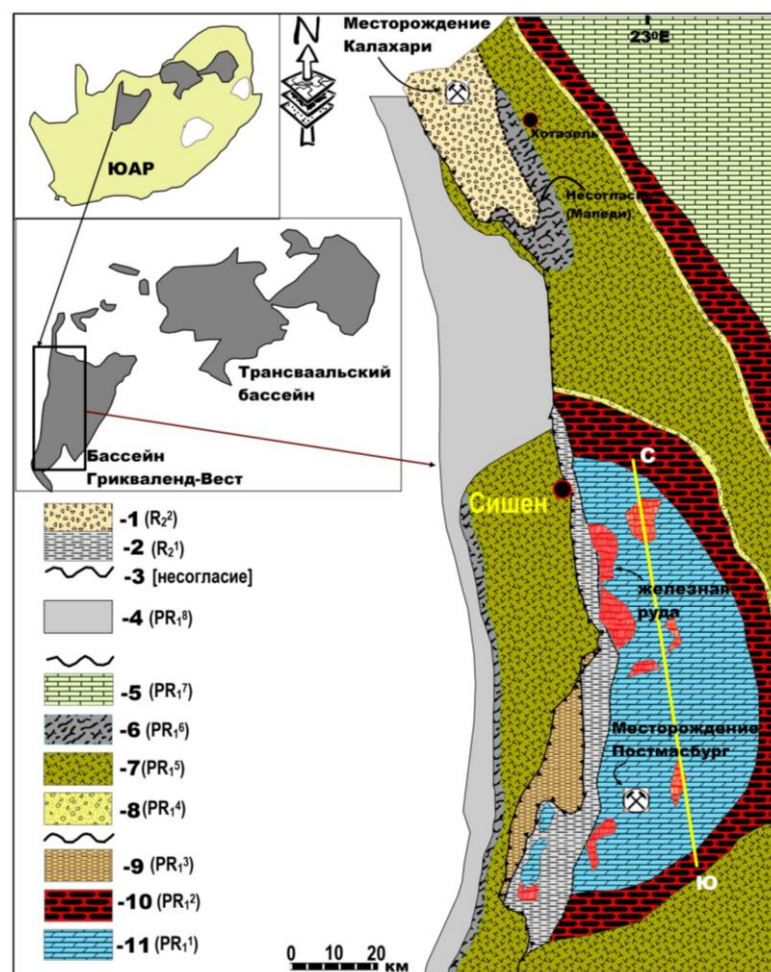


Рисунок 2.2 - Геологическая карта бассейна Грикваленд-Вест, показывающая расположение марганцевых месторождений Калахари и Постмасбург на западном фланге кратона Каапвааль, Южная Африка. 1 - конгломераты, сланцы и кварциты формации Мапеди («Mafedi») (R_2^2), 2 - углистые пылевато-глинистые сланцы, железистые алевролиты, кварциты формации Гамагара («Gamagara») (R_1^1), 3 - несогласие, 4 - конгломераты и кварциты формаций Лакхнау и Хартли («Lucknow и Hartley») (PR_1^8), 5 - известняки и доломиты формации Моодраай («Moodraai») (PR_1^7), 6 - железо-и марганцеворудные пласты и лавы формации Хотазель («Hotazel») (PR_1^6), 7 - базальты и андезиты формации Онгелук («Ongeluk») (PR_1^5), 8 - ледниковые диамиктиты формации Макганене («Makganyene») (PR_1^4), 9 - железорудные формации и сланцы подгруппы Коегас («Koegas») (PR_1^3), 10 - обломочно-текстурированные железорудные формации подгруппы Асбесшвелс («Asbesheuwels») (PR_1^2), 11 - карбонатные породы и сланцы подгруппы Кэмпбеллранд («Campbellrand») (PR_1^1) [84, 100]

Постмасбургское месторождение расположено примерно в 120 км к югу от месторождения марганца Калахари, на крупной антиклинальной купольной структуре Маремане. Месторождение образовано двумя дугообразными поясами, простирающимися от Постмасбурга на юге до Сишена на севере. Купол Маремане сложен доломитами подгруппы Кампбельранда и породами железорудной формации подгруппы Асбестовых холмов Трансваальской супергруппы (рисунок 2.3). В этом районе обнажена только восточная половина купола. К западу, вдоль эрозионной зоны несогласия, залегают красные пласты серии Мапеди Олифантшукской супергруппы. Далее к западу, некоторые стратиграфические единицы Трансваальской супергруппы замещены формацией Мапеди вдоль линии разлома по направлению с севера на юг.

Выделяют два основных типа руд: железистую марганцевую руду в западном поясе и кремнистую марганцевую руду в восточном поясе месторождения [64]. Граница мапедийского/гамагараского несогласия, отделяет карстовые доломитовые и железистые образования Трансваальской супергруппы от вышележащих терригенных отложений Мапедийско-Гамагарской свиты. Впадины и провалы в палеокарстовой поверхности доломитов Кампбеллранда служили ловушками для накопления марганцевых и железных руд и пород вышележащих Гамагарской и Мапедийской свит. В Фэрфилдском члене разреза доломита Кампбеллранда встречаются воронки, заполненные железистыми отложениями Манганоровой формации. Несогласный контакт между Манганоровой железистой формацией и подстилающим доломитом маркируется слоем манганоносной кремнистой брекчии. Железистая руда состоит в основном из браунита, партриджита и биксбита, а кремнистая руда состоит из браунита, кварца и мелкозернистого партриджита. К гипергенным минеральным фазам относятся в основном романехит, пиролюзит и литиофорит.

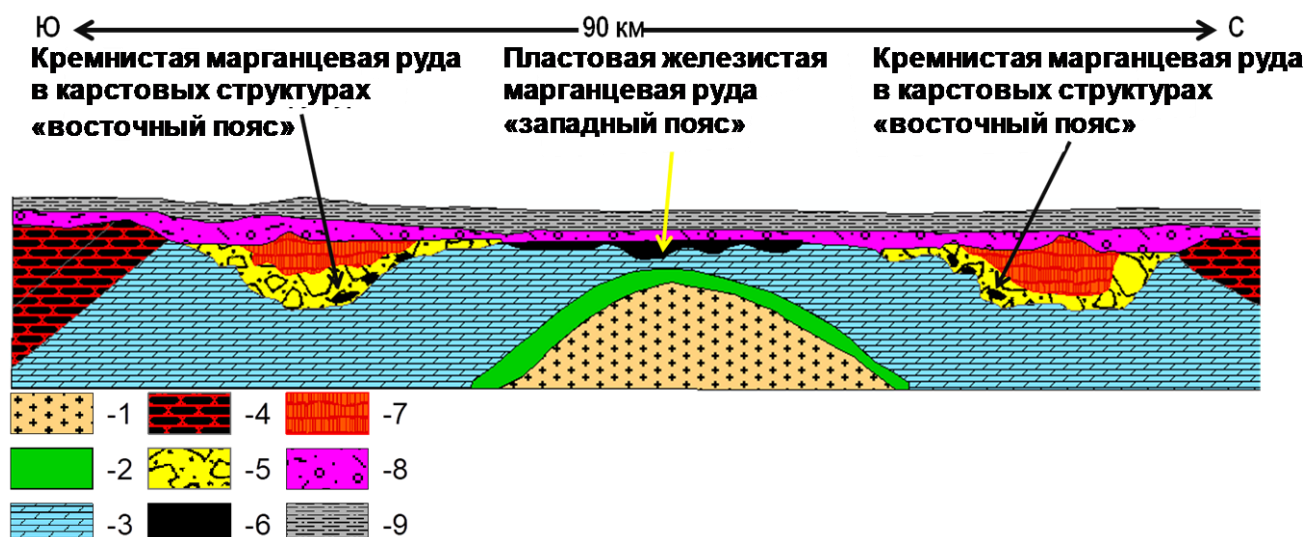


Рисунок 2.3 - Схематический разрез купола Маремана, показывающий расположение высокосортных марганцевых и железных руд Восточного и Западного поясов. 1 - кристаллический фундамент; 2 - песчаники, алевролиты, андезиты формации Врибург «Vryburg»; 3 - доломиты подгруппы Кэмпбеллранд; 4 - железорудная формация подгруппы Асбешевельс «Asbesheuvels»; 5 - брекчия формации Вольхааркоп «Wolhaarkop»; 6 - марганцевая руда; 7 - железорудные концентрации в марганцевой руде; 8 - гематитовые галечные конгломераты; 9- алевролит формации Гамагара «Gamagara» [38, 74]

Марганцеворудное поле Калахари. Поле марганцевых руд представляет собой эрозионные реликты марганецсодержащей Хотазельской свиты. Они располагаются под более молодым покровом позднепротерозойских Олифантшоекских красноцветных пластов. Выше залегают слои позднекаменноугольного-раннепермского возраста, представляющие собой дваикский диамиктит супергруппы Кару. Разрез венчается кайнозойскими отложениями Калахари [73].

В тектоническом отношении район марганцеворудного поля Калахари приурочен к синклинали Димотен, заполненной преимущественно лавами формации Онгелук и вышележащими отложениями формаций Хотазель и Моидраай. В верхнем палеозое породы центральной части синклинали были

сильно эродированы ледниками и образована троговая долина, которая заполнена отложениями формации Двайк (тиллиты). Все породы перекрываются современными отложениями формации Калахари [5-6]. Структурной особенностью западной части кратона являются крупномасштабные надвиги Каапвааль [25-26, 34]. В частности, Н.Дж. Беукес и С.А. Смит [34] признали влияние крупномасштабных тектонических движений, приведших к образованию гор Хейса на западной окраине кратона, и продемонстрировали их влияние на стратиграфическую конфигурацию Трансваальской супергруппы в этом районе. В результате стратиграфические единицы, которые ранее считались частью Трансваальской супергруппы, такие как формация Гамагара, теперь входят в более молодую формацию Олифантшоекской супергруппы. Марганцевые руды залегают в виде прослоев с железистыми образованиями Хотазельской свиты Воелватерской подгруппы Позднеархейско-Палеопротерозойской Трансваальской супергруппы (рисунок 2.4). Отложения подгруппы Вольватер сохранились в пяти эрозионных реликтах, из которых Калахари является самым крупным и единственным промышленно-значимым. В Калахари добывают два типа руд: низкосортную осадочную руду (Маматванскую), которая составляет около 97% запасов, и высокосортную руду типа Весселя (рисунок 2.5). Руды маматванского типа представлены микрокристаллическим слоистым браунит-лутитом, состоящим из кутногорита, Mn-кальцита, браунита и гематита и подвержены вторичным изменениям с образованием позднедиагенетических или метаморфогенных - гаусманита, партриджита, манганита и кальцита.

Высокосортные руды типа Весселя с содержанием Mn от 42 до 48 мас. % составляют около 30% запасов руды. Они встречаются только в северо-западной части Главного месторождения Калахари и связаны с системой субмеридианальных разломов. Считается, что образование руд Весселя связано с Кибарнским орогенным событием, которое произошло около 1,1 млрд. лет тому назад. Вдоль зоны разлома руда Маматвана была обогащена вторичными процессами до высокосортного типа Весселя.

Супергруппа	Группа	Подгруппа	Формация	Литология		Примерная мощность (м)
Трансваальская			Калахари (KZ)		Калькреды, песок, глины	до 150
	Кару		Двайка (C ₃)		Диамиктиты	до 650
	Олифансхоек	Volop (PR ₁ ¹⁰)	Вольватер Глен-лион		Серые кварциты, коричневатые кварциты	до 3500
			Хартли (PR ₁ ⁹)		Андезитовые лавы	700
			Лакхнау (PR ₁ ⁸)		Пурпурные и белые кварциты	450
			Мапеди Моодрай (PR ₁ ⁷)		Сланцы, кварциты, лавы, доломиты	150-200
	Постмасбург		Хотазель (PR ₁ ⁶)		Железомарганцевые формации, андезитовые лавы	250
			Онгелук (PR ₁ ⁵)		Диамиктиты	50-150
			Макгенене (PR ₁ ⁴)		Железная руда	240-600
	Гхаап	Коегас	Ройнеке (PR ₁ ³)		Железорудная формация	200-300
		Асбешевель (PR ₁ ¹)	Грикватаун (PR ₁ ²)		Железорудная формация (микрослоистые текстуры)	150-750
			Куруман (PR ₁ ¹)			
		Кэмпбеллранд (AR ₂ ²)	Гамохаан Когельбин		Карбонаты с прослоями сланцев	1500-1700
			Клиппан Папкуйль			
			Клипфонтейн Хеувель			
		Шмидтсдриф (AR ₂ ¹)	Ферфилд Рейвило		Сланцы, кварциты, карбонаты	10-250
			Монтевилль			
			Локомона			
			Боомплаас			
			Врибург			

Рисунок 2.4 - Стратиграфическое положение рудной толщи марганцеворудного поля Калахари

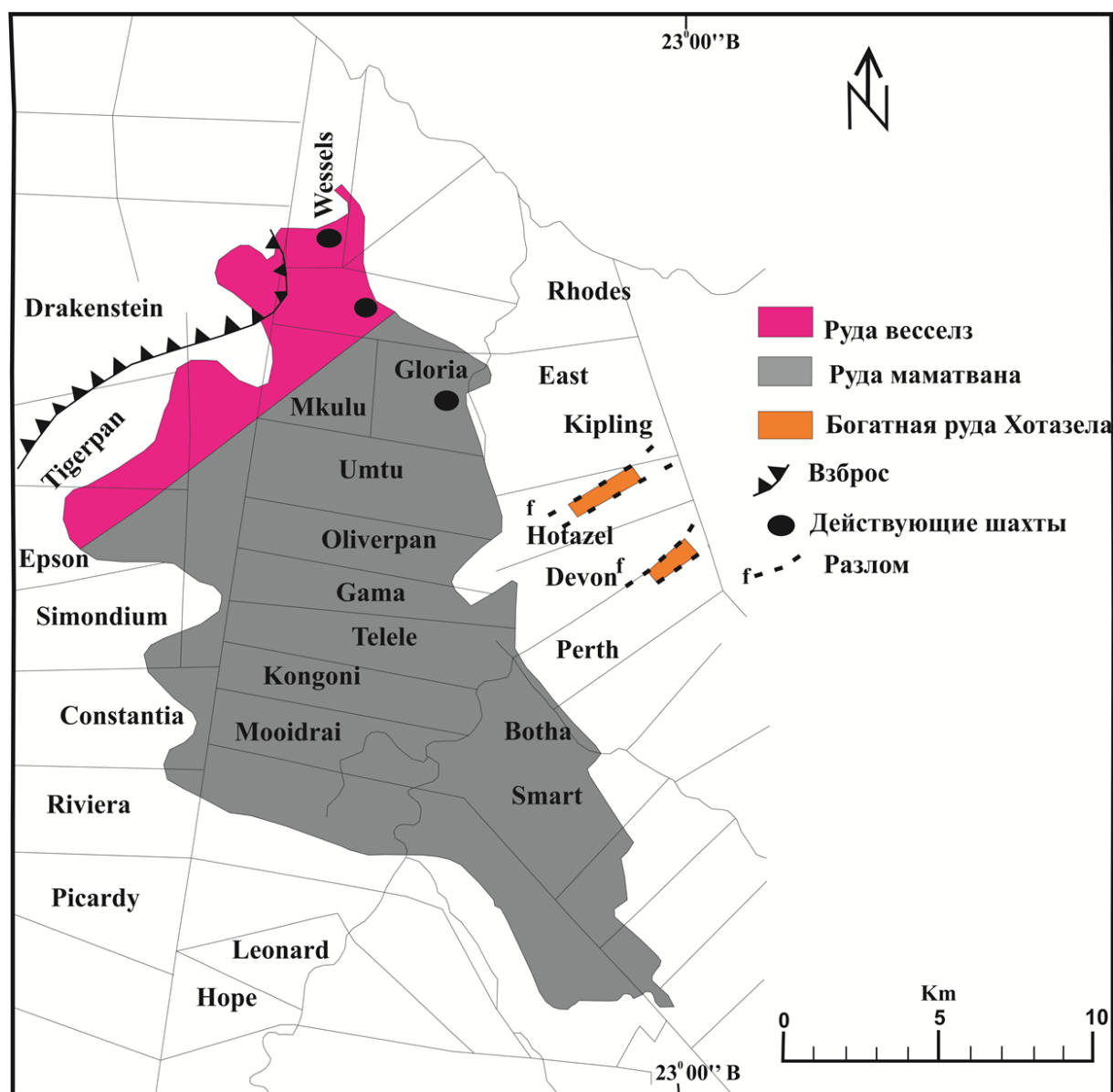


Рисунок 2.5 - Региональная карта марганцеворудного поля Калахари

2.1.2 Марганцевая минерализация в Трансваальском бассейне

Трансваальский район охватывает северную часть Капваальского кратона в Северо-Западной провинции ЮАР и расположен между небольшими городами - Крюгерсдорп на востоке и Оттосхуп на западе. Район расположен между меридианами 26° и 31° ВД и широтами $24^{\circ} 00'$ и $27^{\circ} 50'$. Климат здесь тропический полусухой, со средним количеством осадков около 500-900 мм в год, в основном выпадающих в летний сезон. Средняя высота рельефа над уровнем моря составляет здесь от 1000 м до 1500 м, в ландшафте преобладают

пологие равнины, переформированные обычно карстовыми структурами, в том числе, такими как пещера Стеркфонтейн «Колыбель человечества».

В этом районе расположено Северо-Западное рудопроявление марганца, являющееся объектом предлагаемого исследования. Установлено, что рудные тела залегают в верхней части разреза неоархейских Мальманийнских доломитов Трансваальского бассейна, простираясь к западу от г. Йоханнесбург в провинции Гаутенг и на большую часть северо-западной части провинции на востоке [93, 97, 116]. В отличие от месторождений Калахари и Постмасбург, Северо-Западное рудопроявление марганца представляет собой продукты вторичного обогащения, сформировавшиеся в зоне выветривания неоархейских доломитов серии Мальмани. Рудный разрез этого региона состоит из двух ярусов: Нижний ярус представлен порошкообразным марганцевым материалом (вадом) черного цвета, сохранившимся в карстовых депрессиях верхней части разреза доломитов в ватервальском сапропелите. Этот материал, в свою очередь, перекрывается латеритной толщей неогеновых озерных отложений, в которых содержатся марганцевые конкреции. Латеритная толща залегает с резким эрозионным контактом на подстилающих отложениях. Эрозионный контакт обусловлен образованием африканской поверхности I поднятия и эрозии.

Преобладающие генетические модели рудообразования для этого региона предполагают карстификацию богатых марганцем доломитов и остаточное накопление марганцевых вадов с прослоями глин. Марганцевые вады впоследствии подверглись диагенетическим и низкотемпературным метаморфическим процессам. На более позднем этапе, часть марганцевых отложений перемывалась и переоткладывалась в перекрывающих озерных отложениях, формируя аллювиальную часть разреза в миоценово-неогеновое время [97, 98, 117].

Результаты минералогических исследований руд, проведенные нами [98] показали преобладание в них высоковалентных оксидов марганца, представленных пиролюзитом, криптомеланом, романехитом, голландитом и литиофоритом. Помимо этих минеральных фаз здесь присутствуют глинистые

минералы, преимущественно каолинит, минералы железа - гетит, гематит, сидерит, а также включения циркона и ильменита. В почвенном слое встречаются рутил, андалузит, лимонит, мусковит и каолинит.

2.2 Тектоническое развитие Трансваальского бассейна

Тектоническое строение Трансваальского бассейна следовало структурному стилю предшествующей Вентерсдорпской супергруппы. По данным К. Берк и др. [45] вулканические и осадочные породы Вентерсдорпской супергруппы накапливались в грабенах субмеридионального простирания, возникших примерно 2,7 млрд. лет назад, одновременно со столкновением кратонов Каапвааль и Зимбабве (рисунок 2.6). Столкновение, по-видимому, произошло вдоль окраины Атлантического типа, развитой на южной современной окраине кратона Зимбабве, и окраины Андского типа, развитой на стороне кратона Каапвааль закрывающегося океана Лимпопо. Шовная зона между двумя кратонами в пределах пояса Лимпопо указывает на характерную линию сдвигания с востока на северо-восток срезанных амфиболитовых и перидотитовых гнейсов, перемежающихся со сланцеватыми кварцитами. Вентерсдорпская рифтовая провинция генетически связана с расширением кратона Каапвааль, связанным с изгибным движением во время столкновения. Ориентация Вентерсдорпских рифтовых систем указывает на левостороннее движение вдоль зоны северо-восточной ориентировки. Исследования метаморфических минеральных комплексов из центрального подвижного пояса Лимпопо указывают на вероятность их погружения более чем на 30 км [86], что подразумевает двойное утолщение земной коры на пике метаморфизма.

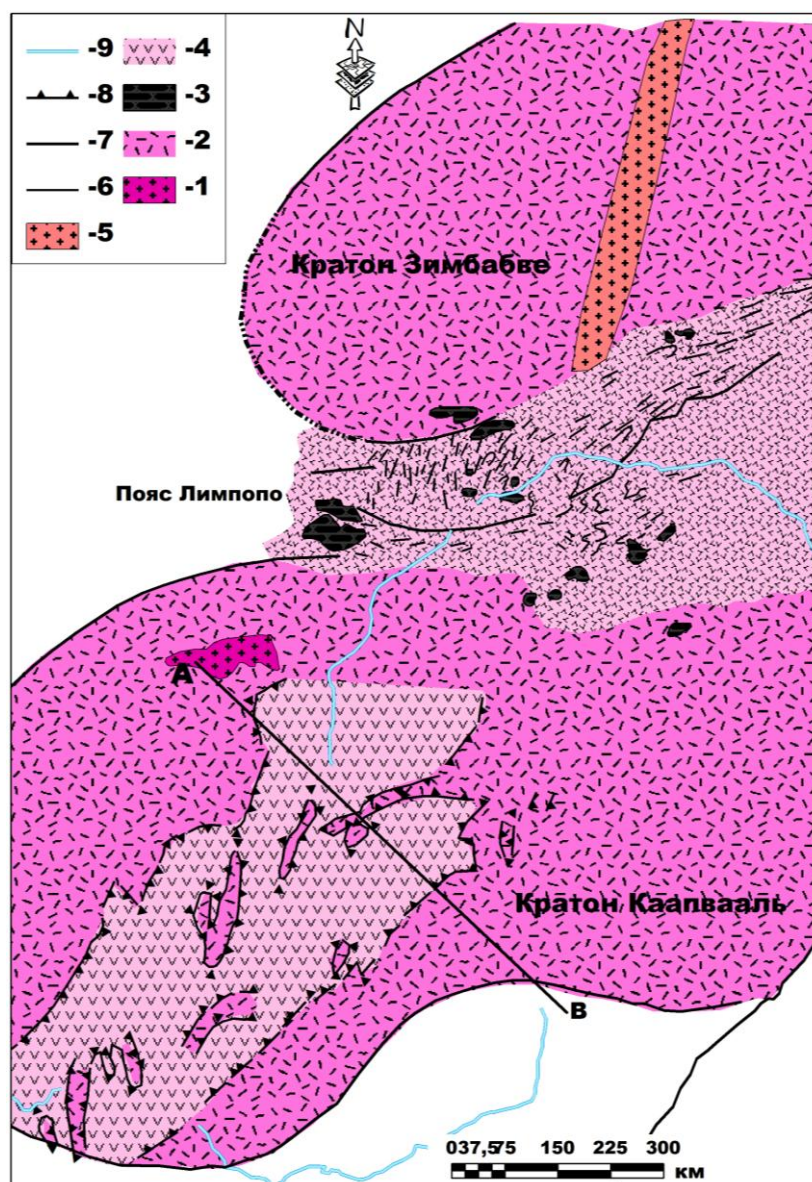


Рисунок 2.6 - Вентерсдорпская рифтовая система кратона Каапвааль [48, 112]. 1 - гранит Габороне (AR_1^1), 2 - кратоны Каапвааль и Зимбабве (AR_1^2), 3 - анатектические плутоны (AR_1^3), 4 - вентерсдорпские рифтовые отложения (AR_1^4), 5 - грейт-Дайк (Ar_1^5), 6 - основные зоны сдвига на поясе Лимпопо, 7 - линия профиля А-В, 8 - разломы, речные системы (Лимпопо и Оранж)

Разломы (рисунок 2.7), возникшие во время этого экстенсионального эпизода, возможно, являлись эруптивными центрами нижнего литологического блока Клипривьерсбергских лав Вентерсдорпской супергруппы. Химическая однородность, как в продольном, так и в вертикальном направлении, значительная мощность (1830 м), широкое распространение и объемный состав

Клипривьерсбергских лав убедительно свидетельствуют о континентальных условиях излияния. Кроме того, Н. Тайлер [112] отметил щелочную природу Клипривьерсбергских лав и связанный с ними кварц-толеитовый состав, который согласуется с континентальными базальтами, связанными с рифтогенезом.

Вышележащая Платбергская группа состоит в основном из кремнистых пирокластических и вулканических пород, перемешанных с локальными осадочными отложениями. Они быстро осаждались в линейных разломных желобах, которые, очевидно, активизировались к концу экструзии Клипривьерсбергских базальтов. Хотя некоторые из этих краевых разломов бассейна, возможно, были активны на протяжении всего извержения лав, огромная мощность и обилие осадочных отложений в Платберге предполагают процесс усиления рифтогенеза.

Переход от Платбергской группы к Ботавильской формации отмечен переслаиванием тонких вулканитов в осадочной толще Ботавильской формации, что, вероятно, было вызвано термическим оседанием осадочной толщи. Самая верхняя формация Алланриджа, по-видимому, представляет собой результат обновления рифтогенеза в рифтовой провинции Вентерсдорп. Образование рифтов проходило во время широко распространенной фазы термического оседания [45]. Эта обновленная рифтовая структура образовалась между крупными древними разломами около 2,6 миллиардов лет назад. Образовавшаяся впадина была заполнена осадочными породами и небольшим количеством лав, образуя группу Волькберга. Последующее оседание приводило к объединению синклинальной структуры с морским бассейном через кратон Каапвааль. Речные системы, слагающие аллювиальные отложения Черного рифа, были погружены под воду. При трансгрессии образовалось обширное мелководное море, в котором процветала примитивная жизнь (бактерии). Интенсивный рост их колоний привел к доломитизации толщ Мальманийских карбонатных отложений, а также накоплению огромных залежей железа и марганца, которые осаждались кислородом, выделяемым цинобактериями (группы Чуниспоорт и Гаап Трансваальской супергруппы) [48].

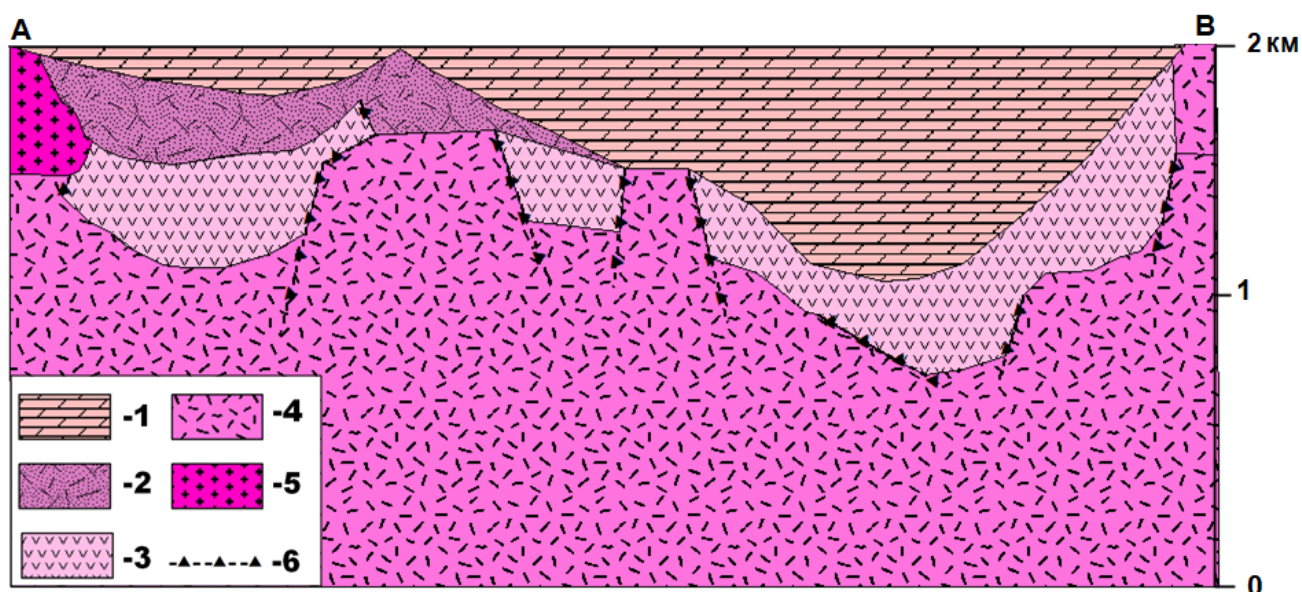


Рисунок 2.7 - Схематический разрез Вентерсдорпской рифтовой провинции [121].

1 - неоархейские доломиты подгруппы Мальмани (AR_2^m), 2 - кварцит серии Черного Рифа (AR_1^4), 3 - лава Вентерсдорпа (AR_1^3), 4 - граниты и гнейсы кратона Каапвааль (AR_1^2), 5 - гранит Габороне (AR_1^1), 6 - разломы

По мнению П.Г. Эрикссон и др. [62] и Ф. Франчи и М.Р. Мапео [65], развитие неоархейско-палеопротерозойского Трансваальского бассейна сопровождалось магматизмом и тектоническими движениями (прим. 2,74 млрд. лет) на территории современной ЮАР (рисунок 2.8). Седиментация проходила на фоне циклов экстенсионального и термического проседаний региона, разделенных стадиями поднятия, что отражалось на изменениях уровня моря [62]. Чуниспоортская группа отложений (2,58 млрд. лет), состоящая полностью из более чем 2000 м карбонатной толщи, известной как Малманийская подгруппа, занимает большую часть северного фланга кратона Каапвааль. Мощная толща карбонатных отложений, вероятно, свидетельствует о долговременном существовании глубокого внутрикратонного бассейна. Возможно, его образование на этой части кратона произошло за счет прогрева мантийным плюмом, который проявился в конце Вентерсдорпского события. В результате образовалась рифтовая система, в которой накапливались морские отложения подгруппы Чуниспоорта (2,58 млрд. лет). Большая часть Чуниспоортской толщи

свидетельствует о непрерывном накоплении морских отложений, указывающем на трансгрессию моря, вероятно, связанную с внутрикратонным тепловым проседанием бассейна [61].

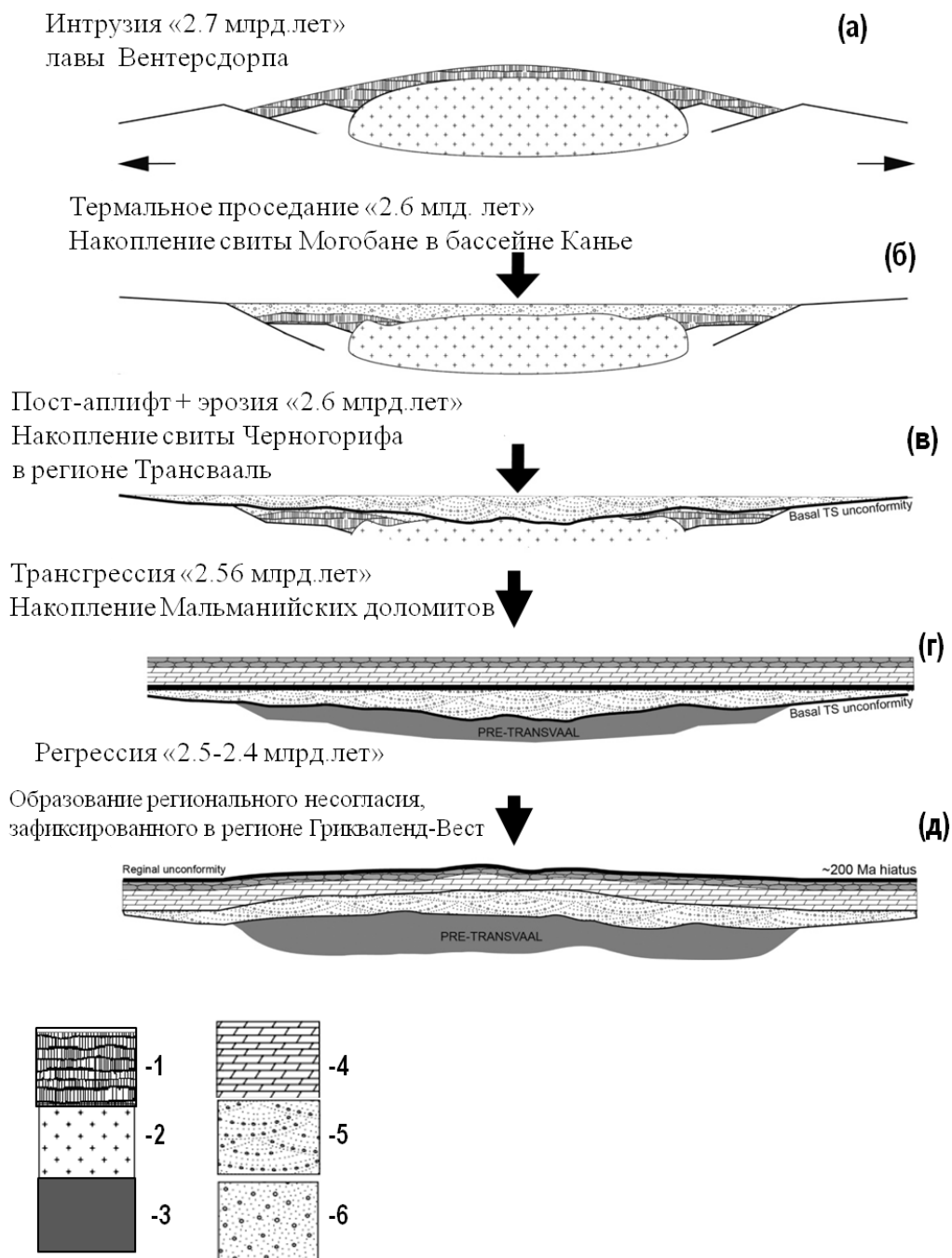


Рисунок 2.8 - Тектоническая модель эволюции Трансваальского Бассейна [65]. 1 - магматические породы нижнего Трансвааля, 2 - интрузия вулканической провинции Вентерсдорпа, 3 - пред-Трансваальские литологические единицы, 4 - доломиты подгруппы Мальмани, 5 - кварциты серии Черного Рифа, 6 - кремнисто-обломочные породы

Верхняя граница разреза Трансваальской супергруппы представляет собой контакт с вышележащим комплексом пород Бушвельд и соответствует тектоническому событию первого порядка, положившему конец эволюции Трансваальского бассейна 2050 млн. лет назад. Общая стратиграфическая последовательность Трансваальской супергруппы начинается с кварцитового слоя серии Черного Рифа, за которым следуют доломиты Чуниспоортской группы, и вся последовательность завершается Преторийской группой отложений.

2.3 Тектоническое положение Северо-Западного рудопроявления

Северо-Западное рудопроявление марганца расположено в пределах северного фланга Каапваальского кратона в одном из трех бассейнов Трансваальской супергруппы, называемом Трансваальским бассейном.

Тектоника Северо-Западного рудопроявления подчинена общему режиму эволюции всего Трансваальского бассейна. Она определяется развитием грабен-индуцированных депрессий и эродированных горстов Трансвааля. Состав отложений Трансваальской супергруппы, к которой относится Мальманийская подгруппа, свидетельствует о существовании здесь внутрикратонного бассейна. Возможной причиной его образования является просадка подстилающих отложений Вентерсдорпской супергруппы под термальным воздействием мантийных плюмов [61]. По мнению Б.Г. Элс и др. [59] тектономагматические события этого района определяются наличием протерозойских магматических интрузий и, в меньшей степени, ударным эффектом, вызванным падением метеорита Вредефорт (2,023 млрд. лет). Взбросы, формирующие грабеновые структуры, проявлены на сейсмическом профиле (Rz-256), пройденном через карбонатную платформу Мальманийской подгруппы - Ar_2^m (рисунок 2.9).

Большая часть этой территории [93, 94, 116] представляет собой реликт древней постгондванской суши района Хайфельда и состоит, в основном из неоархейских марганценосных карбонатов, марганцевых конкреций, марганцевого вада, неогеновых терригенных отложений (рисунок 2.10), и также выходов на поверхность кварцитов серии Чёрного Рифа [97-98].

