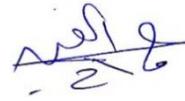


На правах рукописи



**ХАССАН МУСАБ АВАД АХМЕД**

**МИНЕРАЛИЗАЦИЯ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ (ЭЛЕМЕНТЫ  
ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ, ЗОЛОТО) В ОФИОЛИТОВОМ КОМПЛЕКСЕ  
КАЛА ЭН НАХАЛЬ-УММ САГАТА ОБРАМЛЕНИЯ АРАВИЙСКО-  
НУБИЙСКОГО ЩИТА  
(ГЕДАРЕФ, СУДАН)**

Специальность 1.6.10 – Гео логия, поиски и разведка твердых полезных  
ископаемых, минерагения.

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Москва, 2024

Работа выполнена на кафедре недропользования и нефтегазового дела инженерной академии Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» (РУДН).

**Научный руководитель:** **Котельников Александр Евгеньевич**  
кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры недропользования и нефтегазового дела инженерной академии Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» (РУДН).

**Официальные оппоненты:** **Савельев Дмитрий Евгеньевич**  
доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории рудных месторождений Института геологии – обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН)

**Чайка Иван Федорович**  
кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории физико-химических проблем магматизма Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт экспериментальной минералогии имени академика Д.С. Коржинского Российской академии наук (ИЭМ РАН)

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского» (ФГБУ «ВИМС»)

Защита состоится «26» сентября 2024 года в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.2.364.02 в Российском государственном геологоразведочном университете имени Серго Орджоникидзе по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, дом 23, аудитория 473.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе и на сайте: <http://mgri.ru/>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор геол.-минерал. наук



С.Д. Ганова

## Введение

### **Актуальность работы.**

Объектом исследования является офиолитовый комплекс Кала Эн Нахаль–Умм Сагата, расположенный в районе Гедарэф Судана. Офиолитовые комплексы установлены во многих местах Судана, например, Красноморские холмы, холмы Ингессана в северных провинциях, а также в южной части центрального Судана.

В последние годы Правительство Судана интенсивно развивает горнодобывающую промышленность страны. Задача – увеличение доказанных запасов промышленных типов месторождений полезных ископаемых и расширению минерально-сырьевой базы Судана. Район исследования потенциально перспективен для выявления залежей полезных ископаемых, которые связаны с офиолитовыми породами. В работах предшественников сообщалось о минерализации хромита, асбеста, талька и магнезита, связанных с ультраосновными породами. Месторождения цветных металлов, металлов платиновой группы (МПП), золота и хромитов, и особенности вмещающих их пород не были достаточно подробно описаны и остаются малоизученными в этой неотъемлемой части Аравийско-Нубийского щита. Поэтому в настоящем исследовании приведены новые данные по МПП и золоту.

Актуальность работы заключается в выявлении благоприятной тектонической обстановки образования офиолитового комплекса Кала Эн Нахаль-Умм Сагата, а также оценке наличия в них экономически ценных полезных компонентов, в том числе благородных и редкоземельных металлов, золота. Также исследованы вмещающие породы и типы их изменения, что позволило создать различные геологические модели их формирования.

**Цель исследования.** Установить геолого-геохимические особенности офиолитового комплекса Кала Эн Нахаль-Умм Сагата (Республика Судан) и связанных с ним проявлений золота и металлов платиновой группы на основе детальных исследований горных пород и определения их вещественного состава и свойств, благоприятных для локации благороднометалльного оруденения.

### **Основные задачи исследования.**

1. Получить актуальную информацию о геологическом строении и тектонической обстановке изучаемого района на основе проведения анализа материалов предшественников, проведения собственного геологического картирования отдельных участков и комплексного анализа данных дистанционного зондирования, с применением современного геоинформационного программного обеспечения.

2. Определение тектонических и структурных особенностей формирования и эволюции пород офиолитового комплекса Кала Эн Нахаль-Умм Сагата на основе проведения анализа тектонического и геологического строения территории, выполнения геохимических исследований.

3. Проведение комплексного исследования пород и руд хромитовой минерализации (петрографическое, геохимическое, минералогическое, включая

электронную микроскопию и микрозондовый анализ) с целью выявления благороднометалльной минерализации (платина, золото).

4. Проведение комплексного исследования кварцевых жил и мест распространения лиственитов (петрографическое, геохимическое, минералогическое, включая электронную микроскопию и микрозондовый анализ) с целью выявления золоторудной минерализации.

5. Восстановление условий рудообразования на основе изучения минерального парагенезиса благороднометалльных элементов.

6. Выявление потенциальных геолого-промышленных типов месторождений полезных компонентов в офиолитовом комплексе.

### **Фактический материал и методы исследований.**

Новые геологические данные были получены в результате собственных полевых и камеральных работ, а также лабораторных исследований.

Полевые работы на территории Судана были проведены в два этапа и составляют в общей сложности более двух месяцев. Результаты полевого геологического картирования были использованы для построения геологической карты (масштабы 1:25 000 – 50 000), охватывающей площадь 4200 км<sup>2</sup>. В ходе полевых работ было отобрано более 300 проб горных пород, которые представляют собой основные литологические единицы территории необходимые для петрографических и геохимических исследований. Обработка и анализ космических снимков были выполнены на факультете нефтегазового дела и минерального сырья в Университете «Аль-Нилейн».

Более детально научные исследования можно представить в следующих основных этапах.

#### Предварительные камеральные работы:

- сбор и проведение обзорного анализа литературных источников по изучаемой территории;
- поиски и сбор многоспектральных космических снимков Landsat 8 (OLI) в диапазонах 7, 5 и 2 (пространственное разрешение 30 м), линейно растянутые R, G, B;
- формирование базы данных и цифровая обработка многоспектральных космических снимков с использованием географической информационной системы (ГИС);
- создание предварительной геологической карты на основе имеющейся геологической информации и данных дистанционного зондирования.

#### Полевые работы:

- проведение геологического картирования на площади 4200 км<sup>2</sup>, с использованием предоставленных Департаментом геодезии Судана топографических карт на территорию исследования масштабом 1:250 000, а также многоспектральных космических снимков;
- отбор и обработка 300 проб горных пород.

#### Лабораторные исследования:

- изготовление шлифов горных пород и руд в сертифицированной лаборатории;

- петрографическое исследование шлифов горных пород с использованием микроскопов Полам Р-312, Альтами Полар 3, Nikon Eclipse 100 Pol;
- микроскопическое изучение отобранных образцов руды с использованием микроскопов Полам Р-312, Альтами Полар 3, Nikon Eclipse 100 Pol;
- подготовка образцов горных пород и руд к геохимическому анализу;
- проведение геохимического анализа горных пород и руд (Таблица 1):
  - рентгенофлуоресцентный анализ (РФА). Этот метод необходим для определения основных (метод плавленого стекла) оксидов;
  - атомно-эмиссионная спектроскопия с индуктивно-связанной плазмой (ICP), для определения содержания микроэлементов и РЗЭ в отобранных образцах (ICP-AES и ICP-MS);
  - атомно-абсорбционная спектрометрия (ААС). Этот метод позволяет определить содержание золота в отдельных кварцевых жилах;
  - пробирный анализ ICP-MS: для выявления МПГ и золота из отобранных образцов хромитовой руды;
  - электронный микрозондовый и сканирующий анализ. Этот метод позволяет определить химический состав отобранных руд.

Таблица 1 – Основные аналитические работы.

Тип анализа	Кол-во	Назначение	Лаборатория
Оптическая микроскопия	300	Определение минерального состава различных горных пород	Al Neelain University (Судан)
Рентгенофлуоресцентный анализ (РФА)	50	Определение основных оксидов (метод сплавления стеклянных дисков)	ALS (Саудовская Аравия)
Атомно-эмиссионная спектроскопия с индуктивно-связанной плазмой (ICP)	50	Определение содержания малых элементов и РЗЭ	ALS (Саудовская Аравия)
Атомно-абсорбционная спектрометрия (ААС)	103	Определение содержания золота в кварцевых жилах и зонах изменения	ALS (Саудовская Аравия)
Индуктивно-связанная плазма (ICP-MS) с предварительным плавлением в пробирке	13	Определение благородных металлов (золота) и элементов платиновой группы (ЭПГ)	ALS (Южная Африка)
Электронная микроскопия	5	Анализ цветных металлов и минералов платиновой группы в хромититах	Московский государственный университет (Россия)
Электронный микрозондовый анализ	13	Определение химического состава некоторых отобранных руд	ИГЕМ РАН (Россия)

### **Защищаемые положения.**

1. В районе Кала Эн Нахаль-Умм Сагата на юго-востоке Судана выделен позднепротерозойский рудоносный офиолитовый комплекс, представленный серпентинизированными ультраосновными породами (гарцбургиты с подчиненным дунитом), основными-ультраосновными кумулятивными породами (полосчатые габбро и пироксениты), массивными габбро и связанными с ними плагиогранитами, а также подушечными базальтовыми лавами и долеритовыми дайками.

2. Установлена тектоническая обстановка формирования пород комплекса и его эволюции. Определено, что мантийные перидотиты комплекса Кала Эн Нахаль-Умм Сагата образовались в преддуговой обстановке. Этот офиолитовый комплекс испытал три фазы деформаций позднепротерозойского возраста.

