

ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

Максимов Прокопий Николаевич

**Морские железняки западной части Аятского
железорудного бассейна: минералого-геохимическая
специфика и условия формирования (Тургайский
прогиб, Казахстан)**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата геолого-минералогических наук

1.6.10 – Геология, поиски и разведка твёрдых полезных ископаемых,
минералогия

Томск, 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель:

Рудмин Максим Андреевич

доктор геолого-минералогических наук, доцент
отделения геологии Инженерной школы
природных ресурсов Национального
исследовательского Томского политехнического
университета

Официальные оппоненты:

Крупенин Михаил Тихонович

доктор геолого-минералогических наук, ведущий
научный сотрудник Института геологии и
геохимии им. академика А.Н. Заварицкого
Уральского отделения Российской академии наук

Шакиров Ренат Белалович

доктор геолого-минералогических наук, доцент,
заведующий лабораторией газогеохимии
Тихоокеанского океанологического института им.
В.И. Ильичева Дальневосточного отделения
Российской академии наук

Защита состоится «26» декабря 2025 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.28 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, ул. Советская, 73, 111 аудитория, «Томский политехнический университет, корпус № 1».



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru при помощи QR-кода.

Автореферат разослан " ____ " _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ДС.ТПУ.28
кандидат геолого-минералогических
наук, доцент

 Якич Тамара Юрьевна

Введение

Актуальность. Морские железняки представляют собой обогащённые железом осадочные образования, формирующие особый тип пород, имеющий важное палеогеографическое и экономическое значение. Среди них особый интерес представляют ооидовые железняки, характеризующиеся наличием ооидов (оолитов) – сферических концентрически-зональных образований. Наиболее древние проявления этого типа пород известны в верхнепротерозойских толщах Северной (Basta et al., 2011) и Южной Африки (Beukes, 1984), Северной Америки (Lechte et al., 2024; Mloszewska et al., 2015) и Китая (Zhu et al., 2022), где они ассоциируют с железистыми кварцитами. В фанерозойской истории Земли выделяются несколько периодов интенсивного формирования ооидовых железняков. Например, в ордовикско-силурийский период накопление железистых толщ было широко развито в районах Висконсина, Иллинойса (Matheson et al., 2024) и Клинтон (Matheson, Pufahl, 2021; Van Houten, 1985). В девонское время значительные проявления ооидовых железняков отмечаются в пределах Сычуаньской впадины (Li et al., 2021) и Марзукского бассейна (Van Houten, 1981). Особую значимость представляет юрский период, в течение которого сформировались крупные бассейны, такие как Лотарингский (Teysse, 1984) и бассейн Большого Кавказа (Kalinina et al., 2024; Тимофеева, 1966). В меловую и палеогеновую эпохи масштабное накопление железняков происходило в Западной Сибири, где образовалось одно из промышленно значимых месторождений России – Бакчарское (Rudmin et al., 2019; Белоус et al., 1964). Завершающий этап продуктивного формирования ооидовых железных руд относится к неогену и характеризуется образованием бурожелезняковых руд Керченского бассейна (Sokol et al., 2020; Шнюков, 1965). Существуют и современные аналоги, например, изучаемые в районе острова Панарея (Di Bella et al., 2019).

Накопление ооидовых железняков происходит в различных фациальных условиях – от континентальных речных (Golubovskaya, 2005; Rudmin et al., 2021¹, 2021²) до морских (Korte, Hesselbo, 2011; Rudmin et al., 2022; Zhu et al., 2022) – и определяется комплексом факторов, включающих характер источников железа, физико-химическую среду, динамику седиментационных процессов и др. Традиционно источником железа во многих классических моделях считались продукты выветривания магматических провинций (в основном базитового состава) (Baïoumy et al., 2017; Novoselov et al., 2023; Страхов, 1947; Холодов и др., 2012). В то же время результаты современных исследований, в частности по материалам Западной Сибири, смежная территория к Тургайскому прогибу, свидетельствуют в пользу флюидо-литогенной модели формирования ооидовых железняков. Согласно этой концепции, существенную роль играли вверх-диффундирующие металлоносные растворы, мигрировавшие в пределах погребённых рифтовых структур в результате пострифтовой активности и поступавшие в верхние горизонты морского бассейна (Rudmin et al., 2018, 2019, 2020, 2022, 2025).

Аятский железорудный бассейн представляет собой как важный рудоносный район на территории Тургайского прогиба, где сосредоточены обширные залежи осадочных железных руд с общей площадью рудного бассейна около 5 тыс. км² (Бекмухаметов, Бекмухаметова, 2007; Бекмухаметов, Билялов, 2003; Сидоренко, 1975). Аятские морские железняки представляют собой ценный объект для изучения генезиса морских железняков, поскольку особое место среди них занимают ооидовые железняки.

Во второй половине XX века в качестве источника рудного вещества в Аятском бассейне рассматривались либо продукты кор выветривания Южного Урала (Кротов, 1956; Новохатский, 1957; Сидоренко, 1975), либо скарно-магнетитовых и титаномagnetитовых месторождений складчатого основания (Бекмухаметова, 2003). К настоящему времени известны различные модели и теории, объясняющие условия формирования ооидовых железняков Аятского бассейна. Однако все они являются дискуссионными, например, до сих пор нет четкого понимания механизма аккумуляции железа. Исследователями рассматриваются и химическое осаждение (Кротов, 1956; Новохатский, 1957), и биогенное осаждение (Сидоренко, 1975), а также гипотезы, связанные с протеканием диагенетических процессов (Новохатский, 1957; Страхов, 1953). Выдвигалось предположение о том, что аятские руды могли отлагаться в зоне смещения пресных речных и соленых морских вод, обусловленной трансгрессивно-регрессивной динамикой бассейна (Бекмухаметов, Бекмухаметова, 2007).

Морфологические признаки ооидов, такие как их округлая форма, гладкая поверхность и структура корок, наряду с различиями в минеральном составе между ядром, концентрическими оболочками и цементом, также не вносят однозначности. Эти характеристики могут быть интерпретированы как в пользу их первичного седиментационного происхождения, так и в пользу сложного многостадийного диагенетического преобразования. Таким образом, для получения однозначных выводов об условиях формирования железняков Аятского бассейна необходим комплексный подход, объединяющий детальный литофациальный анализ, микроструктурные исследования, а также всестороннее минералогическое и геохимическое изучение ооидовых железняков.

Объектом диссертационного исследования являются морские железняки западной части Аятского железорудного бассейна. **Предмет исследований** – их минералогическая специфика и условия формирования.

Цель исследования – реконструкция условий формирования верхнемеловых морских железняков Аятского бассейна Тургайского прогиба (Северный Казахстан) путем изучения их литофациальных и минералогическо-геохимических особенностей. Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**:

Выполнение литофациального анализа.

Установление стадийности минералообразования и парагенезисов железистых ооидов и пелоидов в процессе седиментогенеза и диагенеза;

Выявление геохимической специализации морских железняков и установление форм нахождения редких, редкоземельных элементов (РЗЭ+Y).

Научная новизна

Предложена литофациальная классификация железняков и вмещающих пород Аятского бассейна на основе минерального состава и текстурно-структурных особенностей

Детализирован минеральный состав железистых ооидов, и установлена стадийность их диагенетического преобразования.

Выявлена геохимическая специфика руд, заключающаяся в обогащении РЗЭ.

Установлена и охарактеризована основная минеральная форма фосфора и РЗЭ в железняках –микровключения фосфатов в кортексе ооидов.

Были определены ранее неописанные аутигенные минералы железняков Аятского бассейна, такие как барит, вюртцит и фосфат редкоземельных элементов.

Впервые получены данные по составу стабильных изотопов углерода и кислорода ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$) в карбонатах и содержание органического углерода аятских руд, которые помогли установить особенности формирования сидерита.

Практическая значимость работы. Разработанная литофациальная модель создает основу для прогнозирования перспективных площадей в северо-западной части Тургайского прогиба. Выявленные минеральные разновидности ооидов имеют важное значение при выборе технологий их обогащения и переработки. Установленные особенности распределения редкоземельных элементов в аятских железняках представляют практический интерес для оценки возможностей попутного извлечения редких земель при промышленном освоении месторождений.

Фактический материал и методы исследования. В качестве основного каменного материала для диссертационной работы послужили образцы, отобранные из естественных выходов железных руд и вмещающих пород в западной части Аятского бассейна.

Методика исследования включает следующие виды лабораторно-аналитических работ: петрографический анализ; сканирующую электронную микроскопию (СЭМ); рентгенодифракционный анализ (РДА); рентгенофлуоресцентный анализ (РФА); просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ); Раман-спектроскопия; масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС); изотопная масс-спектрометрия; Rock-eval.

Основные защищаемые положения.

1. Железняки западной части Аятского бассейна формировались в обстановке понижения уровня моря в отличительных условиях седиментации. Ооидовые железняки накапливались при высокой гидродинамической активности придонных вод, а однородные – при низкой. При повышении уровня моря образовывались подстилающие алевролиты бассейна. Изменение области сноса обломочного материала способствовало накоплению перекрывающих песчаников.
2. В морских железняках аятской свиты выделяется восемь основных минеральных разновидностей железистых ооидов и пелоидов. Формирование гётит-бертьериновых, сидерит-гётитовых, гётит-сидерит-бертьериновых, сидерит-бертьериновых, сидеритовых и гипс-бертьериновых разновидностей происходило на ранней стадии диагенеза, образование бертьерин-пиритовых и барит-пирит-бертьериновых на поздней стадии диагенеза при замещении раннедиагенетических форм.
3. Геохимическая специфика морских железняков проявляется в повышенных концентрациях железа, фосфора, а также сопутствующих РЗЭ+Y, что отличает их от вмещающих пород. Максимальные концентрации РЗЭ приурочены к железистым ооидам. Основными минеральными формами РЗЭ являются микровключения фосфатов в кортексе ооидов.