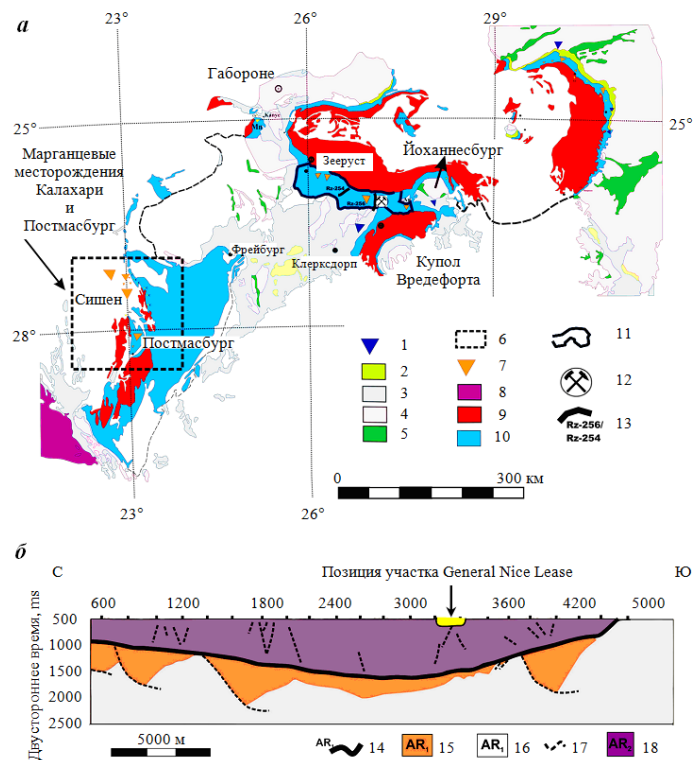
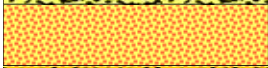
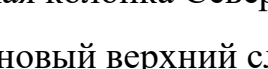
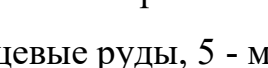
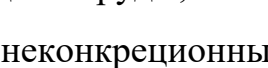
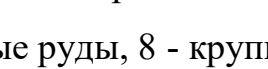


Рисунок 2.9 - а) Геологическая карта основных архейских стратиграфических единиц кратона Каапвааль по [44, 67], 1 - минерализация золота; 2 - базальный слой вулканогенно-осадочных пород (группа Волькберга, AR_2); 3 - пред-Трансваальская платформа (AR_1) (супергруппы Понгола, Хейс, Витватерсранд и Вентерсдорп); 4 - архейские граниты (AR_1); 5 - архейские зеленокаменные пояса (AR_1); 6 - территория распространения марганцевых месторождений Калахари и Постмасбург (PR_1^1); 7 - марганцевые месторождения; 8 - гранитные и метаморфические комплексы Намаква (K_1); 9 - обломочные осадочные единицы верхней части разреза (группы Претория и Постмасбург, T_2); 10 - карбонатные отложения (группы Chuniespoort и Campbell-Griquatown, AR_2); 11 - граница Северо-Западного рудопроявления марганца, представленного в настоящем исследовании; 12 - лицензионная площадь (General Nice Mine); 13 - сейсмические профили, проходящие через Малманийскую карбонатную платформу; (б) - сейсмический профиль Rz-256: 1 - кварцит серии Чёрного Рифа (AR_1), 2 - вулканические породы Вентердорп, 3 - граниты, гнейсы фундамента, 4 - разломы, 5 - неоархейские марганценозные доломиты (AR_2^m) [110]

Проявление марганца, представленное марганцевым вадом, марганцевыми конкрециями и корками приурочено к обширным древним африканским эрозионным поверхностям, называемым Африканской-I и Африканской-II, которые образовались в постгондванское время в позднем мелу и в середине кайнозоя соответственно [97, 117]. В течение мел-неогенового периодов на доломиты была наложена кора выветривания. Нижняя граница коры выветривания имеет сложный эрозионный рельеф, который в 3-х местах представлен глубокими карстовыми воронками. Размер карстовых воронок колеблется от 50 до 70 м в диаметре. Стратиграфически, рудопоявление состоит из двух ярусов. Нижний ярус сложен вадом чёрного цвета, мощность его варьирует от 0,5 до 2,5 м. Он включает прослой глины красного цвета толщиной от 5 до 20 см. Верхний ярус сложен марганцевыми конкрециями размером от 0,5 мм до 5 см. Мощность отложений верхнего яруса изменяется от 5 до 10 м (рисунок 2.11-а). По данным горных работ и картирования выходов на поверхность рудный пласт простирается от 4,74 до 5,28 км. По направлению с севера на юг это расстояние меньше - от 1,3 до 2,73 км, а в широтном направлении – 5,3 км. На рисунке 2.10 показано, что верхняя часть рудного тела залегает в неогеновых отложениях, которые перекрыты четвертичными осадками.

Эратема	Система	Отдел	Индекс	Стратиграфическая колонка	Глубина от поверхности (m)	Характеристика пород
KZ	Четвертичная	Голоцен	Q		0	Гуминовый верхний слой почвы с корнями растений.
		Эоплейстоцен			1	Красноцветная почва.
KZ	Неогеновая	Миоцен	N ₁	                          		

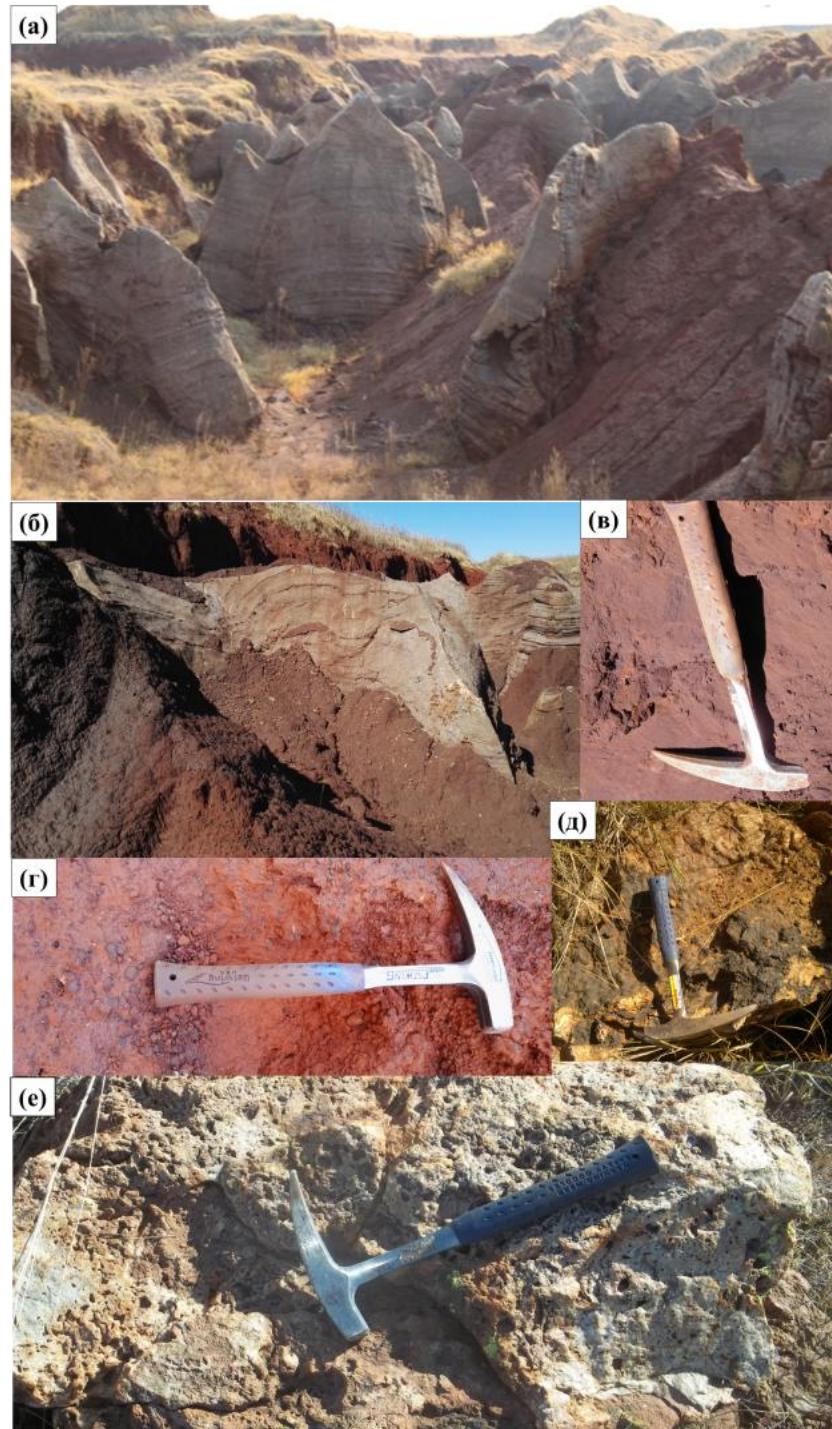


Рисунок 2.11 - Осадочные фации, встречающиеся в районе исследования; а - купольные структуры выветривания марганценосных доломитов, б - купольные структуры выветривания неоархейских марганценосных доломитов покрытые марганцевым вадом, в - порошкообразный марганцевый вад, г - латеритная часть разреза («Westwits alluvium») содержащая марганцевые конкреции, д - марганценосные карбонаты, е - кварцит серии Черного Рифа

2.4 Геологическое строение Северо-Западного рудопроявления марганца

Геологическая обстановка и условия накопления руд Северо-Западного рудопроявления отражаются в геологическом строении неоархейской Мальманийской подгруппы Чуниспортской группы отложений («Chuniespoort Group»). Чуниспортская группа отложений интерпретируется П.Г. Эрикссон и др. [61] как результат образования внутрикратонного бассейна, в пределах рифтовой провинции Вентерсдорпской супергруппы.

Северо-Западное рудопроявление марганца в верхней части разреза доломитов Мальманийской подгруппы приурочено к карстовым структурам, возникающим в результате денудации и приповерхностного выветривания и растворения доломитов (рисунок 2.12). Локализация карстовых процессов в неоархейских доломитах приводит к увеличению мощности рудных тел в депрессионных участках, в которых залегают богатые марганцевые руды, представленные марганцевым вадом (рисунок 2.12-б). Марганценозные доломиты серии Мальмани (Мальманийской подгруппы) картируются под элювиальными и терригенными отложениями в широкой полосе от г. Мафикег на западе до г.Йоханнесбург на востоке [36, 37, 72, 93, 97, 155, 117]. Богатые руды, залегающие на доломитах представляют собой продукты обогащения, которые образовались в коре выветривания и представлены оксидами и гидроксидами марганца.

Литология района. Прежде всего следует отметить, что неоархейские марганценозные доломиты серии Мальмани занимают большую площадь, на территории рудопроявления. Кроме них, встречаются кварциты формации Черного Рифа, которая, согласно стратиграфическому расчленению подстилает серии Мальмани. Железные руды, принадлежащие формации Пенге встречаются в подчиненном количестве. Марганценозные доломиты перекрываются элювиальными и терригенными отложениями формации Вествитс.

Одно из первых полевых исследований здесь, было проведено Т.С.Патриджем и Р.Р. Мод в 1987 году. Они заметили следы ряда крупных циклов выветривания и эрозии, развитых на поверхности Южно-Африканского субконтинента после распада Гондваны между 180 и 120 млн. лет.

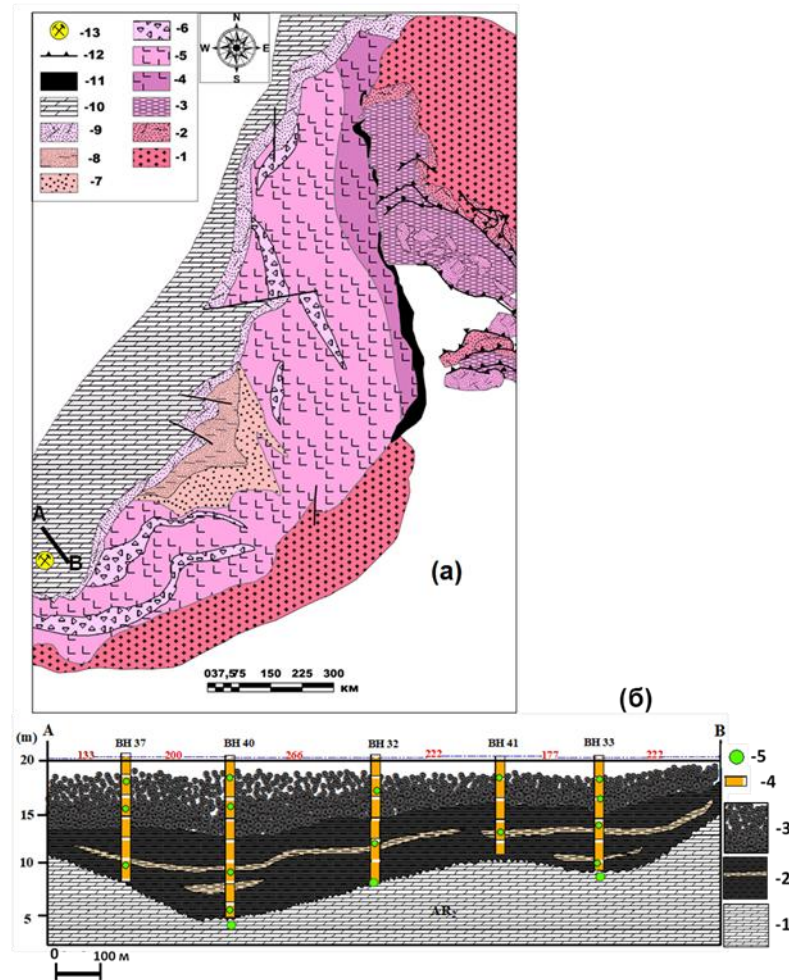


Рисунок 2.12 - Схема геологического строения (а) и разрез Северо-Западного рудопроявления Mn, ЮАР (б). На плане 1(а): 1 - архейские граниты фундамента (AR_1^1), 2 - песчаники и кварцитовые породы Витватерсранд (AR_1^2), 3 - сланцы Витватерсранд, 4 - толеитовые базальты группы Клиприверсбург (AR_1^3), 5 - андезитовые лавы группы Платберг (AR_1^4), 6 - кремнистые, пирокластические породы группы Ботавиль (AR_1^5), 7, 8 - диамиктиты, песчаники, кварциты формации Алланридж (AR_1^6), 9 - кварцит серии Черного Рифа (AR_1^7), 10 - неоархейский марганценосный доломит серии Мальмани (AR_2^m), 11 - тектонический меланж, 12 - разломы, 13 - лицензионная площадь «General Nice Mine L.t.d». На разрезе 2.12(б): 1- точки отбора проб, 2- разведочные шурфы, 3- марганцевые конкреции (N), 4- порошкообразный марганцевый вад с прослоем глины ($K_2?$), 5- неоархейский марганценосный доломит серии Мальмани (AR_2^m)

Однако абсолютные датировки и продолжительность некоторых событий, таких, как Постафриканские II, отразились в эрозии поверхности рельефа после поднятия. Эти события остаются плохо изученными, главным образом, из-за отсутствия каких-либо реалистичных биостратиграфических или биогенных возрастных определений.

Понимание эволюции этих эрозионных явлений играет важнейшую роль в понимании постгондванской тектонической истории субконтинента, а также фиксирует изменение климатических условий от мелового периода до современности.

Позже, в 1997 и 2000 годы, рудопроявления сложенные, в основном, марганцевым вадом привлекли внимание некоторых ученых [36, 93, 116, 117]. В частности, обнажения «марганцевых вадов» были обнаружены Н.Ж. Беукесом и др [37] в открытом карьере на начальном этапе разработки месторождений золота в горных выработках на участке «Waterval 174 IQ» к западу от города Крюгерсдорп. Их минералогический анализ, проведенный с помощью рентгеновского дифрактометра, показал, что марганцевый вад состоит в основном из гематита, пиролюзита и каолинита. Ван Ниекерк и др. [116-117], А. Пак и др.[93] обнаружили аналогичные рудопроявления на далеко к западу, рядом с городом Лихтенбург. Наличие отпечатков листьев *Glossopteris* на плоскостях залегания марганцевого вада, привело авторов к выводу, что залежь образовалась в результате выветривания пермских слоев сланцев «Екка» супергруппы Кару. Дж. Де Вилльерсом и др. [56] было выполнено одно из ранних геохимических исследований в этом регионе [37, 55, 76, 93], которое показало, что карбонатные породы, особенно выветрелые строматолитовые доломиты, содержат большое количество марганца. Это заключение было подтверждено недавними геохимическими данными, опубликованными в работе [97]. Здесь же сделано заключение, что сохранившиеся коренные породы (доломиты) являются материнскими для выветрелых гипергенных марганцевых руд.

2.5 Стратиграфия рудопроявления марганца на северо-западе ЮАР

Литостратиграфия Северо-Западного рудопроявления марганца показывает его сходство с другими аналогичными месторождениями, такими как месторождение Катанга в Демократической Республике Конго [54], месторождение Окинава в Японии [27, 50].

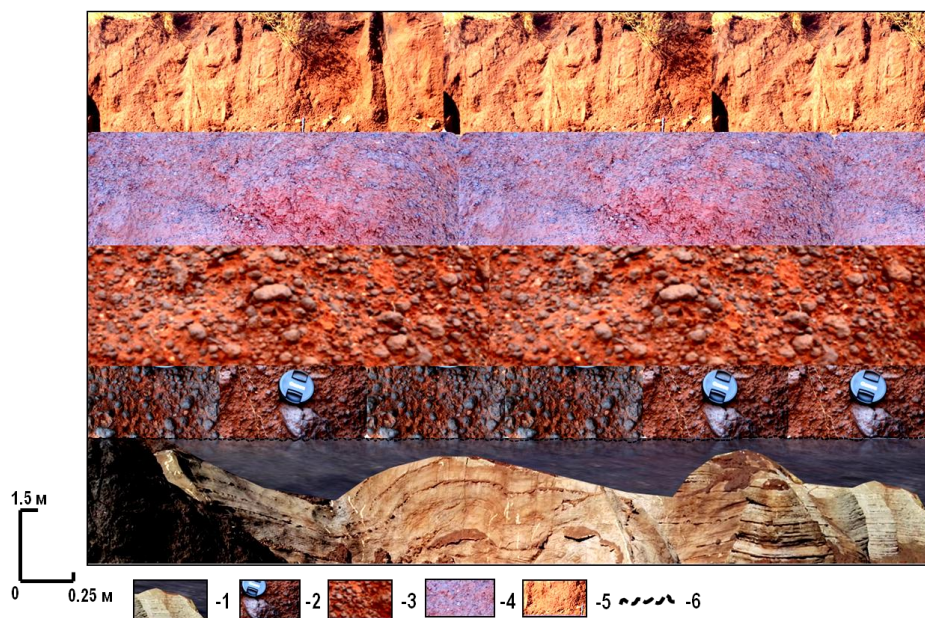


Рисунок 2.13 - Стратиграфический профиль Северо-Западного рудопроявления марганца. 1 - неоархейский марганценосный доломит и марганцевый вад, 2 - крупноконкреционная руда, 3 - крупно-среднеконкреционная руда, 4 - средне-мелкоконтреционная руда, 5 - четвертичная покрывающая почва, 6 – несогласие

Стратиграфия рудопроявления марганца Северо-Западное представлена базальным марганценосным доломитом серии Мальмани, порошкообразным марганцевым вадом в карстовых структурах, развитых на доломитах и марганцевыми конкрециями в латеритной части стратиграфического разреза (рисунок 2.13).

Задокументированные стратиграфические разрезы рудопроявления. На основе размеров конкреций, содержаний химических элементов, представленных минеральных ассоциаций и концентраций марганцевых конкреций по вертикальному разрезу, латеритная часть разреза была разделена на восемь зон: А, В, С, D, E, F, G и Н (рисунки 2.14).

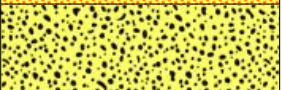
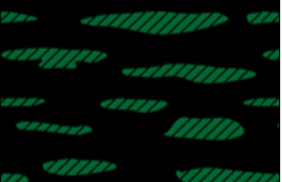
Эратем- а	Систем- а	Отдел	Индекс	Стратиграфичес- кая колонка	Полевые наблюдения	Глубина от поверхнос- ти (м)
KZ	Четвер- тичная	голоцен	Q			0
		Эоплей- стоцен				1
KZ	Неогеновая	Миоцен	N ₁			2
						3
						4
						5
						6
						7
MZ	Меловая	Верхний	K ₂ ? ?			8
AR			AR ₂			9
						10
						11

Рисунок 2.14 - Стратиграфический разрез по шурфу - GNR-ВН 07

Верхняя зона (Зона А) представлена четвертичными отложениями – песком и красной массивной четвертичной почвой. Она обогащена органическими веществами и корнями растений. Её мощность варьируется от 0,5 до 1 м. Эта зона подстилается Зоной В, представленной илистым материалом, с включениями мелких окатанных терригенных обломков. Мощность данной зоны составляет порядка одного метра. Далее, под Зоной В залегает Зона С. Зона С состоит из мелкоконкреционной (< 4 мм) марганцевой руды. В этой зоне встречаются

угловатые обломки марганцевых пород и минералов, а также карцевые зерна, ильменит, лимонит и глинистые минералы. Максимальная мощность зоны С составляет 1 м.

Зона D, залегающая на глубине 2,6 м от поверхности, сложена мелко- и среднеконкреционной марганцевой рудой размером зерен более 4 мм. Она подстилается слоем средне-и крупноконкреционной руды, называемым Зоной E. Средний размер конкреций в этом слое варьируется от 1 до 3 мм. В его почвенной матрице присутствуют угловатые и окатанные железо- и марганецсодержащие обломки размером до 2,5 см. Помимо марганцевых конкреций, здесь присутствуют глинистые минералы, кварц, ильменит, обломки циркона и рутила.

Зона F залегающая на глубине 5 м от поверхности характеризуется линзовидными марганцевыми конкрециями. Она подстилается Зоной G, мощностью 0,8 м.

Зона G представлена крупноконкреционной марганцевой рудой. Доля марганцевых конкреций, по сравнению с другими фазфми, составляет около 70% и поэтому Зона G относится к богатым марганцем. Базальная зона, называемая Зоной H, представлена марганцевым вадом ватервальского сапролита в типично коровом рельефе марганценосных доломитов.

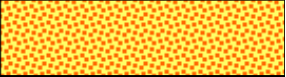
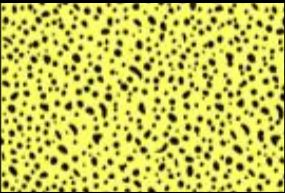
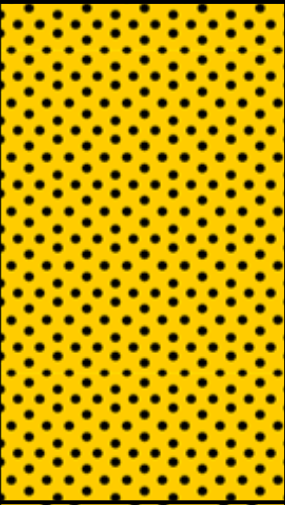
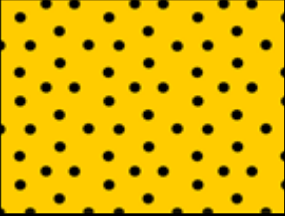
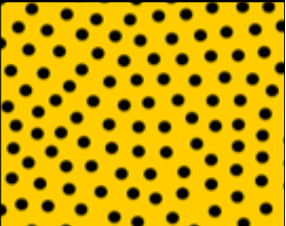
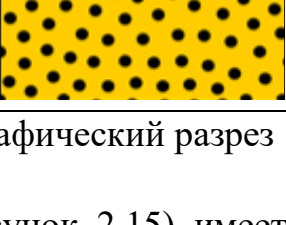
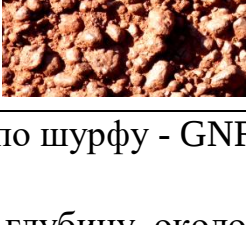
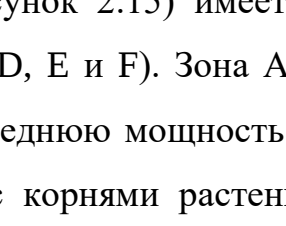
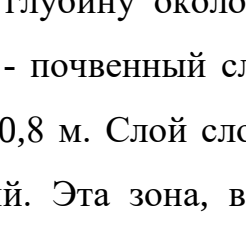
Эратем -а	Систем -а	Отдел	Индекс	Стратиграфическая колонка	Полевые наблюдения	Глубина от поверхности (м)
KZ	Четвертичная	голоцен Эоплейстоцен	Q			0
KZ	Неогеновая	Миоцен	N ₁			1
						2
						3
						4
						5
						6
						7
						8
						9
						10
						11
						12

Рисунок 2.15 - Стратиграфический разрез по шурфу - GNR-ВН 16

Шурф- GNR-ВН 16 (рисунок 2.15) имеет глубину около 12 м и в нем встречены шесть зон (А, В, С, D, Е и F). Зона А - почвенный слой, залегает на поверхности разреза и имеет среднюю мощность 0,8 м. Слой сложен массивной темной суглинистой породой с корнями растений. Эта зона, в свою очередь,

подстиляется слоем массивной илистой почвы мощностью 0,65 м. Слой представляет Зону В. Под этим слоем залегает мелкоконкреционная руда мощностью 1,6 м - это Зона С. Кроме марганцевых конкреций, в этой зоне присутствуют лимонит, мелкие зерна кварца.

Далее – на глубине от 3,05 м до 7,2 м залегает слой мелко-среднеконкреционной марганцевой руды, представленный Зоной D. Акцессорные минералы в ассоциации с марганцевыми конкрециями включают - кварц, кальцит, гематит и глинистые минералы. Ниже по разрезу расположена Зона Е. Она имеет мощность 1,8 м и представляет собой рудную зону с размерами частиц от 5 мм до 2 см. Зона F, залегающая на глубине от 9 м до 12 м сложена крупноконкреционной марганцевой рудой.

2.6 Выводы по 2 главе

В заключение второй главы следует отметить следующее. Северный фланг Каапваальского Кратона, где находится Северо-Западное рудопроявление, относится к одной из трех структурных единиц Трансваальской супергруппы, известной как Трансваальский бассейн. Геологическое строение этого района представлено наклонными грабенами субмеридиального и северо-восточного простирания Вентерсдорпской рифтовой провинции, сформировавшимися примерно 2,7 млрд. лет назад одновременно со столкновением кратонов Каапвааль и Зимбабве. Развитие Вентерсдорпской рифтовой провинции связывают с расширением кратона Каапвааль во время столкновения кратонов. Вероятно, столкновение между кратонами происходило вдоль материковой окраины Атлантического типа, на южной окраине кратона Зимбабве, и окраины Андского типа, развитой на стороне кратона Каапвааль. Эта рифтовая провинция послужила территорией локализацией эруптивных центров Вентерсдорпской супергруппы.

Возобновление рифтогенеза в провинции Вентерсдорпа около 2,6 млн. лет назад способствовало накоплению осадочных толщ и магматических лав Волькберга. Продолжающееся погружение завершилось соединением с морским бассейном вдоль кратона Каапвааль. Речные системы, образующие отложения

формации Черного рифа, были затоплены из-за повышения уровня моря и за этим последовало накопление мощной карбонатной толщи (около 2000 м) серии Мальмани.

Геохронология карбонатов серии Мальмани указывает на то, что они образовались между 2,6-2,5 миллиардами лет назад, что делает их одной из старейших известных доломитовых формаций.

В конце мелового периода на доломиты была наложена кора выветривания. Кора выветривания имеет сложный рельеф нижней границы, которая осложнена карстовыми депрессиями и воронками. Формирование Северо-Западного рудопроявления марганца связано с постседиментационными процессами минерального обогащения в той же зоне окисления марганценосных доломитов в обстановке тропического и влажного климата.

Рудопроявление приурочено к карстовым депрессиям и представлено двумя ярусами. Нижний ярус выполнен марганцевым вадом *Ватервальского сапролита*, залегающим в карстовых структурах.

Верхний ярус представляет собой неогеновую латеритную аллювиальную толщу, содержащую марганцевые конкреции. Он делился на пять конкреционных зон. Нижняя зона состоит из крупноконкреционной марганцевой руды с диаметрами частиц от 1 до 5-6 см. Эта зона перекрывается слоем средне-крупноконкреционной марганцевой руды с диаметрами частиц менее 6 см. Верхняя рудная зона сложена мелкоконкреционной рудой с диаметрами частиц до 3 мм. В этой зоне также встречаются многочисленные зерна кварца.

Геохимический анализ этих зон показал, что обогащение марганцем, алюминием, магнием и калием произошло в нижней части разреза. Концентрация железа появляется равномерно по всем зонам. Повышенное содержание кремнезема отмечается в верхних зонах.

ГЛАВА 3 МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ МАРГАНЦЕВЫХ РУД

Аннотация. Показаны научные подходы, включая аналитические методы, используемые в данном исследовании для достижения намеченных целей и задач. Описаны полевые и камеральные работы, аналитические приборы и их применение, а также компьютерные программы, используемые для интерпретации данных. В ходе полевых работ, которые проводились в разное время в общей сложности в течение 16 недель, выполнена документация стратиграфических разрезов в горных выработках, изучены естественные и искусственные обнажения, отобраны бороздовые и штучные пробы.

В коллекции горных пород и минералов, отобранных автором, представлены все разновидности марганценосных отложений и вмещающих пород разреза. Это пробы доломитов, марганцевого вада и марганцевых конкреций и корок. На рисунке 3.1 показаны участки опробования марганцевых руд для намеченного исследования. Большая часть образцов, использованных в работе, были собраны из разведочных шурфов на лицензионной площади «General Nice Manganese Mine L.t.d».

В разделах, посвященных истории исследований региона, представлены обзоры публикаций и ссылки на последние опубликованные научные труды.

3.1 Полевые работы и отбор проб. Для исследования состава руды и вмещающих отложений было опробовано несколько разведочных шурфов на лицензионной площади «General Nice Manganese Mine» в ходе первого и второго этапов разведки рудопроявления марганца Северо-Западное. Образцы были отобраны из семидесяти разведочных шурфов, пересекающих рудные тела и участки минерализации (рисунок 3.2). Пробы на геохимические и минералогические анализы, были отобраны из девяти репрезентативных разведочных шурфов: GNR-BH 15, GNR-BH 22, GNR-BH 52, GNR-06, GNR-13, GNR-09, GNR-04, GNR-BH 51, GNR-BH 16. В разрезах, вскрытых шурфами было установлено восемь стратиграфических зон. Они обозначены сверху вниз в следующей последовательности: А, В, С, D, E, F, G и Н . Из каждой из этих зон были отобраны образцы, представляющие их в каждом шурфе, а затем и валовые

пробы. Для более достоверной диагностики образцы были доставлены в несколько разных лабораторий следующих институтов: Council for Geoscience, Mintek и университет Йоханнесбурга в ЮАР, а также в Аналитический центр коллективного пользования Горного университета в г. Санкт-Петербурге. Кроме того, были выполнены химические анализы содержаний марганца в пробах из всех шурфов, с целью оценки его ресурсов в рудопроявлении Северо-Западное.

3.2 Камеральные работы заключались в анализе геологических карт, спутниковых изображений и аэрофотоснимков северо-западного района перед выездом на полевые работы. Кроме того, изучение опубликованных научных работ позволило более целенаправленно запланировать маршрутные исследования, наметить точки опробования в шурфах и определить интервалы между точками наблюдения. Спутниковые снимки, региональные геологические карты и аэрофотоснимки исследуемого района были использованы с привязкой к цифровой топографической карте. Опубликованные графические материалы использовались для составления геологической карты исследуемого района в цифровом формате с применением программ: ArcGIS 9.3, Oasis montaj, CorelDraw 2018 и Surfer 9. Данные полевых наблюдений и стратиграфических описаний разрезов легли в основу построения концепции рудообразования и объёмной модели залегания рудных пластов. Здесь применялись программы: Strater 4 и Micromine соответственно. Геохимические и статистические показатели рудопроявления обрабатывались с помощью программ: Micromine, Grapher 8, Isatis.neo Mining 2020 и Excel.

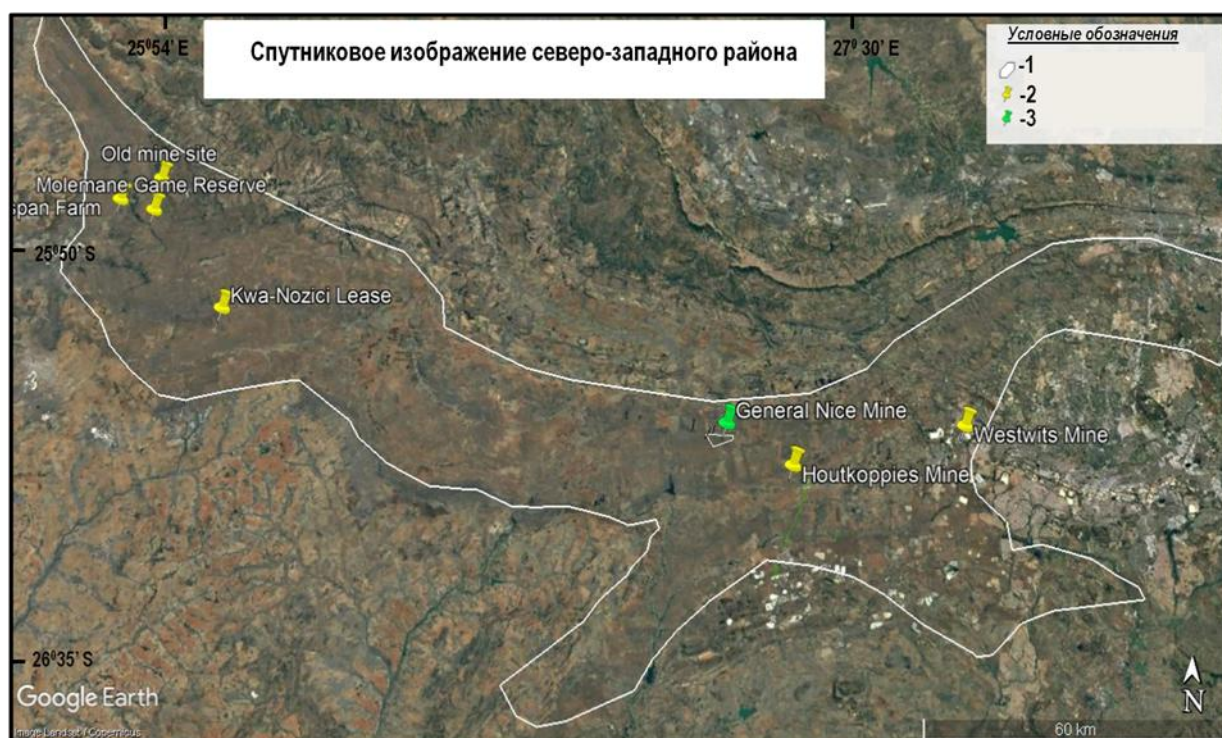


Рисунок 3.1 - Спутниковое изображение региона Хайфельда в Северо-Западной провинции. 1 - контур площади карбонатных отложений - доломитов подгруппы Мальмани, 2 - минерализованные участки и старые рудники марганца изучающиеся в данной работе, 3 - лицензионная площадь «General Nice Manganese Mine L.t.d», из которой было отобрано большое количество каменного материала. Здесь было заложено и пройдено несколько разведочных шурфов для детального изучения Северо-Западного рудопроявления проходка шурфов позволила выполнить структурный контроль размещения рудных пластов, определить закономерности распределения и установить объём полезного компонента

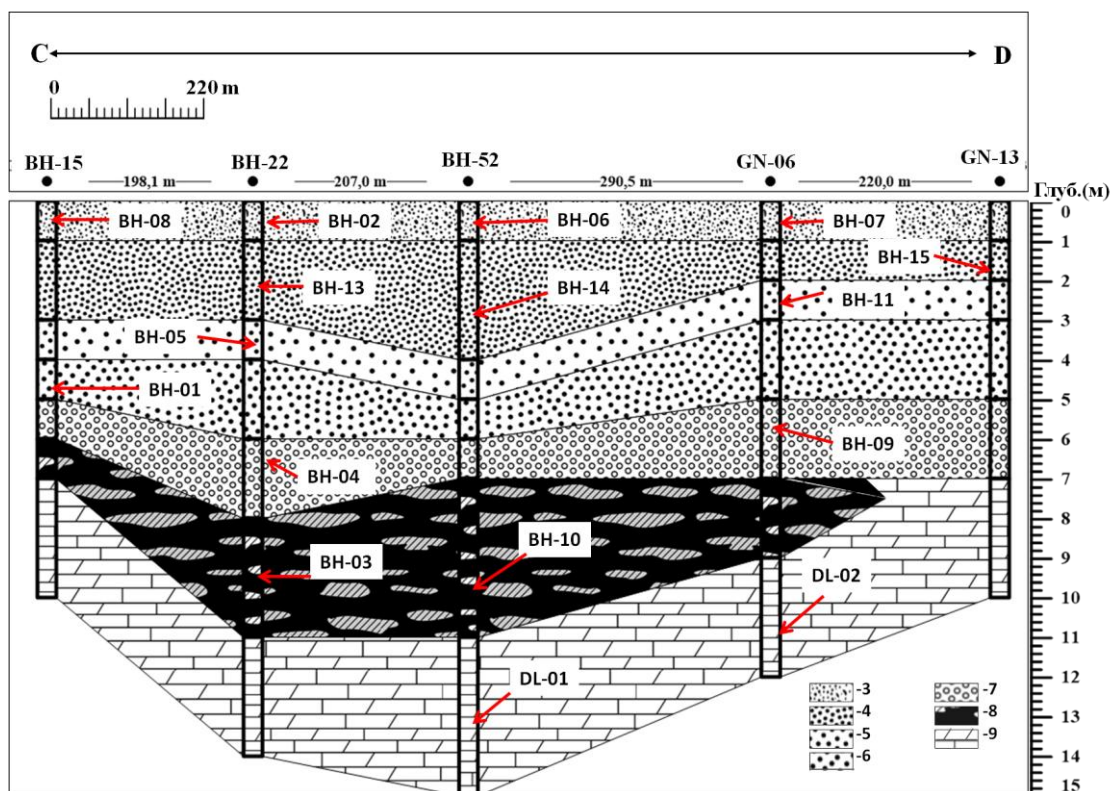
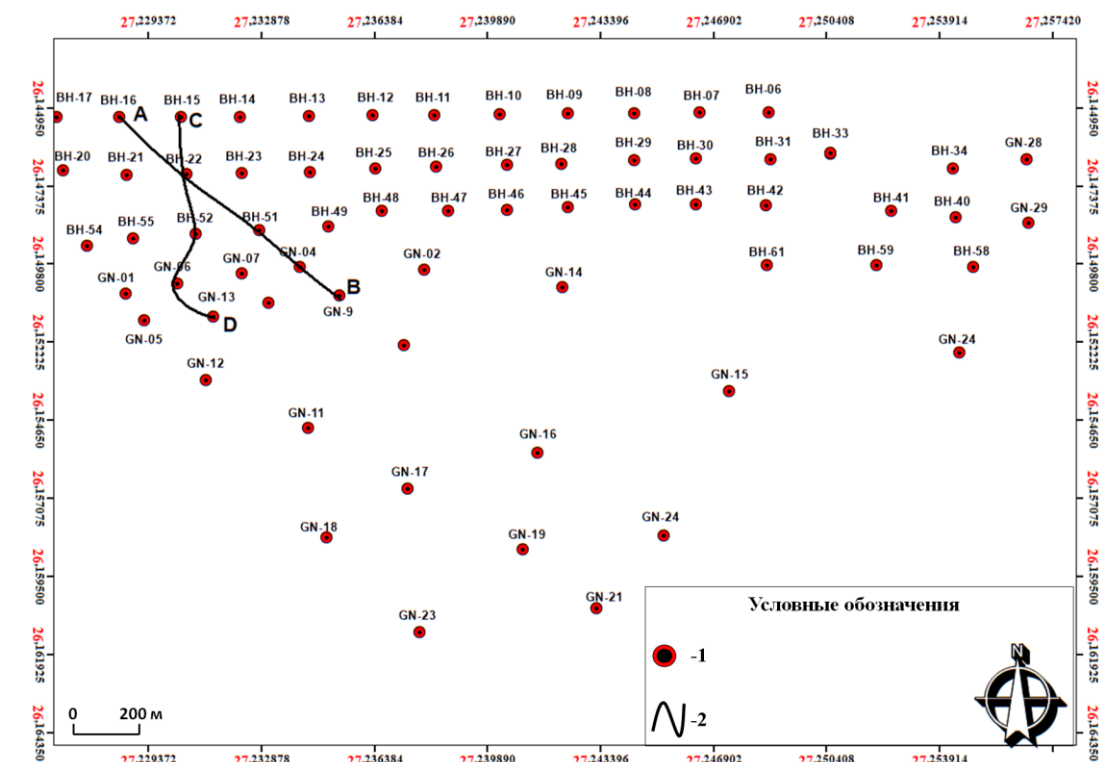


Рисунок 3.2 - План участка работ и геологический разрез по линии C-D с указанием точек отбора проб: 1 - разведочные шурфы, 2 - геологические профили по линиям АВ и CD, 3 - мелкоконкреционные марганцевые руды (N_1^5), 4 - мелко- и среднеконкреционные марганцевые руды (N_1^4), 5 - среднеконкреционные марганцевые руды (N_1^3), 6 - крупноконкреционные марганцевые руды (N_1^2), 7 - крупноконкреционные марганцевые руды с прослоями калькретов (N_1^1), 8 - марганцевый вад ($K_2^{??}$), 9 - неоархейский марганценозный доломит серии Мальмани (AR_2^m)

3.3 Методика подготовки проб

Предварительная подготовка образцов руды заключалась в промывке их дистиллированной водой с последующей сушкой в печи при температуре 105°C в течение 24 часов. Подготовка образцов для изучения валового состава методами рентгенофлуоресцентного анализа, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой, а также рентгеновской порошковой дифракции заключалась в контролируемом измельчении в порошок до аналитической крупности с использованием вибрационной мельницы ММ-301 фирмы Retsch и агатовых ступок.