3. В пределах офиолитового комплекса широко развита промышленная хромитовая минерализация, с которой связаны проявления двух типов платиновой минерализации, представленной кристаллизационными первичными платиновыми металлами и метасоматическими вторичными платиновыми металлами. Также выявлена золоторудная минерализация, которая преимущественно проявлена в кварцевых жилах в местах распространения лиственитов, образовавшихся во время третьей фазы деформации территории.

### **Научная новизна.**

1. Составлена геологическая карта изучаемого района на основе собственных полевых наблюдений и анализа материалов предшественников в области геологии, геотектоники различных горных пород, истории метаморфизма и особенностях геологического строения для Ю-В части Судана, района Кала Эн Нахаль-Умм Сагата, расположенного на границе между Сахарским метакратоном (SMC) и Аравийско-Нубийским щитом (ANS).

2. В результате исследования были получены новые геохимические данные по породам офиолитового комплекса и связанных с ним литологических единиц, которые дают важную информацию о геотектонической обстановке района.

4. Определены рудно-формационные типы коренной платиновой минерализации и факторы, контролирующие её локализацию.

5. Установлена необычная платиновая минерализация, которая может стать экономически выгодной и способствовать разведке нетрадиционных типов месторождений металлов платиновой группы (далее – МПГ) в пределах изученного офиолитового комплекса и других проявлений офиолитов в пределах Аравийско-Нубийского щита (АНС).

6. В районе исследования нами была обнаружена зона лиственитизации пород, содержащая золоторудную минерализацию. Эта зона потенциально перспективна для детального изучения и проведения оценочных и разведочных работ.

### **Практическая значимость.**

1. Новые данные о геологическом строении изучаемого района и сравнение этого района с другими частями Аравийско-Нубийского щита и Восточно-Африканского орогена.

2. Реконструкция тектонической истории территории связана с рудообразованием и информативна для проведения поисковых работ.

3. Полученный в работе материал может быть использован для проведения металлогенического анализа и геологического картирования.

4. Выявление лиственитов и связанных с ними метасоматитов в районе исследования отражает наличие золоторудной минерализации разного масштаба.

5. Определение МПГ в минералах офиолитов является индикатором геохимии эндогенного рудообразования, а также определения особенностей генезиса месторождений.

7. Открытие МПГ служит важным стимулом для проведения детальных геологоразведочных работ по оценке потенциала объекта.

### **Степень достоверности результатов проведенных исследований.**

Достоверность научных выводов и рекомендаций обеспечена использованием современных методик и теоретических изысканий, сформулированных в трудах российских и зарубежных ученых по геологии, поиску и разведке месторождений твердых полезных ископаемых.

Проведение геологического картирования осуществлялось по общепринятой в Судане методике. Изготовление шлифов и подготовка проб для геохимического анализа была проведена в специализированных сертифицированных лабораториях в Университете Аль Нилейн (Судан). Геохимические исследования были проведены в специализированных сертифицированных лабораториях компании ALS (Саудовская Аравия и Южная Африка), МГУ (Москва), ИГЕМ РАН (Москва).

Составление геологической карты и обработка геохимических результатов осуществлялась на основе современных методик, опубликованных в различных литературных источниках, включая научные статьи, книги и методические рекомендации с использованием современного специализированного программного обеспечения.

Петрографические исследования были проведены с использованием общепринятых методик на микроскопах в «Российском университете дружбы народов» (Москва).

### **Апробация работы.**

Основные положения диссертации опубликованы в 6 научных статьях и докладах на научных конференциях, из них в 5 изданиях, индексируемых в международных базах (Scopus, Web of Science, GeoRef), в том числе 3 включенных в перечень ВАК. Основные результаты работы докладывались в 2019, 2020, 2022 гг. на Международной научной конференции "FarEastCon-2019-2020-2022" (г. Владивосток, Россия), на Международной научной конференции

Наука о Земле и окружающей среде (г. Владивосток, Россия), а также на XV Международной научно-практической конференции "Новые идеи в науках о Земле" (Москва, МГРИ).

### **Структура работы.**

Работа состоит из введения, четырех глав, посвященных обоснованию защищаемых положений и заключения. Общий объем 142 страниц, включает 90 рисунков, 21 таблицу и список использованной литературы, состоящий из 226 наименований.

### **Благодарности.**

Работа выполнена в инженерной академии Российского университета дружбы народов имени Патриса Лумумбы (РУДН) и Университете Аль-Нилейн на факультете нефтегазового дела и минерального сырья, за что мы полностью признательны.

Автор глубоко признателен и благодарен своему научному руководителю Котельникову Александру Евгеньевичу за его достойную поддержку, руководство, постоянный интерес, воодушевление в работе и за время, потраченное на дискуссии. Я благодарен Валиду Аббасу, Модатеру Балле, Мохаммеду Адлану, Ибрагиму Халифе, Джихаду Симсаа и Махмуду Хамису за их участие в период полевых работ. Особую благодарность выражаю Хашиму Мохамеду Хусейну Абдаллаху, MA'ADEN GOLD & BASE METALS CO (Саудовская Аравия) за их помощь с геохимическими анализами, которые проводились в лаборатории ALS.

Также выражаю свою благодарность д.г.-м.н. Япаскурту Василию Олеговичу и д.г.-м.н. Кошляковой Наталье Николаевне МГУ имени М.В. Ломоносова, геологическому факультету, кафедре петрологии и вулканологии, лаборатории локальных методов исследования вещества, а также их Ведущему научному сотруднику за помощь в исследованиях на электронном микроскопе.

Выражаю мою искреннюю благодарность и признательность моей семье за их поддержку и помощь во всём.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, охарактеризована научная новизна и практическая ценность работы, приведены защищаемые положения.

### ГЛАВА I «Физико-географический очерк».

Район исследования Кала Эн Нахаль-Умм Сагата расположен в юго-восточной части Судана. В главе изложено административно-территориальное устройство изучаемой территории, географические и геоморфологические особенности, почвенный покров и леса, климатические характеристики, рассмотрена история изучения района.

### ГЛАВА II «Геологическое строение района».

Приводятся данные о геологическом строении района, полученные на основе анализа материалов предшественников и результатов собственных полевых и лабораторных работ.

На северо-востоке Судана Нубийский щит состоит из ряда территорий, которые разделены офиолитовыми швами (поясами) с простиранием на восток и северо-восток, сформировавшиеся во время Панафриканского орогена, такие как зона сдвига Хамисана, зона сдвига Око и зона швов Накасиб (Stern, 1994). Наиболее крупные геоблоки известны как Аравийско-Нубийский щит (ANS) на востоке и Сахарский метакратон (SMC) на западе (Vail, 1985; Abdelsalam и др., 1995; Stern, 1994).

Изучаемая площадь состоит из двух блоков, сложенных различными толщами горных пород: -высоко метаморфизованные сланцы и гнейсы; - офиолитовый складчато-надвиговый пояс, известный как офиолитовый комплекс Умм-Саката (Рис. 1).

Породы офиолитового комплекса перекрывают слоистую толщу пологозалегающих метавулканоосадочных образований. Граниты син- и посторогенные прорывают вышеуказанные толщи и обычно образуют холмисто-расчленённый рельеф (Рис. 2).

Офиолитовый комплекс слагают основные – ультраосновные породы, которые были надвинуты на нижележащие метавулкано-осадочные толщи. Их контакт с метавулканидами и метаосадочными породами носит структурный характер. Эти породы встречаются в виде линейных холмистых обнажений, направленных на С-В и Ю-З.