Публикации и апробация результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 15 научных работ. Из них 5 статей размещены в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК. При этом 5 публикаций изданы в международных журналах, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science и относящихся к квартилям Q1-Q2.

Основные положения диссертации были представлены на 10 всероссийских и международных конференциях, включая: Всероссийскую конференцию «Новое в познании процессов рудообразования» (Москва, 2021); Международную конференцию «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2021-2024); Всероссийскую Уральскую минералогическую школу (Екатеринбург, 2022); XXXIII молодежную научную школу-конференцию «Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии» (Апатиты, 2022); Всероссийскую школу студентов, аспирантов, молодых специалистов и учёных по литологии (Екатеринбург, 2024); Всероссийскую Рудную школу ЦНИГРИ (Москва, 2024). Публичное обсуждение результатов способствовало их апробации и подтвердило актуальность проведенных исследований.

В рамках работы над диссертацией **соискатель** принимал участие в качестве исполнителя в **двух** грантовых проектах: РНФ 21-17-00019 «Биогеохимические циклы, источники металлов и эволюция вещества в мел-палеогеновых морских железорудных месторождениях» и ГЗ Наука FSWW-2023-0010 «Комплексные исследования на базе природных геологических лабораторий».

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 7 глав и заключения. общим объемом 89 страниц. В ней содержится 20 рисунков и 4 таблицы. Список литературы включает 127 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность темы, определены цели и задачи исследования, указаны объект, предмет, научная новизна и практическая значимость работы. **Глава 1** освещает современное состояние проблемы и содержит обзор изучения морских железняков Аятского бассейна. Особое внимание уделено представлениям о генезисе и составе этих образований, а также проблемным аспектам, требующим уточнения. **Глава 2** описывает исходные материалы, методы получения аналитических проб и методы исследования. **Глава 3** посвящена геологическому строению района. Рассматриваются стратиграфические комплексы палеозоя, мезозоя и кайнозоя, структура складчатого фундамента и осадочного чехла. Отдельное внимание уделено тектоническим особенностям, определяющим размещение рудоносных слоев. **Глава 4** содержит характеристику литологического строения и литофациальных особенностей морских железняков и вмещающих пород. Рассмотрены разрезы западного и восточного фланга изучаемой (западной) части бассейна. В **главе 5** представлены результаты минералогических исследований. Описан минеральный состав железных руд и отмечены различия в минеральном составе разрезов западного и восточного флангов. Выделены минеральные виды ооидов, проведен анализ их морфологии; на основе выделенных признаков сделаны выводы об особенностях их формирования. **Глава 6** включает геохимическую характеристику морских железняков. Рассматривается распределение макро- и микроэлементов, геохимических индексов, редкоземельных элементов. Изучены газово-жидкие включения и изотопный состав сидеритового цемента, что позволило уточнить физико-химические параметры осадочной среды. **Глава 7** обобщает факторы, контролирующие распространение и вещественный состав железняков в пределах бассейна. Рассматриваются геолого-структурная позиция, палеогеографическая обстановка,

климатические условия, а также возможные источники поступления железа и других металлов в зону осадконакопления. В **заключении** сформулированы основные научные результаты и выводы.

Личный вклад автора заключается в выполнении большей части аналитических исследований. Автором самостоятельно выполнен полный цикл подготовки образцов, включая изготовление шлифов, аншлифов, аналитических проб и отбор монофракций ооидов. Лично проведен ряд исследований: оптико-микроскопические исследования, съемка на сканирующем электронном, силикатный анализ на рентгенофлуоресцентном спектрометре и определение ГЖВ сидерита на рамановском спектрометре. Автором осуществлена комплексная интерпретация всех полученных данных, включая результаты масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и рентгенофлуоресцентного анализа, просвечивающей электронной микроскопии, рентгенодифракционного анализа, а также данных изотопной масс-спектрометрии и Rock-eval анализа. Все теоретические и практические результаты диссертации получены автором лично, что позволило сформулировать основные выводы и положения, выносимые на защиту.

Благодарности. Выражаю благодарность за научное руководство и ценные замечания научному руководителю, Рудмину М. А. Благодарю коллег из Томского политехнического университета: Якич Т. Ю., Рубана А. С., Краснощекову Л. А., Ананьева Ю. С. и Гаврилова Р. Ю. за ценные советы и консультации. Также искренне благодарю своих друзей и коллег Крутенко Д. С. и Крутенко М. Ф. за помощь и поддержку. Особую признательность выражаю своей супруге, Максимовой Н. А., за постоянное понимание и всестороннюю поддержку в период написания диссертации.

Краткая геологическая характеристика Аятского бассейна морских железняков

Тургайский прогиб представляет собой крупную платформенную структуру, соединяющую Западно-Сибирскую и Туранскую плиты, и ограничен Южным Уралом на западе и Восточно-Казахским нагорьем на востоке (Рис.1 А. Бойцова и др., 1955; Найдин, 2006; Папулов и др., 1990; Сидоренко, 1975; Формозова, 1959). Аятский железорудный бассейн расположен в северной части Тургайского прогиба (рис. 1). Административно бассейн находится на территории Северного Казахстана, к юго-западу от г. Костанай, около поселков Варваринское и Журавлевка. С геологической точки зрения, бассейн оконтурен со всех сторон крупными тектоническими структурами. С восточной стороны его граница проводится по зоне Центрально-Тургайского разлома, с западной – по Тобольскому разлому. Южная граница бассейна проводится по Кустанайскому поднятию, а северная – по зоне Качарского широтного разлома (Бекмухаметов, Бекмухаметова, 2014; Сидоренко, 1975; Топорков, 1958).

Первые сведения о железных рудах Аятского бассейна датируются 1890-ми годами и связаны с исследованиями геолога А.А. Краснопольского, который впервые описал рудоносные образования Северного Казахстана. В середине XX века бассейн стал объектом исследований советских учёных, среди которых В.П. Кротов, Л.Н. Формозова, Д.Д. Топорков, И.П. Новохатский, А.В. Сидоренко, А.Л. Яницкий, А.Э. Бекмухамедов и многие другие. Их работы, посвящённые в первую очередь оценке рудного потенциала и изучению богатых залежей железных руд осадочного генезиса, заложили основу для современного понимания геологии региона. Формирование морских отложений Аятского бассейна происходило в поздне меловое время в мелководных заливах, лагунах и прибрежных областях в условиях

общего опускания территории и обширной трансгрессии (Кротов, 1956; Новохатский, 1957; Папулов и др., 1990; Формозова, 1959).

Морские железняки распространены среди пород аятской (сантон-кампан) и журавлевской свит (маастрихт) (Папулов и др., 1990; Сидоренко, 1975; Формозова, 1959). Из них наиболее представительной для изучения является аятская свита, поскольку в результате палеогеновой трансгрессии часть журавлевской свиты была эродирована (Найдин, 2006; Сидоренко, 1975). Аятская свита залегает с разрывом на поверхности палеозойского фундамента ближе к восточному флангу и местами на континентальных отложениях сеноман-туронского возраста ближе к западному флангу изучаемой части Аятского бассейна (рис. 1) (Папулов и др., 1990; Сидоренко, 1975).