В целях подготовки к локальным методам анализа части образца были отрезаны с использованием прецизионных отрезных станков Struers (Secotom-10) и Struers (Accutom-50), оснащенных алмазными пилами. Полученные срезы монтировались на предметные стекла, шлифовались до толщины 30 мкм, полировались до необходимой гладкости поверхности. Пробоподготовка контролировалась с использованием интерференционной цветовой диаграммы Мишеля-Леви. Отобранные под биноклем участки рудных образцов заливались эпоксидной смолой в вакууме в держателях диаметром 22 мм для сохранения их исходной структуры (пористости, взаимного расположения зерен, контактов между минеральными фазами и др.). Полученные аншлифы шлифовались и полировались до качества поверхности, необходимого для всестороннего исследования в сканирующем электронном микроскопе.

3.3.1 Методы анализа химического состав руд

Для определения химического состава руды выполнялись аналитические исследования методами рентгеновской флуоресценции, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) и рентгеновской порошковой дифрактометрии.

Рентгеновский флуоресценционный анализ (РФА). Этот метод используется для неразрушающего химического анализа горных пород, минералов и отложений при облучении их монохроматическим рентгеновским излучением с последующим анализом спектра вторичного рентгеновского излучения.

В данной работе РФА применялся для анализа основных и микроэлементов изучаемых рудных проб. Исследования проводились с помощью прибора XRF MagiX Fast (PANalytical) (рисунок 3.3).



Рисунок 3.3 - Аппарат для выполнения анализов методом рентгеновской флуоресценции

В качестве источника рентгеновского излучения в спектрометре используется 4 кВт Rh-рентгеновская трубка, излучение от которой падает на образец. Возбужденное в образце вторичное (характеристическое) излучение попадает на кристалл-анализатор. В результате дифракции на кристалле излучение разлагается в спектр (в соответствии с уравнением Вульфа-Брэгга), по положению и интенсивности линий в котором проводится определение содержания элементов. Спектрометр является многоканальным прибором, в составе которого есть сканирующий (по углам дифракции) канал и каналы, настроенные на характеристическое излучение определенного элемента (фиксированные каналы). Для корректировки неконтролируемых эффектов за счет неизменяемых легких элементов определялись потери при прокаливании

(П.П.П.), для чего измельченный образец (фракция менее 75 мкм) нагревался до температуры 1000 °С, выдерживался в течение не менее 3 ч для окисления Fe^{2+} и S. Стеклянные препараты получали сплавлением 1 г прокаленного образца и 10 г флюса, состоящего из 49,5% $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$, 49,5% LiBO_2 и 0,50% LiI при температуре 1150°С. Для изготовления таблетки 12 г измельченного образца и 3 г связующего вещества порошки смешивали и прессовали с помощью гидравлического пресса с приложенным давлением 25 тонн. Для контроля в качестве стандарта использовался собственный амфиболитовый эталонный материал (образец 12/76).

Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS). В геохимии для изучения источников рудных веществ, приводящих к образованию полезных ископаемых, изучается поведение редких и редкоземельных элементов. Слабая подвижность последних и сохранение геохимических спектров в осадочных средах позволяют использовать их в качестве индикаторов источников отложений. Аномалии редкоземельных элементов в любой осадочной среде дают представление о преобладавших во время осадконакопления условиях. Понимание этих условий дает надежное обоснование модели эволюции изучаемых отложений, в данном случае гипергенного рудообразования марганцевых пород района Хайфельда ЮАР. Результаты определений 31 примесного элемента (содержание $n \cdot 100 \text{ ppm}$ и менее) в 22 рудных образцах были получены на квадрупольном масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой PerkinElmer NexioN 300X (рисунок 3.4) в Университете Йоханнесбурга. На основе полученных композиционных спектров были установлены аномальные содержания редкоземельных элементов, которые были нормализованы по средним составам хондрита и постархейского австралийского сланца, как представительного эталона пород восточного фланга кратона Каапвааль. По полученным аналитическим результатам были рассчитаны коэффициенты корреляции, соотношения между содержаниями марганца, редких и редкоземельных элементов, установлены аномальные концентрации элементов – генетических маркеров определения источника рудного марганца.

Аномалии $Ce(\frac{Ce^{*}_{SN}}{Ce^{*}_{SN}})$ и $Eu(\frac{Eu^{*}_{SN}}{Eu^{*}_{SN}})$ вычислены, как коэффициенты нормализованных значений - индекс SN (3.1a) и (3.2), по среднему составу постархейского австралийского глинистого сланца - PAAS, [88] путем интерполяции содержаний соседних элементов (надстрочный знак “*”) таким образом, что: .

$$Ce^{*}_{SN} = 0.5La_{SN} + 0.5Pr_{SN}, \quad (3.1a)$$

$$\frac{Ce_{SN}}{Ce^{*}_{SN}} = \frac{2x[Ce]_{SN}}{[Sm]_{SN} + [Pr]_{SN}}, \quad (3.1b)$$

$$\frac{Eu_{SN}}{Eu^{*}_{SN}} = \frac{2x[Eu]_{SN}}{[Sm]_{SN} + [Gd]_{SN}}, \quad (3.2)$$

Из-за аномального поведения La в зоне окисления, традиционная формула (3.1b) для вычисления аномальных значений Ce может вызывать завышения содержаний Ce. Поэтому Н. Беукес и др. [36], П. Джосс и др. [81] предложили использование формулы (3.3).

$$\frac{Ce_{SN}}{Ce^{*}_{SN}} = \frac{[Ce]_{SN}}{([Pr]_{SN})^2/[Nd]_{SN}}, \quad (3.3)$$

Где Ce^{*}_{SN} , содержание церия по средним значениям постархейского австралийского сланца, Eu^{*}_{SN} , содержание европия по средним значениям постархейского австралийского сланца.



Рисунок 3.4 - Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой «ИСП-МС PerkinElmer Nexion 300X»

Рентгеновская порошковая дифрактометрия. Этот аналитический метод используется в качестве неразрушающего фазового анализа горных пород, минералов и пород при облучении их монохроматическим рентгеновским излучением с целью идентификации кристаллического материала. Рентгеновская дифракция основана на законе Вульфа-Брэгга ($n\lambda = 2d \sin \theta$), который связывает длину волны электромагнитного излучения с углом дифракции и межплоскостным расстоянием в кристаллических решетках. Анализируемый материал измельчают, гомогенизируют и запрессовывают в виде плоского поликристаллического образца с хаотической ориентировкой зерен. Образец облучают параллельным монохроматическим пучком рентгеновских лучей от рентгеновской трубки с регистрацией интенсивности дифрагированных лучей при последовательном изменении углов падения-отражения θ . Путем сравнения полученного набора межплоскостных расстояний с эталонными значениями из международной базы данных JSPDC (2011г.) идентифицируются все имеющиеся кристаллические фазы (при содержании более 1 вес. %). Идентификация минералов и их соотношений проводилась с использованием дифрактометра XRD 6000 фирмы Shimadzu (рисунок 3.5) в Санкт-Петербургском горном университете. Исследуемые пробы измерялись при следующих режимах: Cu K α - излучение, ускоряющее напряжение 35кВ, ток 45мА, скорость 2°/мин, скорость вращения образца - 60 оборотов/мин, диапазон углов 2θ - 5°-90°.

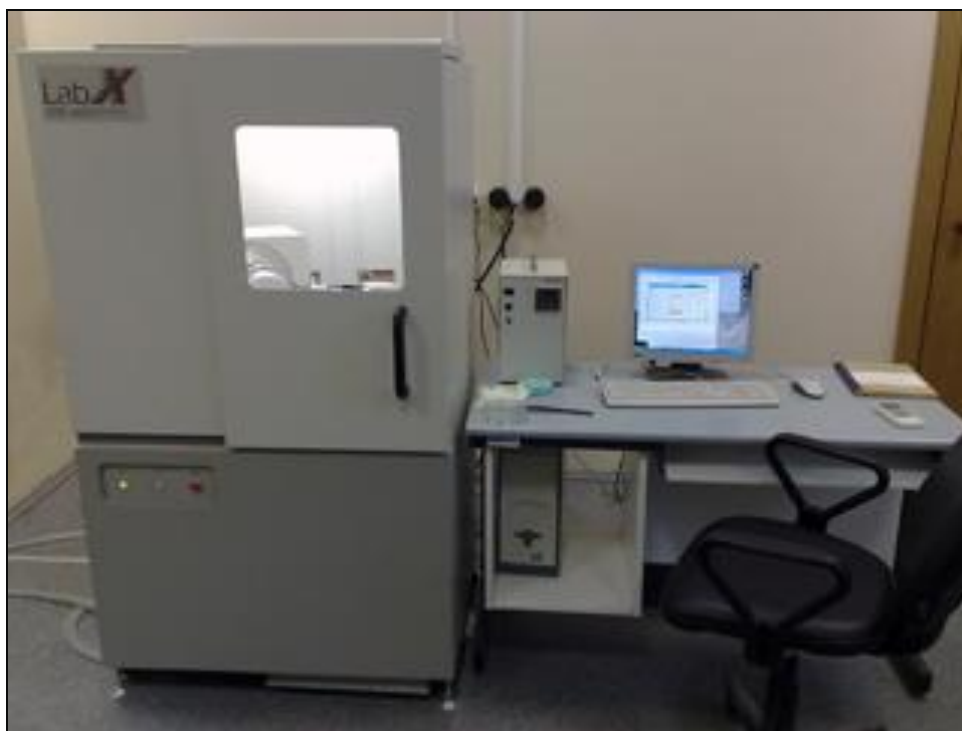


Рисунок 3.5 - Рентгеновский порошковый дифрактометр «XRD 6000 Shimadzu»

3.3.2 Методы исследования руд по шлифам и аншлифам

Петрографические исследования шлифов и аншлифов проводились методом оптической микроскопии в проходящем и отраженном свете на микроскопе Olympus BX-51 (рисунок 3.6). В результате были охарактеризованы структурноморфологические особенности и минеральный состав образцов. Субмикронная неоднородность и сложные взаимоотношения между мелкодисперсными минеральными фазами определили необходимость последующего использования сканирующей электронной микроскопии в широком диапазоне увеличений и режимов изображений.

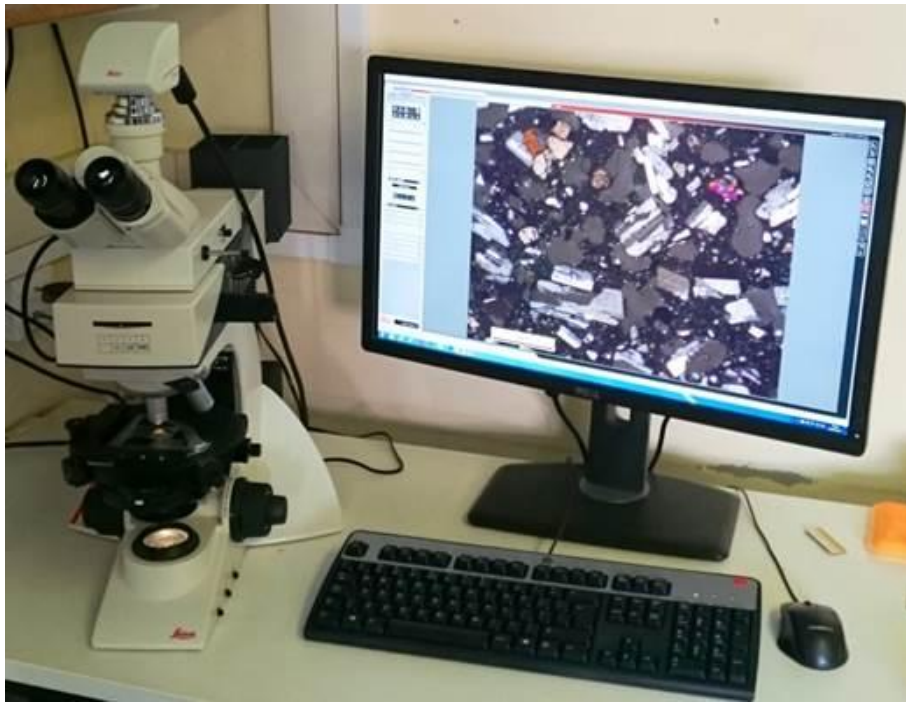


Рисунок 3.6 - Петрографический микроскоп «Olympus BX-51»

Сканирующая электронная микроскопия. Использование сканирующей электронной микроскопии (SEM) позволяет изучить структурноморфологические особенности минеральных фаз, их парагенезис, установить распределение химических элементов, и тем самым получить достаточно убедительные доказательства генезиса и условий формирования исследуемых объектов. Микро- и нано- структурнохимические особенности ряда руд вторичного происхождения, широкое присутствие в них минерализованных органических остатков, минеральный парагенезис и биогенные отпечатки исследовались с применением SEM с различными электронными пушками: с W-катодом, с LaB₆-катодом, с катодом Шоттки. Этим методом изучалась структурная морфология конкреций марганца. Образцы руды были приготовлены в виде отполированных аншлифов, напыленных пленкой углерода в высоком вакууме на установке JEE-420 для создания токопроводящей поверхности. Изучение на растровых электронных микроскопах JSM-6460LV и JSM-7001F проводилось с использованием детекторов вторичных электронов и отраженных электронов в режиме композиционного контраста. Диапазоны ускоряющего напряжения варьировали

от 15кВ до 25кВ при токе зонда 10^{-11} - 10^{-8} А. Микроскопы были оснащены энергодисперсионными спектрометрами X-Act и X-MAX80 (Oxford Instruments), соответственно, с системами анализа рентгеновских спектров INCA и AZtec (рисунок 3.7). Количественный анализ в диапазоне химических элементов от Na до U выполнялся с использованием корректировки по стандарту Co и контролем тока зонда (O_2 рассчитан по стехиометрии). Исследования выполнены в Санкт-Петербургском горном университете.



Рисунок 3.7 - Сканирующий электронный микроскоп «JSM-7001F»

Модальный композиционный анализ. Метод модального композиционного анализа, известный как «метод подсчета точек Газзи-Дикинсона», является одним из широко используемых в геологии. Он опирается на подсчете точек зерен песчаных пород в шлифах для реконструкции источников сноса терригенных отложений [51-52]. Метод подсчета точек был разработан для ускорения сбора

данных по составам материнских пород терригенных отложений. Использование этого метода позволяет определить диапазон вариации составов пород по изменениям размеров слагающих их зерен, устраняя необходимость просеивания и многократного подсчета, различных по размеру фракций.

В данной работе этот метод применялся для количественной оценки детритового минерального состава и для реконструкции источников сноса терригенных отложений, составляющих верхний ярус рудного разреза. Детритовые минеральные зерна, составляющие песчаную породу, были разделены на группы: Q_m (монокристаллический кварц), Q_p (поликристаллический кварц), P (плагиоклаз полевой шпат), K (калиевый полевой шпат), L_v (вулканические или метавулканические обломки пород) и L_s (зерна осадочных и метаосадочных пород). Модальный анализ составов терригенных отложений базируется на результатах подсчетов не менее 300 детритовых зерен в одном образце. Полученное число зерен разных минералов и обломков пород, исключая матрицу и цемент - пересчитывается на 100% [52]. Стандартные диаграммы (Q_t -F-L, Q_m -F- L_t , $\ln(Q/F)$ и $\ln(Q/RF)$) применяются для определения вероятного коренного источника терригенного материала. Анализ подсчета точек был выполнен на поляризационном микроскопе Leica DM2700 P с фиксированным ступенчатым автоматическим счетчиком точек Pelcon (рисунок 3.8).

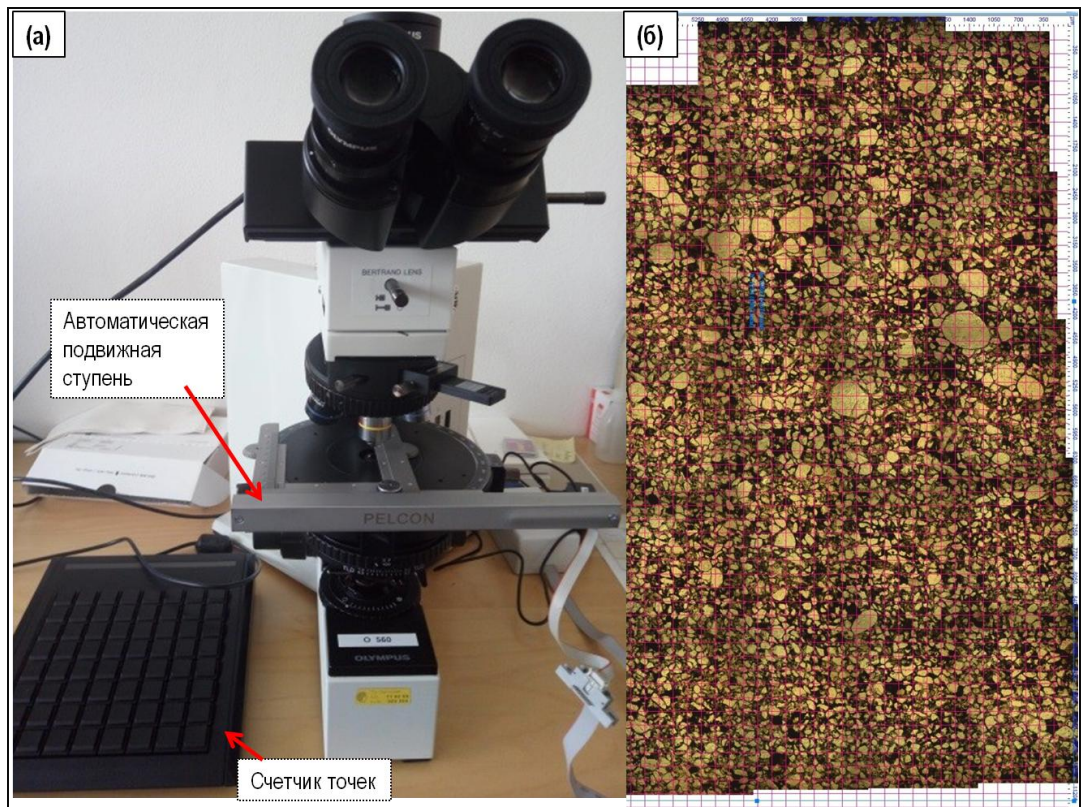


Рисунок 3.8 - а) Поляризационный микроскоп с установленной ступенью подсчета точек «Pelcon» и б) типичная компьютерная сетка, используемая при точечном подсчете детритовых минеральных зерен

3.4. Выводы по 3 главе

В заключении перечисления методов и методических приемов изучения пород и руд следует отметить, что полученные результаты анализов обладают основным свойством — они легко воспроизводимы и по этой причине представляются убедительными и надежными.

ГЛАВА 4 МИНЕРАЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ И ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РУД СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО РУДОПРОЯВЛЕНИЯ

Аннотация: В данной главе представлены результаты минералогических, петрохимических и геохимических исследований марганценосных пород Северо-Западного рудопроявления. Также представлены результаты модального композиционного анализа терригенных отложений, составляющих верхнюю часть рудного разреза. Для определения состава руд выполнены петрографические исследования в шлифах и аншлифах, минералогический анализ проб, химический анализ минералов методами сканирующей электронной микроскопии, энергодисперсионной спектроскопии, с помощью рентгеновского дифрактометра и рентгено-флюоресцентных исследований. Исследования минерального и химического составов руд Северо-Западного рудопроявления из коллекций автора были выполнены в лабораториях ЦКП Горного Университета, Минтек («Mintek»), Council for Geoscience и в Университете Йоханнесбург в ЮАР. Результаты исследований были опубликованы нами в работах: [12, 13, 98, 99].

4.1 Описание вмещающих пород и руд

Литологические фации, представленные в районе Северо-Западного рудопроявления состоят из марганцовистых карбонатов, кварцитов и железосодержащих пород и песчаников, образующих залежи с признаками озерного и терригенного генезиса (рисунок 4.1). Отчетливо выделяются два рудных слоя: зернистые породы макроскопически диагностируемые как марганцевые конкреции и пылеватый слой черного цвета, диагностируемый как марганцевый вад. Обнажения коренных выходов редки, основная часть территории перекрыта почвенными наносами четвертичного возраста.

Марганценосные карбонаты. В основании рудопроявления залегает мощная толща марганценосных доломитов позднеархейского возраста, которые относятся к подгруппе Мальмани. Эти породы слагают крупную карбонатную платформенную структуру на северном фланге кратона Каапвааль, возраст ее около 2,5 миллиардов лет. Структура сложена строматолитовыми доломитами, которые являются потенциальным источником марганца, магния и железа. В

разрезе осадочного чехла платформенной структуры по содержанию кремнезема и морфологическим особенностям первоначально выделялось пять формаций (Оактри, Монте-Кристо, Литтелтон, Экклз и Фриско). Нижние слои темно-серых доломитов формаций Оактри и Монте-Кристо бедны кремнеземом и относительно богаты марганцем (рисунок 4.2). Доломиты верхней формации Фриско богаты кремнеземом и содержат эпигенетическую минерализацию флюорита долины Миссисипи.



Рисунок 4.1 - Район Хейфельда с обнажениями строматолитовых доломитов в шурфах и в карстовых депрессиях

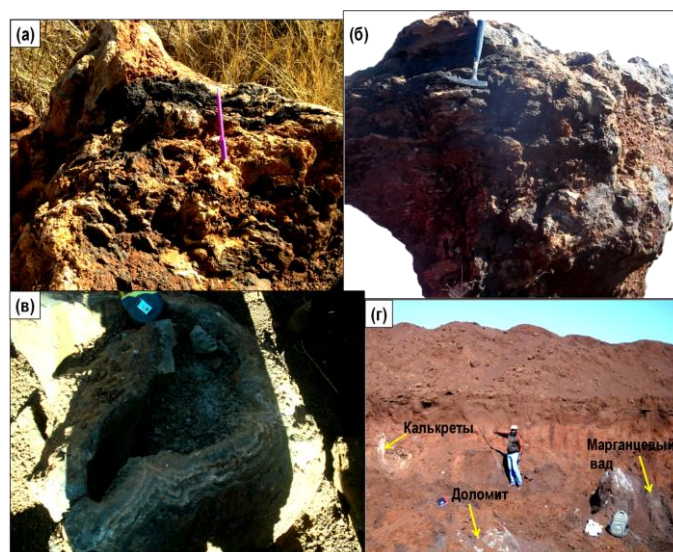


Рисунок 4.2 - Неоархейские марганценозные строматолитовые доломиты серии Мальмани (AR_2^m)

Кварциты. В районе рудопроявления изредко обнажаются кварциты формации Черного рифа. Они массивные и устойчивые к процессу выветривания (рисунок 4.3).

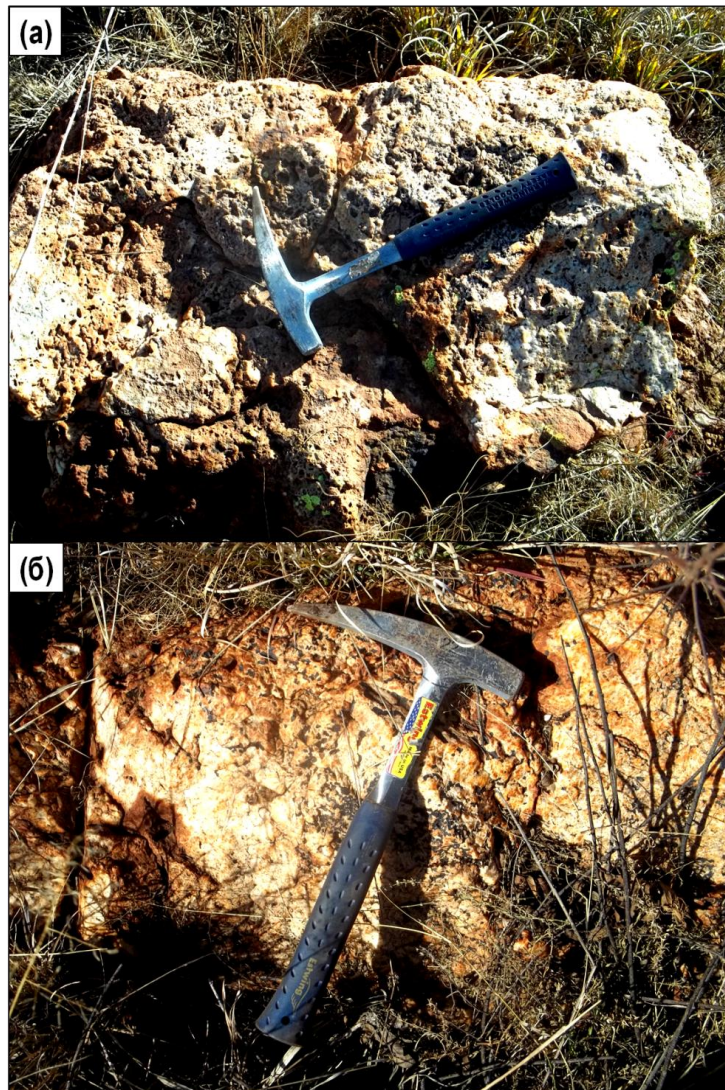


Рисунок 4.3 - Обнажения и развалы кварцитов серии Черного Рифа (Ar_1)

Железосодержащие породы. На территории исследования были отмечены различные типы железосодержащих фаций. Мягкие красноватые, мелкозернистые и пылеобразные фации не выходят на поверхность и были выявлены только в шурфах. Разноцветные железистые породы с шероховатой поверхностью обнажаются в нескольких точках наблюдений (рисунок 4.4).



Рисунок 4.4 - Рыхлые разноцветные железистые фации

Озерные отложения. Озерные отложения формации Вествитс (Westwits), характеризуются плохо сортированными, угловатыми и округлыми фрагментами кварцевых и аркозовых песчаников, кварцитов и тиллитов (рисунок 4.5).



Рисунок 4.5 - Плохо сортированные озерные отложения формации Вествитс (Westwits) (N₁)

Марганцевые конкреции. Железо-марганцевыми конкрециями называют твердые образования диаметром в среднем 4 см, встречающиеся на дне Тихого и Индийского океанов. Они содержат концентрически-зональные агрегаты минералов железа и марганца, а также редкоземельных элементов. Считается, что конкреции образовались как агломераты из коллоидного раствора в водах океана. Промышленная добыча рудных конкреций приостановлена из-за судебных споров по международным правам на рудоносные акватории, в связи с высокой стоимостью глубоководной разработки рудных полей и по причине неизвестных экологических последствий добычи конкреций на дне океана.

Кроме этого, марганцевые конкреции образуются в коре выветривания тропических районов. Формирование здесь марганцевых руд связано с процессами выветривания древних марганценосных пород, накопление которых, вероятно, здесь происходило в мелководных условиях океана. Исследуемый объект относится к таким типам залежей. В рудопроявлении встречены следующие литологические разновидности руды – конкреции, корки и вад (рисунок 4.6 и рисунок 4.7). Марганцевые конкреции содержатся в разрезе латеритной коры выветривания, переотложенной в виде аллювия (рисунок 4.6).



Рисунок 4.6 - Стенка шурфа одного из участков Северо-Западного рудопроявления, где: 1 - неоархейские марганценосные строматолитовые доломиты серии Мальмани (AR_2^m); 2 - марганцевый вад; 3 - марганцевые конкреции в латеритной части рудного разреза

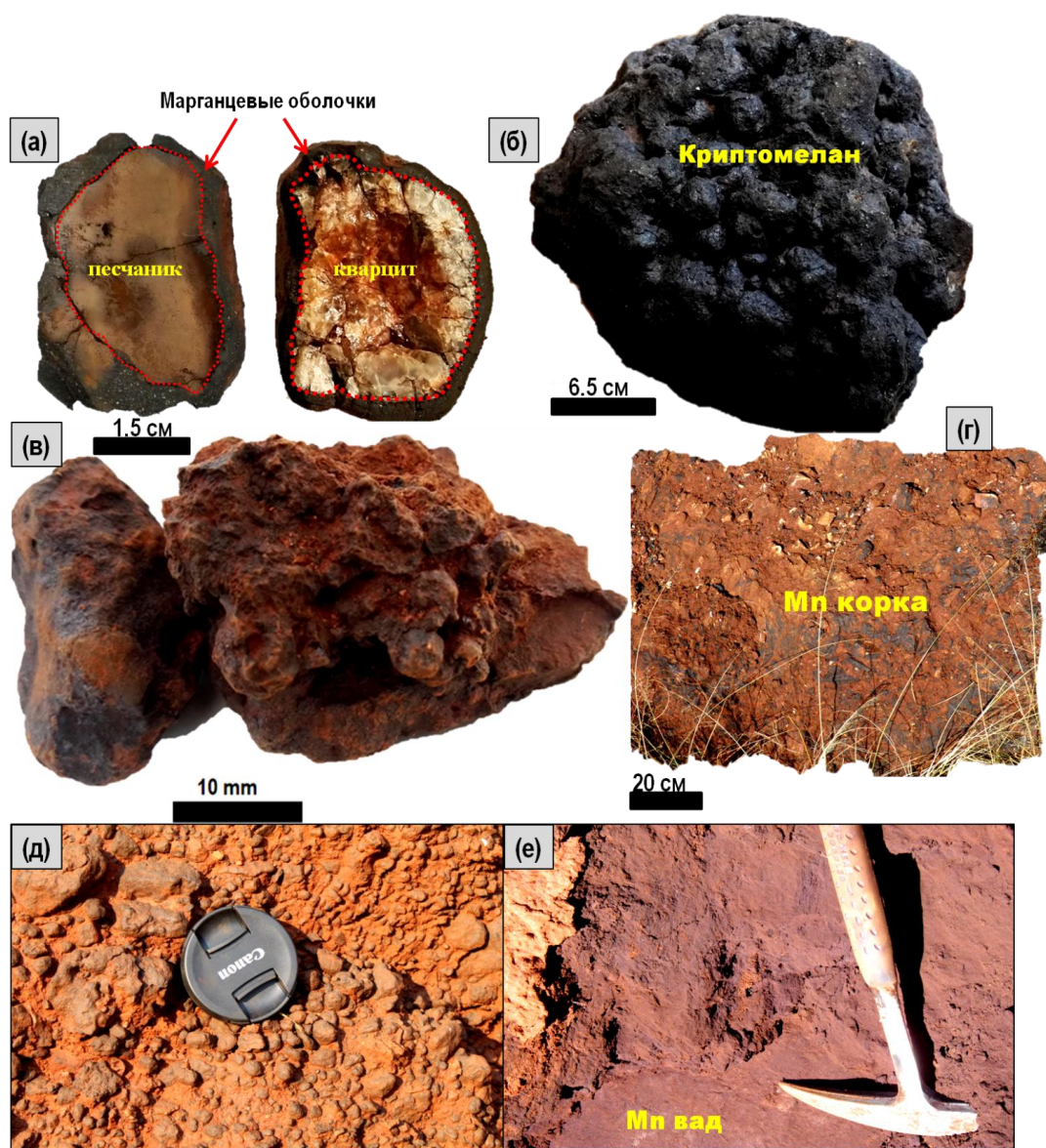


Рисунок 4.7 - Образцы марганцевых конкреций, марганцевых корок и марганцевого вада

4.1.1 Петрографическая характеристика руд

Изучение минерального состава Северо-Западного рудопроявления методом рентгенофазового анализа показало, что в составе марганцевой руды представлены, в основном, минералы марганца, имеющие общую кристаллическую структуру, типа - $[A^{+}(^{2+}) (Mn^{4+}_6 Mn^{3+}_2) O_{16}]$, где А – катионы K^+ , Ba^{2+} , Pb^{2+} . В эту группу входят - криptomелан ($K^+[Mn^{4+}_6 Mn^{3+}_2]_8 O_{16}$), голландит ($Ba^{2+} [Mn^{4+}_6 Mn^{3+}_2]_8 O_{16}$), романехит ($(Ba, H_2O)_2 [Mn^{4+}, Mn^{3+}]_5 O_{10}$), литиофорит ($(Al, Li)Mn^{4+}O_2 (OH)_2$) и пиролюзит ($\alpha-MnO_2$). В подчиненном количестве

присутствуют манганит $\text{MnO}(\text{OH})$ и вернадит $([\text{Mn}^{4+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Ca}, \text{Na}][\text{O}, \text{OH}]_2 \cdot x\text{nH}_2\text{O})$ (рисунок 4.8). К акцессорным минералам относятся оксиды железа, преимущественно гематит (Fe_2O_3) и гетит ($\text{FeO}(\text{OH})$), а также включения детритового циркона и ильменита (Таблица 4.1).