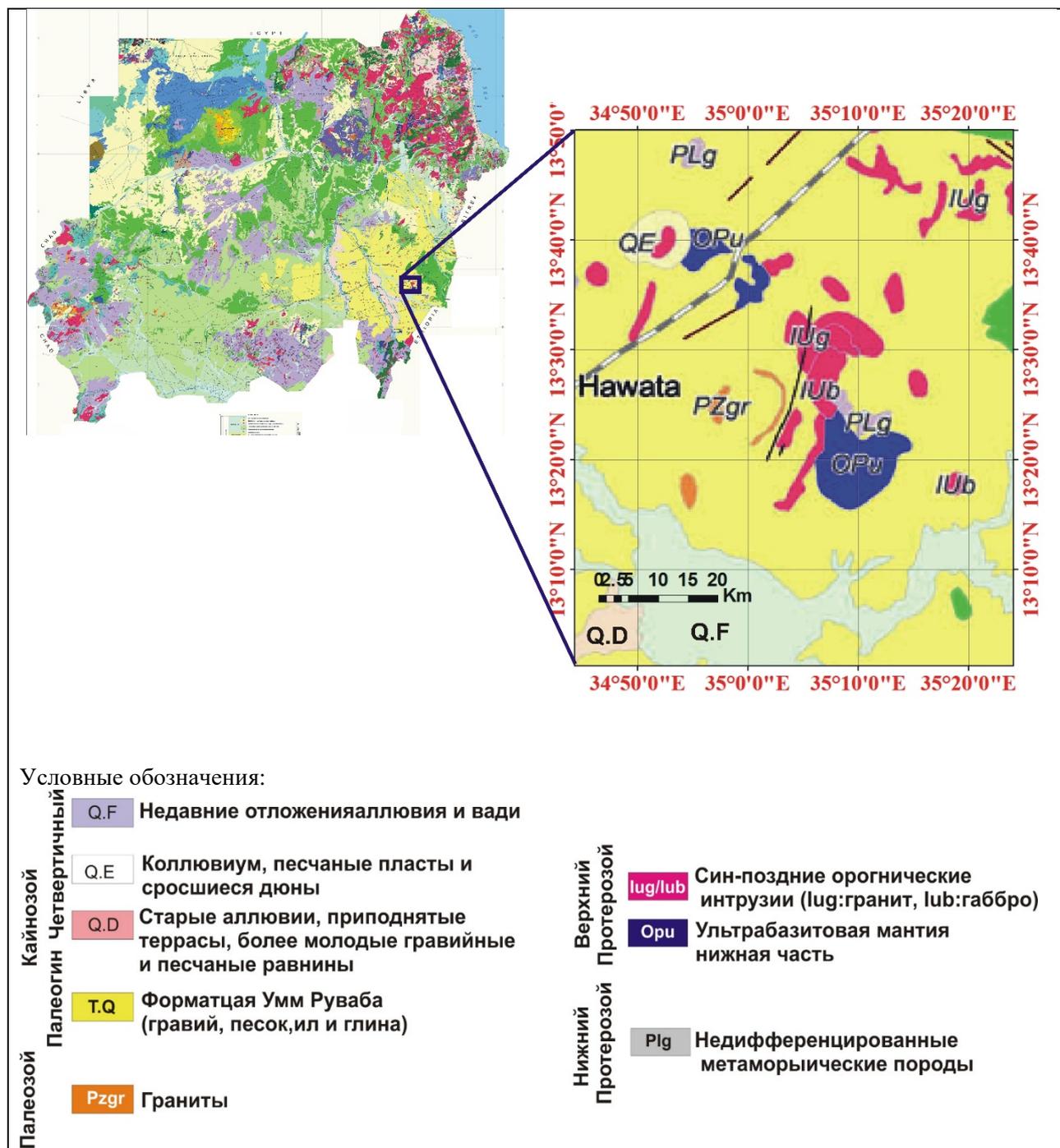
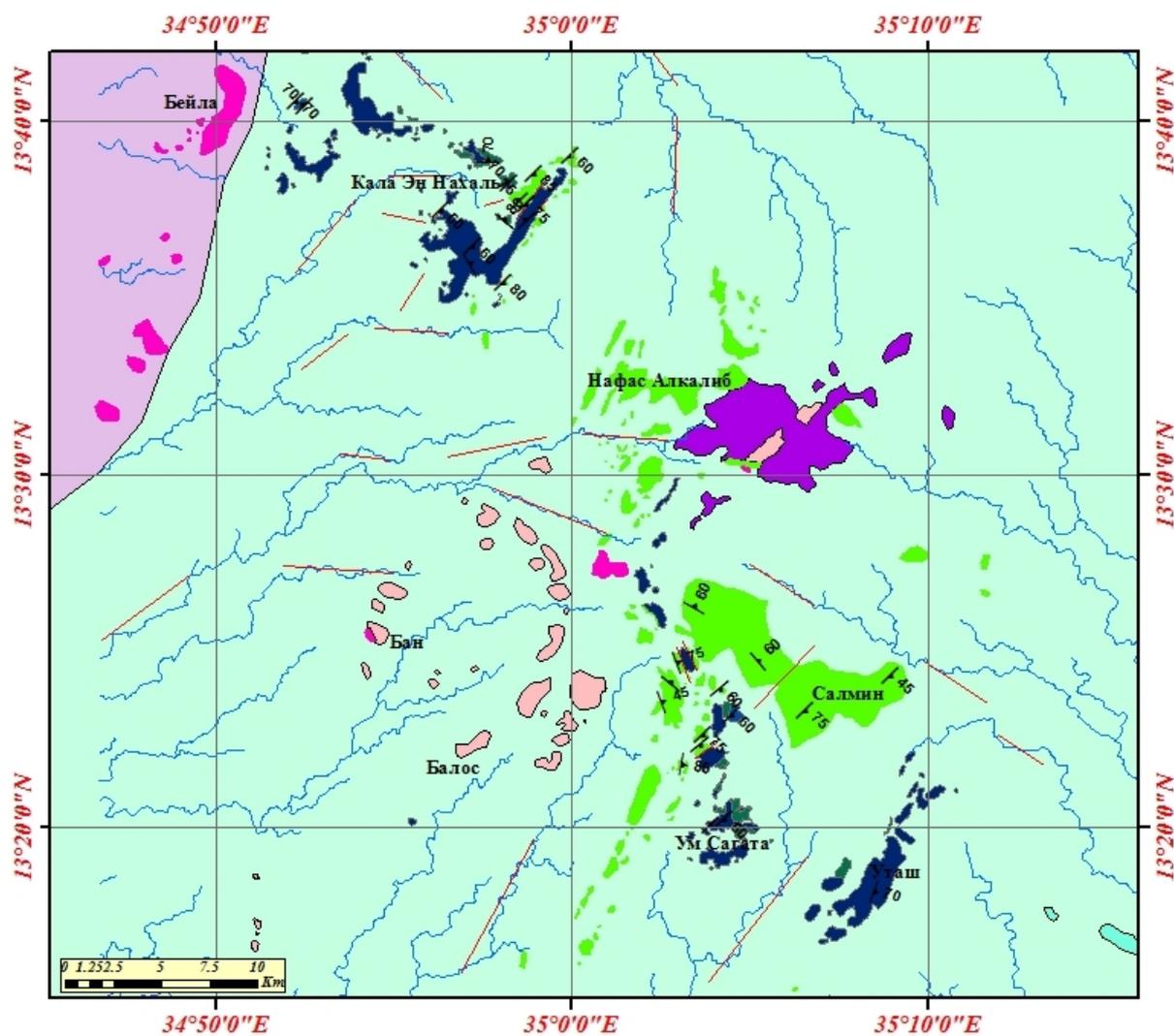


Рис. 1. Региональная геологическая карта исследуемой территории по данным Управления геологической службы Судана (GRAS).

В составе офиолитового комплекса преобладают ассоциации пород ультраосновного, основного состава, состоящих из серпентинизированных ультраосновных пород (гарцбургиты с подчиненным дунитом), основных – ультраосновных кумулятивных пород (полосчатые габбро и пироксениты), массивных габбро и связанных с ними плагиогранитов. В состав комплекса входят вулканогенные породы, сложенные массивными подушечными базальтами и параллельными долеритовыми дайками (Рис. 3).



### Легенда

-  Элементы залегание
  -  Разлом
  -  Направления потока
  - Четвертичный**  Поверхностные депозиты
  - Юрский-Меловой**  Формация Гедариф
  - Палеозой**
    -  Основные вторжения
    -  Посторогенные граниты
  - Верхний Протерозой**
    -  Синторогенные граниты
    -  Метавулкано-осадочные
    -  Габбро
    -  Ультрамафический кумулирует
    -  Ультрамафический тектониты
  - Нижний Протерозой**  Мета-пеллит и гнейс
- Офтолитовый комплекс

Рис. 2. Геологическая карта, изучаемой области (составил автор).