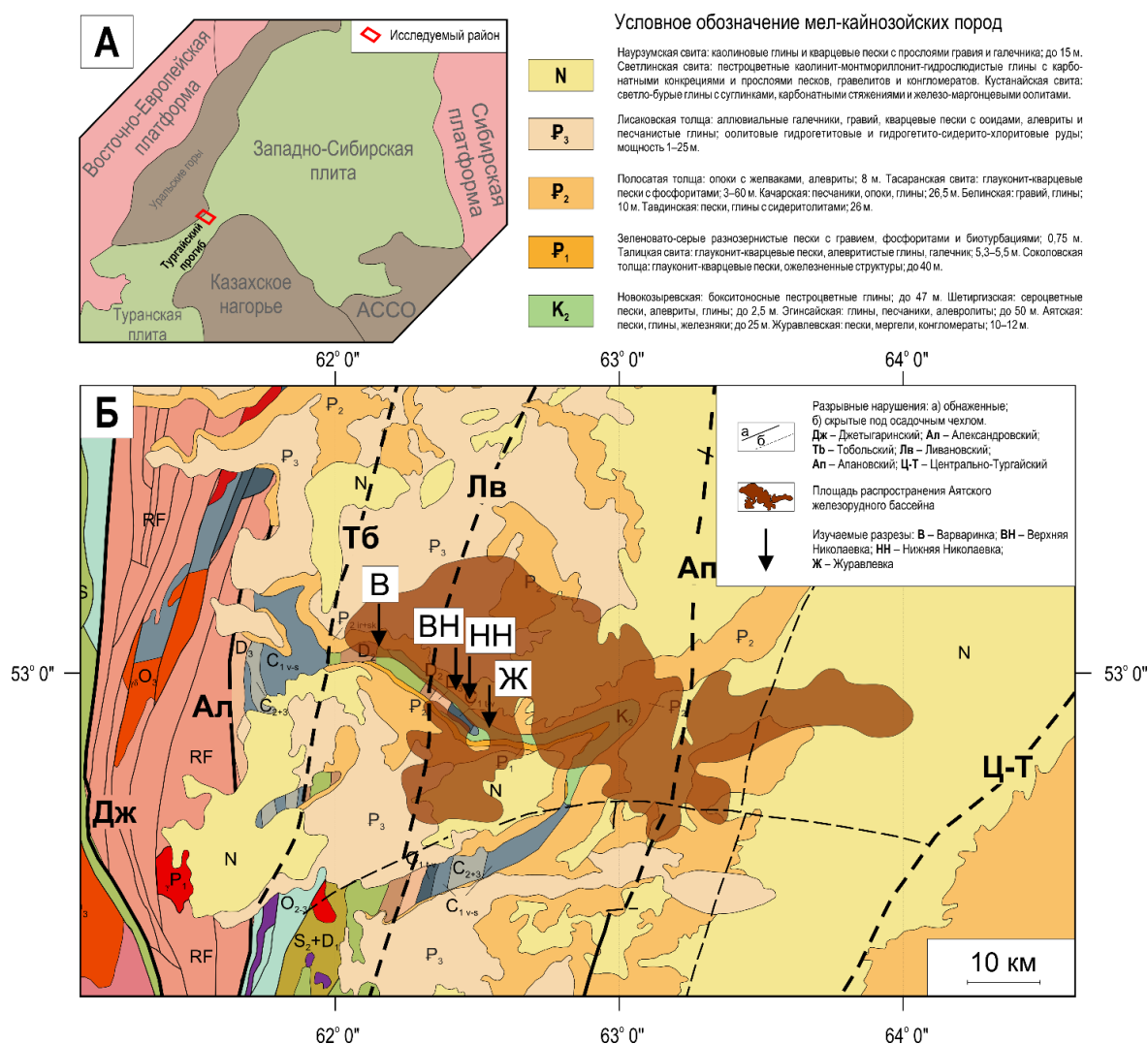


Рисунок 1. Обзорная (А) и геологическая (Б) схемы района исследований с контуром Аятского железорудного бассейна (Топорков, 1958) и положения изучаемых разрезов.

Породы аятской свиты обнажаются по левому берегу р. Аят, а также вскрыты карьерами Варваринского, Качарского, Соколовского и Сарбайского месторождений (Папулов и др., 1990; Сидоренко, 1975). В отложениях свиты установлены макро- и микрофаунистические остатки (гастроподы, перидиниевые водоросли) и спорово-пыльцевые комплексы, характеризующие прибрежные части моря (Киприянова, 1977; Папулов и др., 1990). Среди

растений преобладают папоротники (семейства *Gleicheniaceae*, *Cyatheaceae*, *Polypodiaceae*) и голосеменные (*Pinaceae*), а находки пыльцы цветковых растений (*Vacuopollis*, *Trudopollis*) служат важными руководящими таксонами, позволяя отнести аятскую свиту к сanton-кампанскому возрасту (Киприянова, 1977; Папулов и др., 1990). Наличие двухстворчатых моллюсков рода *Korobkovitrigonia* в кварц-глауконитовых песчаниках подтверждает, что свита накапливалась в прибрежно-мелководных условиях с глубиной моря порядка 10-20 м (Папулов и др., 1990).

Обоснование защищаемых положений

Первое защищаемое положение

Железняки западной части Аятского бассейна формировались в обстановке понижения уровня моря в отличительных условиях седиментации. Ооидовые железняки накапливались при высокой гидродинамической активности придонных вод, а однородные – при низкой. При повышении уровня моря образовывались подстилающие алевролиты бассейна. Изменение области сноса обломочного материала способствовало накоплению перекрывающих песчаников.

Ключевой особенностью строения Аятского бассейна является латеральная изменчивость в залегании рудовмещающих толщ. При прослеживании ооидовых железняков с запада на восток фиксируется закономерное изменение характера их залегания: в западной части железняки лежат непосредственно на бокситоносных отложениях сеноман-туронского возраста, тогда как восточнее залегают на литологически разнородных породах аятской свиты, включая базальные гальки с песками, алевролиты и прослои песчаников. Для изучения строения аятской свиты были привлечены материалы четырёх разрезов, расположенных вблизи населённых пунктов Варваринка, Николаевка и Журавлёвка: разрезы Варваринка, Верхняя Николаевка, Нижняя Николаевка и Журавлёвка. Среди них наибольшую стратиграфическую и литолого-фациальную информативность представляют разрезы Варваринка, расположенный в западной окраине бассейна, и Нижняя Николаевка, характеризующая восточный фланг. На основании анализа условий залегания, текстурно-структурных особенностей и минерального состава пород в пределах аятской свиты выделены терригенные и хемогенные литофации (рис. 2). К терригенным литофациям отнесены алевролиты с прослоями разнозернистых песчаников (F1), а также кварц-глауконитовые средне- и грубозернистые песчаники (F2). Хемогенные литофации представлены однородными железяками с прослоями мелкозернистого песчаника (F3) и ооидовыми железяками с незначительной примесью мелкозернистого песчаника и тонкими прослоями гипса (F4).

Литофация алевролитов с прослоями разнозернистого песчаника (F1) залегает в основании аятской свиты на поверхности палеозойских пород и в средней части Николаевского разреза между однородными и ооидовыми железяками (рис. 1). Мощность отложений варьирует от 1 до 2 м. При этом в западной части Аятского бассейна алевролиты выклиниваются с востока на запад, что указывает на латеральную изменчивость условий осадконакопления в сторону береговой линии. Породы состоят из мелкоалевритового кварца и полевых шпатов (40-60 %), глинистого матрикса (иллит-сметита и каолинита; 40 %), а также единичных зёрен циркона и ильменита (рис. 2 А). Обломочные зерна терригенного материала имеют изометричные полуокруглые и полигональные формы с размером от 0,01 до 0,02 мм.

Литофация кварц-глауконитовых средне- и грубозернистых песчаников (F2) представлена слабо сцементированными породами с прослоями грубозернистого песчанистого материала. Мощность изменяется от 0,6 до 5 м, при этом в западной части бассейна увеличивается доля полевых шпатов до 10 %, а также появляются прослои грубозернистых песчаников с мощностью до 0,1 м. Обломочная фракция состоит преимущественно из хорошо отсортированного кварца, с редкими зёрнами полевых шпатов, матрикс представлен иллит-смектитом. Среди аутигенных минералов в литофации преобладает глауконит и в меньшей степени пирит. Пирит встречается в виде фрамбоидов, приуроченных к органическим реликтам. Содержание глауконита и пирита не превышает 10 %. В породе также присутствуют остатки раковин планктонных гастропод.

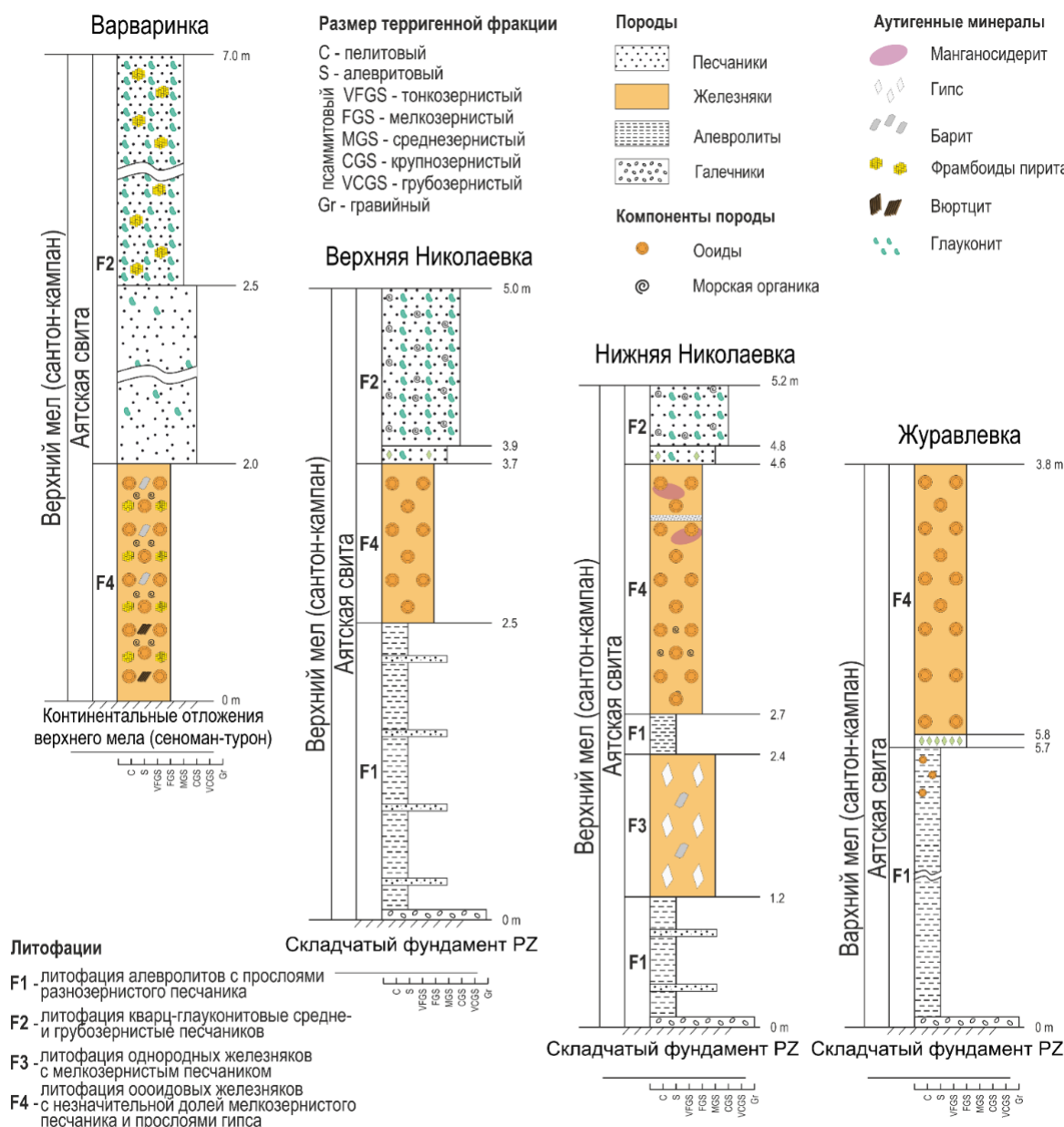


Рисунок 2. Литолого-стратиграфические колонки изучаемых разрезов аятской свиты.