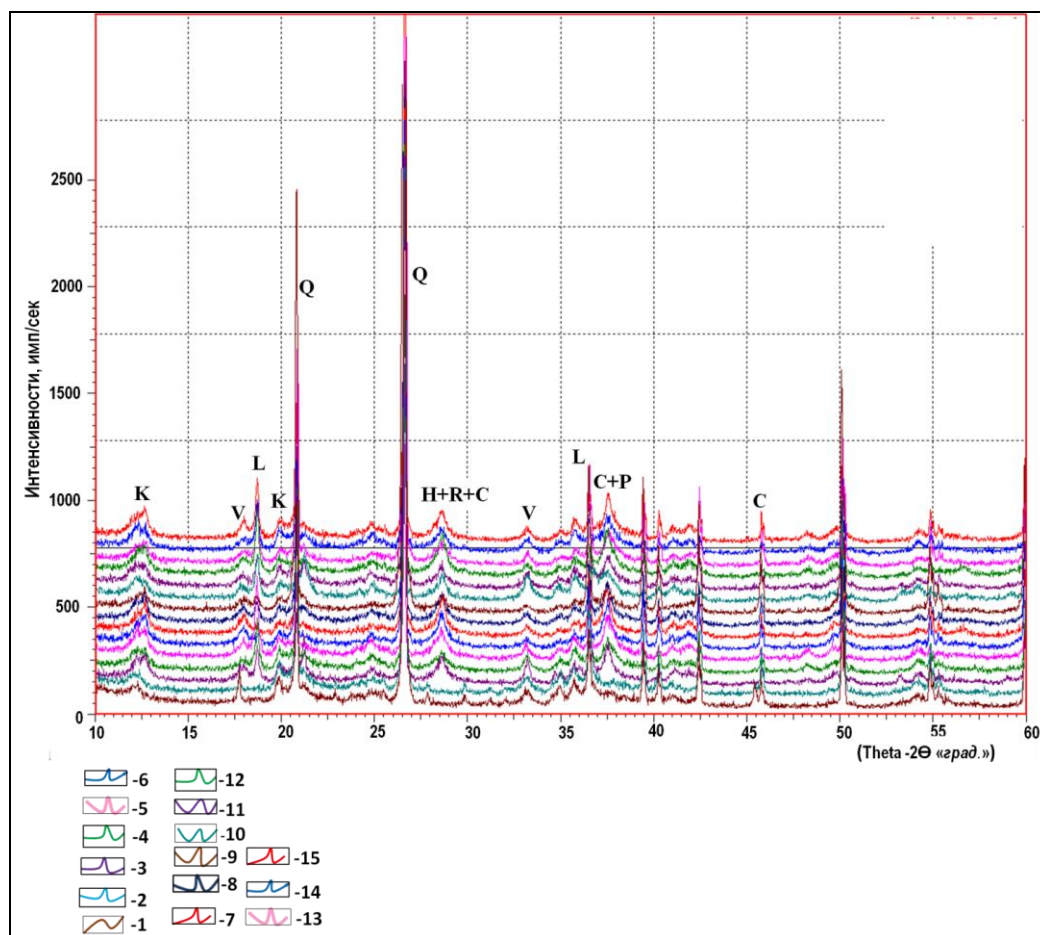


Рисунок 4.8 - Рентгеновские дифракционные спектры, показывающие различные минеральные фазы в исследуемых образцах, где обозначены пики содержаний: С - криптомелана, V - вернадита, R - романехита, L - литиофорита, Н - голландита, Р - пирролюзита, Q - кварца и К - каолинита. Анализы проводились на 15 образцах: 1 - марганцевая конкреция (ВН_10), 2 - марганцевая конкреция (ВН_02), 3 - марганцевая конкреция (ВН_03), 4 - марганцевая конкреция (ВН_04), 5 - марганцевая конкреция (ВН_07), 6 - марганцевая конкреция (ВН_09), 7 - марганцевая конкреция (ВН_11), 8 - марганцевая конкреция (ВН_12), 9 - марганцевая конкреция (ВН_13), 10 - марганцевый вад (WD_02), 11 - марганцевый вад (WD_01), 12 - марганценосный доломит (DL_01), 13 - марганцевая конкреция (ВН_05), 14 - марганцевая конкреция (ВН_06), 15-ВН_01

Таблица 4.1 - Минеральный состав руды Северо-Западного рудопроявления ЮАР

№	Минерал	Химическая формула	Примеси
1	Романехит	$\text{BaMn}_8\text{O}_{10}$	K, Al, La, Ce
2	Криптомелан	$\text{KMn}_8\text{O}_{16}$	La, Ce, Ba
3	Пиролюзит	MnO_2	-
4	Литиофорит	$((\text{Al}, \text{Li})\text{Mn}^{4+}\text{O}_2 (\text{OH})_2)$	Ni, Co, Cu
5	Голландит	$(\text{Ba}^{2+} [\text{Mn}^{4+}_6\text{Mn}^{3+}_2]_8\text{O}_{16})$	K, La, Ce
6	Вернадит	$[\text{Mn}^{4+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Ca}, \text{Na})(\text{O}, \text{OH})_2 \times n\text{H}_2\text{O}]$	-
7	Манганит	$\text{MnO}(\text{OH})$	-
8	Гематит	Fe_2O_3	-
9	Гетит	$\text{FeO}(\text{OH})$	-
10	Каолинит	$\text{Al}_2(\text{OH})_4\text{Si}_2\text{O}_5$	-
11	Слюда	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{F}, \text{OH})_2$	-
12	Ильменит (включения)	FeTiO_3	Nb, Cr
13	Циркон (включения)	ZrSiO_4	Hf, Sc, U, Ce
14	Браунит	$\text{Mn}^{2+}\text{Mn}^{3+}_6\text{SiO}_4$	Ba, Ti, Ca, Fe
15	Кутногорит	$\text{Ca} (\text{Mn}, \text{Mg}) (\text{CO}_3)_2$	-

Петрографический анализ полированных аншлифов доломитов на сканирующем электронном микроскопе (SEM) с энергодисперсионной рентгеновской спектрометрией (EDS) показали наличие марганцевых карбонатов и, в небольших количествах, силикатов, что согласуется с мнением Роя [103] о

том, что присутствие карбонатов марганца в качестве первичных минералов в условиях низкой температуры и интенсивного окисления, приводит к образованию пиролюзита и криптомелана (рисунок 4.9). Первичными минералами здесь могли бы быть - кутногорит и браунит. Оксидные марганцевые фазы встречаются в основном в виде тонких концентрических оболочек вокруг ядер или обломков других горных пород или отдельных минералов, совместно с разнородным цементирующим материалом. Образование этих гипергенных оксидных минеральных фаз марганца указывает на присутствие свободного кислорода в воздухе поверхностных и грунтовых вод. Выветривание и растворение марганценосных доломитов, повышенная степень окисления при активном участии органического вещества в окружающей среде, на поздней стадии рудогенеза приводят к образованию оксидов марганца с высокой валентностью (Mn^{4+}) - пиролюзита, литиофорита, криптомелана и романехита (рисунок 4.10). Формирование минералов марганца на этой стадии рудогенеза происходило преимущественно путем прямого их осаждения из богатых марганцем водных растворов и путем преобразования раннообразованных минералов (манганита, вернадита и др.). В частности, наблюдается развитие романехита по пиролюзиту, очевидно, вызванное изменением состава минералообразующих растворов в результате изменения окислительно-восстановительных условий окружающей среды (рисунок 4.11-а, в).

На поздней диагенетической стадии минералообразования формировались тонкие каймы из игольчатых кристаллов литиофорита. Они часто выстилают стенки порового пространства. Наблюдаются замещения пиролюзита романехитом по сетчатой системе трещинок (рисунок 4.11-в-г). Криptomелан и пиролюзит выглядят черной землистой массой под EDS. По ним образуется романехит (рисунок 4.12-а).

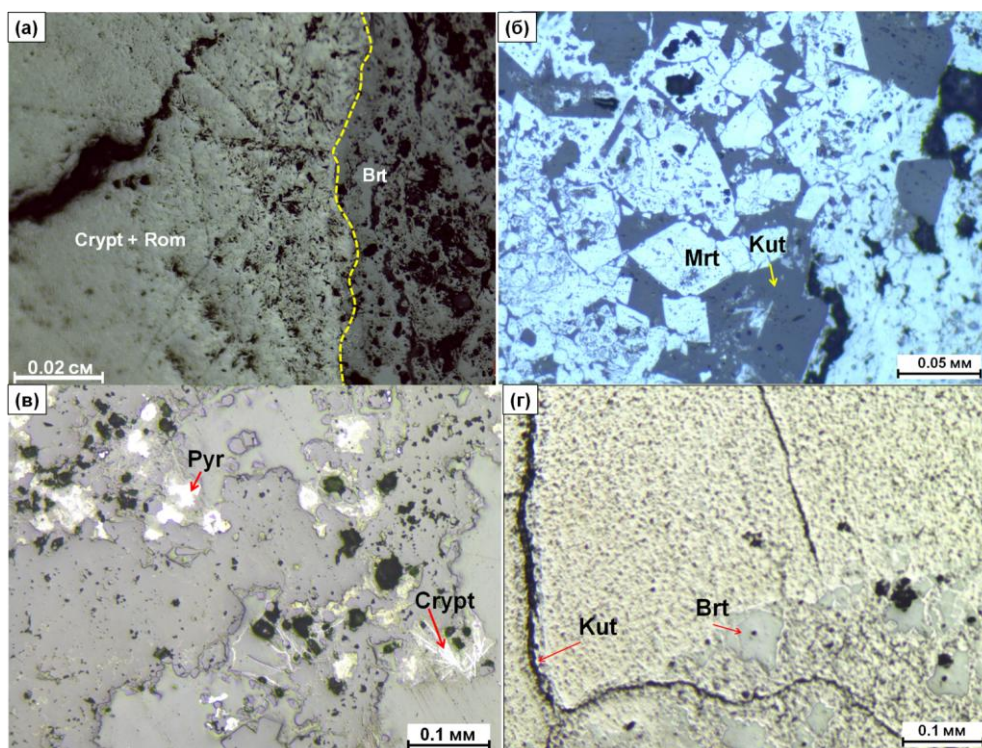


Рисунок 4.9 - Фотографии аншлифов марганценосных доломитов серии Мальмани. а) контактная зона окисления, указывающая на преобразование браунита (Brt) в оксиды марганца - криптомелан и романехит, б) рост зерен мартита (Mrt), наложенных на кутногорит (Kut), в) образование оксидов марганца, г) мелкие овоиды вдоль жилы, состоящей из кутногорита (Kut)

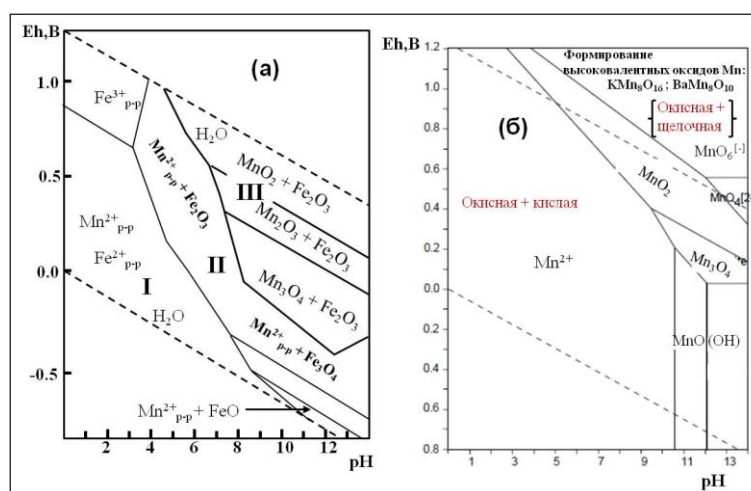


Рисунок 4.10 - Eh-pH диаграммы устойчивости соединений железа и марганца. Диаграммы построены С. Рой [103]. Римскими цифрами отмечены поля: **I** – железо и марганец находятся в растворенном состоянии, **II** – железо переходит в твердую фазу, а марганец сохраняется в растворе, **III** – марганец в твердой фазе

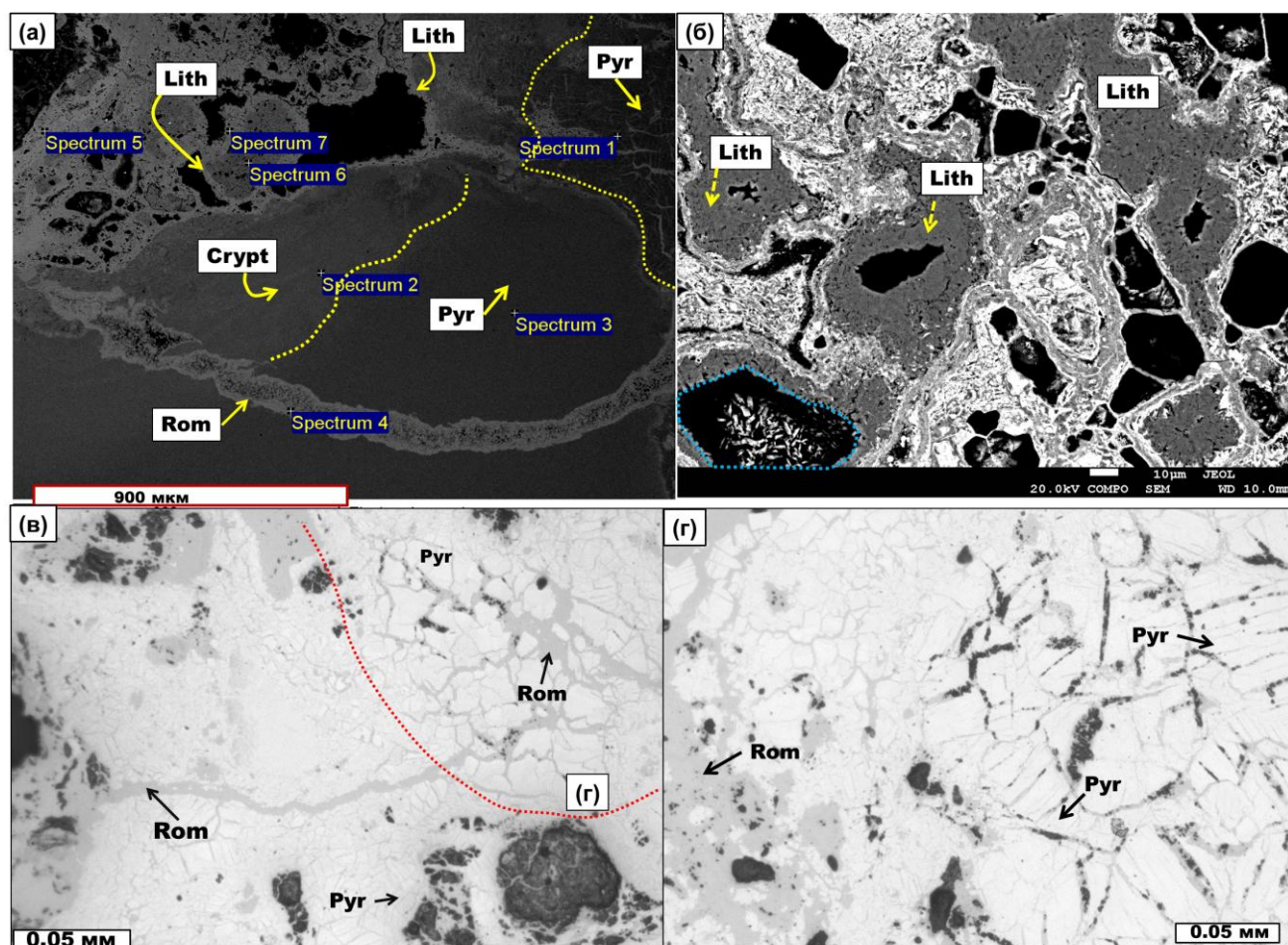


Рисунок 4.11 - Минералы оксидных марганцевых руд (фотографии в отраженном свете). **а**) - романехит (**Rom**)-светло-серый в отраженном свете выполняет трещину в землистой массе криптомелана (**Crypt**) и пиролюзита (**Pyr**). Тонкие оторочки литиофорита (**Lith**) - выстилают стенки порового пространства; **б**) - литиофорит (**Lith**) с игольчатой морфологией, покрывает поровые пространства (продукт поздней диагенетической стадии); **в - г**) - замещение ранее образованного пиролюзита романехитом

Диагностика глинистых минералов является непростой задачей, решение которой выполнялось с помощью методов рентгеновской дифракции и сканирующей электронной микроскопии. Установлено, что зерна детритовых цирконов встречаются в глинистых цементах (рисунок 4.12-а, б).

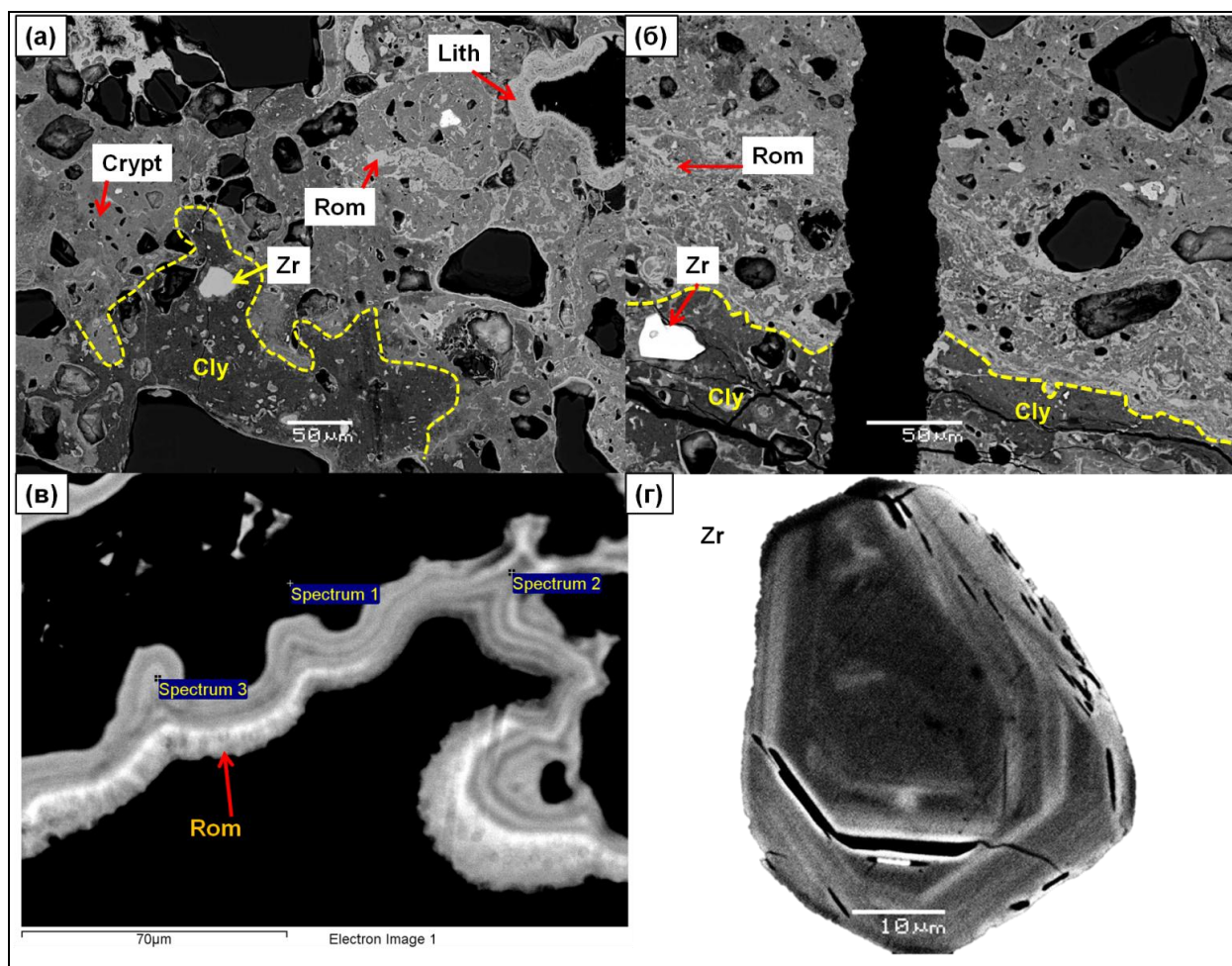


Рисунок 4.12 - Минералы оксидных марганцевых руд. Фотографии в электронном и поляризационном микроскопах: **а, б**) - включение детритового циркона-Zr в глинистом цементе. Образование тонкого слоя литиофорита (**Lith**) по стенкам порового пространства, **в** - почковидная текстура концентрических пластов оксидов марганца, **г** - зерно циркона (Zr) указанный на рисунке 12-а

Минералы марганца оптически непрозрачны, поэтому основным методом изучения марганцевых пород являлась сканирующая электронная микроскопия высокого разрешения. Исследование руд данным методом позволило определить главную особенность их микроструктуры, которая заключается в сочетании и равномерном распределении четырех основных минеральных компонентов. Результаты исследования образцов этим методом подтвердились данными рентгенофазового анализа. Было установлено, что на микроуровне руда представляет собой агрегат, в котором равномерно распределена аморфная

оксидная масса манганита и криптомелана, обволакивающая детритовые зерна кварца и полевого шпата (рисунок 4.13-б, в, г).

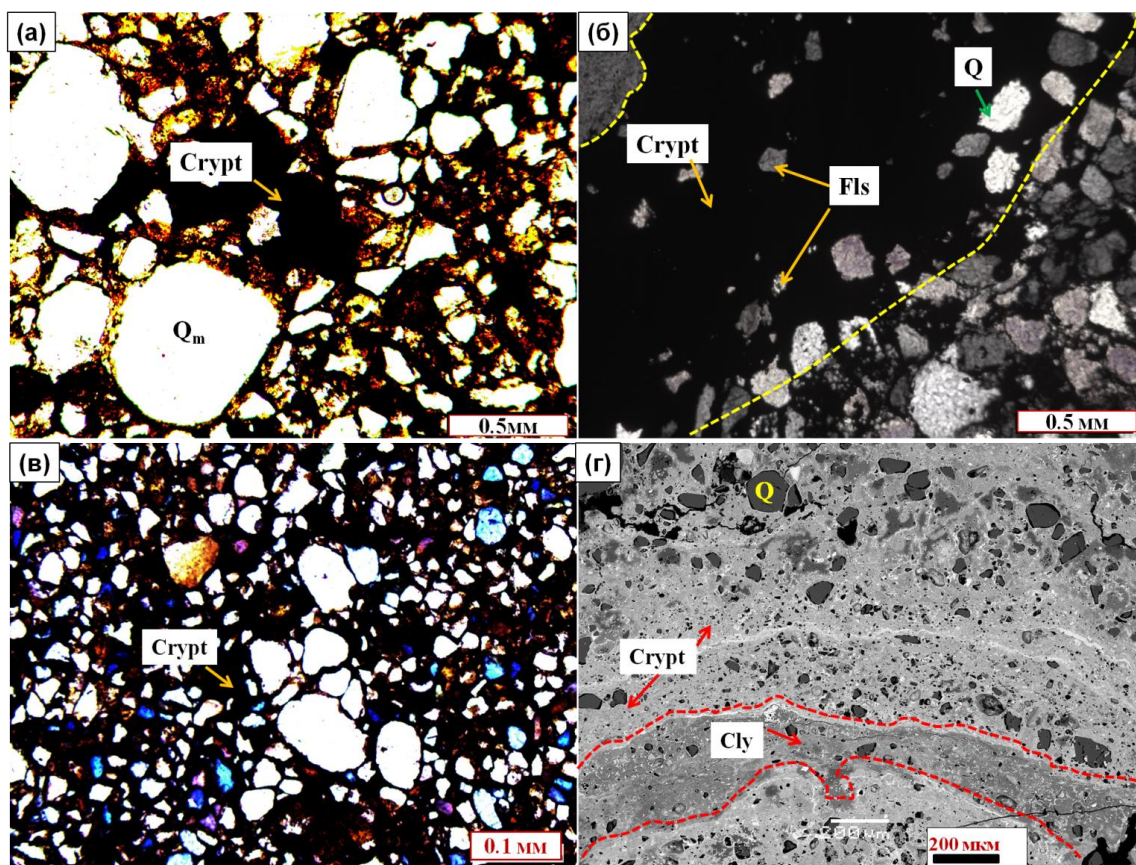


Рисунок 4.13 - Фотографии аншлифов. а-б) криптомелан (**Crypt**) встречается в виде аутигенного цементного-матричного оруденения между терригенными обломками. Он замещает детритовые зерна кварца (**Q**) и полевого шпата (**Fls**); в) обломки зерен кварца и полевого шпата в матрице оксидов марганца; г), светлый фон представлен аутигенными фазами - криптомеланом и продуктами изменения зерен полевого шпата - глинами (**Cly**)

На рисунке 4.14 ниже видно ту же структурный распад пиролюзита и последующее образование романехита. Хорошо развитый контакт богатых марганцем и богатых железом концентрических слоев показан на рисунке 4.14-а

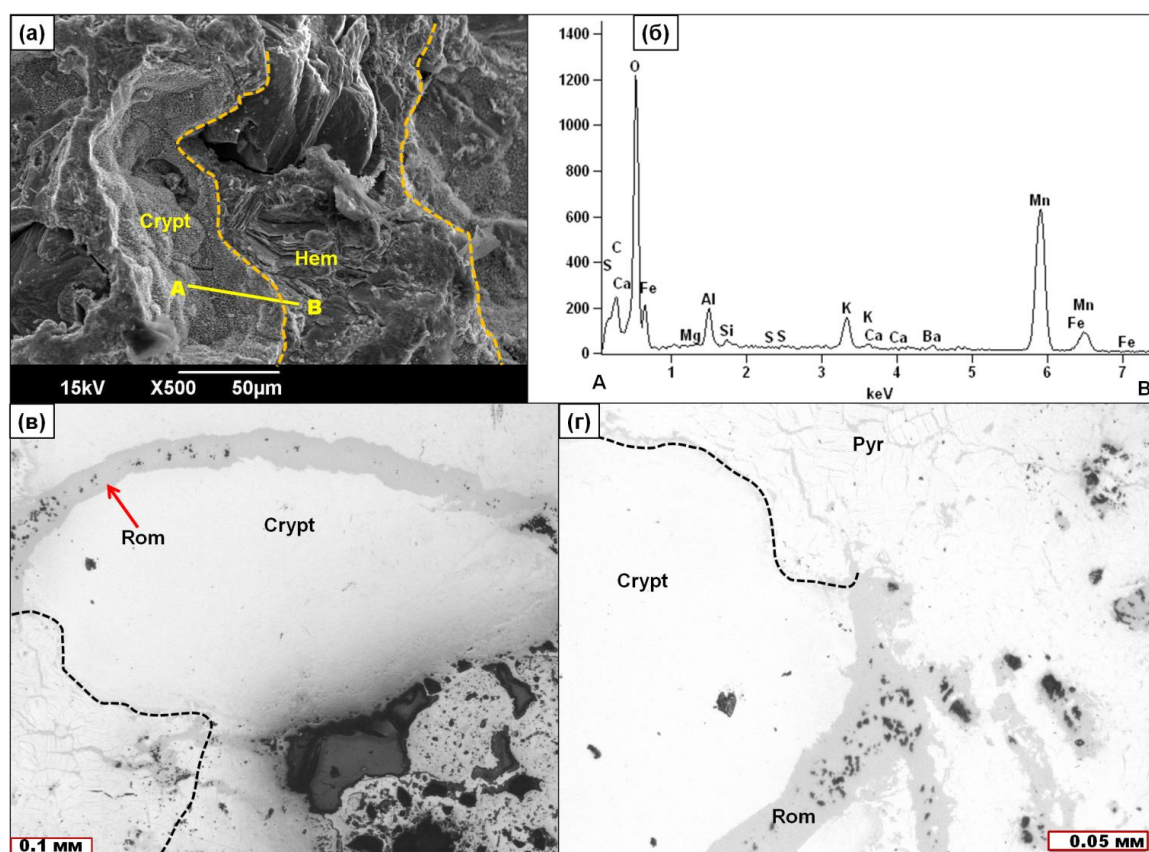


Рисунок 4.14 - Минералы оксидных марганцевых руд. Фотографии в электронном и поляризационном микроскопах: **а)** - псевдоморфозы криптомелана ($\text{KMn}_8\text{O}_{16}$) по смектиту; **б)** профиль А–В по данным электронной микроскопии; **в-г)** - романехит (**Rom**) - светло-серый в отраженном свете выполняет трещину в землистой массе криптомелана (**Crypt**) и пиролюзита (**Pyr**)

Для понимания пространственного распределения элементов в образцах минералов было проведено их элементное картирование на микроструктурном уровне методом сканирующей электронной микроскопии (SEM) с энергодисперсионной рентгеновской спектрометрией (EDS). На рисунке 4.15 показан профиль (А-В), проходящий через различные части образца. Сканирование вкост простирания контактов рудных и нерудных минералов, а также поперек внутриминеральных зон позволило установить последовательность изменений состава рудных растворов. Более светлые на фотографиях участки руды соответствуют высокой концентрации марганца и бария. Напротив, более темные участки характеризуются высокой интенсивностью спектров алюминия,

железа и кремнезема. Положительная корреляция между интенсивностью спектров марганца и бария отражает преобладание романехита. Участки с высоким содержанием алюминия, кремнезема и натрия соответствуют составу глинистых минералов. Низкое содержание кремнезема, равномерно распределенного по внутриминеральным зонам, является следствием присутствия остатков кварца и, возможно, кремнистых линз в оксидном марганцевом цементе. Высокая интенсивность спектра кремнезема ближе к концу профиля представляет собой силикатное ядро образца.

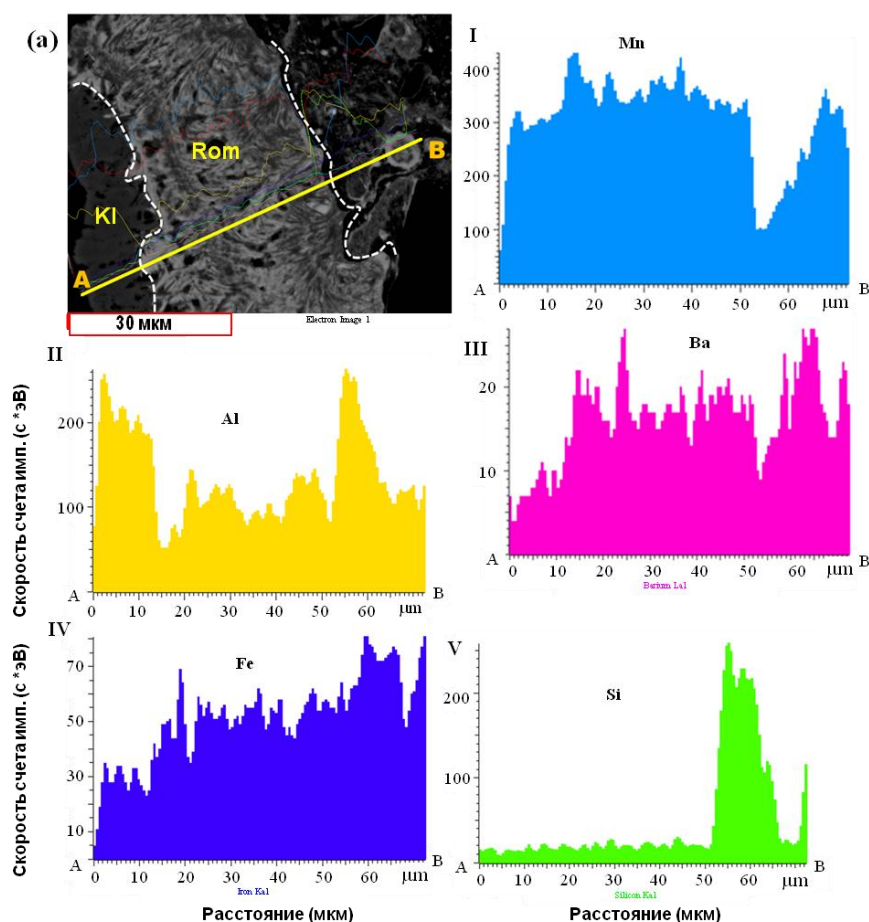


Рисунок 4.15 - Минералы (романехит «Rom», криптомелан «Crypt», каолинит «Kl») и картирование пространственного распределения преобладающих элементов, в образцах горных пород: I – марганца, II – алюминия, III – бария, IV – железа, V – кремнезема. На обоих рисунке видно, что яркие участки отражают оксиды марганца, представленные преобладанием Ba, K, Mn. Более темные участки в основном связаны с положительными пиками Al и представляют собой участки, обогащенные глинистыми минералами

4.1.2 Модальный композиционный анализ терригенных отложений

Известно, что развитие постгондванского Африканского ландшафта было в основном сформировано накоплением неогеновых терригенных отложений вдоль древних эрозионных поверхностей (несогласий), известных как Африканская поверхность поднятия и эрозии I и II, которые, по оценкам, развивались в позднем мелу и середине кайнозоя соответственно [46]. Поэтому для определения типа тектонической обстановки осадконакопления были предложены схемы классификации вещественного состава [20, 51, 52, 95, 96, 108, 120, 122], позволяющие определить на исследуемой территории не только вероятные коренные источники, но и направления сноса и области накопления терригенных осадков.

Для более систематизированного подхода к анализу состава терригенного материала в отложениях региона детритовые зерна были разделены на группы, каждая из которых охарактеризована одним или двумя одинаковыми для этой группы свойствами.

Например, обломки пород и зерна минералов, образованные в ходе денудации континентальной суши, представленной выступами кратонов, должны быть сходны между собой по преимущественно кварц-полевошпатовому составу [88]. В таких минеральных ассоциациях в подчиненных количествах могут присутствовать - дистен, силлиманит, гранат, слюды и темноцветные минералы.

Напротив, терригенный материал, образованный в результате денудации магматических пород, слагающих островные дуги, должен быть насыщен темноцветными силикатными минералами: пироксеном, амфиболом, плагиоклазом, магнетитом, ильменитом и рутилом.

Терригенный материал размытых орогенных областей будет характеризоваться контрастными составами детритовых зерен, представляющими собой магматические комплексы, метаморфические и осадочные образования.

Пропорции вкладов обломочного материала из областей проявления различных тектонических обстановок можно оценить по результатам анализов минеральных составов слагающих эти области горных пород [51, 80]. В то же

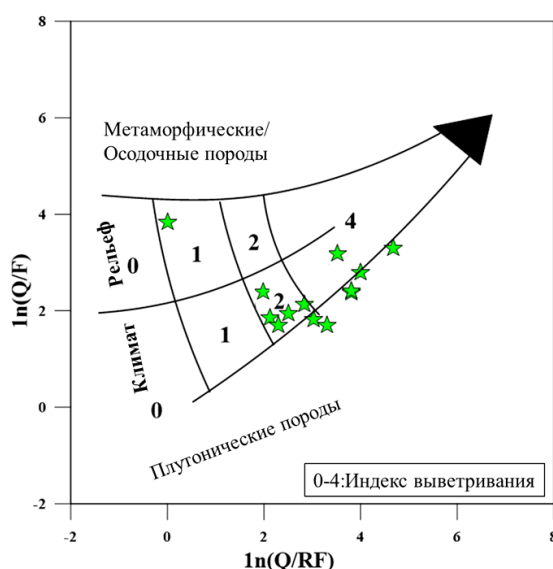
время, эволюционные тренды изменения составов детритового материала в пространстве и во времени позволяют наметить смену его источников и пути транспортировки из областей обрамления бассейна. Таким образом, необходимо реконструировать источник сноса неогеновых отложений, составляющих верхнюю часть рудного разреза, с целью выяснения, возможности существования какого-либо вторичного и внешнего источника марганца.

Для количественной оценки минерального состава использовался метод подсчета зерен минералов. В ходе подсчета, зерна были разделены по группам: Q_m (монокристаллический кварц), Q_p (поликристаллический кварц), P (плагиоклаз), K (калиевый полевой шпат), L_v (вулканические или метавулканические обломки пород) и L_s (зерна осадочных и метасадочных пород). Модальный анализ составов терригенных отложений базируется на результатах подсчетов не менее 300 детритовых зерен в одном шлифе.

В соответствии с данной методикой, в шлифах подсчитывались разные по составу и по форме частицы (в основном кварца, полевого шпата и фрагменты пород). Полученное число зерен минералов и обломков пород, исключая матрицу, цемент, слюду, тяжелые минералы, и карбонаты, пересчитывалось на 100% [52]. Результаты подсчета точек выносились на диаграммы.

Бинарная диаграмма « $\ln (Q/F)$ и $\ln (Q/RF)$ » [122] была использована для определения индекса выветривания осадков в период их образования (рисунок 4.16). Эта диаграмма базируется на логарифмическом отношении количеств детритовых обломков кварца, лититовых фрагментов пород и полевых шпатов. На ней, видно, что наши образцы попадают в поле 2 и располагаются в близости от поля 4. Это говорит о том, что накопление материала происходило в районе низкой равнины с умеренным и субгумидным климатом, и в тропических влажных условиях в пределах областей умеренного и низкого рельефов соответственно (рисунок 4.16) [11]. На транспортировку осадков на большие расстояния указывает смещение точек в сторону полей составов пород, характерных для более влажного климата, а не засушливых регионов [123].