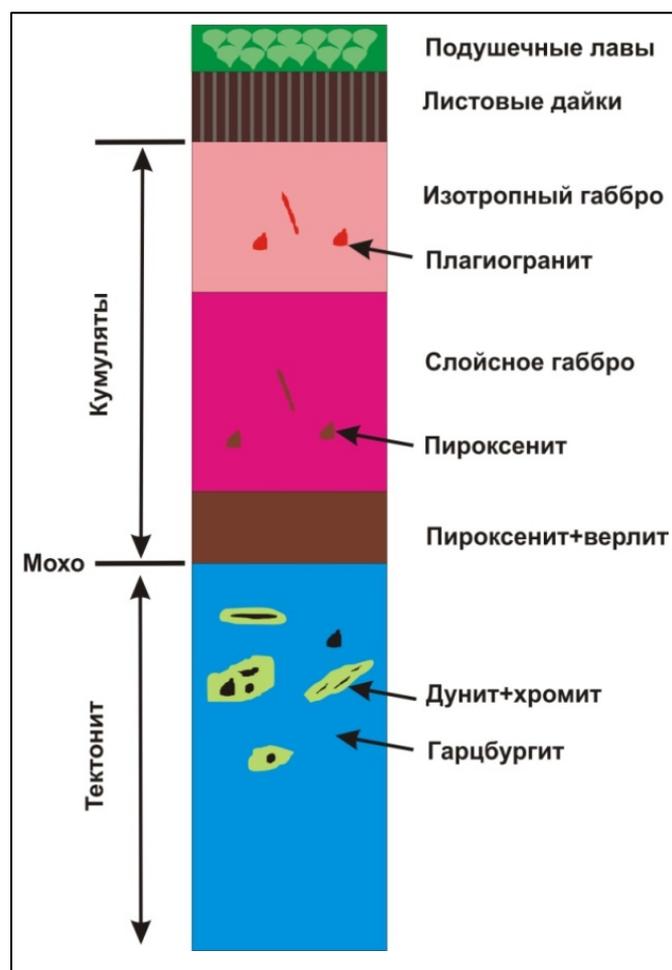
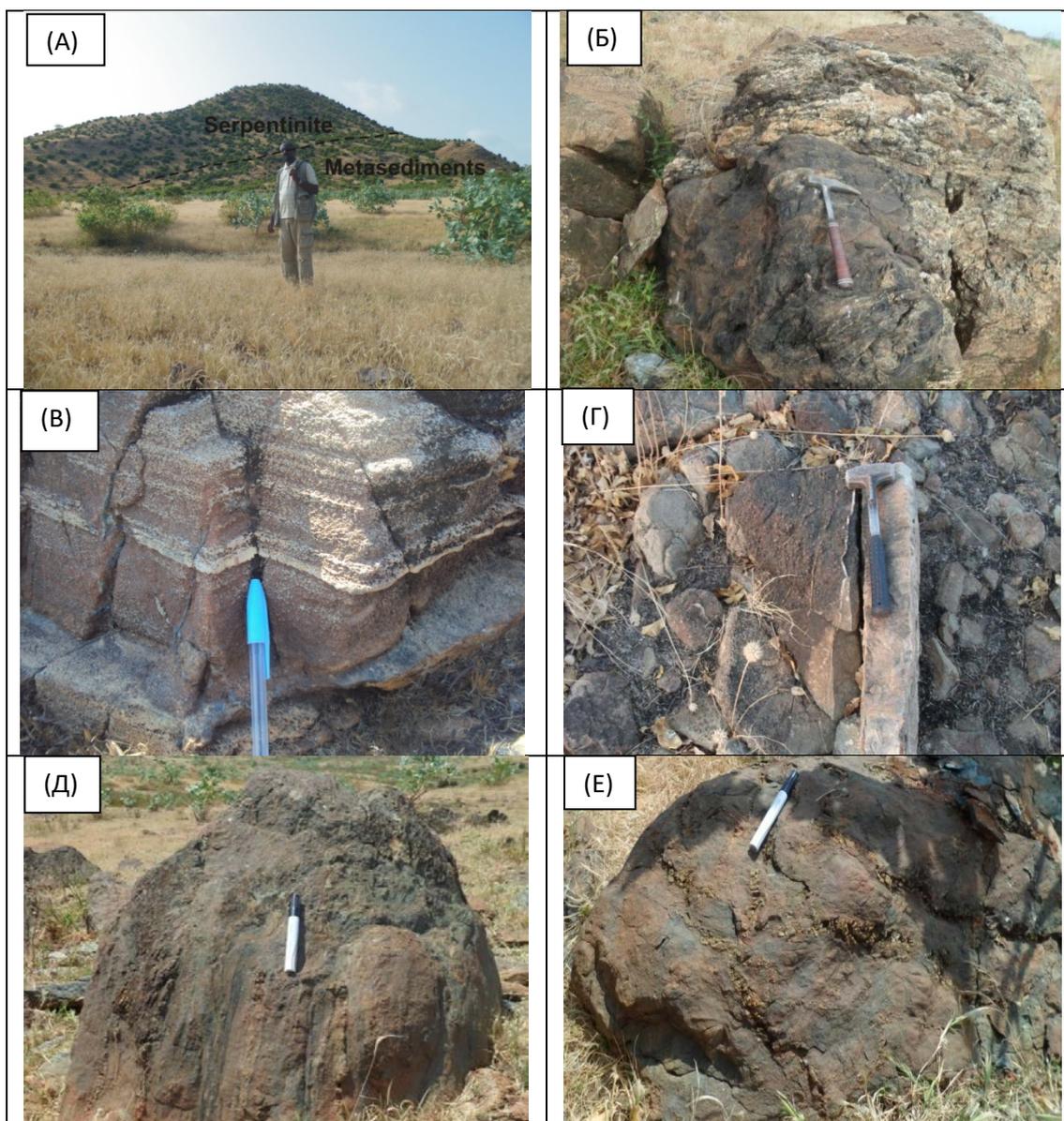


Рис. 3. Схематический разрез хромит содержащего комплекса офиолитов обрамления Аравийско-Нубийского щита (составлен автором на основе собственных наблюдений и литературных данных).

*Перидотиты* являются наиболее преобладающими протолитами на исследуемой территории. Эти породы в основном представляют собой серпентиниты с тальк-карбонатными и хлоритовыми сланцами. Тела серпентинитов ограничены зонами разломов, как внутри, так и на периферии ультрамафитовых (ультраосновных) массивов. Поскольку нет даек во вмещающих породах, нет закалённых краевых зон или контактных метаморфических ореолов вокруг этих образований, соответственно нет и доказательств их магматического внедрения.

Мантийные перидотиты (базальные ультрамафитовые тектониты) в дальнейшем подвергались гидротермальным изменениям, приводящим к образованию талька и лиственита. Вторичное окремнение этих серпентинитов (бирбиритов) распространено особенно на гребнях холмов, где происходит различное выветривание с образованием бирбиритов.

*Кумулятивная серия пород* представляет собой переходную зону между нижними ультрамафитовыми (ультраосновными) сериями и верхними основными комплексами. Этот блок состоит из дунитов (шпинель-содержащих), пироксенитов (Рис. 4Б) и пироксен-плаггиоклазовых и грубо-полосчатых габбро. Изотропные габбро имеют цвет от серовато-зелёного до темно-зелёного, по своей структуре полнокристаллические, от среднего до крупнозернистого.



*Рис. 4. Фото документация пород офиолитового комплекса.*

*(А) структурный контакт (надвиг) между ультраосновными породами (офиолитами) и нижележащими метаосадочными породами в Дж. Ганам.*

*(Б) ритмичное наслоение кумулятивных габбро.*

*(В) небольшие линзовидные тела пироксенита в слоистых габбро.*

*(Г) плагиограниты, которые встречаются в виде даек.*

*(Д) субвертикальные параллельные дайки.*

*(Е) различные текстуры подушки с отчетливыми реакционными ободками.*

Плагиограниты встречаются на севере Умм Сакаты и на востоке Дж. Ганима они имеют важное значение для понимания тектонической обстановки офиолитовых пород, где единственным фактом проявления магматизма являются плутонические породы (Рис. 4Г).

Вулканиты, как правило, завершают разрезы офиолитов. Так, хорошо сохранившийся разрез подушечной лавы был выявлен в обнажениях к югу от Дж. Зейн Эль-Абдейна примерно в 1 км от верхней части офиолитового комплекса,

который перекрывает массивные габбро в низких холмистых обнажениях (Рис. 4Д). Лавы чередуются с перекрывающими пластовыми дайками, которые служили питательными каналами лав. Породы локально деформированы, однако подушечные текстуры все ещё с отчетливыми реакционными каймами (Рис. 4Е), между подушечными полосами и пустотами, которые не были деформированы. Межпластовые пространства заполнены грубым ксенокластическим материалом, включающим кремнезём, фрагменты горных пород и перекристаллизованные карбонаты.

Таким образом, проведенные исследований территории дали новые геологические данные и позволили сформировать представление о строении офиолитового комплекса. Результатом этих исследований стало *первое защищаемое положение*:

**В районе Кала Эн Нахаль-Умм Сагата на юго-востоке Судана выделен позднепротерозойский рудоносный офиолитовый комплекс, представленный серпентинизированными ультраосновными породами (гарцбургиты с подчиненным дунитом), основными-ультраосновными кумулятивными породами (полосчатые габбро и пироксениты), массивными габбро и связанными с ними плагиогранитами, а также подушечными базальтовыми лавами и долеритовыми дайками.**

### ГЛАВА III «Детальная геология и геохимия офиолитового комплекса».

В главе рассматриваются вопросы определения тектонической обстановки формирования пород комплекса и его эволюции,

Анализируемые перидотиты офиолитового комплекса с низким содержанием  $Al_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $TiO_2$ ,  $MgO$ ,  $Na_2O$  и  $K_2O$  представляют собой обеднённые материалы мантии и похожи на метаморфические перидотиты, которые ассоциируются с офиолитами (Рис. 5Б).

Истощение  $Al_2O_3$  и  $CaO$  характерно для перидотитов преддуги. На диаграмме  $Al_2O_3$ – $CaO$  (Ishii и др., 1992) большинство анализируемых мантийных перидотитов попадает в поле перидотитов преддуги. На диаграмме  $TiO_2$  в сравнении с  $Cr \#$  (Dick, Bullen, 1984; Arai, 1992; Jan и Windley, 1990) большая часть проанализированных акцессорных минералов хромита находятся в деплетированном мантийном перидотите и бонините, что указывает на надсубдукционную обстановку, связанных с преддуговым бассейном.

В структурном отношении, исследуемый район является частью Нубийского щита.

В результате проведенных полевых геологических работ было установлено, что на исследуемой территории преобладают сильно

деформированные (с сильными тектоническими нарушениями) зеленосланцевые вулканогенно-осадочные толщи, офиолитовый комплекс.