Литофация однородных железняков с мелкозернистым песчаником (F3) залегает в основании слоя железняков в виде чашеобразных линзовидных тел, достигающих мощности в раздуде до 1,2 м и протяжённости 250-300 м. Чашеобразная форма тел свидетельствует об их формировании в углублениях донного рельефа, таких как межбаровые понижения или

внутрибассейновые мульды. В западной части бассейна (разрез «Варваринка») эта литофация не прослеживается. Железняки имеют желтовато-бурый цвет, состоят из гётита (45-50 %), сидерита (15-20 %), гипса (10-25 %) и кварца (5-20 %). Кварцевые зерна хорошо сортированы, слабоокатаны, их размер не превышает 0,25 мм (рис 3 В). Характерной особенностью являются мелкие призматические кристаллы гипса, развивающиеся по трещинам пород.

Литофация ооидовых железняков с мелкозернистым песчаником (F4) представлена протяженными пластами с выдержанной мощностью около 2 м. Породы содержат 30-40 % железистых ооидов и пелоидов сферической и субсферической формы размером 0,3-0,7 мм, 60-70 % сидеритового цемента, а также до 5 % терригенного кварца и органических остатков. Минеральный состав характеризуется карбонатным цементом, преимущественно сидеритом (40-50 %), с участками манганосидерита, гётит-бертьериновыми ооидами и второстепенными аутигенными минералами (пирит, вюртцит, барит и гипс). В некоторых участках литофации отмечаются прослои гипса мощностью 3-4 см и протяжённостью 10-30 м (рис. 2), а сами железистые ооиды содержат включения кварцевых зёрен в кольцевых зонах кортекса. Кортекс, являющийся основной оболочкой ооидов, имеет ритмично-зональное строение и зачастую покрывает затравочные частицы, которые иногда представлены гипсом. Подобные особенности свидетельствуют о формировании ооидов литофации F4 в условиях раннего диагенеза (ранний аутигенез), предшествующего литификации породы.

Аятская свита демонстрирует смену литофаций, обусловленную эвстатическими колебаниями уровня моря, изменениями гидродинамического режима и характера поступления обломочного и железистого материала. На основании литофациального анализа и палеонтологических находок предложена реконструкция изменений уровня моря в пределах Аятского бассейна во время сантон-кампанского периода (рис. 3).

На раннем этапе накапливалась литофация алевролитов с прослоями разномзернистого песчаника (F1). Увеличение пространства осадконакопления в условиях слабого поступления обломочного материала способствовало накоплению тонкодисперсного терригенного материала (алевриты, глины). Кратковременные события повышенной энергии (штормовые воздействия, прибрежные течения, локальные эрозионные каналы) приводили к переотложению и временной аккумуляции более грубых фракций, формирующих тонкие прослои песчаника в составе алевритового слоя.

С понижением уровня моря формировалась литофация однородных железняков с мелкозернистым песчаником (F3). Осадконакопление происходило в локальных понижениях морского дна с ограниченной гидродинамической активностью, что обеспечивало осаждение железистого материала при отсутствии условий для ооидообразования. Очередное повышение уровня моря сопровождалось накоплением литофации алевролитов (F1), фиксирующей поступление тонкодисперсного материала в условиях слабого поступления терригенного материала.

Дальнейшее понижение уровня моря обусловило усиление гидродинамики, что привело к формированию литофации ооидовых железняков с мелкозернистым песчаником (F4). В этих условиях более активные течения обеспечивали перемещение и вращение затравочных частиц, на поверхности которых происходило ритмичное осаждение железистого вещества, формировавшее ооиды. В составе данной литофации фиксируется прослой гипса, интерпретируемый как результат эвапоритовых процессов. Его формирование, по-видимому,

связано с интенсивным испарением морской воды в условиях ограниченного водообмена, что способствовало осаждению сульфата кальция в осадочной толще.

Последующее повышение уровня моря связано с развитием литофации кварц-глауконитовых средне- и грубозернистых песчаников (F2). В этот период береговая линия достигала склонов Южного Урала (Папулов и др., 1990), что способствовало поступлению в бассейн более крупного терригенного материала с крутых террас. В результате формировались песчаники с преобладанием кварца и полевого шпата, местами содержащие более грубые обломки.

Последовательность литофаций в разрезе аятской свиты отражает закономерные изменения условий осадконакопления, контролируемые вариациями гидродинамической активности в областях сноса обломочного материала. Накопление алевритовых и железистых осадков (F1, F3, F4) происходило в периоды, когда областью питания служили пологие склоны Кустанайского поднятия, что обусловило формирование спокойного гидродинамического режима. Смена литофации на песчаники (F2) свидетельствует об активизации гидродинамики сноса, вызванной продвижением береговой линии в область крутых склонов Южного Урала, ставших источником крупных обломков аллотигенной фракции.

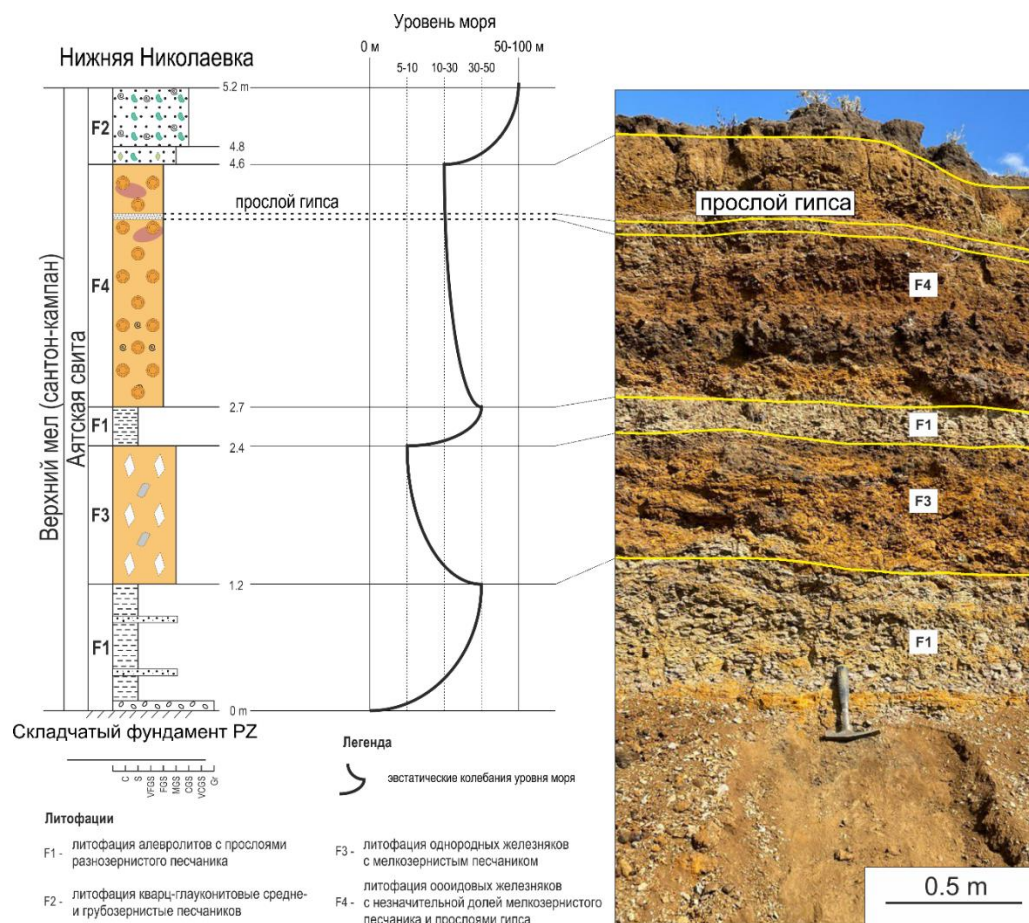


Рисунок 3. Литологическая колонка и литофации аятских отложений, отражающие эвстатические циклы уровня моря на примере разреза Нижняя Николаевка.

Второе защищаемое положение

В морских железняках аятской свиты выделяется восемь основных минеральных разновидностей железистых ооидов и пелоидов. Формирование гётит-бертьериновых, сидерит-гётитовых, гётит-сидерит-бертьериновых, сидерит-бертьериновых,

сидеритовых и гипс-бертьериновых разновидностей происходило на ранней стадии диагенеза, образование бертьерин-пиритовых и барит-пирит-бертьериновых на поздней стадии диагенеза при замещении раннедиагенетических форм.

Классификация ооидов (оолитов) железорудных отложений Приаралья впервые была предложена Л.Н. Формозовой в 1959 году. В своей работе она выделила два типа ооидов: сплошные гидрогетитовые и ооиды с концентрически-зональным строением. Данная классификация применима и к железнякам Аятского бассейна, однако требует дополнений, учитывающих новые данные. Проведённое качественное и количественное определение минеральных типов ооидов не только уточняет их состав, но и позволяет выявить пространственные зоны формирования морских железняков. Это имеет практическое значение, в том числе для разработки технологических схем обогащения минерального сырья.