Диаграммы « Q_t -F-L и Q_m -F-Lt» по [51] применялись для определения тектонических условий образования осадочных пород. Тройная диаграмма по [20] дала возможность определить тип материнских пород (рисунок 4.17). На диаграмме В. Д. Шутова [20] все исследуемые образцы представлены группой кварцевых песчаников. Это кремнекластитокварцевые, полевошпат-кварцевые и мезомиктовые кварцевые песчаники (рисунок 4.17). Расчет соотношений детритовых зерен в шлифах и аншлифах был проведен с использованием петрографического поляризационного микроскопа.



Полуколичественный индекс выветривания			Рельеф		
			Высокие горы	Умеренные холмы	Равнины
			(0)	(1)	(2)
Климатические осадки	Полузасушливые и Средиземноморский	0	0	0	0
	Умеренный субгумидный	1	0	1	2
	Тропический влажный	2	0	2	4

Рисунок 4.16 - Логарифмы соотношений на диаграмме по [122]. Q - кварц, F - полевой шпат, RF - фрагменты породы

Значения 0, 1 и 2 обозначают осадки из полувлажных и средиземноморских, умеренных субгумидных и тропических влажных климатических условий и высокогорного (0), умеренных холмов (1) и низких равнин (2) рельефов. В полуколичественных значениях индекса выветривания в диапазоне 0-4 представлены незрелые, слегка выветрившиеся, умеренно выветрившиеся и интенсивно выветрившиеся отложения, соответственно, с минимумами, характерными для районов с низким рельефом или климатическим порогом, и максимумами, характерными для низменностей с тропическим влажным климатом.

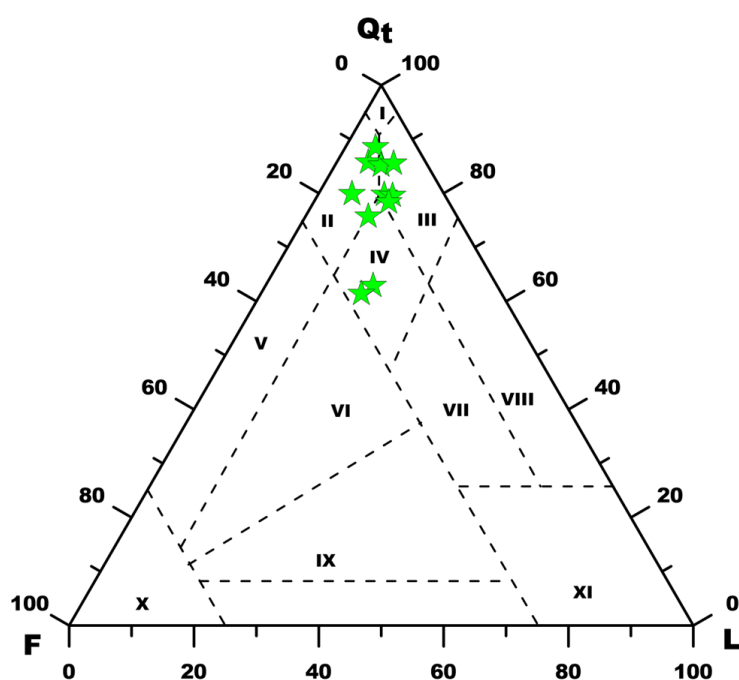


Рисунок 4.17 - Классификация терригенных отложений на основе схемы, предложенной [20], где песчаники **кварцевой группы** представлены следующими фациями: I - мономиктовые кварцевые, II - кремнекласитокварцевые, III - полевошпат-кварцевые, IV - мезомиктовые кварцевые. **Граувакковая группа песчаников**: V - кварцевые, VI- полевошпат-кварцевые, IX - кварц-полевошпатовые, X - собственно граувакки, XI - поле песчаников не чисто терригенного происхождения. **Аркозная группа песчаников**: VII - граувакковые аркозы, VIII- собственно аркозы

Проанализированные терригенные породы в основном сложены хорошо отсортированным и окатанным материалом (см. рисунок 4.18, а, б), что может указывать на удаленность от областей питания. Расположение фигуративных точек терригенных пород северо-западного региона на диаграмме F–Qt–L (полевые шпаты–кварц–обломки пород) (рисунок 4.19) свидетельствует о том, что они образовались, главным образом, за счет разрушения пород, слагающих кратоны.

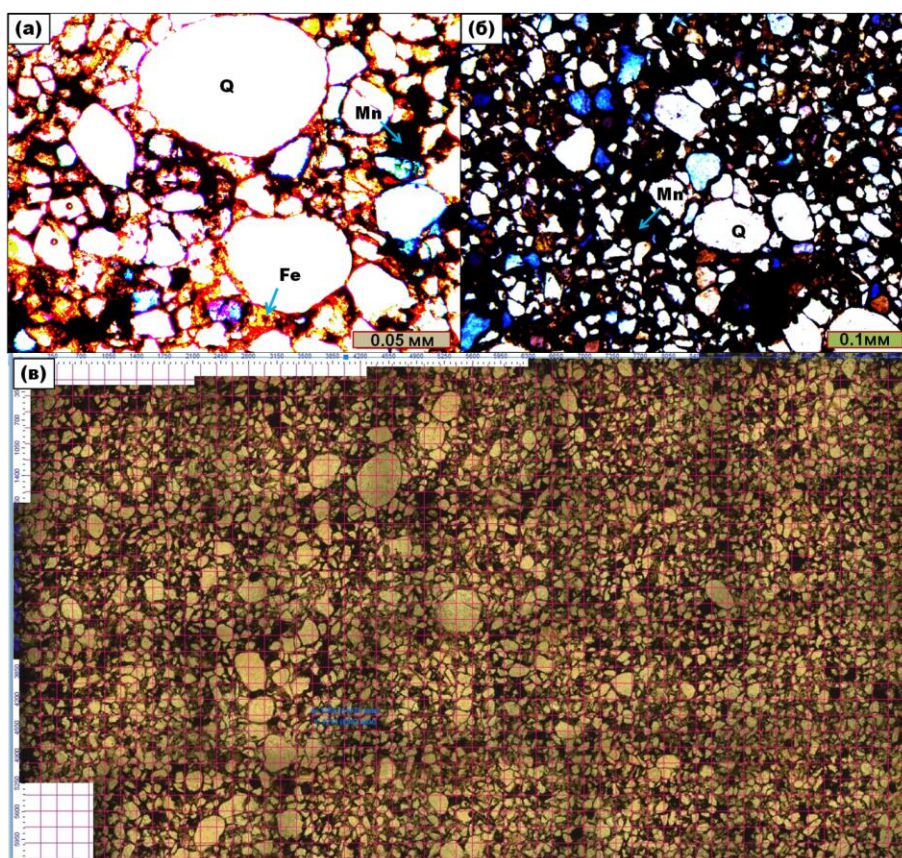


Рисунок 4.18 - Микрофотографии аншлифов изученных с помощью сканирующего электронного и поляризационного микроскопов. На фото показано присутствие в исследуемых образцах аутигенных глин и оксидов марганца и железа. (а) - гематит (Fe) встречается в виде ореолов вокруг зерен кварца в обломках пород и в виде пластинчатых образований, чередующихся с фазами оксидов марганца; (б) замещение терригенных зерен оксидом марганца, (в) - «леопардовая» текстура распределения рудного вещества в породе

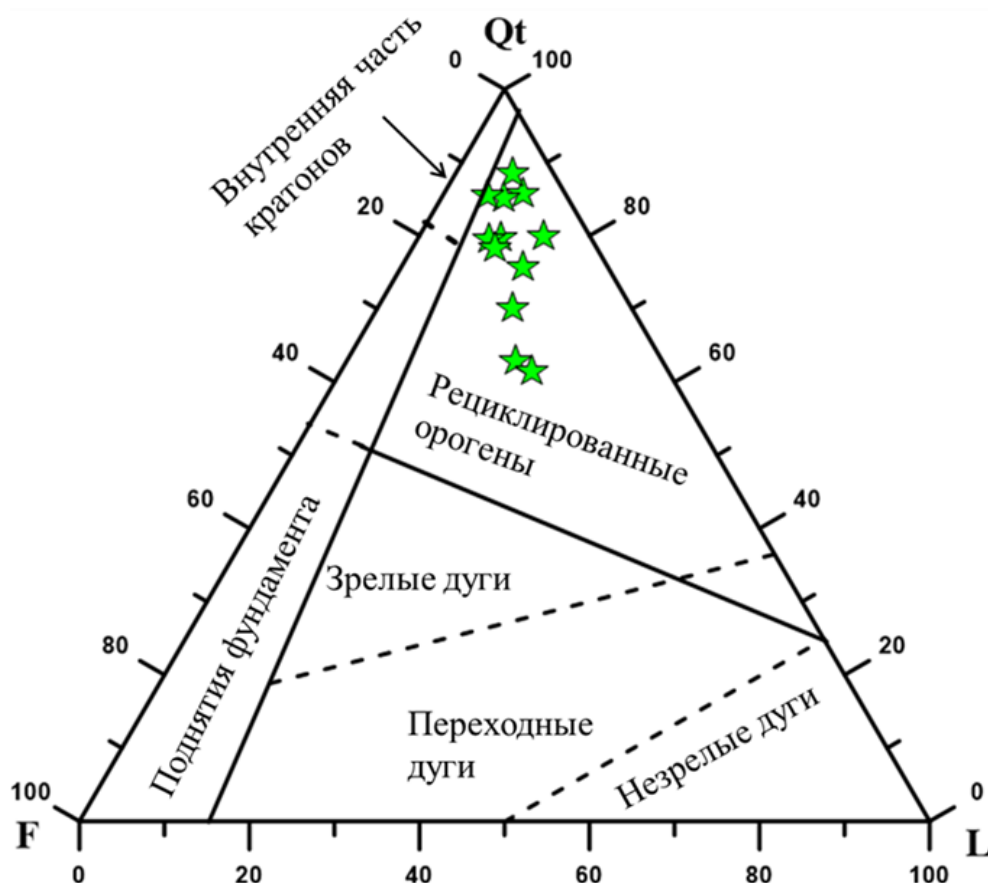


Рисунок 4.19 - Диаграмма F–Qt–L (полевые шпаты – кварц – обломки пород) для терригенных пород северо-западного региона [51]

На основе химической классификации, применялись петрохимические модули по Я.Э. Юдовичу и М.П. Кетрису [21]:

Фемический модуль (ФМ) = $[(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MnO} + \text{MgO})/\text{SiO}_2]$ - подходит для идентификации граувакк и аркозов. Он отражает интенсивность и темпы выветривания и захоронения: чем больше фемических элементов переходит в раствор во время выветривания, тем больше разница между песчаниками и типичными граувакками [87]. Слегка повышенные значения (0,07-1,02 в среднем 0,44) ФМ указывают на наличие вулканокластических граувакк и, вероятно, метавулканических обломков. Величина этого модуля указывает на вероятный источник сноса терригенных материалов из мафических и ультрамафических пород (лавы Вентерсдорп) Каапваальского кратона.

Нормализованный модуль щелочности (НКМ) = $[\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} / \text{Al}_2\text{O}_3]$

позволяет диагностировать примесь вулканического материала в осадочных породах. Этот показатель обычно выше в аркозах за счет широкого развития слюд и полевых шпатов, в том числе калийных, и ниже в граувакках из-за преобладания глинистого цемента, фрагментов вулканитов и глинисто-илистой матрицы [21, 87].

По словам Я.Э. Юдовича и М.П. Кетриса [21], НКМ содержит информацию о соотношении двух основных типов щелочных алюмосиликатов: полевого шпата и слюды. Поскольку слюды являются минералами, гораздо более богатыми глиноземом, чем полевой шпат, низкие значения НКМ указывают на преобладание слюды, а высокие - на преобладание полевого шпата. Например, если НКМ породы больше 0,31, то она должна содержать калиевый полевой шпат (или какой-либо другой минерал с высоким содержанием калия), а если значение НКМ меньше 0,31, то присутствие калиевого полевого шпата, хотя и возможно, не является значимым.

Терригенные отложения региона Хайфельд, имеют средние значения этого показателя, превышающие 0,31, что указывает на преобладание полевого шпата над слюдой.

Титановый модуль (ТМ) = $[\text{TiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3]$. Величина титанового модуля (ТМ) является важной геохимической константой гипергенных процессов и была представлена в работах А. А. Мигдисова в 60-е годы, посвященных изучению осадочного чехла Русской плиты [8]. Он заметил, что значения модуля титана зависят от климатических и фациальных условий формирования горных пород. Этот модуль используется для оценки состава горных пород в районах их коренного нахождения и для определения динамики осадконакопления. Он отражает интенсивность сортировки титаносодержащих минералов и глинистого вещества.

Наши образцы характеризуются относительно низкими значениями ТМ в диапазоне от 0,01 до 0,07 (таблица 4.2). Такое распределение значений ТМ,

вероятно, объясняется возникновением обломочного материала в результате эрозии переработанных пород кратона.

Тенденции в изменении среднего химического состава исследуемых образцов, а также их сходства и различия лучше всего иллюстрируются модульными диаграммами Я.Э. Юдовича и М.П. Кетриса [21]: ГМ–НКМ, ГМ–ТМ, ФМ–ТМ и ФМ–НКМ (рисунок 4.20). Наблюдаемые отрицательные корреляции между парами ФМ–ТМ и ТМ–ТМ указывают на петрогенное происхождение пород и их принадлежность к сублитаренитам.

Таким образом, литохимический состав терригенных пород исследуемых объектов свидетельствует об их низкой химической зрелости, интенсивной гидродинамической переработке и высоких темпах физического выветривания. Основными источниками обломочного материала являлись песчаники, мафические и ультрамафические породы ближнего внутреннего кратона с переменным привносом примесей сиалического материала из удаленных эродированных блоков континентальной коры.

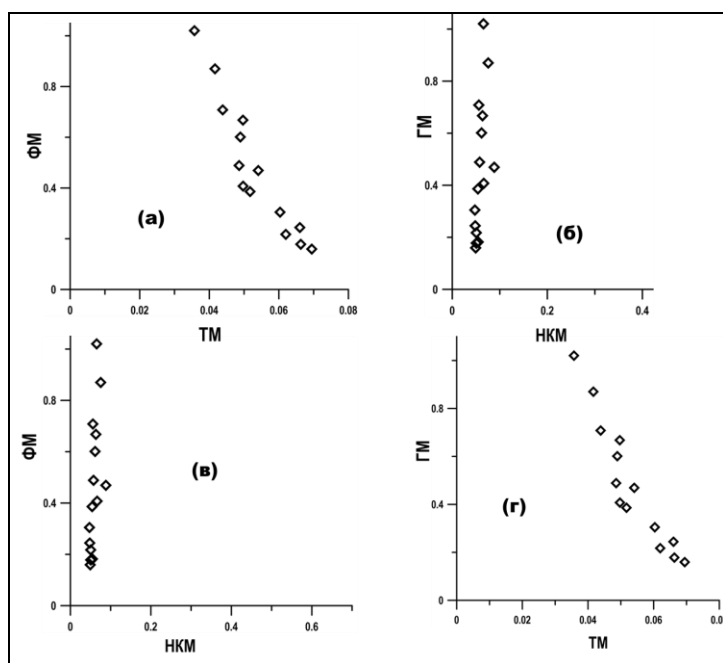


Рисунок 4.20 - Модульные диаграммы составов терригенных пород северо-западного региона [21, 87]

Таблица 4.2 - Литохимические модули терригенных отложений Северо-Западного региона

Образец	ГМ	ФМ	НКМ	ТМ
ТС_01	0,66	0,47	0,09	0,05
ТС_02	0,35	0,22	0,05	0,06
ТС_03	0,84	0,60	0,06	0,05
ТС_04	1,34	1,02	0,07	0,04
ТС_05	0,10	0,49	0,06	0,05
ТС_06	0,89	0,67	0,06	0,05
ТС_07	0,36	0,24	0,05	0,07
ТС_08	0,25	0,16	0,05	0,07
ТС_09	1,01	0,71	0,06	0,04
ТС_10	1,16	0,87	0,08	0,04
ТС_11	0,64	0,41	0,07	0,05
ТС_12	0,61	0,39	0,05	0,05
ТС_13	0,48	0,31	0,05	0,06
ТС_14	0,28	0,18	0,05	0,07
ТС_15	0,27	0,18	0,05	0,01
ТС_16	0,07	0,07	0,60	<0,01
Минимум	0,07	0,07	0,05	0,004
Максимум	1,34	1,02	0,60	0,069
Среднее значение	0,62	0,44	0,09	0,05

4.2 Геохимические особенности Северо-Западного рудопроявления

Изучение микроэлементного состава рудного вещества помогает определить особенности формирования рудных залежей гипергенного происхождения. В этой связи, были проанализированы образцы руды на ряд макро- и микроэлементов, включая редкоземельные. Результаты анализов представлены в таблице 4.3. Ранее, в разрезе рудопроявления Северо-Западное по глубине залегания, степени окисления, морфологическим признакам, размерам марганцевых конкреций и другими литологическим признакам, было выделено восемь различных стратиграфических зон [97]. Из всех зон - верхней из подзон А и В), центральной из подзон С, D, Е и нижней из подзон F, G, Н были отобраны пробы. Результаты анализов проб представлены в таблицах 4.3 и 4.4, где видно,

что во всех образцах обнаружены высокие содержания марганца, железа, бария, кобальта, церия, лантана, хрома и никеля.

Нижняя, самая глубокая по залеганию зона, состоит из марганцевого вада, крупно- и среднеконкреционных марганцевых руд и прослоев типа калькрет. Вышележащая - центральная зона - характеризуется средне- и мелкоконкреционными марганцевыми рудами. Верхняя зона, обычно красного, до темно-коричневого, цвета представлена илистой почвой.

В нижней зоне рудопроявления содержится больше марганца чем в центральной и верхней зонах (рисунок 4.21). Во всех зонах содержание оксидов MgO , CaO , K_2O , Cr_2O_3 , P_2O_5 и Na_2O менее 0,1 мас.%. По нашему мнению, низкие содержания этих элементов обусловлены процессами растворения и выщелачивания нисходящими потоками просачивающейся с поверхности метеорной воды.

Содержание главного рудного компонента - MnO колеблется в пределах от 0,8 до 19 мас. %, и в среднем составляет 12 мас.% (таблица 4.3). Концентрация марганца убывает в самом верхнем слое марганцевых конкреций (ТС_08, ТС_09; ТС_10; ТС_11; ТС_12; ТС_13; ТС_14). При этом, здесь выше содержание SiO_2 , что объясняется высоким содержанием в этом слое отдельных зерен кварца и обломков кварцита.

Верхний слой состоит преимущественно из мелкоконкреционных марганцевых руд. Они представляют собой обрастания тонких марганцевых минеральных оторочек вокруг зерен песчаника, кальцита и кварцита.

Содержания оксидов примесных металлов возрастает в этом слое в последовательности: Na (0,02 - 0,1 мас.%, средн. 0,05 мас.%), Mg (<0,1- 0,2 мас.%, средн. 0,06 мас.%), Ca (0,2 - 3 мас.%, средн. 0,09 мас.%), K (0,2 – 0,9 мас.%, средн. 0,60 мас.%), Fe (2 - 20 мас.%, средн. 10,14.%), Al (0,3 - 14,8 мас.% , средн.10,58 мас.%).

Таблица 4.3 - Химический состав руд по данным XRF Северо-Западного рудопроявления марганца (в мас.%)

№ п/п	SiO ₂ (мас.%)	Al ₂ O ₃ (мас.%)	Fe ₂ O ₃ (мас.%)	MnO (мас.%)	MgO (мас.%)	CaO (мас.%)	K ₂ O (мас.%)	Na ₂ O (мас.%)	TiO ₂ (мас.%)	P ₂ O ₅ (мас.%)	Cr ₂ O ₃ (мас.%)	Σ(сумма) (мас.%)	Mn/Fe
ТС_01	43,00	13,43	13,05	19,03	0,09	0,07	0,79	0,09	0,48	0,08	0,05	90,16	1,6
ТС_02	54,79	12,67	10,59	12,73	0,12	0,13	0,71	0,07	0,62	0,06	0,06	92,55	1,33
ТС_03	46,82	12,97	12,20	17,50	0,10	0,08	0,89	0,09	0,54	0,09	0,04	91,32	1,59
ТС_04	61,64	11,09	11,76	6,38	0,23	0,28	0,93	0,05	0,60	0,04	0,05	93,05	1,46
ТС_05	54,58	14,82	11,83	9,30	0,08	0,07	0,77	0,06	0,65	0,06	0,05	92,27	0,60
ТС_06	58,73	12,28	19,90	1,39	0,05	0,06	0,72	0,06	0,61	0,09	0,08	93,97	0,87
ТС_07	76,49	8,48	9,32	0,10	0,02	0,05	0,39	0,02	0,56	0,05	0,08	95,56	0,08
ТС_08	78,2	6,91	6,43	4,00	0,001	0,03	0,32	0,02	0,48	0,08	0,09	96,56	0,69
ТС_09	79,50	7,69	7,06	0,90	<0,01	0,03	0,37	0,02	0,51	0,08	0,06	96,22	0,14
ТС_10	64,70	13,73	12,04	2,12	0,05	0,03	0,68	0,06	0,71	0,05	0,12	94,29	0,19
ТС_11	62,37	13,87	10,93	4,62	0,09	0,05	0,80	0,12	0,69	0,05	0,04	93,63	0,47
ТС_12	69,71	11,76	10,35	1,59	0,05	0,02	0,53	0,03	0,71	0,05	0,09	94,89	0,17
ТС_13	76,40	9,68	8,22	0,90	0,03	0,05	0,46	0,03	0,60	0,04	0,06	96,47	0,12
ТС_14	61,11	13,18	13,16	4,83	0,07	0,03	0,71	0,05	0,64	0,06	0,12	93,96	0,11
DL-02	76,94	6,40	3,13	8,10	<0,01	0,05	0,32	0,05	0,07	0,01	0,06	95,13	0,41

Продолжение таблицы 4.3 (редкие элементы в г/т)

№ п/п	Ba (г/т)	Co (г/т)	Ni (г/т)	La (г/т)	Ce (г/т)	Cr (г/т)	Y (г/т)	Zn (г/т)	As (г/т)	Rb (г/т)	V (г/т)	Nb (г/т)
ТС_01	1 155	36	118	41	81	263	27	24	12	55	141	11
ТС_02	903	27	62	36	72	375	16	22	13	40	131	12
ТС_03	8 386	103	247	203	442	468	57	35	16	46	321	12
ТС_04	20 110	204	404	278	907	480	48	30	34	39	521	9,4
ТС_05	5 490	63	111	79	291	847	24	35	21	54	261	13
ТС_06	1 551	77	123	36	148	2 048	18	45	44	54	269	13
ТС_07	952	29	65	29	73	555	14	27	26	36	136	11
ТС_08	720	19	46	28	64	342	12	30	11	30	104	9,3
ТС_09	8 390	56	71	109	242	371	32	36	17	49	321	13
ТС_10	14 698	99	129	242	563	329	43	61	44	46	514	10
ТС_11	4 358	48	102	70	238	472	24	37	11	57	226	14
ТС_12	3 146	72	140	48	262	847	21	35	21	55	201	14
ТС_13	1 677	70	149	34	157	590	17	30	14	46	163	13
ТС_14	637	20	48	27	62	372	13	29	13	33	109	10
DL-02	6 210	66	156	102	347	48	20	6,3	5,3	10	157	4

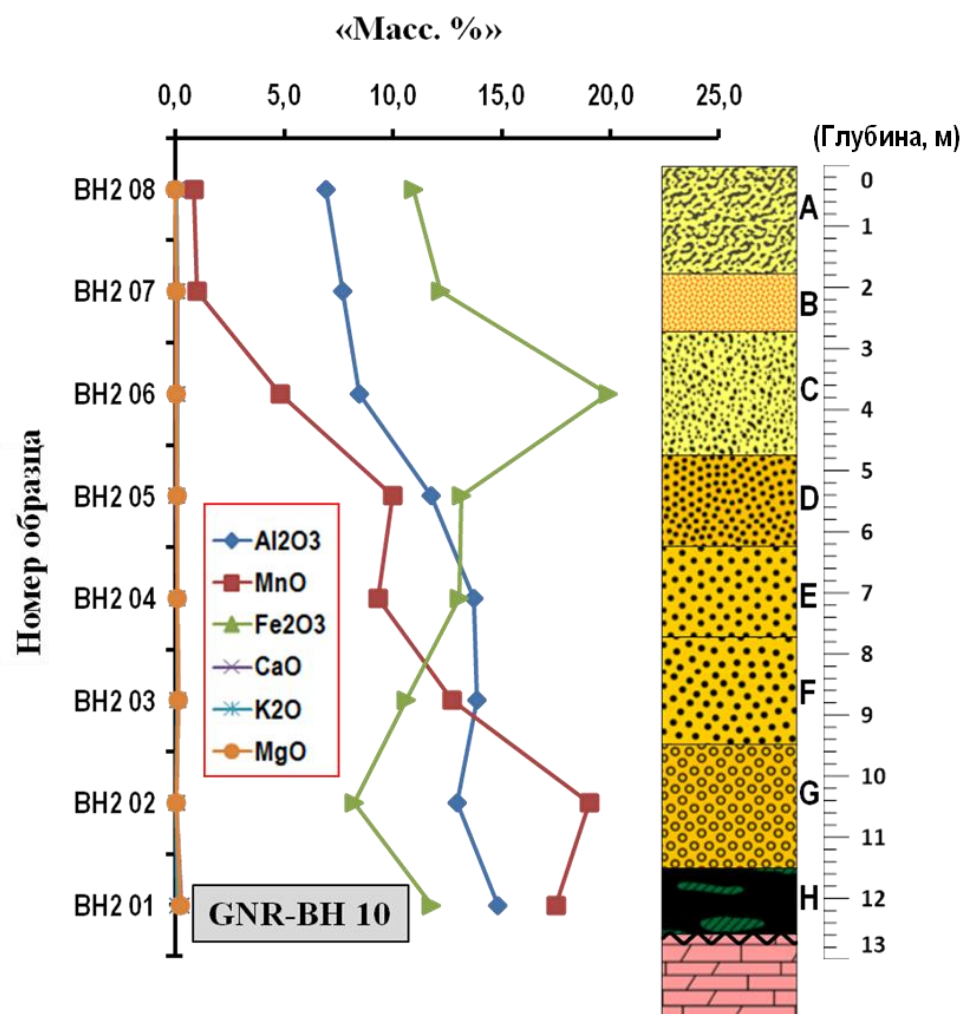


Рисунок 4.21 - Содержание марганца, алюминия, железа, кальция, калия и магния в различных зонах по шурфам GNR-BH 10

На рисунках 4.22 и 4.23 заметна положительная корреляционная связь MnO с Ba, Ni, V, La, Ce, Co, отрицательная - с Cr, Zr в руде. Представляется, что Cr и Zr входят, в основном, в состав терригенных минералов, их концентрация в породе приводит к сокращению объема марганцевых минералов, то есть к отрицательной корреляции с содержанием марганца в руде.

Самые сильные положительные корреляционные связи проявлены между концентрациями MnO и Ba ($R^2 = 0,91$), MnO и V ($R^2 = 0,84$), MnO и Ni ($R^2 = 0,52$). Они обусловлены, по-видимому, процессами сорбции микроэлементов в ходе седиментации калий- и барий содержащих оксидов марганца – криптомелана и романехита. В частности, Дж. Л. Метро [89] и С.М. Рендалл и др. [101] отмечают,

что коллоидные образования железа и марганца способны, благодаря своим поверхностным свойствам, «очищать» недосыщенные растворы металлов в процессе седиментации.

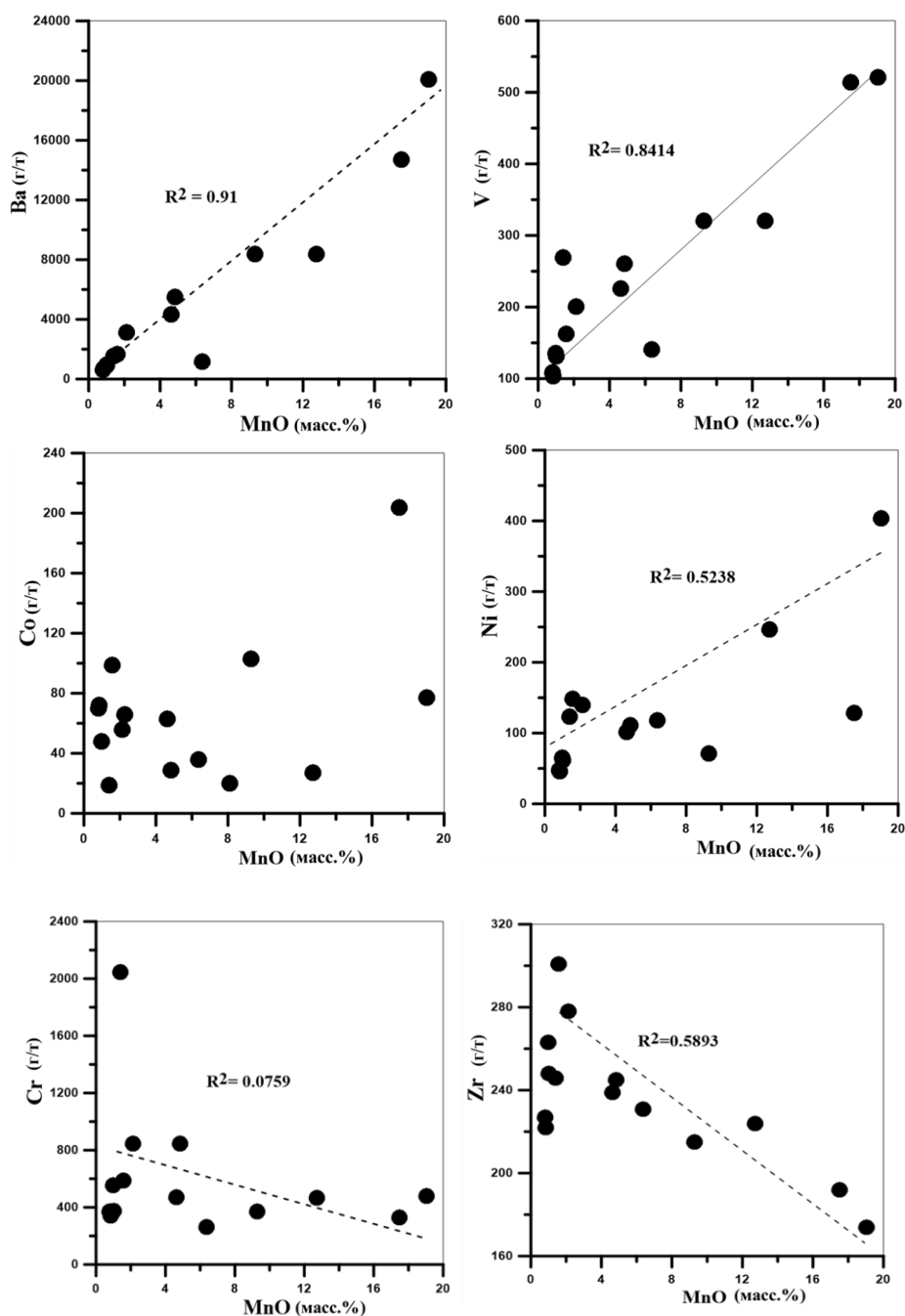


Рисунок 4.22 - Корреляция содержаний Ba, Ni, V, Cr, Co, и Zr с MnO в руде Северо-Западного рудопроявления ЮАР

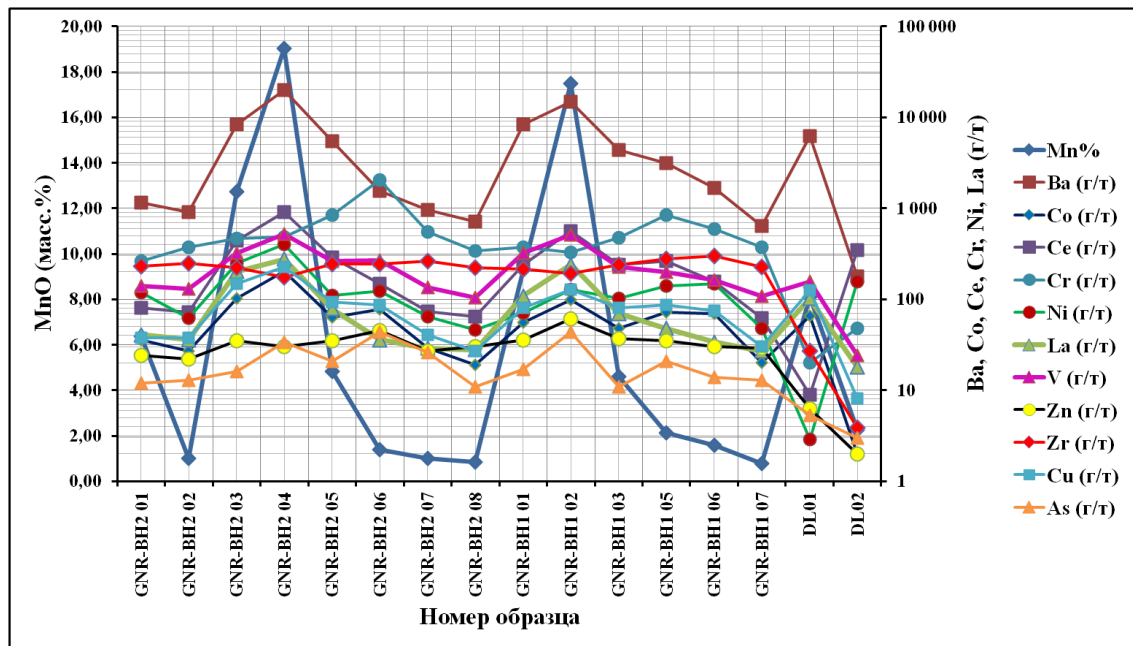


Рисунок 4.23 - Распределения содержаний марганца и сопутствующих элементов в пробах руды

Величины содержаний редких и редкоземельных элементов во всех образцах марганцевых руд отчетливо демонстрируют обогащение Ba, V, La, Ce, Ni, Co, Cr, Cu, Zn и Zr (рисунок. 4.24). Средние содержания редких и редкоземельных элементов (в г/т) в руде возрастают в последовательности: Lu (1,24), Tm (1,30), U (3,22), Ho (3,28), Tb (3,68), Cs (4,36), Eu (7,18), Er (8,41), Yb (8,53), Tl (10,20), Mo (14,48), Dy (18,87), As (25,07), Gd (26,46), Th (27,18), Sm (30,73), Pr (43,97), Sc (49,06), Zn (52,71), Y (60,32), Nd (157,25), Co (100,93), La (193,67), Pb (212,39), Zr (228,24), Cu (233,65), Cr (229,89), Ni (340,66), V (342,97), Ce (607,64), Ba (10603,55).

Между этими элементами наблюдаются как сильные положительные, так и отрицательные корреляции. Концентрация Mn показывает сильную положительную корреляцию с содержанием La, Ce, Cu, Ba, Y, Co, Ni и K, что, вероятно, свидетельствует о сорбции этих элементов из водных рудных растворов в туннельную структуру оксидов Mn при рудоосаждении (таблица 4.5). Заметная корреляция отмечается и по содержаниям всех редких элементов (РЭ), за исключением Sr (рисунок 4.24-а). Это говорит о том, что рудные минералы осаждались из одних и тех же рудных водных растворов.

Другой важной особенностью является совпадение элементных составов рудных образцов и проб, отобранных из неоархейских марганценосных доломитов Мальманийской подгруппы (GNR DD и DOL) (рисунок 4.24-б). Напротив, состав марганцевого вада, представленный образцом WAD, не соответствует этой корреляционной модели (рисунок 4.24-б). Возможно, это связано с его ранним формированием, совпадающим с образованием постафриканской поверхности I поднятия и эрозии. Его образование, вероятно связанное с катагенетическим преобразованием прослоев черных углистых сланцев в разрезе доломитов, соответствует данным Н. Ваниекерк [116].

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 (таблица 4.4). Из коэффициентов видно, что образцы руды более обогащены легкими редкоземельными элементами, что характерно для гипергенных оксидов марганца, таких как криптомелан и голландит.

Содержания редкоземельных элементов в образцах марганцевой руды, нормализованные к составу хондриту и среднему составу постархейского австралийского глинистого сланца (PAAS) приведены на рисунке 5.1. Относительно эталонных сланцев и хондритов $PЗЭ_{SN}$ и $PЗЭ_{CN}$ руды характеризуются обогащением легкими редкоземельными элементами.