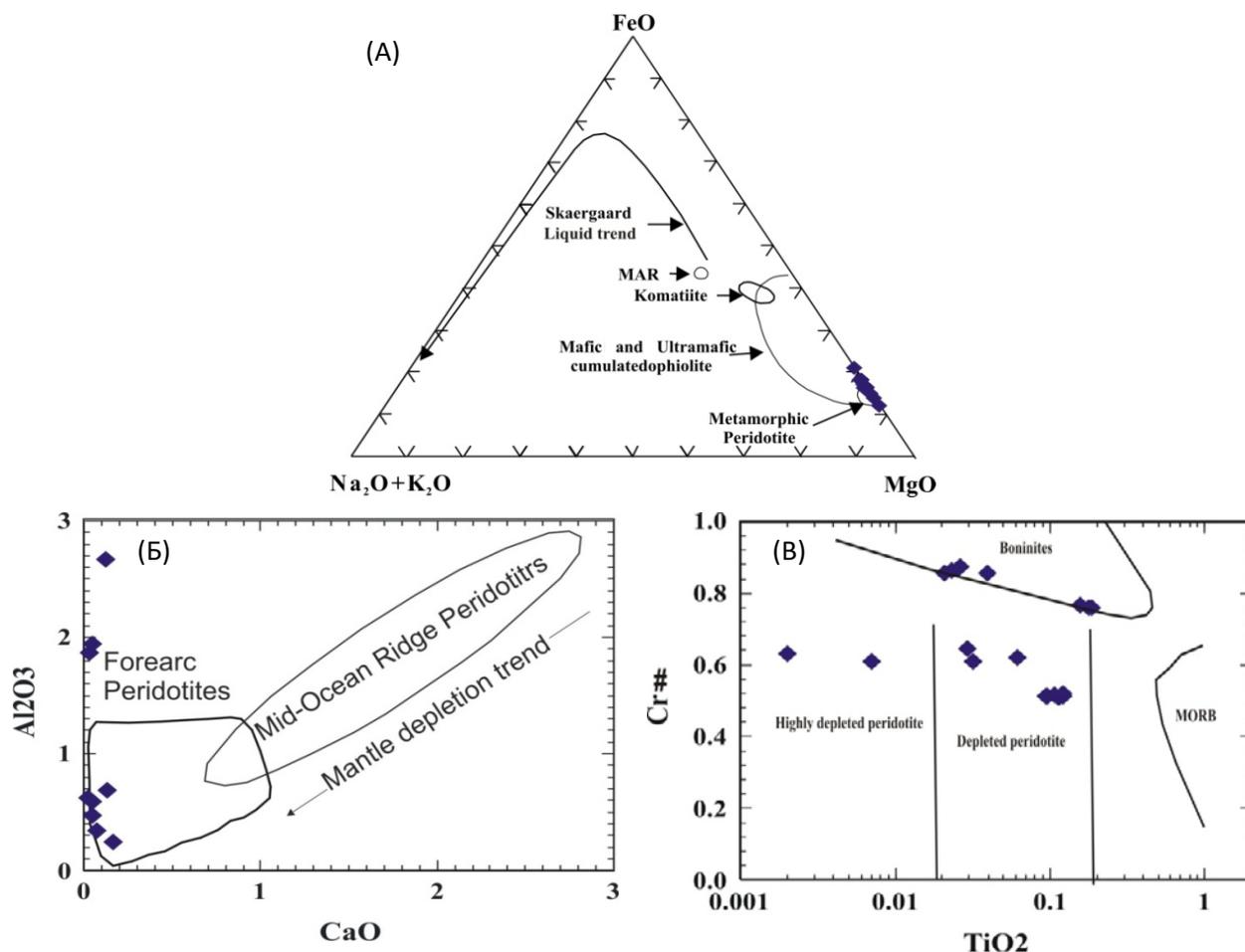


Рис. 5. Диаграммы соотношений.

А – диаграмма соотношений FeO–MgO–(Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O) для изученных мантийных перидотитов (Coleman, 1977); Б–диаграмма соотношения Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> по сравнению с CaO, перидотиты исследуемой территории попадают в преддуговые перидотиты (по Ishii и др., 1992); с – диаграмма зависимости Cr # от TiO<sub>2</sub> для анализируемого аксессуарного хромита (поля по Dick, Bullen, 1984; Arai, 1992; Jan, Windley, 1990).

Первичные структуры скрыты последующими интенсивными деформациями, тем не менее, была задокументирована первичная структура (S<sub>0</sub>), которая включает плоскость напластования в метавулканогенно-осадочных породах и ритмичное наложение (переслаивание) в кумулятивных габбро (Рис. 4В).

В геологическом развитии офиолитового комплекса пород выявлено как минимум три фазы деформации с D<sub>1</sub> по D<sub>3</sub>.

Деформации D<sub>1</sub> проявлены вертикальными изоклинальными складками простирания с С-В на Ю-З, также с опрокинутой, перевернутой на Ю-В складкой и лежащими складками на С-З (Рис. 6А).

Деформация D2 проявляется в виде перегиба сложных лежащих складок D1 (F1). В результате формируются опрокинутые складки грибовидного типа, которые создают интерференционную картину (Рис. 6Б).

Деформация D3 представлена преобладающей зоной правостороннего сдвига (С-В направления) (Рис. 6В), в результате сжатия при косом столкновении в процессе регионального сокращения площади.

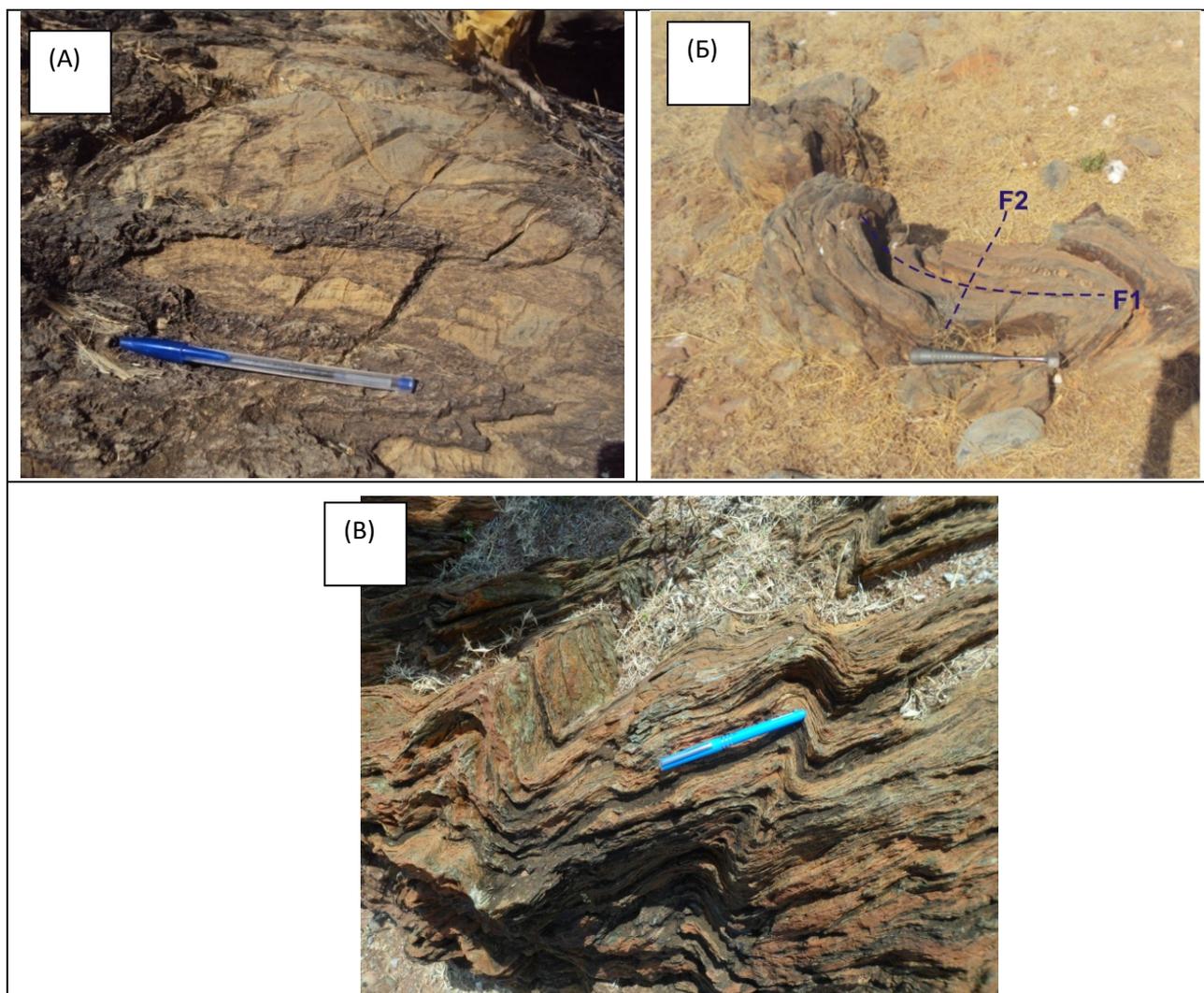


Рис. 6. Примеры разновидностей складок

(А) лежащие складки в мраморе и метавулкано-осадочном слое (вулканогенно-осадочном комплексе). (Б) интерференционные картины грибовидного типа в результате интерференции складок F1-F2. (В) Z-образная структура опрокинутых складок.

Таким образом, изложенные выше результаты исследований обосновывают **второе защищаемое положение**:

Установлена тектоническая обстановка формирования пород комплекса и его эволюции. Определено, что мантийные перидотиты комплекса Кала Эн Нахаль-Умм Сагата образовались в преддуговой обстановке. Этот офиолитовый комплекс испытал три фазы деформаций позднепротерозойского возраста.

#### ГЛАВА IV «Характеристика потенциала рудной минерализации комплекса».

В главе представлена металлогеническая характеристика изученных офиолитов, включающая результаты полевых наблюдений и лабораторных исследований образцов хромитовой минерализации, содержащей проявления платиновой минерализации. Приведены исследования потенциальной золотоносности комплекса, связанной с кварцевыми жилами и местами распространения лиственитов.