Ранее в исследованиях предшественников (Кротов, 1956; Новохатский, 1957) среди минеральных ассоциаций ооидов аятских железняков выделялись преимущественно гётит-сидерит-хлоритовые типы. Однако результаты настоящего исследования выявили наличие ранее не описанных минералов в составе ооидов. Эти находки требуют актуализации существующей классификации, что позволит более полно охарактеризовать процессы формирования железорудных ооидов в морских условиях.

По результатам рентгеновского дифракционного анализа (РДА, рис. 4) установлено, что в валовом составе ооидовых железняков Варваринского разреза основным минералом является сидерит (до 90 %). Второстепенные компоненты представлены пиритом (около 2 %) и алюмосиликатной фазой (до 8 %). В то же время ооидовые железняки района Нижней Николаевки характеризуются преимущественно гётитовым и смешаннослойным иллит-сметитовым составом. Однородные железняки, в сравнении с ооидовыми, отличаются доминированием гётита (80 %), а также заметно более высоким содержанием кварца (до 10 %) и гипса (до 10 %).

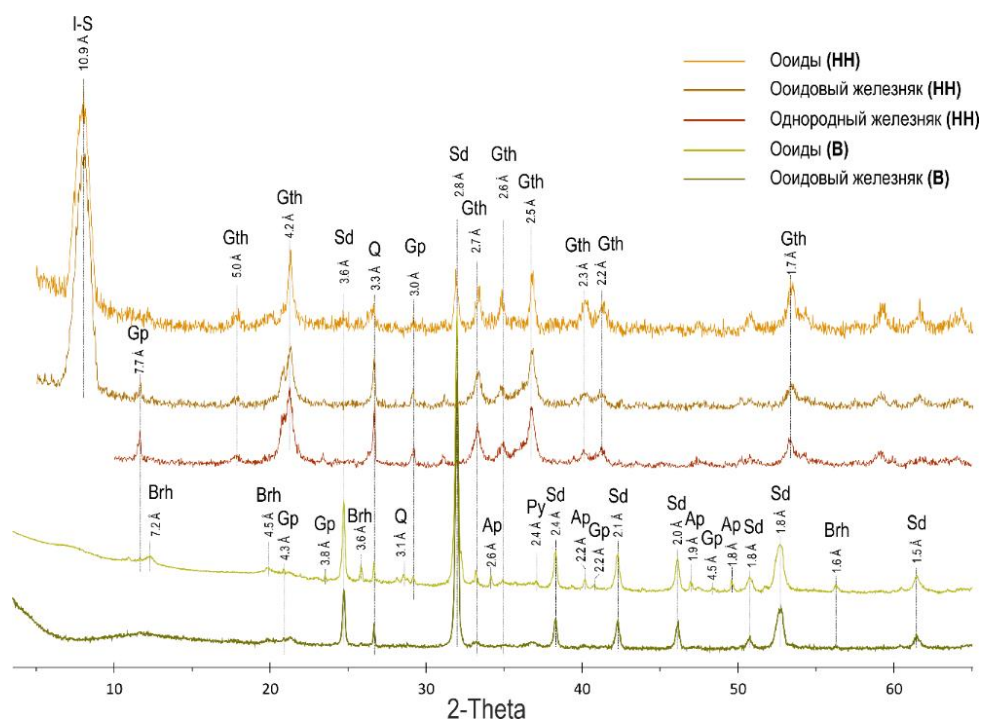


Рисунок 4. Рентгеновская дифрактограмма ооидовых железняков и фракции ооидов. oi – ооидовый железняк; od – монофракция ооидов. Ap – апатит; Brh – бертьерин; Gr – гипс; Gth – гетит; Qz – кварц; Sd – сидерит. В – разрез Варваринка; НН – разрез Нижняя Николаевка.

РДА монофракции ооидов из Варваринского разреза выявил более сложный минеральный состав. В ооидах идентифицированы следующие минералы: гипс (рефлексы 7,7, 4,3 и 3,8 Å), бертьерин (7,2 и 4,5 Å), сидерит (2,8, 1,7 и 1,5 Å), апатит (3,6, 2,6 и 2,2 Å), кварц (3,3 и 3,1 Å), гётит (2,7 и 2,6 Å) и пирит (2,4 Å). Монофракция ооидов из Нижней Николаевки отличается меньшим минералогическим разнообразием: в сравнении с валовым составом появляются характерные пики сидерита, тогда как интенсивность основного рефлекса кварца заметно снижается (рис. 4).

По данным просвечивающей микроскопии кортекс ооидов сложен преимущественно сидеритом, гетитом и в меньшем количестве встречается бертьерин (рис. 5). Гетит встречается в виде таблитчатых и призматических кристаллов (рис. 5 Б), а бертьерин образует удлиненные волокнистые агрегаты (рис. 5 В). Микрочастицы бертьерина имеют извилистые очертания. На картинах локальной электронной дифракции гетит отличается рефлексами при 5,0, 4,2-4,3, 2,4, 2,3, 1,7 Å, а сидерит 2,8, 1,7, 1,5 Å. Бертьерин идентифицируется по характерным волокнистым структурам и обладают межплоскостное расстояние 7,0-7,3 Å.

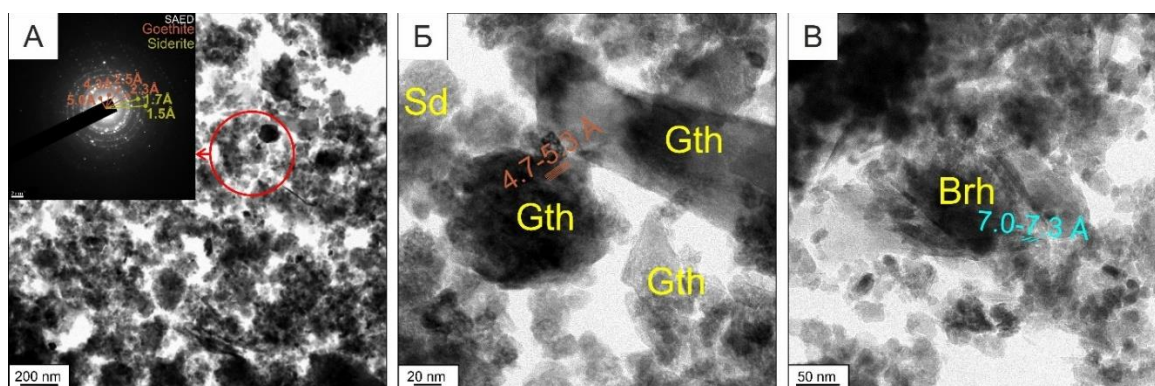


Рисунок 5. ПЭМ-снимки кортекса ооидов (внешняя оболочка): А – обзорный снимок с изображением локальной электронной дифракции на выбранной области (красный круг); Б – зерно сидерита и кристаллы гетита с межплоскостным расстоянием равным 4,7-5,3 Å; В – волокнистые изогнутые частицы бертьерина с межплоскостным расстоянием 7,0-7,3 Å. Brh – бертьерин; Gth – гетит; Sd – сидерит.

На основании данных сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) установлено, что ооиды аятских железняков обладают сложным минеральным составом и демонстрируют разнообразные взаимоотношения между минеральными компонентами (рис. 6). Помимо ранее выявленных минералов, таких как сидерит, гётит и бертьерин, методом СЭМ (рис. 6, 7), в составе ооидов дополнительно обнаружены барит, вюртцит и фосфаты редкоземельных элементов (РЗЭ).

Сидерит, являясь наиболее распространённым минералом, доминирует как в валовом составе железняков, так и в составе ооидов (рис. 6 А, Б, В). В то же время гётит и гипс встречаются преимущественно в ооидах, что может свидетельствовать о их формировании в специфических диагенетических условиях, отличных от условий образования цемента железняков. Химический состав сидерита остаётся стабильным, однако в кортексе ооидов наблюдается примесь ванадия до 0,5 %. Кортекс гётита в ооидах периодически содержит

примеси фосфора (до 0,4 %) и ванадия (до 0,3 %). По минеральным ассоциациям ооидов в аятских железнях часто встречаются такие типы, как гётит-бертьериновые (рис. 6 Г) или гётит-сидеритовые ооиды. Реже наблюдаются ооиды гётит-сидерит-бертьеринового (рис. 6 А) и сидерит-бертьеринового состава. В некоторых случаях, когда в качестве ядер ооидов выступает гипс, их кортекс всегда состоит из бертьерина (рис. 6 Д). Особый интерес также представляют фосфаты РЗЭ, которые преимущественно сингенетически связаны с бертьериновым и сидеритовым кортексом (рис. 6 Е). Это отличает аятские железнйки от керченских (Sokol et al., 2020), где фосфаты РЗЭ преимущественно ассоциированы с оксигидроксидами железа, что свидетельствует о различиях в условиях осадконакопления.