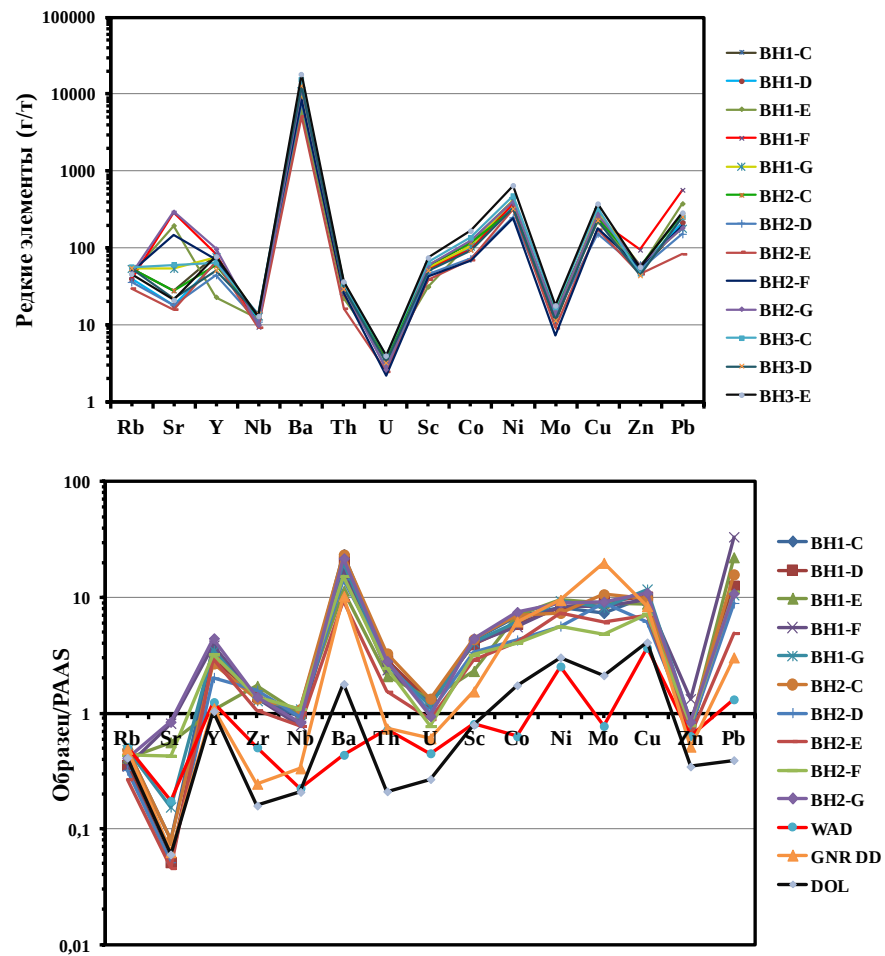


Рисунок 4.24 - Распределения содержаний микроэлементов (а) и их средние содержания, нормированные к средним содержаниям PAAS (б) в рудных образцах

Таблица 4.4 - Состав редкоземельных элементов Северо-Западного марганцевого рудопроявления, результаты анализа ICP-MS в г/т

№ п/п	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Ho	Er	Tm
	(г/т)	(г/т)	(г/т)	(г/т)	(г/т)	(г/т)	(г/т)	(г/т)	(г/т)	(г/т)	(г/т)	(г/т)	(г/т)
BH1-C	263,34	758,35	55,35	196,48	37,74	8,74	34,05	4,638	24,23	82,23	4,30	11,08	1,71
BH1-D	209,89	639,47	47,23	168,77	32,72	7,65	28,55	3,997	20,52	65,09	3,62	9,23	1,45
BH1-E	71,91	490,34	15,92	55,66	10,79	2,60	9,61	1,347	7,22	23,08	1,28	3,36	0,55
BH1-F	300,53	639,38	58,47	205,66	38,50	8,90	34,82	4,788	24,79	85,03	4,3	11,30	1,72
BH1-G	240,84	658,19	53,50	192,69	36,86	8,52	32,75	4,541	23,63	76,57	4,17	10,58	1,64
BH2-C	200,28	734,34	49,09	177,05	35,14	8,21	29,24	4,136	20,93	59,07	3,57	9,01	1,40
BH2-D	132,77	425,44	31,43	113,82	22,28	5,24	19,08	2,673	13,77	44,68	2,37	6,17	0,95
BH2-E	179,53	400,91	39,85	145,19	27,90	6,48	25,58	3,571	18,65	65,38	3,35	8,57	1,33
BH2-F	159,18	437,63	33,38	121,21	22,91	5,48	21,78	2,99	15,63	70,68	2,88	7,54	1,15
BH2-G	233,92	693,33	47,33	168,75	32,51	7,72	30,43	4,15	21,80	97,53	3,94	10,30	1,58
BH3-C	232,09	775,83	54,94	197,14	39,01	9,18	32,32	4,55	23,20	65,03	3,92	10,06	1,57
BH3-D	182,61	613,26	42,96	153,43	30,29	7,10	25,46	3,54	18,05	51,50	3,09	7,95	1,24
BH3-E	273,87	978,77	64,82	228,61	45,82	10,62	37,95	5,41	27,38	77,20	4,68	12,12	1,89
BH3-F	251,76	933,00	60,02	212,35	43,09	10,03	36,32	5,09	26,06	72,95	4,52	11,43	1,76
BH4-D	202,58	640,70	48,20	172,29	34,08	8,01	28,09	3,87	19,62	54,44	3,32	8,41	1,29
BH4-E	239,88	801,12	57,67	203,42	40,32	9,50	33,09	4,55	22,67	61,49	3,79	9,54	1,45
BH4-F	253,67	709,78	57,76	207,16	39,56	9,17	33,56	4,57	22,99	67,77	3,92	9,93	1,53
BH4-G	227,65	626,51	52,33	188,73	36,73	8,46	31,15	4,34	22,14	63,99	3,79	9,70	1,50
WAD	22,91	30,16	4,48	17,06	3,24	0,85	3,42	0,47	2,73	27,40	0,57	1,59	0,25
GNR DD	86,01	381,48	22,35	79,51	16	3,69	12,42	1,77	8,78	24,24	1,50	3,84	0,60
DOL	56,89	129,71	13,51	51,40	9,96	2,23	8,63	1,22	6,27	22,89	1,12	2,85	0,43

Продолжение 1 таблицы 4.4

Yb	Lu	Sc	V	(Ce/Ce*)_{SN}	(Eu/Eu*)_{SN}	(La/Yb)_{SN}	(Y/Ho)_{SN}	Yb
(г/т)	(г/т)	(г/т)	(г/т)	(г/т)	(г/т)	(г/т)	(г/т)	(г/т)
11,20	1,63	57,91	315,86	1,51	1,14	1,73	9,13	11,20
9,55	1,36	53,435	318,35	1,50	1,17	1,62	8,57	9,55
3,69	0,55	31,435	245,05	3,33	1,19	1,44	8,61	3,69
11,17	1,66	54,647	289,22	1,19	1,13	1,98	9,42	11,17
10,79	1,57	56,244	320,27	1,37	1,14	1,64	8,74	10,79
9,12	1,31	59,218	354,37	1,67	1,19	1,62	7,88	9,12
6,15	0,89	46,066	263,22	1,52	1,18	1,59	9,00	6,15
8,74	1,24	39,16	243,27	1,13	1,13	1,51	9,29	8,74
7,47	1,11	43,436	273,55	1,47	1,14	1,57	11,67	7,47
10,25	1,55	60,191	421,72	1,62	1,14	1,68	11,78	10,25
10,38	1,50	65,641	424,16	1,57	1,21	1,65	7,90	10,38
8,17	1,18	51,373	317,55	1,58	1,19	1,65	7,94	8,17
12,43	1,80	74,71	394,36	1,65	1,19	1,62	7,86	12,43
11,79	1,72	69,51	346,21	1,70	1,18	1,57	7,68	11,79
8,49	1,21	52,59	429,46	1,47	1,21	1,76	7,81	8,49
9,59	1,37	54,41	642,63	1,52	1,21	1,84	7,72	9,59
9,78	1,41	49,81	545,56	1,36	1,17	1,91	8,24	9,78
9,84	1,42	50,01	373,42	1,34	1,17	1,70	8,04	9,84
1,53	0,26	10,96	162,79	0,79	1,18	1,10	22,97	1,53
3,93	0,56	20,92	410,55	1,88	1,22	1,61	7,68	3,93
2,83	0,43	10,77	72,08	1,13	1,12	1,48	9,70	2,83

Продолжение 2 таблицы 4.4

№ п/п	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Zr	Mo	Cs	Ti	Pb	Th	U	Ba	Co/Zn	Co + Cu+ Ni
	(г/т)	(г/т)	(г/т)	(г/т)	(г/т)	(г/т)	(г/т)	(г/т)	(г/т)	(г/т)	(г/т)	(г/т)	(г/т)	(г/т)	(г/т)	(г/т)
BH1-C	271,62	116,27	358,39	253,67	49,35	25,08	258,67	10,98	4,78	11,98	208,02	30,56	3,35	13031,57	2,36	728,33
BH1-D	285,77	100,26	358,28	254,02	56,59	38,12	269,64	13,85	5,05	10,27	214,90	30,68	3,57	11347,64	1,77	712,56
BH1-E	885,53	120,11	417,05	220,78	53,83	22,12	326,99	13,51	5,24	6,24	378,02	22,33	3,71	6307,58	2,23	757,94
BH1-F	252,48	94,98	371,82	237,46	94,35	29,36	257,57	12,66	4,82	9,68	567,96	25,35	3,39	9589,55	1,01	704,26
BH1-G	207,34	105,25	411,31	294,88	60,39	22,97	243,77	12,30	4,641	10,97	179,17	28,17	3,25	10987,49	1,74	811,43
BH2-C	280,54	118,97	323,2	247,00	58,10	54,60	253,50	15,95	4,561	11,73	268,76	35,073	3,73	12900,77	2,05	689,16
BH2-D	151,24	72,80	248,76	153,96	53,03	17,76	299,57	13,34	6,292	7,89	152,14	29,85	2,81	7879,89	1,37	475,53
BH2-E	88,02	70,08	320,34	174,40	46,00	18,21	200,24	9,11	4,025	6,31	83,57	16,38	2,48	5184,60	1,52	564,81
BH2-F	398,10	68,98	246,28	180,95	55,66	21,53	263,96	7,28	5,442	9,35	190,81	26,28	2,16	8420,98	1,24	496,20
BH2-G	113,91	127,09	397,16	273,93	59,72	27,05	262,90	13,77	4,824	12,28	183,98	30,14	2,64	11985,41	2,13	798,17
BH3-C	486,76	137,01	478,21	327,71	46,48	24,79	268,16	17,02	5,306	13,76	251,64	33,84	3,98	15496,29	2,95	942,93
BH3-D	335,11	94,09	325,09	228,62	43,90	20,46	260,4	11,51	5,26	11,49	255,4	29,40	3,24	12839,72	2,14	647,80
BH3-E	199,09	166,93	649,55	375,09	56,79	24,41	273,99	17,83	5,20	15,59	286,68	36,46	3,97	18096,34	2,94	1191,57
BH3-F	158,63	133,22	527,18	303,34	58,26	20,84	284,91	15,00	5,28	13,22	325,47	41,72	4,08	16253,48	2,29	963,75
BH4-D	155,51	93,94	258,71	209,34	47,48	29,29	221,20	17,36	3,46	12,37	212,23	31,14	3,82	12437,38	1,98	561,99
BH4-E	89,12	129,51	249,44	262,32	55,10	35,39	205,85	28,86	3,00	16,58	230,07	36,26	4,77	16622,9	2,35	641,27
BH4-F	111,88	96,32	204,34	227,21	71,00	33,44	216,64	21,133	3,27	13,17	167,62	28,25	4,64	12019,94	1,36	527,87
BH4-G	183,86	99,05	331,27	242,43	41,76	23,16	196,20	16,59	3,21	9,96	150,38	27,34	3,35	9796,47	2,37	672,76
WAD	93,62	10,71	111,56	91,53	45,01	26,1	96,02	1,161	5,83	1,58	22,35	7,70	1,26	239,69	0,24	213,80
GNR DD	17,77	105,33	417,69	210,68	36,44	9,34	46,63	29,87	0,85	5,34	51,52	7,87	1,70	5644,46	2,89	733,69
DOL	13,48	29,56	133,38	102,17	24,53	4,69	30,17	3,18	0,84	2,03	6,70	2,26	0,75	982,41	1,21	265,10
B3-D	278,13	130,08	355,47	268,85	45,80	22,85	284,24	16,27	4,78	12,56	285,13	40,94	4,15	15213,64	2,84	754,40

Таблица 4.5 - Корреляционная матрица коэффициента Пирсона для РЗЭ Северо-Западного марганцевого рудопроявления (анализ ICP-MS)

	Mn ⁴⁺	Fe ³⁺	K ₂ O	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	La	Ce	Ni	Co	Cu	Y	Ba	Zr	Nd
Mn ⁴⁺	1														
Fe ³⁺	0,202	1													
K ₂ O	0,562	0,779	1												
CaO	0,326	0,209	0,548	1											
Al ₂ O ₃	0,404	0,795	0,872	0,207	1										
MgO	0,407	0,042	0,762	0,919	0,185	1									
La	0,973	0,242	0,519	0,180	0,441	0,235	1								
Ce	0,907	0,199	0,448	0,012	0,441	0,140	0,945	1							
Ni	0,728	0,363	0,473	0,198	0,480	0,226	0,781	0,874	1						
Co	0,796	0,480	0,549	0,083	0,566	0,096	0,854	0,945	0,954	1					
Cu	0,833	0,378	0,511	0,060	0,546	0,094	0,888	0,964	0,927	0,963	1				
Y	0,789	0,402	0,651	0,369	0,518	0,446	0,809	0,697	0,629	0,666	0,637	1			
Ba	0,951	0,274	0,525	0,089	0,475	0,162	0,966	0,969	0,777	0,882	0,898	0,721	1		
Zr	-0,232	0,629	0,450	0,060	0,673	-0,399	-0,142	-0,405	0,037	0,054	-0,057	0,119	-0,147	1	
Nd	0,981	0,157	0,505	0,152	0,434	0,248	0,997	0,942	0,746	0,838	0,873	0,807	0,973	-0,401	1

4.3 Выводы по 4 главе

В итоге следует отметить следующее. Северо-Западное рудопроявление марганца сложено оксидами марганца высоковалентного состояния, накопленными в гипергенной зоне неоархейских марганценосных доломитов Мальманийской серии Трансваальского бассейна.

Результаты петрографического, минералогического и геохимического изучения каменного материала рудопроявления дали возможность обосновать следующие выводы:

1) Марганцевая руда преимущественно состоит из марганцевого вада, марганцевых конкреций и корок. Марганцевый вад сохраняется в типичных карстовых структурах, образовавшихся в результате выветривания и растворения нижележащих доломитов. Марганцевые конкреции приурочены к вышележащей неогенной латеритной части разреза (Вествиг).

2) Минеральный состав рудопроявления характеризуется преимущественно романехитом, криптомеланом, голландитом, пиролюзитом, литиофоритом и вернадитом. К нерудным минеральным фазам относятся каолинит, кварц, кальцит, включения ильменита и циркона. Минералы оксида марганца встречаются в основном в виде тонких концентрических слоев вокруг фрагментов кальцита, кварцита, песчаника и др. Эти минеральные ассоциации аналогичны тем, которые встречаются в других гипергенных месторождениях марганца. Руда обогащена рядом редкоземельных и микроэлементов, в частности, Се, La, Ba, V, Ni, Cr, Cu и Zr. Большинство из них положительно коррелируется с содержаниями марганца. Предполагается механизм сорбции этих элементов из водных рудных растворов в туннельную структуру оксидов марганца. По-видимому, концентрация главных рудных элементов - марганца и железа, а также сопутствующих: кобальта, хрома, никеля и ванадия определена длительным корообразованием по доломитам серии Мальмани.

3) Результаты исследования модального композиционного анализа позволяют предположить, что источниками терригенного материала, содержащего марганцевые руды, подвергшегося марганцевому оруденению в

Северо- Западном районе ЮАР являлись архейские граниты, кластические породы и кварциты Каапваальского кратона, группы Претория и Ранд-антиклинального хребта серии Черного рифа, которые выходят на поверхность вдоль северного обрамления района на более высоких отметках рельефа. На основании этих результатов можно сделать вывод, что источник марганца в большей степени связан с выветриванием подстилающих доломитов, чем с возможным переносом металла из других коренных источников, расположенных на значительном удалении от зоны рудонакопления. Наши данные о высоких содержаниях марганца в доломитах (в количестве 0,5 - 8 мас.% MnO) соответствуют данным, представленным в литературе [55, 76].

ГЛАВА 5 РУДОГЕНЕЗ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО РУДОПРОЯВЛЕНИЯ МАРГАНЦА

Аннотация: В данной главе представлена генетическая модель рудопроявления Северо-Западное, позволяющая представить историю его формирования и размещения на выветрелой поверхности доломитов позднеархейского возраста. Кроме того, представлен результат оценки ресурсов марганца, подсчитанных с помощью блочной модели в программе «Micromine 2020».

5.1 Гипотеза образования марганцевых руд

Одним из важнейших и в то же время сложных вопросов в изучении истории рудогенеза месторождений полезных ископаемых является определение источника рудного вещества, что справедливо и по отношению изучаемому объекту. Все исследователи, работавшие на Северо-Западном рудопроявлении [55, 36, 93, 97, 116, 117] заметили, что формирование этого объекта происходило в результате длительного процесса корообразования, наложенного на неоархейские доломиты серии Мальмани. Были выявлены два основных типа руд; марганцевый вад ватервальского сапролита ($K_2??$) и марганцевые конкреции в латеритной части разреза, перекрывающей сапролит (P_1-N_2).

Наиболее универсальной и наименее теоретически уязвимой оказалась концептуализация апвеллинга, как механизма поступления марганца из глубинной сероводородной зоны морских и океанических бассейнов в прибрежные части водоемов [35, 119]. Железо и марганец поступают в океанические бассейны из различных источников - в результате разложения подводного вулканического аппарата, в течение апвеллинга рудного вещества из глубинных гидротермальных источников, в процессе эрозии близлежащей континентальной суши и т.д. Впоследствии, они откладывались сингенетично с вмещающими их карбонатными отложениями. Об этом свидетельствуют петрологические исследования, химический и минералогический анализы, структуры пород в аншлифах, в том числе, изученных с помощью электронного микроскопа. Эти факты указывают на раннее присутствие марганцевых

карбонатов, силикатов и оксидов в доломитах Мальмани. Принципиально иная точка зрения на генезис марганцевых месторождений связана с накоплением осадочных пород и ориентирована на катагенетические - диагенетические процессы. Возможность катагенетического образования марганцевых руд в Мангышлакском и Лабинском месторождениях была высказана В.Н. Холодовым [16]. При этом решающую роль играли нефтяные воды, которые содержат большое количество углекислого газа, метана, сероводорода и других агрессивных компонентов. Рудные элементы, содержащиеся в таких водах, могли выщелачиваться из подстилающих вмещающих пород и переноситься на поверхность большими массами [9-10].

Важно отметить, что накопление марганценосных пород в истории развития литосферы Земли началось в середине архея, и что формирование этих осадков в то время происходило в основном в мелководных бассейнах седиментации при активном участии органического вещества. Концентрации марганца в них, за редким исключением, не достигали промышленных концентраций, а формирование залежей собственно марганцевых руд до масштабов месторождения связано с постседиментационными процессами минерального преобразования.

Для определения условий формирования и источника рудных веществ Северо-Западного рудопроявления марганца были изучены - его минеральный состав, закономерности расположения рудных тел и их тесная связь с неоархейскими марганецсодержащими породами, а также геохимия редкоземельных и микроэлементов.

Когерентное поведение микроэлементов и редкоземельных элементов в природных средах используется для выявления источников различных рудных элементов в марганцевых месторождениях или иных полезных ископаемых, поэтому существенным моментом точности их диагностики является выбор соответствующих стандартных эталонов [31, 77, 81, 90].

В литературе принято генетическое деление месторождений железо - марганцевых конкреций и корок на три категории: гидрогенетические,

диагенетические и гидротермальные типы [29, 31, 41]. Благодаря разнообразию их составов, несколько авторов, таких как [29, 31, 41, 53, 77, 78, 81, 90, 111] построили и усовершенствовали схемы генетических классификаций, которые весьма обоснованно описывают потенциальные источники рудных веществ, питающие процессы образования марганцевых конкреций в озерных и океанических толщах воды. Авторы многих публикаций использовали переменный состав редкоземельных (РЗЭ) и редких элементов (РЭ) для разработки генетических схем рудообразования [17, 22, 24, 31, 53, 91, 118], позволяющих определить вероятный источник рудного вещества. В частности, содержания РЭ и РЗЭ учитывались для определения генезиса океанических железомарганцевых конкреций и корок в различных океанических условиях.

Ввиду отсутствия современных и обоснованных представлений об образовании марганцевых руд в районе Мальмани, нами были проведены полевые и аналитические работы на площади распространения и в вертикальных разрезах рудопроявления Северо-Западное.

Для расчета и анализа кларков концентрации (КК) использованы два “геохимических стандарта” – состав хондрита (CI) и средние значения постархейского австралийского глинистого сланца – PAAS.

5.2 Генетическая модель Северо-Западного рудопроявления марганца

Для построения генетической модели рудопроявления Северо-Западное использованы результаты приведенных выше анализов содержаний редких и редкоземельных элементов в рудах, петрографических, минералогических и ретгеноспектральных анализов. Содержания редкоземельных элементов в образцах марганцевой руды, нормализованные к хондриту и среднему постархейскому австралийскому глинистому сланцу, приведены на рисунке 5.1. Относительно эталонных постархейских австралийских сланцев и хондритов $PZЭ_{SN}$ и $PZЭ_{CN}$ руды характеризуются заметным обогащением легкими редкоземельными элементами.

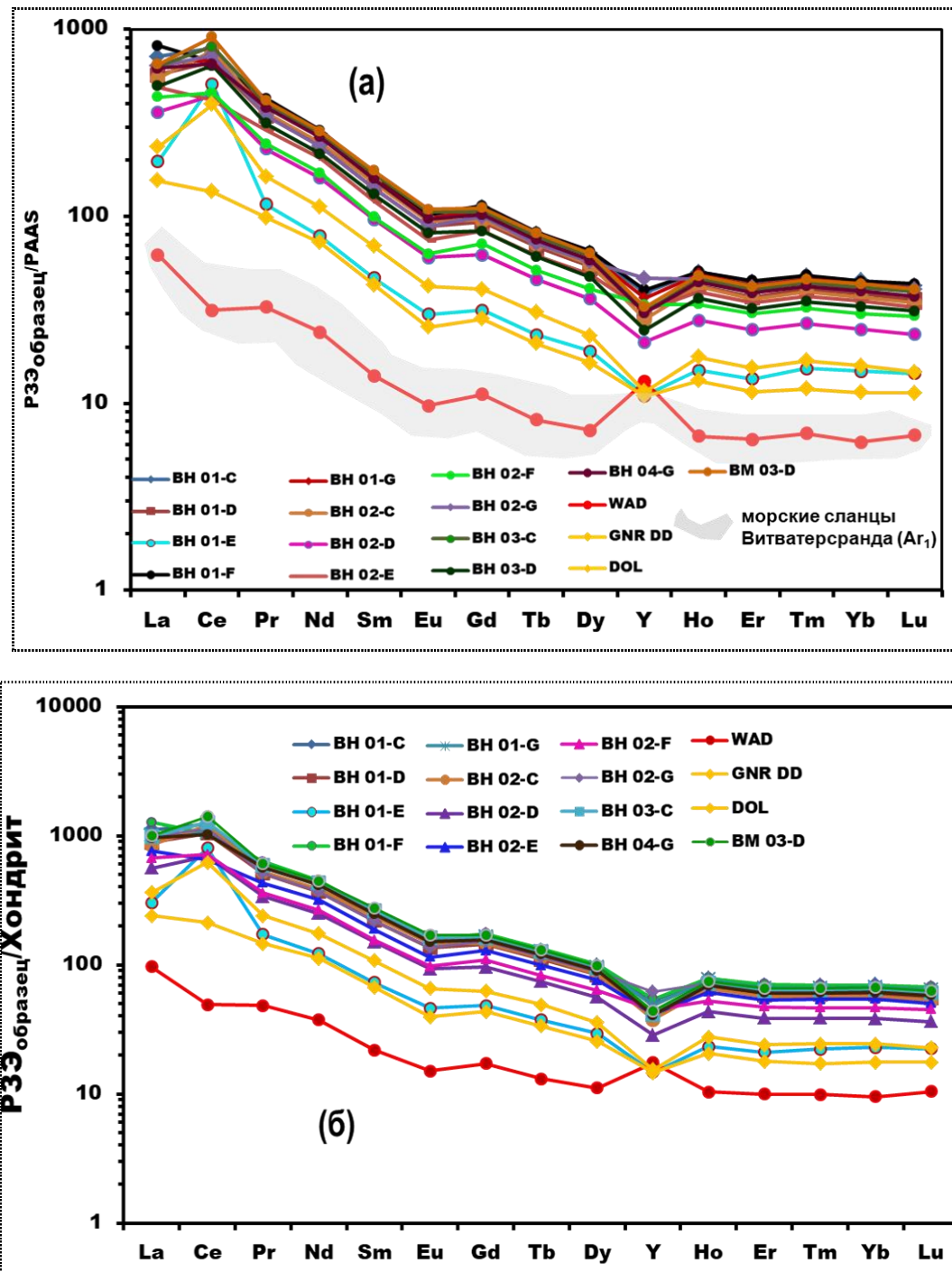


Рисунок 5.1 - Спектры распределения содержаний РЗЭ, а - нормированные к РААС [109] и б - к хондриту [107] для рудных образцов

Содержания редкоземельных элементов - $MREE_{SN}$ и $MREE_{CN}$ немного повешены по отношению к содержаниям легких редкоземельных элементов над эталонными с резким понижением и выравниванием концентраций в спектре тяжелых редкоземельных элементов ($HREE_{SN}$ и $HREE_{CN}$) (рисунок 5.1). На обоих кривых распределения составов наблюдаются выраженные - положительная аномалия Ce_{SN} и отрицательная аномалия Y_{SN} . Такая же тенденция наблюдается и на рисунке 5.2-в. Наличие положительной и отрицательной аномалий по относительным содержаниям Ce_{SN} и Y_{SN} соответственно, является характерной чертой гидрогенетических/гидрогенных минеральных осадков [31, 68, 77]. Эти аномалии и обогащение руды легкими редкоземельными элементами (LREE) коррелируются с содержаниями оксидных минералов, таких как криптомелан, голландит и романехит. Кроме того, наблюдается корреляционная тенденция в спектрах доломитов и конкреций. Это, по-видимому, объясняется генетической связью между ними.

Следует отметить, что образец марганцевого вада (WAD) напротив, характеризуется положительной аномалией по содержанию Y и отрицательной – по содержанию Ce соответственно. Это свидетельствует о раннем формировании марганцевого вада во время Постафриканского I (верхний мел) события (поднятие и эрозия, что предшествовало образованию марганцевых конкреций). Химический состав марганцевого вада ближе к составу черных углистых сланцев морского происхождения.

Для определения источника рудных веществ нами были использованы статистически обоснованные генетические диаграммы [30, 41]. 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 5.3). К. Николсон и др. предложили [92] бинарную диаграмму $(Co+Ni) - (As+Cu+Mo+Pb+V+Zn)$, которая четко разделяет составы руд гипергенного и гидротермального происхождений. Надежность выводов по этим диаграммам подкрепляется данными распределений редких и редкоземельных

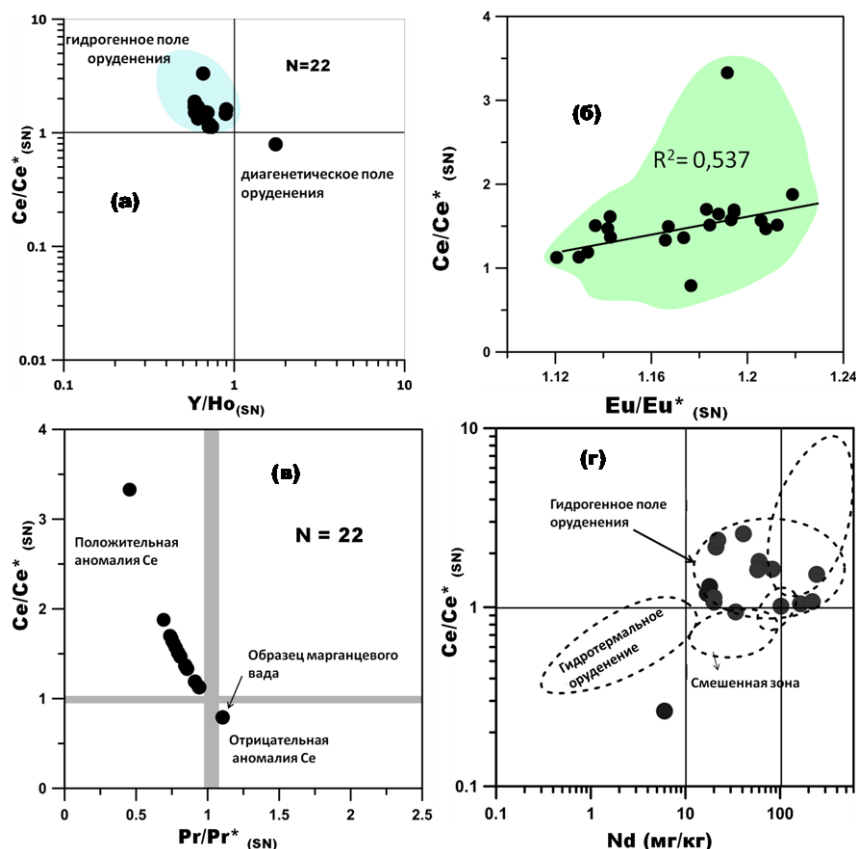


Рисунок 5.2 - Гипергенные и гидрогенные руды Северо-Западного рудопоя: **а)** диаграмма $Ce_{SN}/Ce^*_{SN} - Y_{SN}/Ho_{SN}$, разделяющая поля минералообразования [31, 81], **б)** диаграмма $Ce_{SN}/Ce^*_{SN} - Eu_{SN}/Eu^*_{SN}$, демонстрирует слабую положительную корреляцию между аномалиями Eu и Ce [81]; **в)** график $Ce_{SN}/Ce^*_{SN} - Pr_{SN}/Pr^*_{SN}$, указывает на наличие значимой положительной аномалии по содержанию Ce в исследуемых образцах [30]; **г)** аномалия $Ce_{SN}/Ce^*_{SN} - Nd$, подтверждает гидрогенетический характер исследуемых образцов, образованных в ходе седиментации рудных веществ из коллоидных золь при выщелачивании и растворении марганценосных доломитов. Диаграммы по [77, 81]

элементов. Известно, что оксиды марганца содержат относительно высокие количества микро- и редкоземельных элементов, адсорбированных из водных растворов при осаждении минералов. Когерентное поведение редкоземельных элементов в природных средах позволило М. Бо и др. [31] и П. Джоссо и др. [81] предложить дополнительные критерии для генетической классификации рудного вещества, учитывающие соотношения между аномалиями Ce и Y и концентрацией Nd (рисунок 5.2).

Таким образом, следует подчеркнуть, что составы руд из Северо-Западного рудопрооявления на тройной диаграмме по Э. Бонатти и др. [41] распределены вдоль основания Fe-Mn, что указывает на преобладание этих двух элементов и подчиненное присутствие Co, Ni и Cu (рисунок 5.3-а). Поля образцов руд, отобранных вдоль гидротермально измененной части марганцеворудного поля Калахари здесь смещены в сторону Mn из-за меньшего содержания в них микроэлементов (Co + Cu + Ni). На диаграмме (рисунок 5.3-б) К. Николсона [92] показано распределение составов руд из Северо-Западного рудопрооявления в поле диаграммы соответствующем рудам гипергенного происхождения. Кроме того, эти образцы являются гидрогенетическими в соответствии с диаграммами [29, 81] - отношение Ce_{SN}/Ce^*_{SN} - Y_{SN}/Ho_{SN} (рисунок 5.2-а), отношение Ce_{SN}/Ce^*_{SN} - Nd (рисунок 5.2-г), Na - Mg (рисунок 5.4-а), (Cu+Ni+Co) - Zr (рисунок 5.4-б).

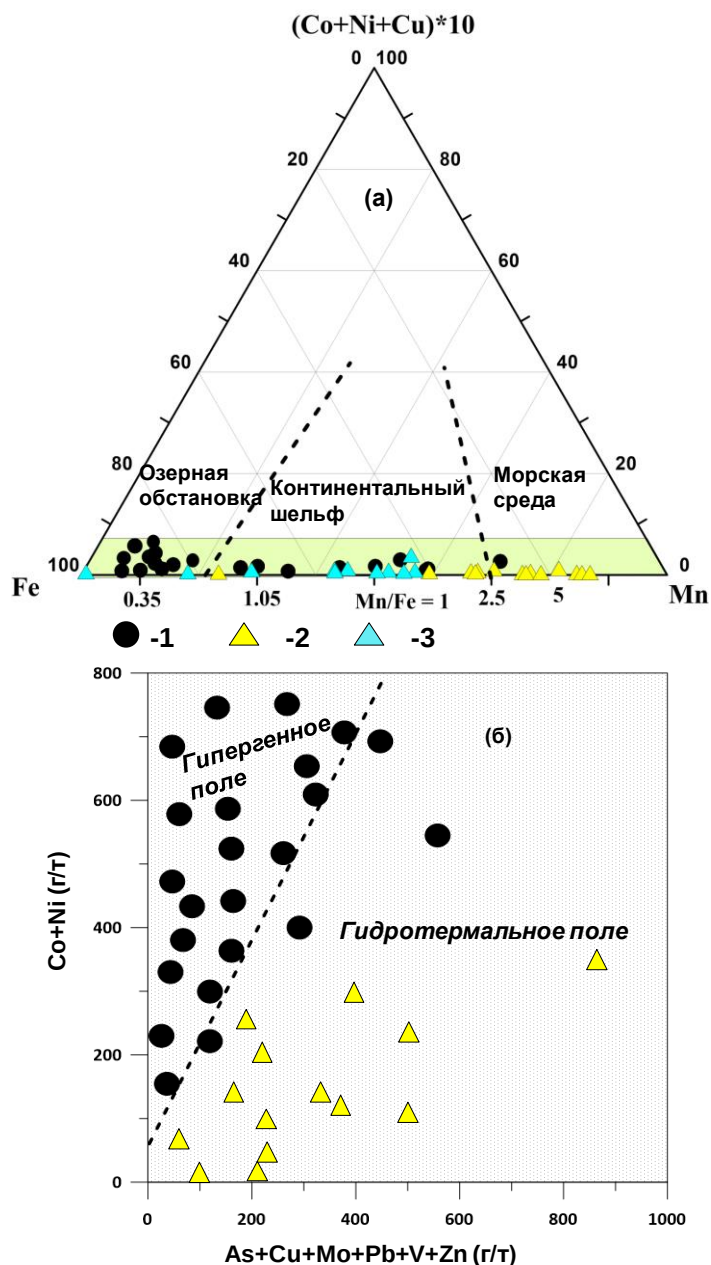


Рисунок 5.3 - Диаграммы генетической классификации марганцевого рудообразования. а) - исследуемые образцы, по-видимому, испытавшие гидрогенетический рост (а), из богатых марганцевых золь, переносимых в суспензии из марганценосных доломитов в гипергенной (б) и озерной обстановках (а) по [41, 92]; где: 1 - образцы из Северо-Западного рудопоявления; 2 - образцы из месторождения Калахари; 3 - образцы из рудопоявления Уэст-Виц

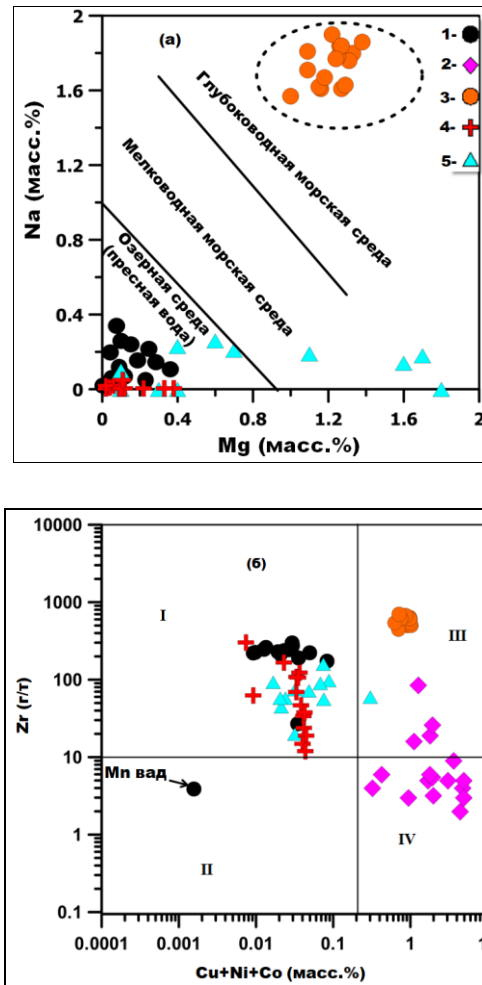


Рисунок 5.4 - Генетические диаграммы для руд месторождений марганца: а) 1 - образцы из Северо-Западного рудопоявления; 2 - образцы океанических железомарганцевых конкреций островов Кука, по данным [77], 3 - образцы из рудопоявления Рейдел по данным [93], 4 - образцы из рудопоявления марганца Уэст-Виц по данным [116], 5 - образцы из месторождения марганца Уоллис и Футуна по данным [81]; б) образцы, имеющие признаки гидрогенного рудообразования, где: I - гидрогенное поле оруденения в зоне гипергенеза, II - диагенетическое поле минералообразования в зоне окисления, III - гидрогенное поле оруденения в условиях морского дна, IV - гидротермальное поле оруденения в условиях морского дна