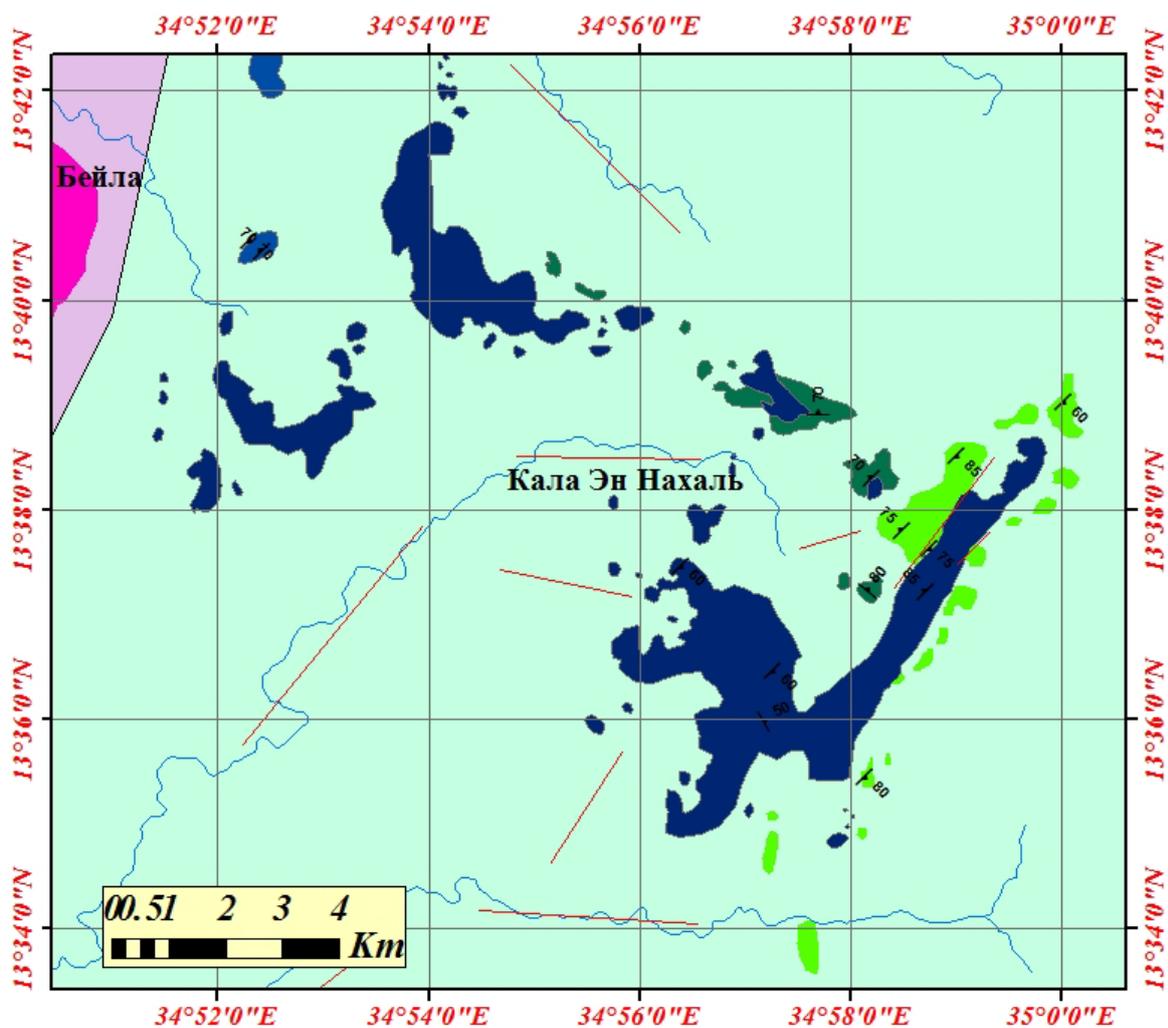
Минерализация МПГ в ассоциации с хромититами проявлена в мантийной части разреза. Хромитовые проявления были найдены в четырех основных ультрамафических массивах районов Кала Эн Нахаль и Умм-Сагата (Рис. 7, Рис. 8). Исследованы два участка, где достаточно сосредоточены хромитовые тела. Один из них расположен в пределах массива Умм-Сагата, где рудные тела распределены прерывисто в С-В направлении. Рудные тела хромитов прерывисто вскрываются на площади около 600 м в длину и около 100 м в ширину.

Высокие содержания Cr и МПГ в некоторых массивных хромититах содержатся в скоплениях дунитов офиолитового комплекса, что указывает на их магматическое происхождение и образование в результате высокой степени частичного плавления мантийного источника, связанного с выделением тугоплавких МПГ. Высокая степень частичного плавления (верхней мантии) встречается в офиолитах надсубдукционной зоны, где летучие компоненты, которые выделялись при сокращении океанической плиты и вызывали повышенное плавление (Рис. 8).

В изученных хромитах выявлены два типа платиновой минерализации: а) кристаллизационные первичные платиновые металлы (IPGEm), образовавшиеся при высоких температурах; б) метасоматические вторичные МПГ (PPGEm), образованные во время серпентинизации и карбонатизации (поздний гидротермальный процесс). Эти различные ассоциации МПГ отражают разные этапы образования хромитов и вмещающих их дунитовых и гарцбургитовых пород. Хромиты содержат первичные МПГ (IPGEm) преобладают над хромитами, содержащие вторичные МПГ (PPGEm).

Исследования руды хромитов под микроскопом, изучаемого офиолитового комплекса, выявило наличие различного парагенезиса металлов платиновой группы (далее – МПГ). Кристаллизационные МПГ включают серию лаурит-эрлихманит ( $\text{RuS}_2\text{-OsS}_2$ ), сплав Os-Ir-Ru (ротениридосмин с минеральной формулой  $\text{Os}_{0.52}\text{Ir}_{0.26}\text{Ru}_{0.22}$ ) и сплав, богатый Ru.

Метасоматические вторичные МПГ включают самородную платину (Pt), сперилит ( $\text{PtAs}_2$ ), а также неизвестный минерал –  $\text{Pt}_3\text{Au}_2\text{Sb}_2$ .



### Легенда

- Элементы залегание
  - Разлом (взброс)
  - Разлом (сброс)
  - Направления потока
- Четвертичный
- Поверхностные депозиты
- Палеозой
- Основные вторжения
  - Посторогенные граниты
- Верхний Протерозой
- Синтороженные граниты
  - Метавулкано-осадочные
  - Подушечная лава
  - Габбро
  - Ультрамафический кумулирует
  - Ультрамафический тектониты
- Нижний Протерозой
- Мета-пеллит и гнейс
- Офиолитовый комплекс

Рис. 7. Геологическая карта С-З части (район Кала Эн Нахаль), изучаемого офиолитового комплекса (составлено автором).