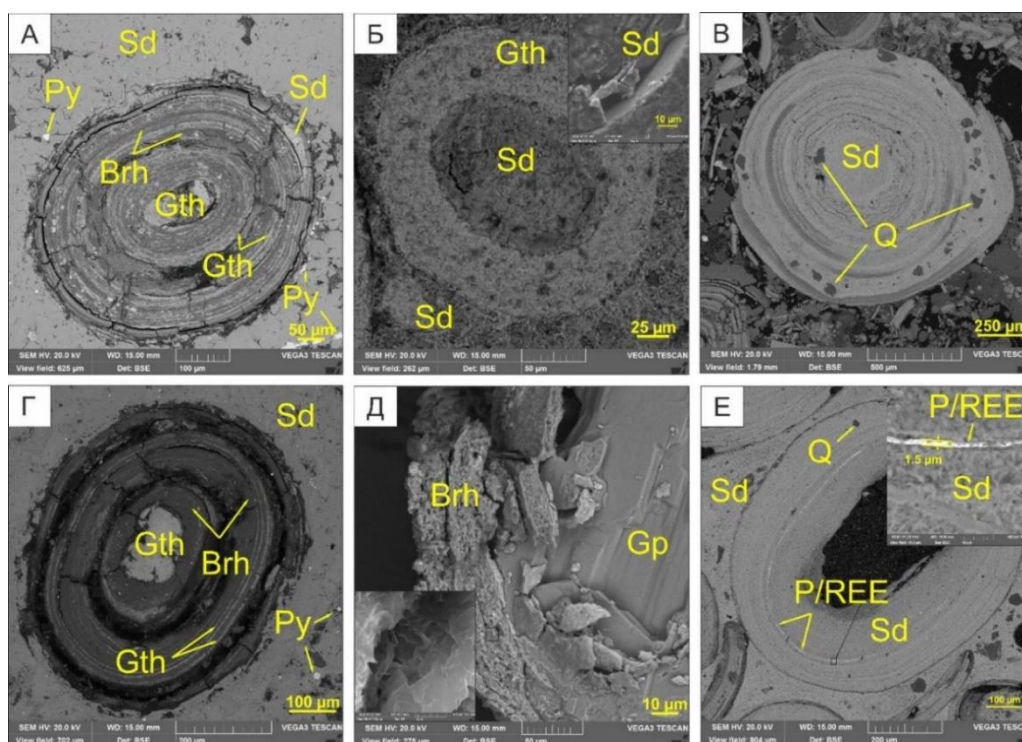


Рисунок 6. СЭМ-снимки основных аутигенных минералов: А – гётит-сидерит-бертьериновый ооид; Б – сидерит-гётитовый ооид; В – сидеритовый ооид с включениями кварца; Г – гётит-бертьериновый ооид; Д – бертьерин-гипсовый ооид; Е – сидеритовый ооид с микровключением фосфата РЗЭ в виде отдельного концентрата в кортексе. Brh – бертьерин; Gth – гётит; P/REE – фосфат РЗЭ; Py – пирит; Q – кварц; Sd – сидерит

Анализ текстурно-структурных особенностей ооидов указывает на их формирование в условиях активной придонной гидродинамики. Их рост происходил в результате многократного перекачивания по морскому дну, что приводило к ритмичному осаждению минеральных слоёв и включению обломочных частиц в растущий кортекс (рис. 6 В). О смене физико-химических условий во время роста свидетельствует присутствие в концентрических оболочках одного ооида минералов, стабильных в различных обстановках: гётита (окислительные условия) и сидерита (восстановительные условия) (рис. 6 А, Б). Данное ритмичное переслаивание минеральных фаз в кортексе является седиментационным признаком и исключает возможность их формирования за счет диагенетического преобразования единой исходной массы.

Несмотря на преобладание седиментационных механизмов формирования, часть ооидов претерпела постседиментационные изменения. Преобразования затронули в основном ооиды

с механическими нарушениями и трещинами, возникшими в процессе осаждения (перекачивания). Диагенетические преобразования выразились в локальном изменении структуры и минерального состава именно этих дефектных зон, в то время как неповрежденные ооиды без трещин сохранили исходное концентрически-зональное строение. Наблюдения показали, что в ходе диагенеза происходило замещение отдельных минеральных компонентов: гётитовый кортекс подвергался замещению пиритом, тогда как гипс – баритом. В составе ооидов пирит встречается в виде микровключений идиоморфных кристаллов размером до 25 мкм (рис. 7 А), а также в форме концентрических зональных колец (рис. 7 Б), что свидетельствует о его позднедиагенетической природе. Вторым по распространённости минералом является барит, фиксируемый как в виде микровключений в кортексе ооидов, так и в форме концентрических зон, сложенных скоплениями призматических кристаллов (рис. 7 В). Барит нередко ассоциирует с пиритом и бертьерином. В отличие от гётит-бертьерин-сидеритовых концентров, баритовые – отличаются крайне неоднородным строением и выраженной структурой замещения (рис. 7 В). Толщина таких концентрических образований достигает 100 мкм, а отдельные призматические кристаллы барита – 30 мкм. Менее распространёнными фазами в составе ооидов являются вюрцит и апатит. Вюрцит наблюдается в виде розетковидных агрегатов тонкопластинчатых зёрен (рис. 7 Г), тогда как апатит формирует сростки призматических кристаллов размером до 5 мкм, локализованных преимущественно в пределах бертьеринового кортекса (рис. 7 Д).

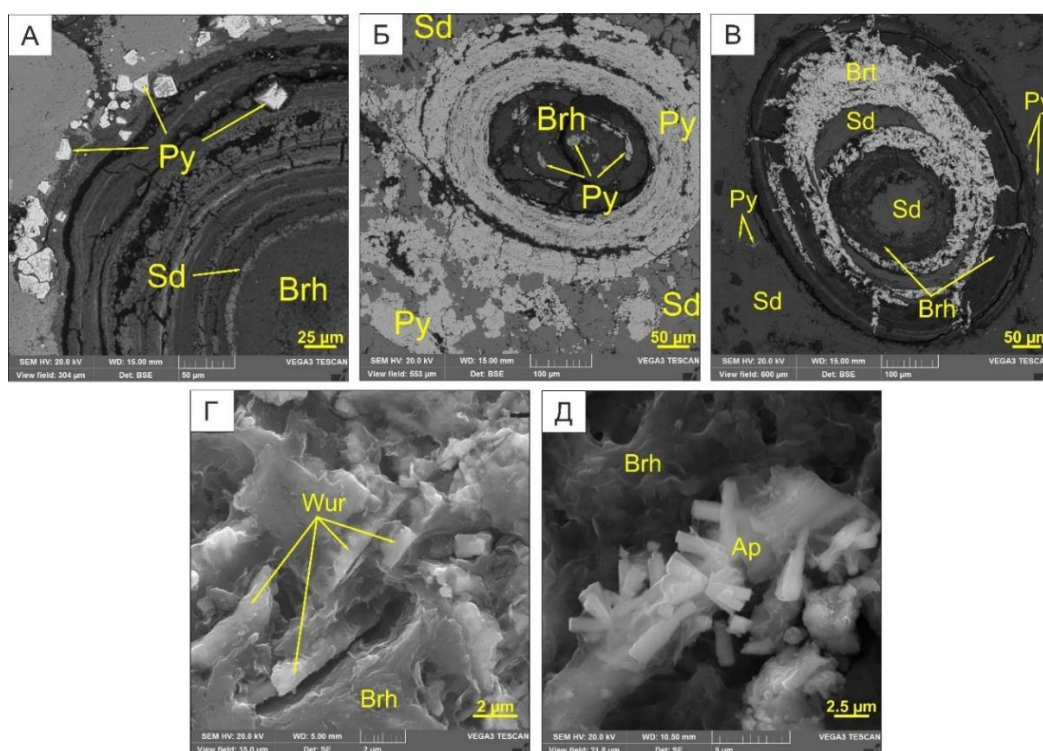


Рисунок 7. СЭМ-изображения реже встречающихся аутигенных минералов: А – сидерит-бертьериновый ооид с микровключениями идиоморфных кристаллов пирита; Б – массивный пирит среди сидеритового цемента и бертьерин-пиритовый ооид; В – сидерит-бертьериновый ооид с трещиной, заполненной баритом; Г – пластинчатые агрегаты вюрцита среди бертьеринового кортекса ооида; Д – призматические сростания апатита в бертьериновом кортексе ооида. Ap – апатит; Brh – бертьерин; Brt – барит; Py – пирит; Sd – сидерит. Wur – вюрцит.

На основе минералогического анализа установлено, что основными минералами, формирующими ооиды, являются сидерит, гётит и бертьерин, тогда как пирит, вюрцит, фосфаты редкоземельных элементов (РЗЭ), барит и гипс представлены в меньших количествах и относятся к редким минералам. На основе минеральных ассоциаций было выделено восемь типов ооидов в порядке их распространенности (табл. 1).

Таблица 1. – Классификация минеральных типов ооидов аятских железняков.

Типы ооидов	Микровключения
Гётит-бертьериновые	вюрцит, пирит, РЗЭ
Сидерит-гётитовые	пирит
Гётит-сидерит-бертьериновые	пирит, вюрцит
Сидерит-бертьериновые	апатит, вюрцит, пирит, РЗЭ
Сидеритовые	пирит
Бертьерин-пиритовые	вюрцит, РЗЭ
Барит-пирит-бертьериновые	РЗЭ, вюрцит
Гипс-бертьериновые	апатит, вюрцит

В морских ооидовых железняках западной части Аятского бассейна рассматривается абиотическая модель формирования ооидов. Согласно предложенной модели, формирование железных ооидов осуществляется через стадию аморфной предшествующей фазы, при которой первичное осаждение железа происходит в форме аморфного ферригидрита из пересыщенных поровых растворов придонного слоя. На основании литофациального анализа и минералогических наблюдений выделяются следующие основные этапы формирования ооидов:

- 1. Формирование ооидов и пелоидов.** При поступлении железистого вещества в водную толщу тонкодисперсные гидроксиды железа осаждались на поверхности мелкообломочного материала (алевритовых частиц, песчинок кварца, гипса) или результате коагуляции аморфных фаз гидроксидов железа непосредственно в водной толще. При этом первичный минеральный состав ядра зависел от окислительно-восстановительных условий: в кислородной среде формировались гётитовые микросферолиты, тогда как в субоксической обстановке возникали ядра бертьеринового состава. (рис. 8 А).
- 2. Рост кортекса.** Активная гидродинамика придонного слоя обеспечивала постоянное перемещение частиц. Это приводило к их циклическому переходу через различные физико-химические рубежи (например, границы раздела вода-осадок, зоны с разными значениями pH и Eh). Смена окислительных (благоприятных для осаждения гидроксидов железа) и восстановительных (благоприятных для формирования сидерита) обстановок обусловила ритмичное осаждение железистого материала различного минерального состава. В результате сформировались концентрически-зональные кортексы, сложенные чередующимися слоями (рис. 8 А, Б).
- 3. Диагенетические преобразования.** В процессе диагенеза первичные минералы ооидов подверглись частичному замещению и перекристаллизации. Рост новых минералов характерен для ооидов с нарушенной структурой: развитием трещинных и пустотных пространств. В частности, наблюдалось преобразование гётита в пирит внутри трещиноватых и разрушенных ооидов (рис. 7 Б, В), что было обусловлено проникновением восстанавливающих флюидов по зонам механических нарушений.