Таким образом, на основе наблюдаемых закономерностей распределения редкоземельных элементов и составов руд на генетических диаграммах, модель Северо-Западного рудопоявления может быть определена следующим образом:

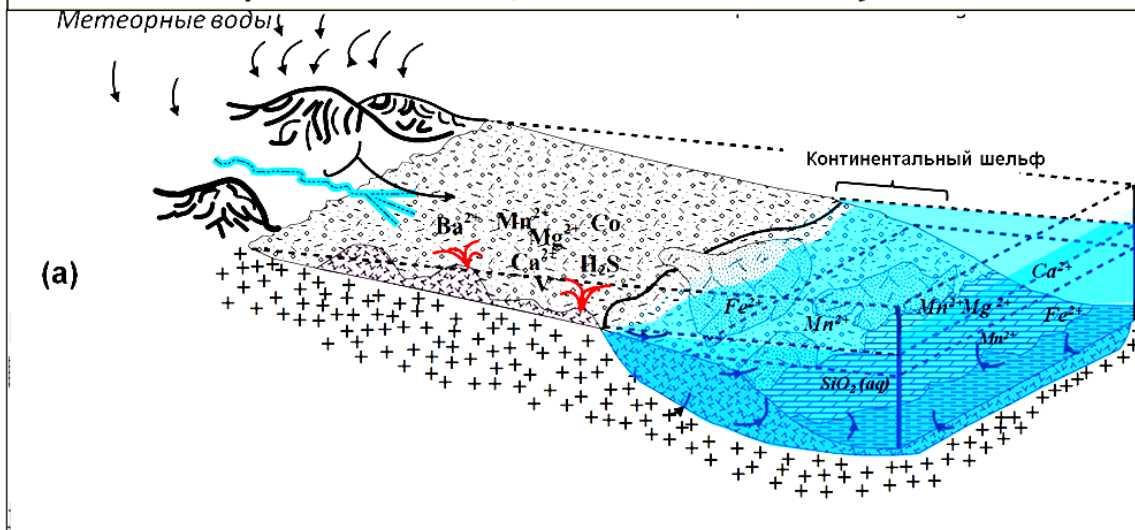
1) В неоархее на платформенном этапе образовалась преимущественно карбонатная толща Мальманийских доломитов. В это время территория была покрыта океаническими водами, которые были обогащены катионами марганца, магния, кальция и железа. Океанические водные растворы, вероятно, обогащались рудными веществами за счет гидротермальных флюидов, извергавшихся в период предшествовавшего Вентерсдорпского вулканического события (2,7 млрд. лет). Не исключена вероятность поступления рудного вещества и в результате эрозии близлежащей континентальной суши (Этап 1, рисунок 5.5). Повышение уровня моря (около 2,5 млрд. лет) зафиксировано и в Трансваальском регионе, где Мальманийские доломиты залегают поверх аллювиальных кварцевых аренитов формации Черного Рифа [43, 44, 60, 91]. В течение трансгрессивного цикла Мальманийские доломиты формировались в типичном открытом Трансваальском эпиконтинентальном море, которое покрывало большую часть территории на северном и западном флангах Каапваальского кратона (Этап 1, рисунок 5.5-б)

2) В позднем мелу и среднем кайнозое были зафиксированы два периода поднятия и эрозии африканской поверхности суши [46, 94], которые привели к денудации Мальманийских доломитов и углистых сланцев под действием поверхностного химического выветривания. Эти эрозионные события известны как Постафриканские I и II поверхности поднятия и эрозии [93]. Эксгумированные марганценозные доломиты подверглись процессам интенсивного химического выветривания и растворения в окислительной обстановке, что привело к выщелачиванию рудных компонентов (Fe, Mn, Ca, Mg, Zn, Pb и др.) в окружающую среду. Поднятие территории, которое, по-видимому, началось примерно 77 млн. лет назад [115], дало начало Постафриканскому I поднятию. Началось образование марганцевого вада за счет разрушения доломитов и углистых сланцев (Этап 3, рисунок 5.5). Этот процесс отразился в разрезах рудной залежи Северо-Западного рудопроявления, где видны глинистые прослои в марганцевом ваде. С помощью рентгеновского дифракционного анализа удалось установить повышенные содержания глинистого материала и литиофорита в марганцевом ваде. Дополнительную информацию об этом дает

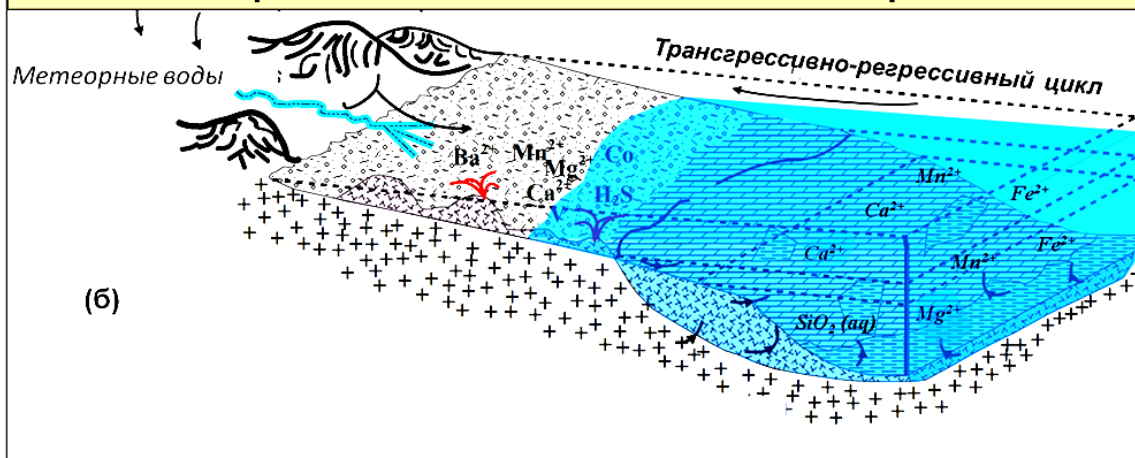
спектр редкоземельных элементов (рисунок 5.1) с отрицательной Се аномалией и положительной Y аномалией. Анализ спектра редкоземельных элементов говорит о раннем образовании марганцевого вада вдоль Постафриканской I поверхности поднятия и эрозии, предшествующем образованию марганцевых конкреций. Материалом, из которого образовался марганцевый вад, являются доломиты с прослоями черных углистых сланцев нижней Мальманийской подгруппы.

3) Во время последующего события, совпадающего с миоценовым подъемом территории и региональной эрозией, произошло образование марганцевых конкреций рудное вещество, которых сформировалось в озерной обстановке за счет выщелачивания и растворения марганценосных доломитов Мальманийской подгруппы (Этап 5, рисунок 5.5). Рудные компоненты поступали в вышележащую водную толщу в виде марганцевых коллоидов. На графиках распределения содержаний редкоземельных элементов видно, что составы образцов доломита идеально совпадают составами марганцевых конкреций

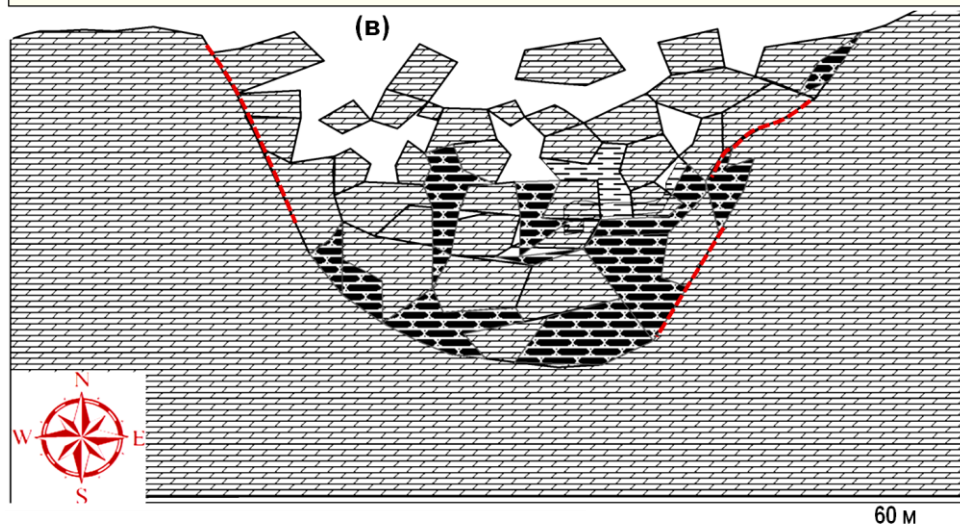
Этап 1: Образование неархейских доломитов серии Мальмани происходило в открытой океанической системе, которая была обогащена рудным веществом, поступившим из гидротермальных флюидов, извергавшихся в период предшествовавшего Вентерсдорпского вулканического события (Ar_1) и также за счет эрозии близлежащей континентальной суши.



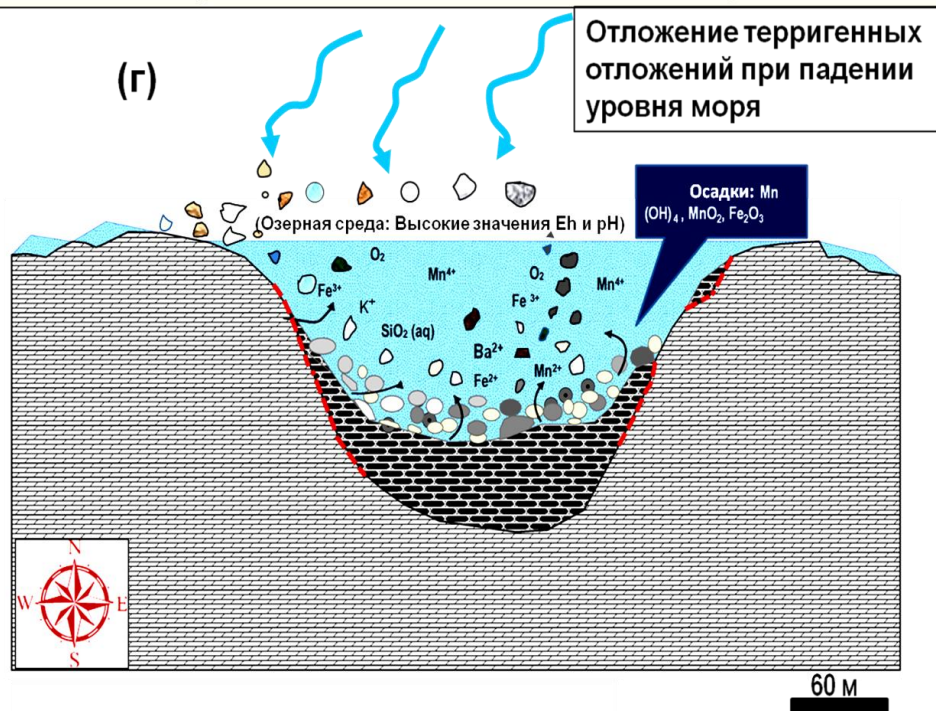
Последующее повышение уровня моря, за которым последовали трансгрессивно-регрессивные циклы: морские осадки отлагались в мелководных бассейнах седиментации во время развития Трансваальского эпиконтинентального моря



Этап 3: Поднятие африканского субконтинента формировалось в позднем мелу 77 млн.лет по данным Vafeas и др. 2018: денудация, выветривание, растворение и разрушение марганценосных доломитов и прослоев углистых черных сланцев в зоне гипергенеза.



Этап 4: Понижение уровня моря и отложение неогеновых отложений в карстовых структурах и палеодолинах, развитых на площади карбоната Мальмани в типичной озерной обстановке.



Этап 5: Образование марганцевых конкреций в результате взаимодействия рудных коллоидных частиц с обломками пород, которые послужили субстратами и центрами аккреции.

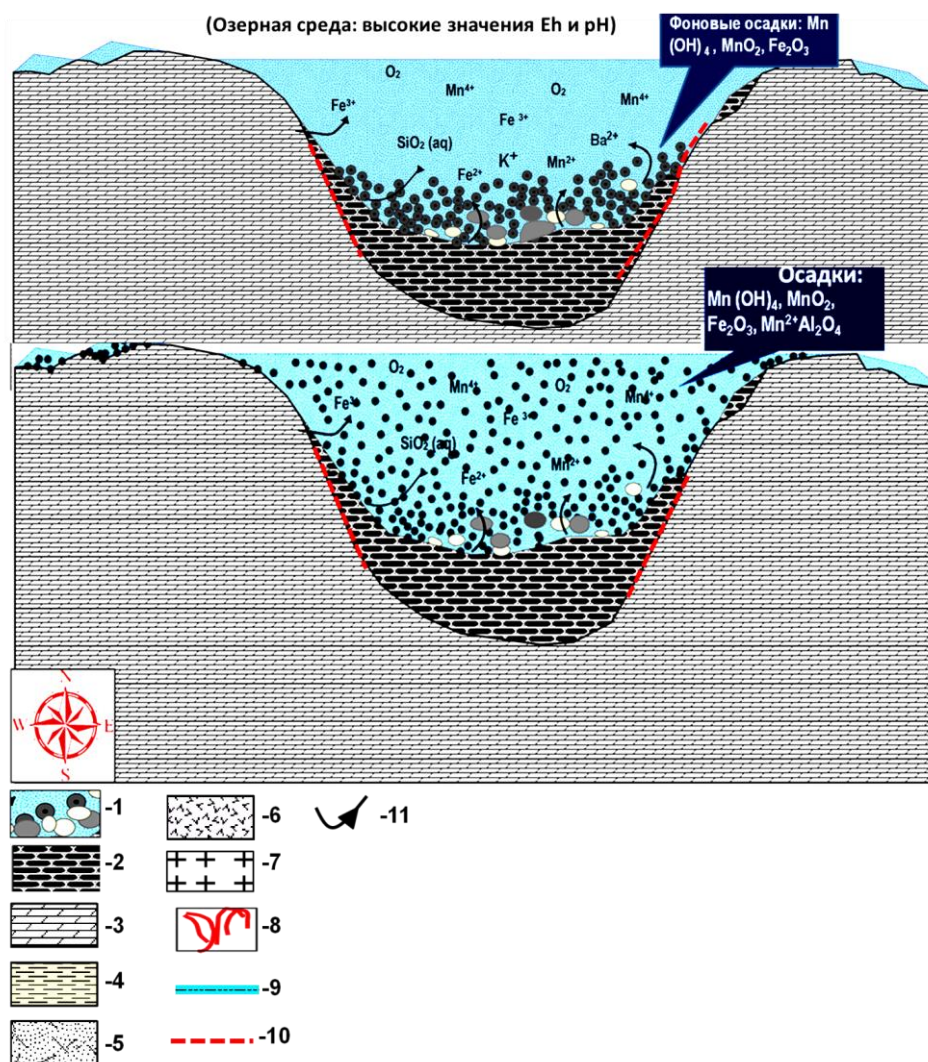


Рисунок 5.5 - Модель образования Северо-Западного рудопроявления марганца; где: 1 - марганцевые конкреции (N_1), 2 - марганцевый вад ($K_2??$), 3 - неоархейские Мальманийские доломиты (Ar_2), 4 - черный углистый сланец ($??$), 5 - кварцит серии Черного Рифа (Ar_1), 6 - базальтовые лавы Вентерсдорпа (Ar_1), 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

5.3 Перспективы промышленного освоения марганцевой руды рудопроявления Северо-Западное

На стадии разведки месторождений полезных ископаемых одной из главных задач является обеспечение представительности опробования для корректного определения содержаний полезного компонента. Эта задача обычно выполняется опробованием по рациональной геологоразведочной сети. На площади исследования рудопроявления марганца Северо-Западное была запроектирована прямоугольная разведочная сеть (200 x 150 м) из 70 разведочных шурфов (рисунок 5.6) с целью оценки промышленного потенциала Северо-Западного рудопроявления. Данные опробования в дальнейшем использовались для подсчета ресурсов марганцевой руды с помощью компьютерной программы моделирования (Micromine 2020). Характерной особенностью распределения мощностей рудного вещества на площади рудопроявления является отчетливая приуроченность наибольших из них к субширотной зоне активизации карстового процесса. Известно, что процесс карстообразования активнее развивается в существенно карбонатных толщах. По этой причине можно утверждать, что на участке Северо-Западного рудопроявления, в доломитах Мальмани граница фациальных изменений при осаждении карбонатов имеет субширотное простирание, так как именно в этом направлении возникла цепочка карстовых воронок, определяющая положение наибольших мощностей марганцевой руды. На рисунке 5.6 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.

Компьютерное моделирование месторождений полезных ископаемых с использованием статистических и геостатистических методов более точно отражает пространственные закономерности распределения широкого комплекса параметров оруденения [1]. 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.

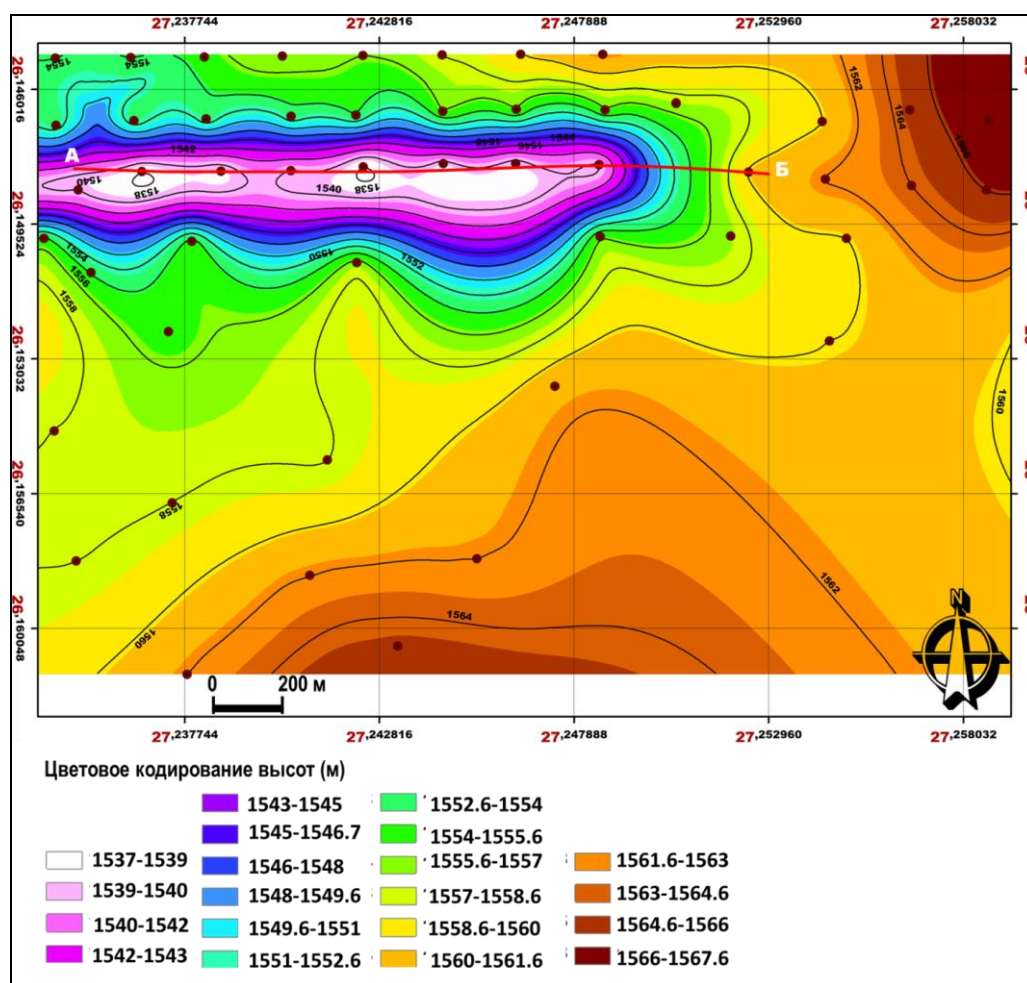


Рисунок 5.6 - Схема размещения геологоразведочных выработок (шурфов) на гипсометрической карте Северо-Западного рудопроявления.

Моделирование геологического объекта с помощью компьютерной технологии включает в себя ряд этапов. Прежде всего, необходимо было создать базу геологоразведочных данных. Типичная база данных по шурфам и скважинам

включает в себя: каталог координат устьев скважин или шурфов, геологическую информацию о породах, инклинометрию, интервалы опробования полезного компонента. После введения данных в компьютер был выполнен их статистический анализ, определены пространственные закономерности распределения полезного компонента в объеме рудопроявления, выполнена оценка природного бортового содержания марганца для геометризации оруденения, а также корреляционный анализ между рудными элементами для установления парагенетических ассоциаций между ними. В результате статистической обработки массива данных были построены гистограммы распределения рудных компонентов, корреляционные диаграммы, график кумулятивной частоты и вероятностный график (график Q-Q) содержания марганца (рисунок 5.7). Построенные диаграммы и графики позволили определить границы рудных тел путем определения бортового содержания, минимального и максимального содержаний в пределах рудопроявления (рисунок 5.7, таблица 5.1). Из кривой кумулятивной частоты и кривой вероятности также видно, что выборки распределены нормально и имеют четко выраженную правую асимметрию (рис. 5.7-б, в, г).

Таблица 5.1 - 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

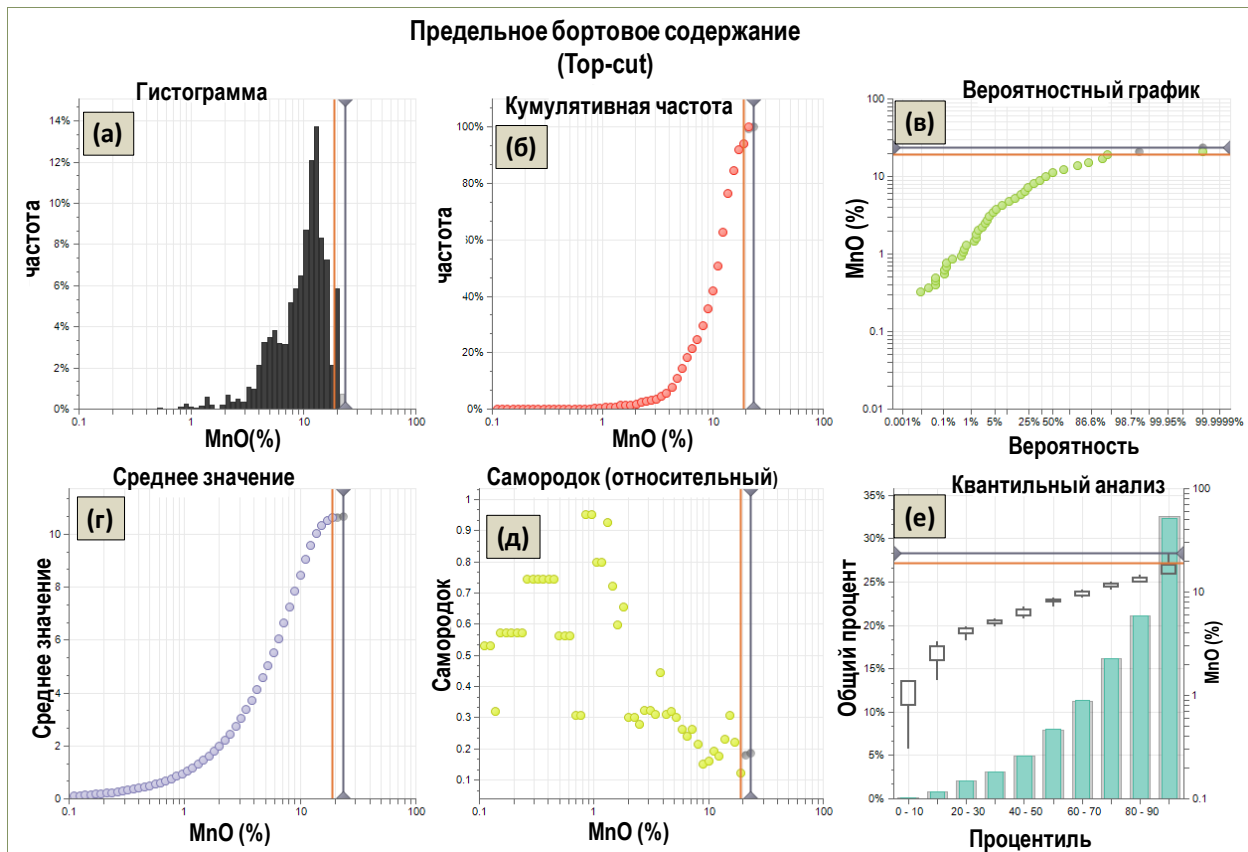


Рисунок 5.7 - Графики статистической обработки геологоразведочных данных (в логарифмическом масштабе)

Гистограмма распределения марганца, построенная при логнормальном распределении, показала бимодальность выборок (рисунок 5.7а). Здесь можно выделить две отдельные совокупности по содержаниям марганца: от 2 % до 6 % и более 7 %, а третья совокупность соответствует фоновому содержанию, бедной части рудного разреза, представленной верхней зоной (слои 5 и 6 на рисунке 5.9). Первая группа составов характеризует промежуточную часть руды между бедными и богатыми рудами. Вторая - представляет богатую часть рудного разреза, представленную марганцевым вадом и крупноконкреционной рудой. По абсолютным значениям содержаний марганца (рисунок 5.8) 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 5.9). Сравнивая эти графики, можно сделать вывод, что логарифмический масштаб позволяет четко выделять группу составов руд с низкими, некондиционными содержаниями марганца.

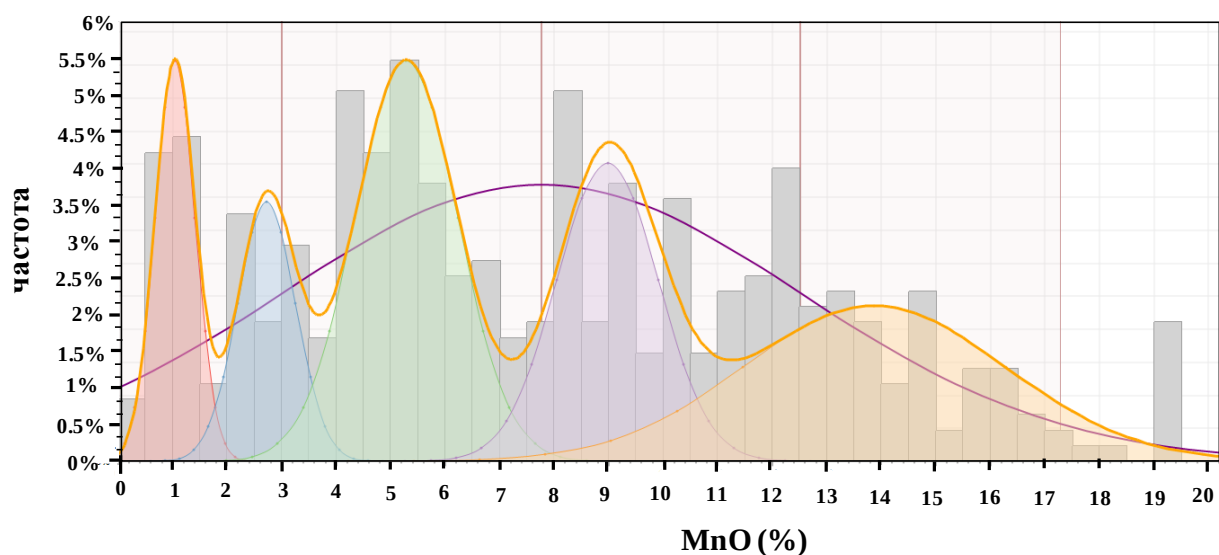


Рисунок 5.8 - Гистограмма, показывающая распределение содержания марганца

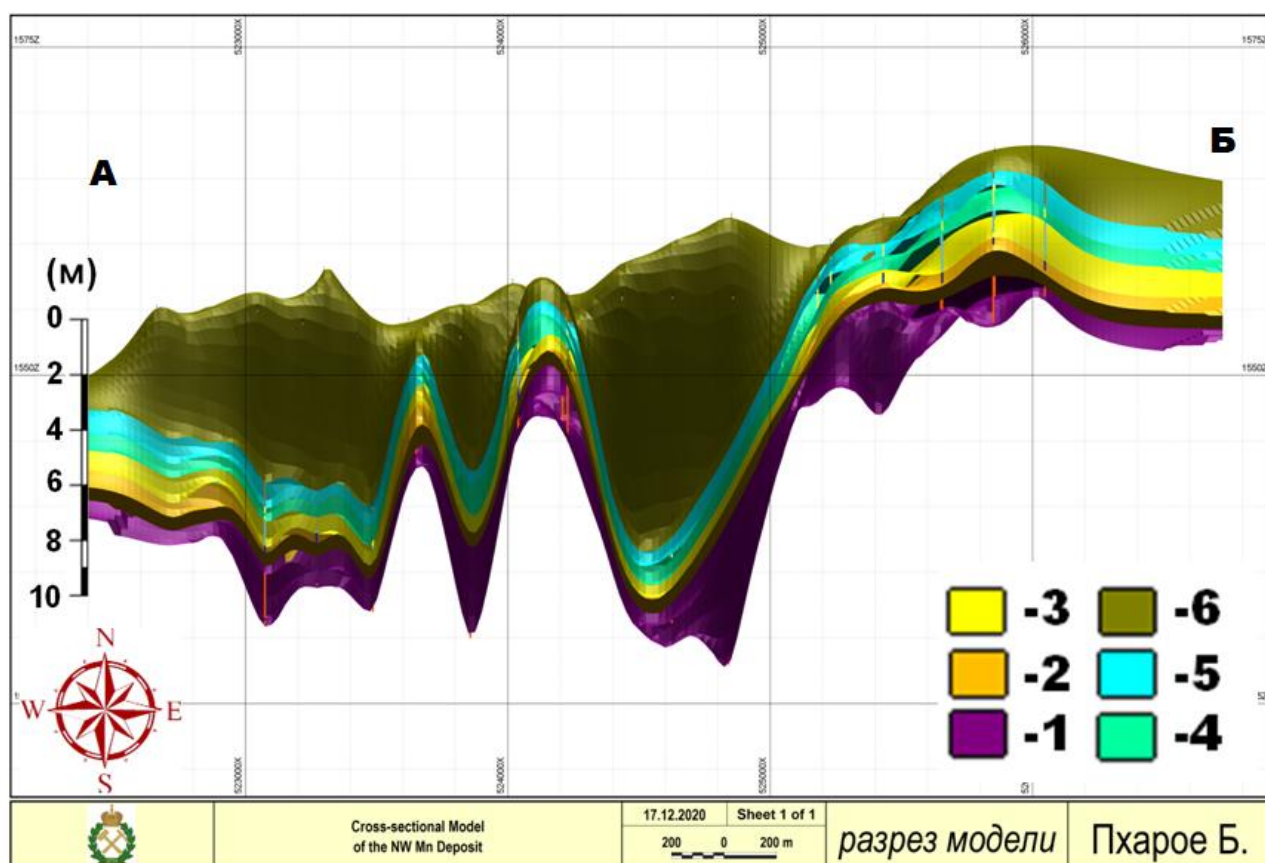


Рисунок 5.9 - Геологический разрез Северо-Западного марганцевого рудопроявления по линии А-Б на рисунках 5.6 и 5.11. 1 - марганцевый вад; 2 - крупнокнреционные марганцевые руды с прослоями калькретов; 3 - крупно- и среднеконкреционные марганцевые руды; 4-среднеконкреционные марганцевые руды; 5 - средне-мелконкреционные марганцевые руды; 6 - мелконкреционные марганцевые руды

В соответствии с международными стандартами классификации ресурсов и запасов месторождений полезных ископаемых они подразделяются на категории. Каждая из категорий определяется набором требований к разведке месторождения, к степени изученности качества руд, к технологии их переработки. Таким образом, оценка ресурсов сочетает в себе геологическую и экономическую части. Нами был применен метод индикаторного крикинга для классификации ресурсов рудопроявления марганца Северо-Западное (таблица 5.2). Подсчет количества полезного компонента в каждом блоке был произведен с использованием критериев поиска окрестностей на основе 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 (рисунок 5.10), 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 5.11).

Основными параметрами дисперсии, определяющими степень отклонения значений случайной величины от ее математического ожидания, являются межквартильный размах (5.1), стандартное отклонение (5.2), дисперсия и коэффициент вариации (5.3) (таблица 5.1).

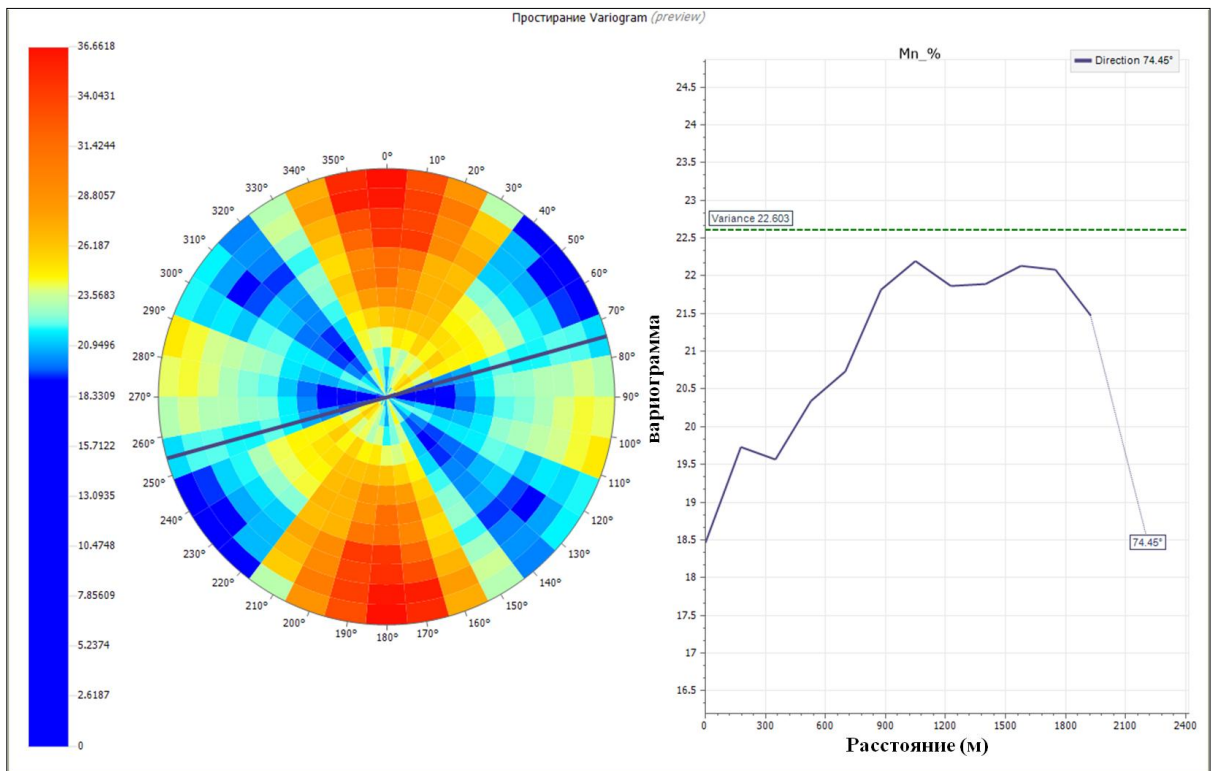


Рисунок 5.10 - Карта индикаторной вариограммы, показывающая непрерывность сорта в шурфе

$$IQR = Q_3 - Q_1, \quad (5.1)$$

где: IQR - межквартильный размах; Q_3 - третий квартиль (75%); Q_1 - первый квартиль (25%).

$$S = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{n - 1}, \quad (5.2)$$

где: S - стандартное отклонение; x_i - значение i -й точки в наборе данных; $\bar{x}$ - среднее значение набора данных; n - количество точек данных в наборе данных.

$$Cv = \frac{S}{\bar{x}}, \quad (5.3)$$

где: Cv - коэффициент вариации; S - стандартное отклонение; $\bar{x}$ - среднее значение набора данных.