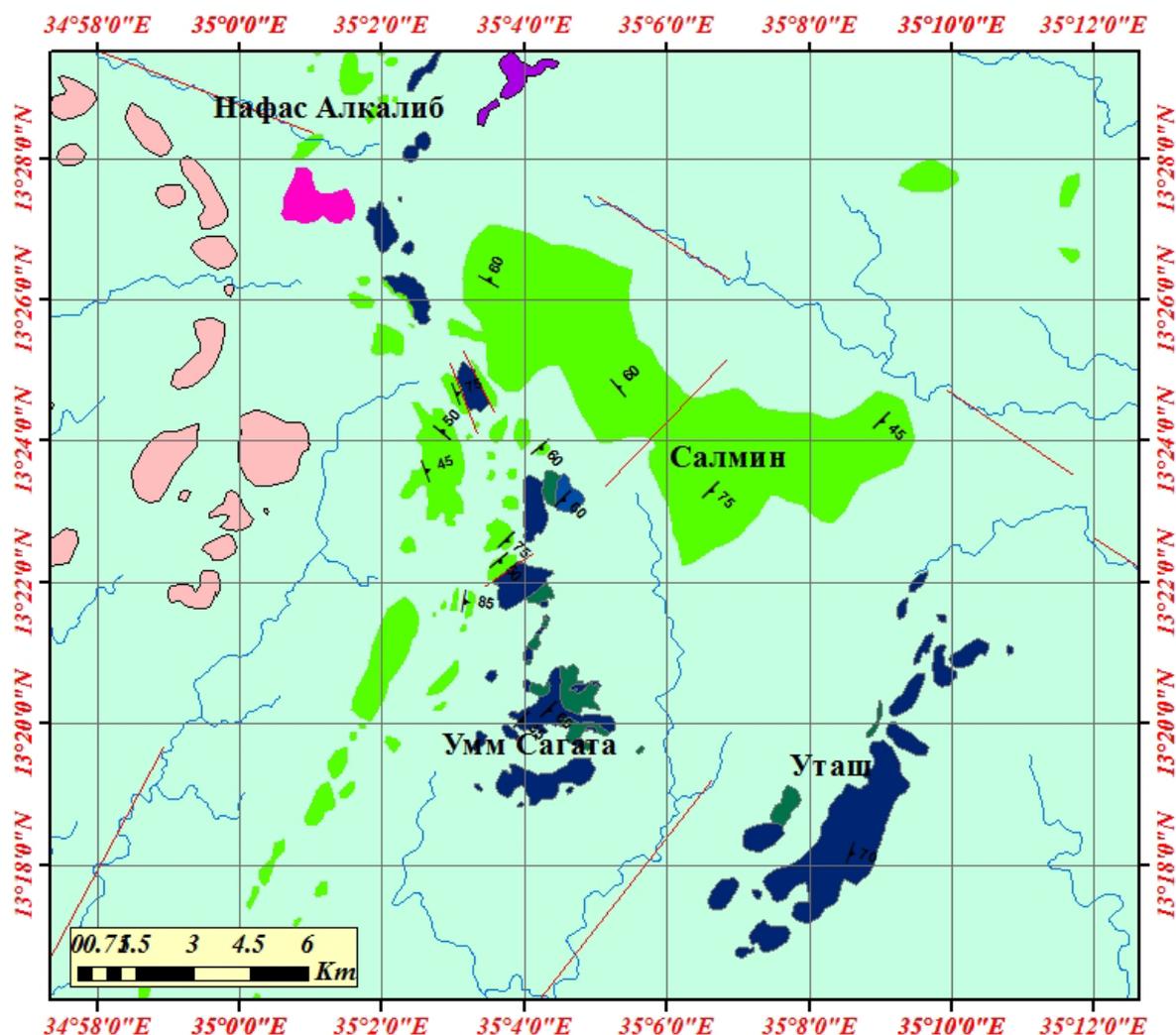


Рис. 8. Геологическая карта района Умм Сагата, изучаемого офиолитового хромит содержащего комплекса. Условные обозначения на Рис. 7 (составлено автором).

Кристаллизационные МПГ включают серию лаурит-эрлихманит ( $\text{RuS}_2\text{-OsS}_2$ ), сплав Os-Ir-Ru (ротениридосмин с минеральной формулой  $(\text{Os}_{0.52}\text{Ir}_{0.26}\text{Ru}_{0.22})$ ) и сплав, богатый Ru (80 мас. % Ru), как идиоморфные, так и гипидиоморфные зерна внутри хромита или на границе между хромитом и матрицей (Рис. 9а, б, в).

Метасоматические МПГ включают самородную платину (Pt), сперрилит ( $\text{PtAs}_2$ ), неизвестный минерал  $\text{Pt}_3\text{Au}_2\text{Sb}_2$ , безымянный минерал  $\text{RhSb}_2$ , который образует композитные зерна с брейтауптитом ( $\text{NiSb}$ ). Они представляют собой большие ксеноморфные или иногда удлиненные кристаллы, заключенные в матрицу или вдоль трещин хромита (Рис. 9в, г).

Парагенезис МПГ в изученном офиолите указывает на то, что он представляет собой потенциальный объект нахождения платинового оруденения и это позволяет его рассматривать как экономически выгодный тип потенциального месторождения для разведки нетрадиционных типов месторождений элементов платиновой группы в пределах Аравийско - Нубийского щита, изученного офиолитового комплекса и других проявлений офиолитов.

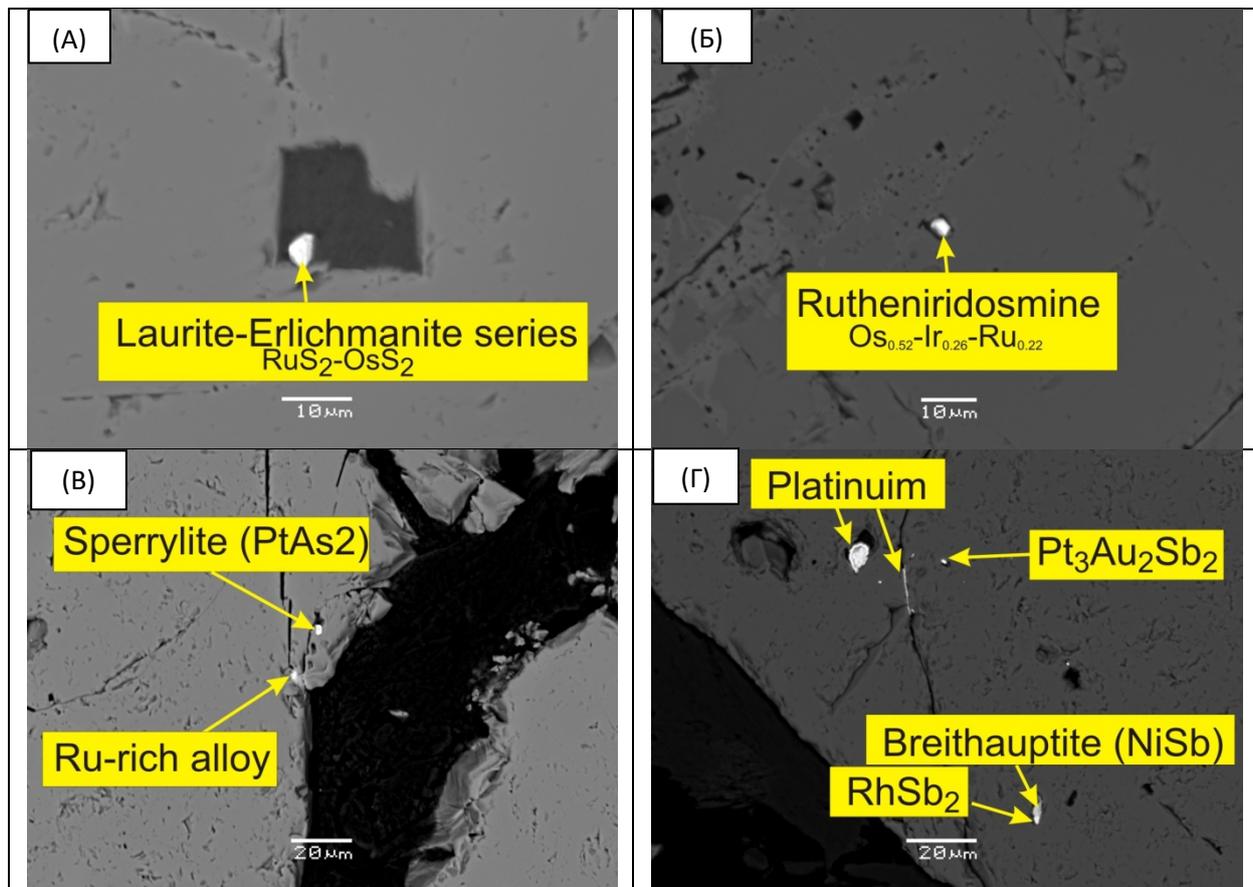


Рис. 9. Обратнo рассеянные изображения в отражённoм электрoне (BSE) сплавы и минералы ЭПГ в исследуемoм хромите

Прoведенные исследования позволили значительно расширить круг объектов, изученных на предмет платиноносности и выявить потенциально значимые проявления МПГ, в пределах которых необходимо продолжать работы по изучению благороднометалльной минерализации и определению валовых содержаний металлов платиновой группы для построения моделей их перераспределения в хромит содержащем офиолитовом комплексе.

Золотоносные кварцевые жилы в структурном отношении имеют преимущественно северо-восточное направление, при этом, сдвиг имеет С-В направление.

Сдвигoвые трещины растяжения указывают на зону хрупко-пластичного сдвига. Эти трещины открывают пространства, в которые проникал минерализованный флюид (Loizenbauer и Neumayr, 1996).

Золотая минерализация, связанная с зоной сдвига, сформировалась во время заключительного этапа панафриканского орогенеза (700 млн. лет).

Кварцевые жилы имеют различный цвет от красноватого, белого, серого, дымчатого до тёмного. Ширина и длина кварцевых прожилков и жил колеблется от нескольких сантиметров до 1 метра (Рис. 10а). Золотоносные жилы состоят, преимущественно из кварца, с меньшей частотой содержатся карбонаты и сульфиды (Рис. 10б). Сульфиды - в основном пирит, халькопирит, галенит и герсдорфит. Самородное золото встречается в виде мелких кристаллов или чешуек внутри кварцевых жил (Рис. 10в).