Параллельно или на последующей стадии протекало замещение гипса баритом в тех ядрах ооидов, где гипс служил затравочной частицей (рис. 14 Б). Этот процесс свидетельствует об изменении геохимии поровых растворов. На поздней стадии диагенеза в системе появились новые минеральные фазы. В межзерновом пространстве кристаллизовались идиоморфные зёрна пирита, вюртцита и апатита, а также пиритовый кортекс, вероятнее всего сформированный на месте гетита (рис. 8 В).

Таким образом, результаты исследования позволяют заключить, что формирование ооидов в Аятском бассейне включало как седиментационные, так и диагенетические стадии. Ключевыми факторами седиментационного этапа могли быть активная гидродинамика мелководной обстановки и поступление железистого вещества. На диагенетической стадии, судя по наличию новообразованных минералов, произошли существенные преобразования вещественного состава, выразившиеся в формировании парагенезисов, устойчивых в восстановительных условиях.

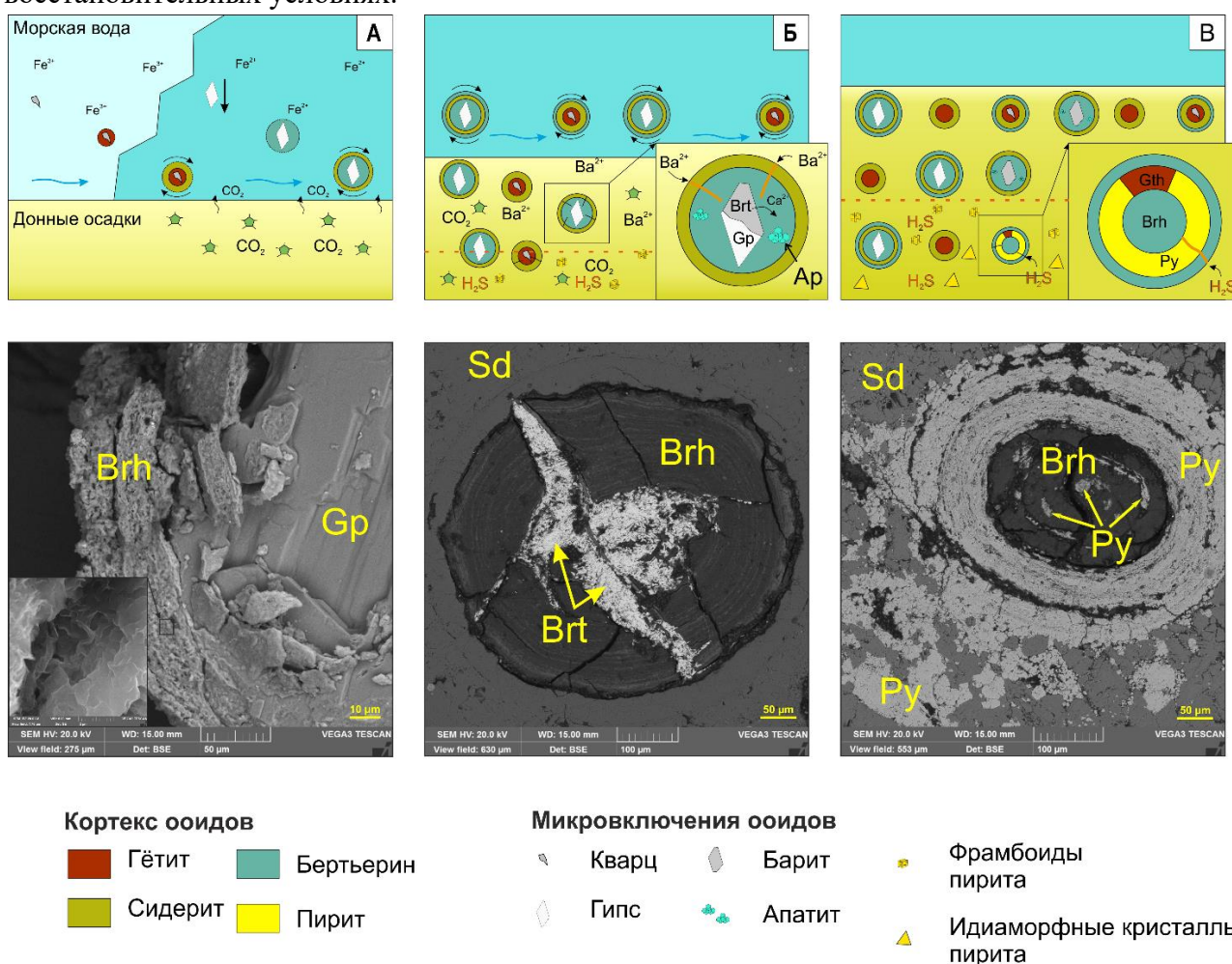


Рисунок 8. Модель формирования ооидов разных типов: А – формирование ооидов; Б – седиментация и замещение изначальных минеральных форм ооидов; В – конечный этап преобразования изначальных форм ооидов.

Третье защищаемое положение

Геохимическая специфика морских железняков проявляется в повышенных концентрациях железа, фосфора, а также сопутствующих РЗЭ+У, что отличает их от вмещающих пород. Максимальные концентрации РЗЭ приурочены к железистым

ооидам. Основными минеральными формами РЗЭ являются микровключения фосфатов в кортексе ооидов.

Морские железняки Аятского бассейна резко отличаются по химическому составу от вмещающих терригенных пород. Наибольшие концентрации валового железа ($\text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{total})}$) установлены в однородных железняках, где его содержание достигает 49,0-67,0 % и связано с преобладанием в их составе гетита. Для ооидовых разностей характерны более вариативные содержания $\text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{total})}$ в интервале 33,0-62,6 %. Повышенные содержания MnO (0,9-6,1 %) также являются характерной чертой железняков, особенно однородных разновидностей. Концентрации P_2O_5 и MnO находятся в относительно высоких и стабильных пределах, 1,0-1,8 % и 2,9-3,5 %, соответственно. Кремнезём (3,2-31,2 %) и глинозём (3,2-6,5 %) в железняках имеют терригенное происхождение, что подтверждается присутствием кварца, полевых шпатов и глинистых минералов.

Наибольшие концентрации микроэлементов установлены в ооидовых железняках. Содержание ванадия в них достигает 328,9 г/т, что более чем в 7 раз превышает его концентрации во вмещающих породах (максимум 45,1 г/т). Показательно, что в концентрате чистых ооидов содержание V возрастает до 737 г/т, что служит прямым доказательством его селективного захвата в процессе роста ооидных корок. Аналогичная тенденция установлена для хрома, содержание которого варьируется от 24,2 г/т в песчаниках до 248,2 г/т в ооидовых железняках. Значительно выше в ооидовых разностях и концентрации кобальта (219,3 г/т) и никеля (208,3 г/т) по сравнению с нижележащими однородными железняками (74,6 г/т и 46,4 г/т соответственно). Также наблюдается резкое обогащение ооидовых железняков мышьяком (до 185,5 г/т) на фоне терригенных отложений (<16,3 г/т).

Кварц-глауконитовые песчаники, в отличие от железняков и алевролитов, характеризуются минимальными содержаниями большинства изученных микроэлементов (V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As). Алевролиты, в свою очередь, демонстрируют промежуточное положение. Однако они обогащены Zr и Hf (вероятно, за счет присутствия циркона), но обеднены As, Sr, Mo, Cd и Ba относительно песчаников (рис. 9).

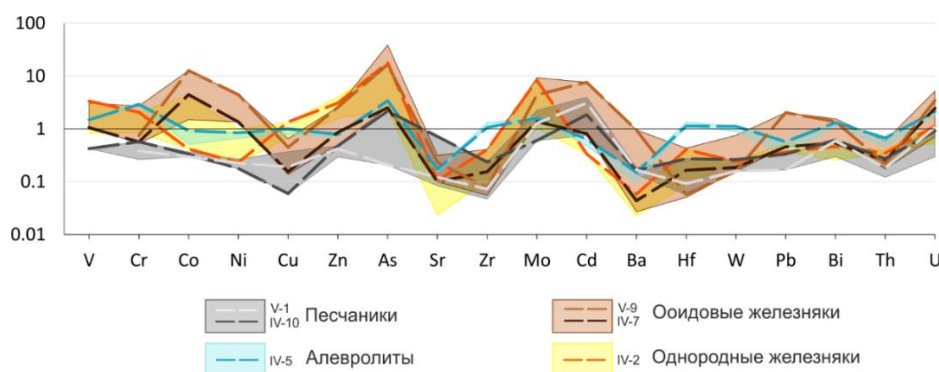


Рисунок 9. Сравнительный анализ микроэлементов пород аятской свиты на основе нормирования значений на стандарт UCC (верхней континентальной коры).