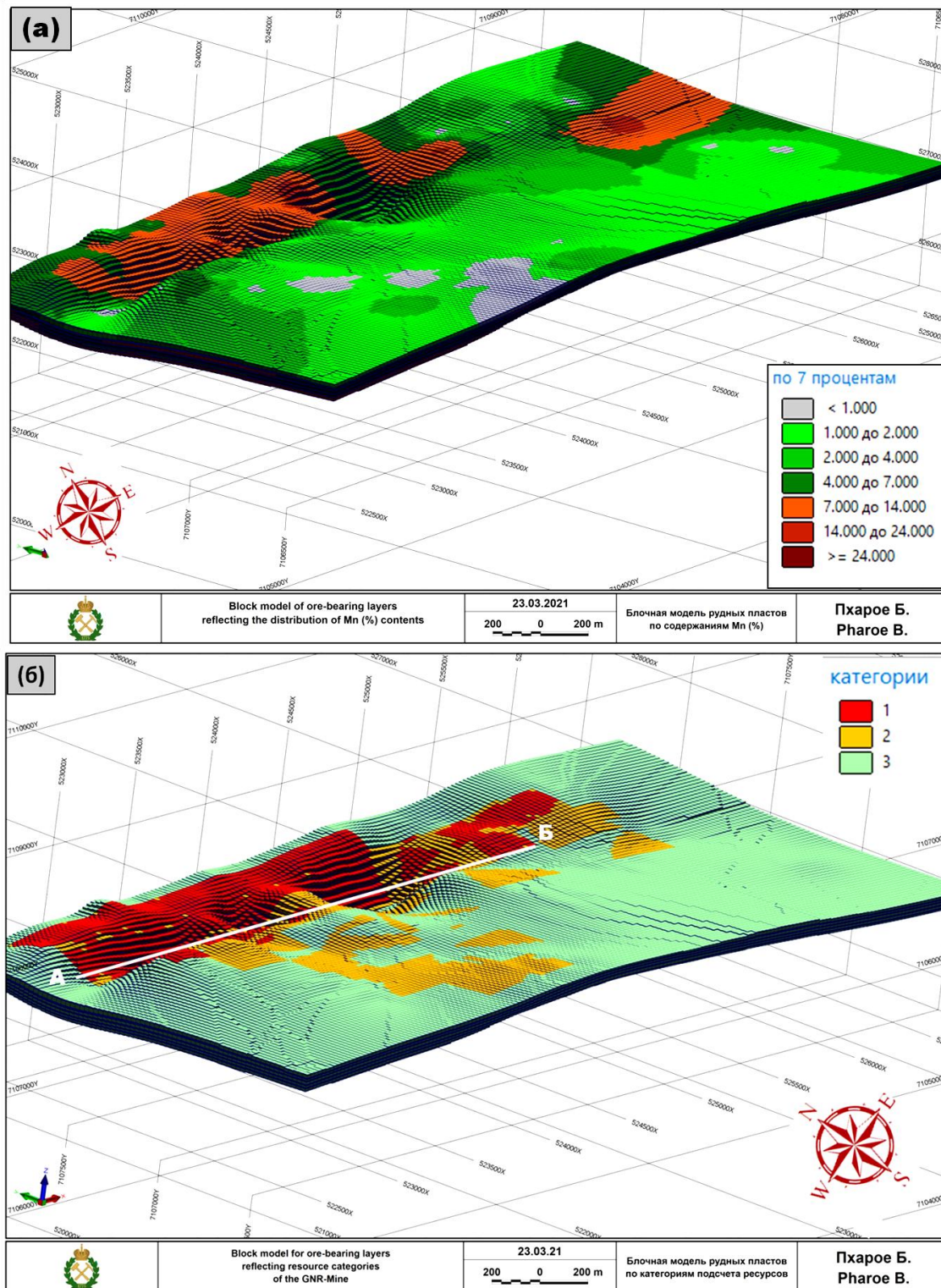


Рисунок 5.11 - Блочная модель ресурсов Северо-Западного рудопоявления (а) по содержаниям марганца и (б) по категории ресурсов. Где: 1 - оцененные ресурсы (P_1) 2 - выявленные ресурсы (P_2), 3 - предполагаемые ресурсы (P_3)

Блочное моделирование состоит из нескольких стадий: 1 - создание пустой блочной модели в пределах рудных зон, 2 - интерполяция содержаний полезных и вредных компонентов, 3 - заполнение блочной модели объёмной плотностью и содержанием полезного компонента.

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 (рисунок 5.11). Оба метода были применены для интерполяции содержаний Mn в рудопроявлении Северо-Западное. Первоначально был проведен геостатистический анализ и на основе преобразованных индикаторных переменных получены наборы медианных индикаторных вариограммных моделей которые отражают закономерности пространственной вариации (5.4).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \{Z(x_i) - Z(x_i + h)\}^2, \quad (5.4)$$

где - $\gamma(h)$ - экспериментальное значение вариограммы на расстоянии h , $N(h)$ - число пар выборок в пределах расстояния h ; $Z(x_i)$, $Z(x_i + h)$ - значения выборок в двух точках, разделенных расстоянием h .

По результатам блочного моделирования Северо-Западного рудопроявления марганца были подсчитаны ресурсы руды по средним содержаниям марганца в БМ, полученным в результате интерполяции методами обратных расстояний (ОР) и обычного кригинга (ОК). В таблице 5.2 показаны категории ресурсов рудопроявления.

Таблица 5.2 - Ресурсы марганца Северо-Западного рудопроявления

Категории	Руда, Mn (млн.т)
Оцененные (Measured) P_1	30,9
Выявленные (Indicated) P_2	39,9
Предполагаемые (Inferred) P_3	73,5
Всего	144,3

5.4 Выводы по 5 главе

В итоге следует заключить, что:

1. Индикаторные свойства редкоземельных и микроэлементов в марганцевых конкрециях и ваде Северо-Западного марганцевого рудопроявления позволили восстановить последовательность формирования залежей марганцевой руды в пределах рудопроявления Северо-Западное. Фактические данные, полученные на основе анализа представительного объема опробования, изучения образцов, данных сканирующей электронной микроскопии, рентгенофлуоресцентной спектрометрии и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой позволили обосновать генетическую модель многофакторного процесса марганцевого рудогенеза в Северо-Западной провинции Южно-Африканской Республики.

2. Применение компьютерной технологии и геостатистического моделирования позволило нам в соответствии с приказом МПР России от 11.12.2006 № 278 классифицировать Северо-Западное рудопроявление марганца. По экономическому значению оно может считаться балансовым. На основе полученных блочных моделей рудных тел и применения интерполяционных методов обратного взвешивания расстояния и индикаторного кригинга была проведена геометризация и подсчет ресурсов отдельных промышленных сортов руд с учетом их объемного веса и других параметров, которые могут оказывать влияние на свойства окончательного продукта.

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 потенциала промышленного освоения Северо-Западного рудопоявления марганца в ЮАР. Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Установлено, что первичное накопление марганца происходило в неоархее в мелководном эпиконтинентальном морском бассейне, где накапливались марганценозные 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 доломитовая толща неоархейских Мальманийских доломитов в условиях эпиконтинентального морского бассейна, который был обогащен рудным веществом, поступавшим из гидротермальных флюидов, извергавшихся в период предшествовавшего Вентерсдорпского вулканического события (2,7 млрд. лет). Не исключена вероятность поступление рудных веществ за счет эрозии близлежащей континентальной суши. В течение последующего регрессивно-трансгрессивного цикла Мальманийские карбонатные отложения отлагались (рисунок 5.5, этап 1-б)

в типичном открытом Трансваальском эпиконтинентальном море, которое покрывало большую часть северного и западного флангов Каапваальского кратона.

– В позднем мелу и среднем кайнозое были зафиксированы два события поднятия и эрозии постафриканской поверхности суши, которые привели к денудации Мальманийских доломитов и прослоев углистых сланцев. Эти события повлияли на особенности спектра редкоземельных элементов (рисунок 5.1) с отрицательной аномалией по содержанию Се и положительной – по концентрации У. Геологическое подтверждение основано на документации глинистых прослоев в марганцевом ваде.

– Отступление уровня моря в неогеновый период привело к образованию озерных отложений, к 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 растворения и выщелачивания марганценосных 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+} . Это такие минералы, как криптомелан ($K^+[Mn^{4+}_6Mn^{3+}_2]_8O_{16}$), голландит ($Ba^{2+}[Mn^{4+}_6Mn^{3+}_2]_8O_{16}$), романехит $((Ba,H_2O)_2[Mn^{4+}, Mn^{3+}]_5O_{10})$, пиролюзит ($\alpha-MnO_2$), манганит $MnO(OH)$, вернадит $(Mn^{4+}, Fe^{3+}, Ca, Na)(O,OH)_2 \cdot nH_2O$ и впервые здесь обнаруженный – литиофорит $((Al, Li)Mn^{4+}_2O_2(OH)_2)$. Все они формировались из коллоидных частиц в окислительных условиях в виде агрегатных срастаний вокруг обломков пород.

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. Объем руды составил 36,9 млн. м³, а ресурсы - 144 млн. тонн, что в соответствии с принятой в России градации марганцевых месторождений, позволяет отнести Северо-Западное рудопроявление марганца к категории месторождений 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Апухтина, И.В. Совершенствование методики оценки запасов месторождений железистых кварцитов на основе трехмерного компьютерного моделирования: специальность 25.00.11 автореферат диссертации канд. геолог-минер. наук: / Апухтина Ирина Викторовна; Санкт-Петербургский Государственный горный университет.- СПб., 2008. - 21 с.
2. Борзых, О.С. Геолого-экономическая переоценка марганцеворудных объектов южной Сибири в целях создания ферросплавного производства: специальность 25.00.11 диссертации канд. геолог-минер. наук: / Борзых О. С. ; - Москва, -2012. -22 с.
3. Варенцов, И.М. О главнейших марганценосных формациях//Осадочные руды железа и марганца. Тр.ГИН АН ССР. -1962. Вып. 70. - С. 119-173.
4. Гаврилов, А. А. Эксгальационно-осадочное рудонакопление марганца. М.: Недра, -1972. -215 с.
5. Кулешов, В.Н. Месторождения марганца. Сообщение 1. Генетические модели марганцевого рудогенеза//Литология и полезные ископаемые. -2011а. - №5. - С.527-550.
6. Кулешов, В.Н. Месторождения марганца. Сообщение 2. Главнейшие эпохи и фазы накопления марганца в истории земли//Литология и полезные ископаемые. -2011б. -№ 6. - С. 612-634.
7. Кулешов, В.Н. Марганцевые породы и руды: геохимия изотопов, генезис, эволюция рудогенеза/Отв.ред. М.А. Федонкин. –М.: Научный мир. -2013. -508 с.
8. Мигдисов, А. А. О соотношении титана и алюминия в осадочных породах. Геохимия, -1960. -№ 2. - С. 149-163.
9. Павлов, Д. И. Связь осадочных месторождений железа и марганца с нефтегазоносными бассейнами//Геология рудных месторождений. -1989. -№ 2. - С. 80-91.

10. Парагенезис металлов и нефти в осадочных толщах нефтегазоносных бассейнов./ Под ред. Горжевского Д.И., Павлова Д.И. М.: Недра, -1990. - 269 с.
11. Пхарое, Б. Состав и реконструкция источников сноса терригенных отложений на северо-западе ЮАР/Пхарое, Б., Евдокимов, А.Н// Геология и геофизика Юга России. -2020. –Т. 10. -№ 4. - С. 124-149.
12. Евдокимов, А.Н. Особенности минерального и химического составов Северо-Западного рудопроявления марганца в районе Хайфельда, ЮАР/ Евдокимов, А.Н., Пхарое, Б //Записки Горного Института. -2021. –Т. 248. - С. 1-14.
13. Евдокимов, А.Н. Индикаторная роль редкоземельных и микроэлементов Северо-Западного рудопроявления марганца (ЮАР) в генетической модели гипергенных марганцевых месторождений/ Евдокимов, А.Н., Пхарое, Б//Записки Горного Института. -2021. –Т. 250.
14. Салихов, Д.Н. Полезные ископаемые республики Башкортостан (марганцевые руды)/ Салихов, Д.Н., Ковалев, С.Г., Брусницын, А.И., Беликова, Г.И., Бердников, П.Г., Сергеева, Е.А., Семкова, Т.А// Уфа: изд-во «Экология». - 2002. -242 с.
15. Синяков, В.И. Геолого-промышленные типы рудных месторождений. –СПб.: Недра. -1994. -248 с.
16. Холодов, В.Н. Осадочные бассейны, закономерности их формирования и принципы классификации. Сообщение 2. Осадочные породные бассейны// Литология и полезные ископаемые. -2010. -№ 3. - С. 268-308.
17. Цыкин, Р.А. Гипергенные марганцевые руды Центральной Сибири. Сибирский федеральный университет. - 2008. - С. 3-14.
18. Шарков, А.А. Марганцевые руды// Методические рекомендации по оценке прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. - М.: ВИМС. -2003. - 84 с.
19. Шевцов, А.З. О необходимости создания сырьевой базы марганца/ Шевцов, А.З., Навиков, А.А// Материалы первой научно-технической конференции по проблеме «Состояние марганцеворудной базы России и вопросы

обеспечения промышленности марганцем». Сборник докладов. Екатеринбург:, ОАО «Уральский институт металлов», ОАО «Российский марганец». -2000. - С. 26-31.

20. Шутов, В.Д. Граувакки. Труды ГИН АН СССР, вып. 238. М., «Наука», -1972. -375 с.

21. Юдович, Я.Э., Кетрис, М.П. Основы литохимии. Санкт-Петербург: Наука, -2000. -479 с.

22. Юдович, Я. Э. Основные закономерности геохимии марганца. – Сыктывкар/ и Юдович Я. Э., Кетрис М. П // Коми НЦ УрО РАН. - 2013. -40с.

23. Яковлев, П.Д. Промышленные типы рудных месторождений. Учебное пособие для вузов. – М.: Недра. -1986. -358с.

24. Achurra, L.E. Manganese nodules in the Miocene Bahia Inglesa Formation, north-central Chile: Petrography, geochemistry, genesis and palaeoceanographic significance/ Achurra, L.E., Lacassie, J.P., Le Roux, J.P., Marquardt, C., Belmar, M., Ruiz-del-Solar, J. and Ishman, S.E//Sedimentary geology. 2009. -Vol. 217. - P. 128-139.

25. Altermann, W. Thrusting, folding, and stratigraphy of the Ghaap Group along the south-western margin of the Kaapvaal Craton// South African Journal of Geology. -1990. –Vol. 93. - P. 556-616.

26. Altermann, W. Structural history of the southwestern corner of the Kaapvaal craton and adjacent Namaqua realm: new observations and a reappraisal// Precambrian Research. -1991. –Vol. 52. - P.133-166.

27. Arachchi, L.P.V. Mineralogical characteristics and micromorphological observations of brittle/soft Fe/Mn concretions from Okinanwan soils/ Arachchi, L.P.V., Tokashiki, Y., Baba, S// Clays and Clay Minerals. -2004. –Vol. 52. -№ 4. - P. 462-472.

28. Astrup, J. Manganese/ In Wilson, M.J., Anhaeusser, C.R. (eds)// Mineral Resources of Southern Africa- Pretoria, South Africa/ Astrup, J., Tsikos, H//Council for Geoscience, Handbook 16. -1998. - P. 450-460.

29. Bau, M. Comparison of the partitioning behaviours of yttrium, rare earth elements, and titanium between hydrogenetic marine ferromanganese crusts and

seawater/ Bau, M., Koschinsky, A., Dulski, P., Hein, J.R// *Geochimica et Cosmochimica Acta*. -1996. -Vol. 60. - P.1709–1725.

30. Bau, M. Distribution of yttrium and rare-earth elements in the Penge and Kuruman iron-formations, Transvaal Supergroup, South Africa/ Bau, M., Dulski, P//*Precambrian Research*. -1996. -Vol.79. - P. 37–55.

31. Bau, M. Discriminating between different genetic types of marine ferromanganese crusts and nodules based on rare earth elements and yttrium / Bau, M., Schindt, K., Koschinsky, A., Hein, J., Kuhn, T. and Usui, A. // *Chemical Geology*. - 2014. -Vol. 381. - P. 1-9.

32. Beukes, N.J. Palaeoenvironmental setting of iron formations in the depositional basin of the Transvaal Supergroup, South Africa. In: Trendall, A.F., Morris, R.C. (eds): *Iron formations: Facts and problems*// Elsevier-Amsterdam.-1983. - P. 131-209.

33. Beukes, N.J. Facies relations, depositional environments and diagenesis in a major early Proterozoic stromatolitic carbonate platform to basinal sequence, Campbellrand Subgroup, Transvaal Supergroup, South Africa// *Sedimentary Geology*. - 1987a. –Vol. 54. - P. 1-46.

34. Beukes, N.J. New evidence for thrust faulting in Griqualand West, South Africa: implications for stratigraphy and the age of red beds/ Beukes, N.J., Smit, C.A// *South African Journal of Geology*. – 1987b. –Vol. 90. - P. 378-394.

35. Beukes, N.J. A volcanic-exhalative origin for the world's largest (Kalahari) manganese field: A discussion of a paper by D.H. Cornell and S.S Schütte/ Beukes, N.J., Gutzmer, J// *Mineral Deposita*. -1996. –Vol. 31. - P. 342-345.

36. Beukes, N.J. Palaeoproterozoic laterites, supergene iron and manganese ores and atmospheric oxygen/ Beukes, N.J., Gutzmer, J., Dorland, H// *Geological Society of Australia Abstracts*. -1999a. -№ 56. - P.7A-7D.

37. Beukes, N.J. Post Gondwana African land surfaces and pedogenetic ferromanganese deposits on the Witwatersrand at the West Wits Gold Mine, South Africa/Beukes, N.J., Van Niekerk, H., Gutzmer, J// *South African Journal of Geology*. - 1999b. -Vol. 102. -№ 2. - P. 65-82.

38. Beukes, N.J. Manganese deposits of Africa / Beukes, N.J., Swindell, E.W and Wabou, H// Episodes Journal of International Geosciences (IUGS). -2016. -Vol. 39. - P. 285-317.
39. Boardman, L.G. The Black Rock manganese deposit in the south eastern Kalahari// Transactions of the Geological Society of South Africa. -1941. –Vol. 44. - P. 51-60.
40. Boardman, L.G. Further geological data on the Postmasburg and Kuruman manganese ore deposits, Northern Cape Province/ In: Haughton, S.H. (ed): Geology of some ore deposits in Southern Africa// Geological Society of S. Africa. -1964. - P. 415-440.
41. Bonatti, E. Classification and genesis of submarine iron manganese deposits. In: Horn, D.R., (Editor), Ferromanganese Deposits of the Ocean Floor/ Bonatti, E., Kraemer, T., Rydell, H// Harriman, Aren House. -1972. P. 473–489.
42. Buchholz, Z. Investor's and procurement guide South Africa Part 3: Manganese, Vanadium, Zinc/ Buchholz, Z., Foya, S// DERA Rohstoffinformation. - 2017. -Vol. 33. -72 p.
43. Button, A. The stratigraphic history of the Malmani Dolomite in the eastern and north-eastern Transvaal// Geological Society of South Africa, Transvaal. -1973. - Vol. 76. - P. 230-247.
44. Button, A. Geochemistry of the Malmani Dolomite of the Transvaal Supergroup in the Northeastern Transvaal// Economic Geology Research Unit University of Witwatersrand. -1975. -№.97. - P.1-21.
45. Burke, K. Is the Ventersdorp Rift System of Southern Africa related to a continental collision between the Kaapvaal and Zimbabwe Cratons at 2.64 Ga ago?/ Burke, V., Kidd, W.S., Kusky, T.//Tectonophysics. -1985. –Vol. 115. - P. 1-24.
46. Burke, K. The African erosion surface: a continental-scale synthesis of geomorphology, tectonics, and environmental change over the past 180 million years/ Burke, K., Gunnell, Y // Memoir of the Geological Society of America. -2008. -Vol. 201, - 66 p.

47. BGR-Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Fachinformationssystem Rohstoffe. -2016. -20p.- URL: <https://www.bgr.bund.de/DE/Home> (22.06.2020).

48. Cheney, E.S. Sequence stratigraphy and plate tectonic significance of the Transvaal succession of southern Africa and its equivalent in Western Australia// Precambrian Research. -1996. –Vol. 79. - P. 3-24.

49. Coetzee, L. Genetic stratigraphy of the Palaeoproterozoic Pretoria Group in the western Transvaal: (Master diss.) University of Johannesburg/ Coetzee, L – Johannesburg. - 2001. -184 p.

50. De Bakker, A.P. Mineralogy of Akinawan terrestrial Fe/Mn nodules and their surrounding soils/ De Bakker, A.P., Tokashiki, Y., Arachchi// Clay Science. -2003. –Vol. 12. - P. 121-130.

51. Dickinson, W.R. Provenance of Northern American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting/Dickinson, W.R., Beard, L.S., Brackenridge, G.R., Evjavec, J.L., Ferguson, R.C., Inman, K.F., Knepp, R.A., Linberg, F.A., Ryberg, P.T// Geo. Soc. of Amer. Bulletin. -1983. –Vol. 94. - P. 222-235.

52. Dickinson, W.R. Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones. In: Zuffa G.G. (Eds) Provenance of Arenites// Springer, Dordrecht. -1985. – Vol. 148. -112 p.

53. Del Rio Salas, R. Geology, Geochemistry and Re-Os systematics of manganese deposits from the Santa Rosalia Basin and adjacent area in Baja California Sur, Mexico/ Del Rio Salas, R., Ruiz, J., Ochoa-Landin, L., Noriega, O., Barra, F., Meza-Figueroa, D., Paz-Moreno, F//Mineralium Deposita. -2008. -Vol. 43. - P. 467-482.

54. De Putter, T. The age of supergene manganese deposits in Katanga and its implications for the Neogene evolution of the African Great Lakes Region/ Putter, T., Ruffet, G., Yans, J., Mees, F//Ore Geology Reviews. -2015. -Vol. 71. - P. 350-362.

55. De Villiers, J. The manganese deposits of the Union of South Africa: Pretoria// *Geological Survey of South Africa Handbook 2*. - 1960. -263p.

56. De Villiers, R.P. The geology and mineralogy of the Kalahari Manganese Field north of Sishen, Cape Province// Geological Survey of South Africa «Memior». - 1970. -№ 59. -84 p.
57. De Villiers, J. The manganese deposits of Griqualand West, South Africa: Some mineralogic aspects// Economic Geology. -1983. –Vol. 78. - P. 1108-1118.
58. Dorland, H.C. Paleoproterozoic laterites, red beds and ironstones of the Pretoria Group with reference to the history of atmospheric oxygen: (Master diss.) University of Johannesburg/Dorland, H.C.-Johannesburg. -1999. -155 p.
59. Els, B.G. The Black Reef Quartzite Formation in the western Transvaal: Sedimentological and economic aspects, and significance for basin evolution/ Els, B.G., van den Berg, W.A., Mayer, J.J//Mineral Deposita. -1995. –Vol. 30. - P. 112-123.
60. Eriksson, K. Cyclic sedimentation in the Malmani Dolomite, Potchefstroom Synclinorium// Geological Society of South Africa. -1972. -Vol. 75. -№ 2. - P. 85-97.
61. Eriksson, P.G. The sedimentary and tectonic setting of the Transvaal Supergroup floor rocks to the Bushveld complex/ Eriksson, P.G., Reczko, F.F// Journal of African Earth Sciences. – 1995. –Vol. 21. -№ 4. - P. 487-504.
62. Eriksson, P.G. Major influences on the evolution of the 2.67-21 Ga Transvaal Basin, Kaapvaal Craton/Eriksson, P.G., Altermann, W., Catuneanu, O., van der Merwe, R., Bumby, A.J// Sedimentary Geology. -2001. -Vol. 141. - P. 205-231.
63. Eroglu, S. Geochemical stratigraphy, sedimentology, and Mo isotope systematic of the ca. 2.58-2.50 Ga –old Transvaal Supergroup carbonate platform, South Africa/Eroglu, S., Schoenberg, R., Wille, M., Beukes, N.J// Precambrian Research. -2015. –Vol. 266. - P. 27-46.
64. Fairey, J. The Role of Hydrothermal Activity in the Formation of Karst-Hosted Manganese Deposits of the Postmasburg Mn Field, Northern Cape Province, South Africa/ Fairey, J., Timmerman, J., Sudo, M., Tsikos, H// Minerals. -2019. -Vol. 9. - P. 1-28.

65. Franchi, F. Evolution of an Archaean intracratonic basin: A review of the Transvaal Supergroup lithostratigraphy in Botswana/ Franch, F., Mapeo, R//Earth-Science Reviews. -2019. -Vol. 191. - P. 273-290.
66. Frankel, J. Manganese ores of the Kuruman District, Cape Province, South Africa// Economic Geology. -1958. –Vol. 53. -577 p.
67. Frimmel, H.E. A giant Mesoarchean crustal gold-enrichment episode: possible causes and consequences for exploration. In: Kelley K, Golden, HC (Eds.), Building exploration capability for the 21st Century//Society of Economic Geologists: Special Publication.-2014. –Vol. 18. - P. 209–234.
68. Garnit, H. Manganese ores in Tunisia: Genetic constraints from trace element geochemistry and mineralogy/ Garnit, H., Kraemer, D., Bouhlef, S., Davoli, M., Barca, M// Ore Geology Reviews. -2020. -Vol. 120. - A. 103451.
69. Grobbelaar, W.S. The Bishop and Glossman manganese mines and Beeshoek iron ore mine of the Postmasburg area. In: Annhaeusser, C.R. and Maske, S. (eds): Mineral deposits of Southern Africa/Grobbelaar, W.S., Beukes, N.J// Geological Society of South Africa-Johannesburg. -1986. - P. 957-961.
70. Grobbelaar, W. Stratigraphy and structural setting of the Griqualand West and the Olifantshoek Sequences at Black Rock, Beeshoek and Rooinekke mines, Griqualand West, South Africa/ Grobbelaar, W., Burger, M.A., Pretorius, A., Marais, W., Van Niekerk, I// Mineral Deposits. -1995. –Vol. 30. - P. 152-161.
71. Grohmann, W.S. Manganese. South Africa's Mineral industry 1994/1995// Minerals Bureau, Department of Mineral and Energy Affairs. -1995. - P. 108-111.
72. Gutzmer, J. Karst control of the Ryedale Fe-Mn deposit in the Palaeozoic Karoo Supergroup, Western Transvaal, South Africa: Berichte der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft, Beiheft zum/ Gutzmer, J., Beukes, N.J // European. J. Mineralogy. -1994. -Vol. 6. -333 p.
73. Gutzmer, J. Genesis and alteration of the Kalahari and Postmasburg manganese deposits, Griqualand West, South Africa: (PhD diss.) University of Johannesburg/ Gutzmer, J. – Johannesburg. -1996. -490 p.

74. Gutzmer, J. Mineral paragenesis of the Kalahari Manganese Field, South Africa/Gutzmer, J., Beukes, N.J//Ore Geology Reviews. -1996. –Vol. 11. - P. 405-428.
75. GTIS-Global Trade Information System Inc. Global Trade Atlas/Commercial database. -2016. -URL: <https://www.gtis.com/gta>.(21.06.2021).
76. Hawker, L.C. Weathering sequence and alteration products in the genesis of the Graskop manganese residua, Republic of South Africa/ Hawker, L.C., Thompson, J.G// Clays and Clay Minerals. -1988. –Vol. 36. -№ 5. - P. 448-454.
77. Hein, R. Critical metals in manganese nodules from the Cook Islands EEZ, abundances and distributions/ Hein, R., Spinardi, F., Okamoto, N., Mizell, K., Thorburn, D., Tawake, A// Ore Geology Reviews. -2015. –Vol. 68. - P. 97-116.
78. Heshmatbehzadi, K. Metallogeny of manganese and ferromanganese ores in Baft Ophiolitic Mélange, Kerman, Iran/Heshmatbehzadi, K., Shahabpour, J// Australian Journal of Basic and Applied Sciences. -2010. -Vol. 4. -№ 2. - P. 302-313.
79. International Manganese Institute (IMnI). IMnI Annual Review 2020// International Manganese Institute. – 2020. -21 p.
80. Jafarzadeh, M. Petrography and geochemistry of Ahwaz Sandstone Member of Asmari Formation, Zagros, Iran: implications on provenance and tectonic setting/ Jafarzadeh, M and Hosseini-Barzi, M// Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. -2008. –Vol. 25. -№ 2. - P. 247-260.
81. Josso, P. A new Discrimination scheme for oceanic ferromanganese deposits using high field strength and rare earth elements/ Josso, P., Pelleter, E., Pourret, O., Fouquet, Y., Etoubleau, J., Cheron, S., Bollinger, C// Ore Geology Reviews. -2017. -Vol. 87. - P. 3-15.
82. Kleyenbuster, A.S. The mineralogy of the manganese bearing Hotazel Formation of the Proterozoic Transvaal Sequence in Griqualand West, South Africa// Transactions of the Geological Society of South Africa. -1984. –Vol. 87. -№ 3. - P. 257-272.
83. Knoll, A.H. Introduction: Initial investigations of the Neoproterozoic shelf margin-basin transition (Transvaal Supergroup, South Africa)/ Knoll, A.H., Beukes, N.J// Precambrian Research. -2009. –Vol. 169. - P. 1-14.

84. Kuleshov, V.N. Isotope geochemistry: The origin and formation of manganese rocks and ores//Elsevier Amsterdam-Natherlands. -2017. -437 p.
85. Kupferburger, W. New considerations concerning the manganese ore deposits in the Postmasburg and Kuruman areas, Northern Cape Province, Union of South Africa/ Kupferburger, W., Boardman, L.G., Bosch, P.R//International Geological Conference-Mexico. -1956. –Vol. 2. - P. 73-87.
86. Light, M.P. The Limpopo Mobile Belt: A result of continental collision//Tectonics. -1982. –Vol. 1. -№ 4. - P. 325-342.
87. Malinovsky, A.I. Lithochemistry of the Paleoisland-Arc Complexes in the Orogenic Belts of the Russian Far East/Malinovsky, A.I., Tuchkova, M.I//Russian Journ. Pacif. Geology. -2010. –Vol. 4. - P. 363-378.
88. McLennan, S.M. Sedimentary rocks and crustal evolution: Tectonic setting and secular trends/McLennan, S.M and Taylor, S.R //Journal of Geology. -1991. –Vol. 99. - P. 1-21.
89. Mero, J.L. Ocean-floor manganese nodules// Economic geology. – 1962. – Vol. 57. -№ 5. - P. 747-767.
90. Nath, B.B. Geochemical constraints on the hydrothermal origin of ferromanganese incrustations from the Rodriguez triple junction, Indian Ocean/ Nath, B.B., Pluger, W.L., Roelandts, I// Geological Society of London, Special Publication. - 1997. -Vol. 119. - P. 199–211.
91. Nel, C. The Mamatwan manganese mine of the Kalahari manganese Field. In: Annhaeusser, C.R., Maske, S., (eds), Mineral Deposits of Southern Africa/ Nel, C., Beukes, N., De Villiers, J// Geological Society of South Africa. -1986. -Vol. 1. - P. 963-978.
92. Nicholson, K. Manganese ores of the Ghoriajhor-Monmunda area, Sundergarh District, Orissa, India: geochemical evidence for a mixed Mn source/ Nicholson, K., Nayak, V.K. and Nanda, J.K //Geological Society of London, Special Publication. -1997. -Vol. 119. - P. 117–121.
93. Pack, A. Supergene ferromanganese wad deposits derived from Permian Karoo Strata along the late Cretaceous-mid-Tertiary African land surface, Ryedale,

South Africa/ Pack, A., Gutzmer, J., Beukes, N., Van Niekerk, H// *Economic Geology*. - 2000. -Vol. 95. - P. 203-220.

94. Partridge, T.C. Geomorphic evolution of Southern Africa since Mesozoic/ Partridge, T.C., Maud, R.R// *South African Journal of Geology*. -1987. -Vol. 90. - P. 197-208.

95. Pettijohn, F.J. Sand and Sand-stones/Pettijohn F.J., Potter P.E., Siever R// Springer, New York. -1972. -158 p.

96. Pettijohn, F.J. Sedimentary Rocks (Third edition)// Harper & Row, New York. – 1975. -628 p.

97. **Pharoe, B.K. Stratigraphy of the pedogenic manganese nodules in the Carletonville area, North West Province of South Africa: A case study of the General Nice Manganese Mine/ Pharoe, B.K., Liu, K// *Journal of African Earth Sciences*. -2018. Vol. 143. - P. 79-101.**

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

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

100. Rasmussen, B. A 1.25 Ga depositional age for the Paleoproterozoic Mapedi red beds, Kalahari Manganese Field, South Africa: New constraints on the timing of oxidative weathering and hematite mineralization/Rasmussen, B., Muhling, R.J., Jian-Wei Zi., Harilaos, T., Fischer, W//*Geology*. -2019. –Vol. 48. -6 p.

101. Rendall, S.M. An extended X-ray absorption fine structure spectroscopy investigation of cadmium sorption on cryptomelane ($\text{KMn}_8\text{O}_{16}$)/Rendall, S.M., Serman, D.M., Ragnarsdottir, K.V., 1998//*Chemical Geology*. -1998. –Vol. 151. - P. 95–106.

102. Roskill Information Services LTD. Manganese: Market Outlook to 2020, 13th Edition. -2015. -279 p. –URL:<https://investingnews.com> (28.06.2021).

103. Roy, S. Mineralogy of the different genetic types of manganese deposits// *Economic Geology*. -1968. –Vol. 63. - P. 760-786.
104. Schröder, S. Stratigraphy and geochemical framework of the Agouron drill cores, Transvaal Supergroup (Neoarchean-Paleoproterozoic, South Africa)/ Schröder, S., Lacassie, J.P., Beukes, N.J// *South African Journal of Geology*. -2006. –Vol. 109. - P.23-54.
105. Steenkamp, J.D. The manganese ferroalloys industry in southern Africa/Steenkamp, J.D., Basson, J// *Journal of S. African Inst. Mining and Metallurgy*. - 2013. –Vol. 113. - P. 667-676.
106. Sumner, Y. Sequence stratigraphic development of the Neoarchean Transvaal carbonate platform, Kaapvaal Craton, South Africa/ Sumner, Y., Beukes, N.J//*South African Journal of Geology*. -2006. –Vol. 109. - P. 11-22.
107. Sun, S. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes/ Sun, S., McDonough, W// *Geological Society of London*. -1989. -Vol. 42. - P. 313-345.
108. Suttner, L.J. Climate and the origin of quartz arenites/Suttner, L.J., Basu, A and Mack, G.M// *Journal of Sedimentary Petrology*. -1981. –Vol. 51. - P. 1235–1246.
109. Taylor, S.R. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*/ Taylor, S.R., McLennan, S.M //Blackwell Scientific, Boston, Mass. -1985. -312 p.
110. Tinker, J. Seismic Stratigraphic Constraints on Neoarchean - Paleoproterozoic Evolution of the Western Margin of the Kaapvaal Craton, South Africa/ Tinker, J., de Wit, M., Grotzinger, J//*South African Journal of Geology*. -2002. Vol. 105. - P. 107-134.
111. Toth, J. Deposition of submarine crusts rich in manganese and iron// *Geological Society of America Bulletin*. -1980. -Vol. 91. - P. 44–54.
112. Tyler, N. Stratigraphy, origin and correlation of the Kanye Volcanic Group in the West-central Transvaal// *Economic Geology Res. Unit – Witwatersrand University*. -1979. -130 p.

113. U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries – manganese//USGS. – 2016. -2 p. -URL: <https://www.usgs.gov/centers/nmic/mineral-commodity-summaries> (30.06.2020).

114. U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries – manganese//USGS. – 2021. -2p. -URL: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/mcs2021> (30.06.2020).

115. Vafeas, N. New evidence for the early onset of supergene alteration along the Kalahari unconformity/ Vafeas, N., Blignaut, L.C., Viljoen, K.S// South African Journal of Geology. -2018. -Vol. 121. - P. 157-170.

116. Van Niekerk, H.S. Post-Gondwana pedogenic ferromanganese deposits, ancient soil profiles, African land surfaces and palaeoclimate change on the Highveld of South Africa/ Van Niekerk, H.S., Beukes, N.J., Gutzmer, J// Journal of African Earth Sciences. -1999a. -Vol. 29. - P. 761-781.

117. Van Niekerk, H.S. An $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age of supergene K-Mn oxyhydroxides in post-Gondwana soil profile on the Highveld of South Africa/Van Niekerk, H.S., Gutzmer, J., Beukes, N., Phillips, D., Kiviets, G// South African Journal of Geology. - 1999b. –Vol 95. - P. 450-454.

118. Varentsov, I.M. Manganese Ores of Supergene Zone: Geochemistry of Formation// Springer, Dordrecht. -1996. -Vol. 8. -302 p.

119. Varentsov, I.M. Genesis of the Eastern Paratethys manganese ore giants: impact of events at Eocene/Oligocene boundary//Ore Geology Reviews. -2002. –Vol. 20. - P. 65-82.

120. Varga, A. Complex examination of the Upper Paleozoic siliciclastic rocks from southern Transdanubia, SW Hungary – Mineralogical, petrographic, and geochemical study. In: J. Arribas, M.J. Johnsson, S. Critelli (Eds.), Sedimentary Provenance and Petrogenesis: Perspectives from Petrography and Geochemistry/Varga A., Szakmány G., Árgyelán T., Józsa S., Raucsik B., Máthé Z// Geologic. Soc. of Amer. Spec. Papers. -2007. –Vol. 420. - P. 221–240.

121. Visser, N.J. The Ventersdorp Group between Taung and Britstown , Northern Cape Province/ Visser, N.J., Grobler, N.J., Joubert, C.W., Putgieter, C.D.,

Potgieter, G.J., McLaren, C.H., Liebenberg, J// Geological Surv. South Africa. -1976. – Vol. 11. - P. 15-28.

122. Weltje, G.J. Stratigraphic inversion of siliciclastic basin fills: a note on the distinction between supply signals resulting from tectonic and climatic forcing/Weltje, G.J., Meijer, X.D., De Boer., P.L//Basin Research. -1998. –Vol. 10. - P.129–153.

123. Zaid, S.M. Provenance, diagenesis, tectonic setting and geochemistry of Rudies (Lower Miocene), Warda Field, Gulf of Suez, Egypt//Journal of African Earth Sciences. -2012. –Vol. 66. - P. 56-71.