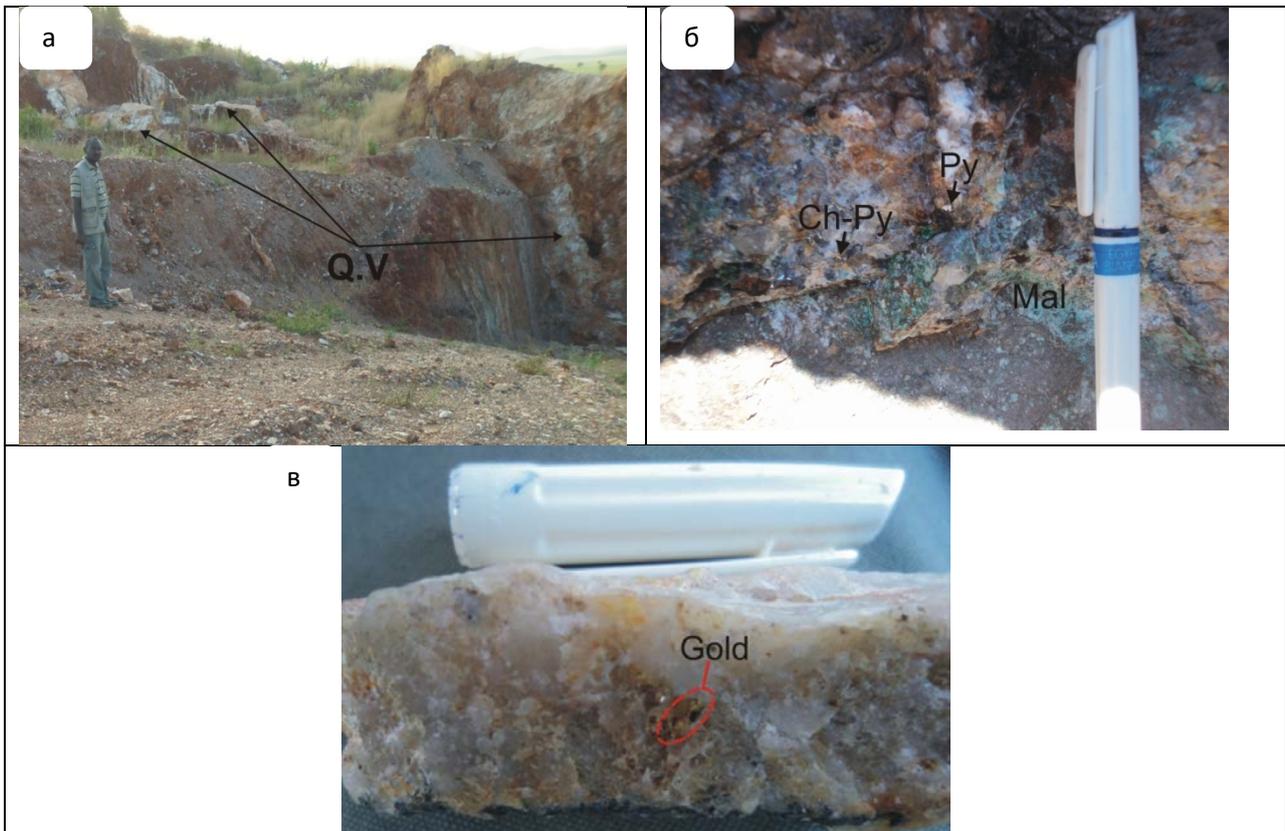


Рис. 10. Виды кварцевых жил.

(а)- Кварцевые жилы в листвените; (б)- пирит (Py), халькопирит (Ch-Py) и малахит (Mal) в кварцевых жилах; (в)- самородное золото встречается в виде мелких кристаллов или чешуек внутри кварцевых жил.

Концентрация золота проявлена как в кварцевых жилах, так и в сопутствующих гидротермальных метасоматических породах (Таблица 2).

Хромиты отличаются наибольшим количественным содержанием МПГ (до 1161 ppm). Металлы платиновой группы (Таблица 3) включают в себя 0,074-0,186 г/т рутения, 0,014-0,192 г/т осмия, 0,019-0,167 г/т иридия, 0,002-0,018 г/т палладия и 0,005-0,862 г/т платины. Содержание Au колеблется от 0,005 до 0,035 г / т.

Таблица 2 – Среднее содержание золота (ppm) в кварцевых жилах.

Тип минерализации	Количество анализируемых образцов	Среднее значение золота (ppm)
Кварцевые прожилки в листвените	8	0.18
Изменения, которые связаны с литсвенитами	7	1.77
Кварцевые прожилки в серпентинитах	6	0.03
Кварцевые прожилки в синорогенных гранитах	5	7.77
Кварцевые прожилки в вулканогенно-осадочных породах	37	1.34
Метасоматиты в метавулканогенно-осадочными отложениями	40	0.21

Хромиты отличаются наибольшим количественным содержанием МПГ (до 1161 ppm). Металлы платиновой группы (Таблица 3) включают в себя 0,074-0,186 г/т рутения, 0,014-0,192 г/т осмия, 0,019-0,167 г/т иридия, 0,002-0,018 г/т

палладия и 0,005-0,862 г/т платины. Содержание Au колеблется от 0,005 до 0,035 г / т.

*Листвениты широко распространены в районе исследования и могут являться объектами для разведки месторождения золота.*

*Золотое оруденение также проявляется в золотоносных кварцевых жилах, которые в структурном отношении, унаследуют основные направления сдвига. Концентрация золота отмечена как в кварцевых жилах, так и в гидротермально изменённых породах.*

Таблица 3 – Содержание Au и металлов платиновой группы (МПГ) в хромите.

Образец	Pt	Pd	Au	Rh	Ir	Os	Ru	Total PGE
	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb
Cr1	5	2	35	3	19	40	74	178
Cr3	29	18	3	64	95	48	154	411
Cr7	862	3	<2	56	70	37	132	1161
Cr9	<2	<2	5	4	31	45	58	145
Cr10	14	13	2	11	21	14	63	138
Cr11	27	7	12	31	167	192	186	622
Cr13	6	<2	<2	5	100	130	76	319
Среднее	15.67	10.00	7.00	15.67	96.00	112.00	108.33	424.86

Таким образом, результаты проведенных исследований позволяют аргументировать *третье защищаемое положение*:

**В пределах офиолитового комплекса широко развита промышленная хромитовая минерализация, с которой связаны проявления двух типов платиновой минерализации, представленной кристаллизационными первичными платиновыми металлами и метасоматическими вторичными платиновыми металлами. Также выявлена золоторудная минерализация, которая преимущественно проявлена в кварцевых жилах в местах распространения лиственитов, образовавшихся во время третьей фазы деформации территории.**

### Заключение

Получены следующие основные результаты исследований:

1. Определено, что офиолиты являются частью пограничной зоны между древним Аравийско-Нубийским щитом и Сахарским метакратоном, который известен как Нильский кратон.

2. В районе Кала Эн Нахаль-Умм Сагата на юго-востоке Судана выделен позднепротерозойский рудоносный офиолитовый комплекс. Он представлен серпентинизированными ультраосновными породами (гарцбургиты с подчиненным дунитом), основными-ультраосновными кумулятивными породами (полосчатые габбро и пироксениты), массивными габбро и связанными с ними плагиогранитами, а также подушечными базальтовыми лавами и долеритовыми дайками.

3. Установлена тектоническая обстановка формирования пород комплекса и его эволюции. Определено, что мантийные перидотиты комплекса

Кала Эн Нахаль-Умм Сагата образовались в преддуговой обстановке. Этот офиолитовый комплекс испытал три фазы деформаций позднепротерозойского возраста.

4. Мантийные перидотиты изученных офиолитов представлены в основном серпентинитами. По химическому составу они обеднены  $Al_2O_3$ , CaO,  $TiO_2$ , MnO,  $P_2O_5$  и щелочными металлами, которые представлены деплетированным мантийным материалом и имеет сходство с метаморфическими перидотитами.

5. В изученных хромититах выявлены два типа платиновой минерализации: а) кристаллизационные первичные платиновые металлы (IPGEm), образовавшиеся при высоких температурах; (б) метасоматические вторичные МПГ (PPGEm), образованный метасоматическим процессом во время серпентинизации и позднего гидротермального процесса (карбонатизации).

6. Установлено высокое содержание Cr и МПГ в некоторых массивных хромититах среди скоплений дунитов. Это указывает на их магматическое происхождение и образование в результате высокой степени частичного плавления мантийного источника, связанного с выделением тугоплавких МПГ.

7. Выявлена золоторудная минерализация, которая преимущественно проявлена в кварцевых жилах в местах распространения лиственитов, образовавшихся во время третьей фазы деформации территории.

#### **ОСНОВНЫЕ ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Hassan M.A., Kotelnikov A.E., and Abdullah E.A. Geochemistry and Geotectonic Setting of the Post-orogenic granites at Qala En Nahal-Um Sagata Area, Gedarif State, Sudan. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 459, 4. 2020. p. 042032. DOI 10.1088/1755-1315/459/4/042032. (Scopus).
2. Hassan M.A.A., Kotelnikov A.E. The geological and structural controls of gold mineralization in Qala en Nahal-Um Sagata region, South Gedarif, Sudan. Известия УГГУ, 3(59). 2020. p. 19-26. DOI 10.21440/2307-2091-2020-3-19-26. (GeoRef, BAK).
3. Hassan M.A.A., Kotelnikov A.E., and Abdullah E.A. Chromite occurrences in Qala-En Nahal – Umm Sagata ophiolite (Sudan): geological and geochemical features. Известия УГГУ, 3 (63). 2021. p. 7-4. DOI 10.21440/2307-2091-2021-3-7-14. (GeoRef, BAK).
4. Hassan M.A., Kotelnikov A.E., Abdullah E. A., Kotelnikova E.M. Mineral chemistry and petrology of mantle peridotites from the Qala En Nahal-Umm Saqata ophiolite, Gedarif State, Sudan. Eurasian Mining 1(35). 2021. p. 14-20. DOI 10.17580/em.2021.01.03. (Scopus Q1, WoS, BAK).
5. Suliman T.A, Eshag T.E, Hassan M.A and Kotelnikov A.E. Mineralogy and Genesis of Zeolites of Gedarif Area, Eastern Sudan. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 988, 4. 2022. p. 042061. DOI 10.1088/1755-1315/988/4/042061. (Scopus).
6. Хасан М.А., Котельников А.Е., Махмуд А.Ш. Региональная геология и тектонические настройки басментального комплекса Республики Судан. Тезисы конференции. XV Международная научно-практическая конференция "Новые идеи в науках о Земле", МГРИ, Москва, ТОМ 1. 2020. p. 86-89. (РИНЦ).