Геохимические характеристики пород Аятского бассейна свидетельствуют о различных redox-условиях на морском дне во время седиментогенеза. В песчаниках и алевролитах среднее значение соотношения V/Cr составляет 0,7, что соответствует кислородной обстановке (Hoffman et al., 1998; Jones, Manning, 1994). В однородных железняках этот показатель увеличивается до 1,3, приближаясь к границе с гипоксической зоной (Hoffman, et al., 1998), однако высокие содержания оксидов железа подтверждают преобладание оксидных

условий. Наиболее высокие значения V/Cr (2,3) установлены в ооидовых железняках, что указывает на формирование в гипоксической обстановке (Hoffman et al., 1998; Jones, Manning, 1994). Выводы о характере палеосреды хорошо согласуются с данными по индексам обогащения ванадия (EF_V) и молибдена (EF_{Mo}). В песчаниках и алевролитах средний показатель составляет $EF_{Mo} - 5,3$, а в железняках увеличивается до $EF_{Mo} - 16,9$. Индекс обогащения ванадием (EF_V) также демонстрирует значительное различие: в песчаниках и алевролитах он равен $EF_V - 1,3$, а в железняках увеличивается до $EF_V - 5,9$, что существенно выше значений вмещающих железняков пород (Tribovillard et al., 2006). В соответствии с геохимическими показателями палеосреды морского дна и индексами обогащения, формирование железняков протекало в условиях от оксидных до гипоксических, с установлением локальной гипоксии на стадии образования ооидов (Hoffman et al., 1998; Tribovillard et al., 2006).

Среднее содержание редкоземельных элементов (РЗЭ) и иттрия (Y) в породах аятской свиты составляет 138,8 г/т. Наблюдается значительная вариабельность концентраций в зависимости от литологического типа пород. В терригенных разностях (алевролитах и песчаниках) содержания $\Sigma РЗЭ + Y$ варьируют от 54,8 до 136,8 г/т при среднем значении 91,4 г/т. Наибольшие концентрации $\Sigma РЗЭ + Y$ характерны для морских железняков, где среднее значение достигает 167,2 г/т. Максимальные содержания установлены в ооидовых железняках – до 356,7 г/т. Для этой разности характерно преобладание легких редкоземельных элементов (ЛРЗЭ) над тяжелыми (ТРЗЭ). Суммарное содержание ЛРЗЭ в ооидовых железняках колеблется от 62,3 до 294,4 г/т, ТРЗЭ – от 6,9 до 24,0 г/т, а Y – от 16,0 до 38,2 г/т. Напротив, однородные железняки демонстрируют минимальные содержания $\Sigma РЗЭ + Y$ среди всех пород свиты (от 46,0 до 110,4 г/т, в среднем 67,9 г/т). Суммарные содержания ЛРЗЭ и ТРЗЭ в них составляют 37,0-84,4 г/т и 3,4-11,9 г/т, соответственно. Сравнительный анализ спектров распределения РЗЭ (рис. 10) подтверждает выявленные различия: ооидовые железняки характеризуются обогащением ЛРЗЭ, в то время как однородные железняки – дефицитом. Концентрации ТРЗЭ и Y во всех типах железняков остаются относительно стабильными и близки к уровню среднего постархейского австралийского сланца (РААС).

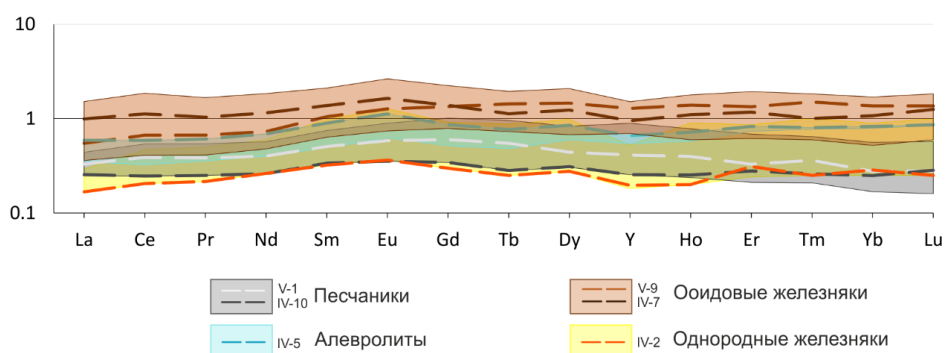


Рисунок 10. Сравнительный анализ редкоземельных элементов пород аятской свиты на основе нормирования значений на стандарт РААС (постархейский австралийский глинистый сланец).

Изотопный состав углерода ($\delta^{13}C$ от $-15,6$ до $-13,1$ ‰) сидеритового цемента свидетельствует преимущественно об органической природе, связанной с процессами разложения детритовой органики (Ferretti, 2005). Разложение органического материала является одной из основных причин деаэрации морской воды и может приводить к локальному снижению содержания кислорода, который в дальнейшем иммобилизовался в виде сидерита в донных отложениях при взаимодействии с доступным железом.

Для подтверждения ведущей роли ооидов в аккумуляции редкоземельных элементов и иттрия (РЗЭ+Y) был выделен ооидовый концентрат с содержанием ооидов около 80 %. После обогащения среднее содержание РЗЭ+Y в концентрате составило 280 г/т, при максимальном значении до 490 г/т, что существенно превышает средние содержания в валовых пробах железняков. Также была установлена положительная корреляция между содержаниями фосфора и РЗЭ. Основными минералами-концентраторами редкоземельных элементов являются фосфаты, преимущественно локализованные в кортексе ооидов (рис. 11) и в меньшей степени – в цементирующей массе. Микроанализ выявил фосфат редких земель (РЗЭ) со следующим составом (мас. %): P_2O_5 – 35,3%; Ce_2O_3 – 33,7%; La_2O_3 – 14,7%; Nd_2O_3 – 9,6%; Pr_2O_3 – 1,2%; CaO – 5,5%, отражая тренд распределения $Ce > La > Nd$. По данным СЭМ-съемки фосфат-РЗЭ формирует концентры толщиной до 1,5 мкм на поверхности ооидов (рис. 11 А), а также ксеноморфные зерна на периферии кортекса ооидов, размер которых варьирует от 3 до 5 мкм. Преимущественная локализация фосфат-РЗЭ в ооидах указывает на их сингенетическое накопление в процессе роста ооидов. Данный вывод подтверждается наличием на периферии кортексов концентрических зон, обогащенных РЗЭ, что, вероятно, связано с захватом этих элементов в момент формирования оболочек на седиментационной стадии формирования ооидов.

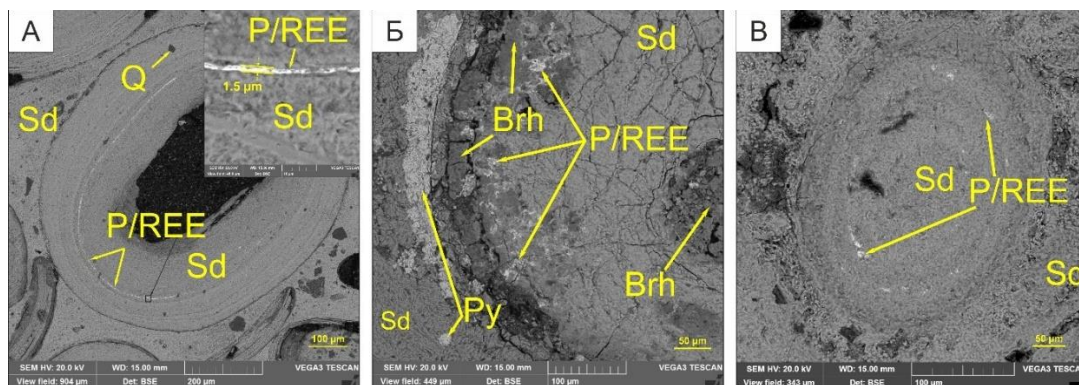


Рисунок 11. Фосфат РЗЭ среди ооидов: А – кортекс фосфата РЗЭ в сидеритовом ооиде; Б – ксеноморфные формы фосфат РЗЭ среди бертьерина; В – ксеноморфные формы фосфата РЗЭ по периферии пелоида. Brh – бертьерин; Brt – барит; P/REE – фосфат РЗЭ; Py – пирит; Qz – кварц; Sd – сидерит.

Полученные данные, в частности обогащение ооидов ЛРЗЭ, позволяют предположить, что основная масса легких РЗЭ сосредоточена в аутигенных фосфатах, слагающих кортекс ооидов. Данный вывод также согласуется с выявленной положительной корреляционной зависимостью между содержаниями фосфора и ЛРЗЭ. Вместе с тем, собственные минеральные фазы тяжелых (ТРЗЭ) редкоземельных элементов в изученных образцах не идентифицированы.

Заключение

В результате комплексного исследования морских железняков западной части Аятского железорудного бассейна установлены ключевые закономерности их строения, состава и условий формирования. Показано, что смена литофаций контролировалась преимущественно эвстатическими колебаниями уровня моря, а также сменой областей сноса обломочного материала – от пологих склонов Кустанайского поднятия к крутым склонам Южного Урала, что обусловило переход от алевритистого к песчанистому типу осадконакопления.

Минералогический анализ показал сложное многостадийное преобразование железняков. На ранней стадии диагенеза формировались железисто-карбонатные разновидности ооидов, тогда как поздние процессы приводили к образованию пирит-баритовых разновидностей. Раннедиагенетические разновидности ооидов отражают изменение физико-химических условий среды осадконакопления.

Геохимические исследования подтвердили специфику руд, проявляющуюся в контрастном обогащении железом, фосфором и редкоземельными элементами (РЗЭ). Основным концентратором РЗЭ являются аутигенные фосфаты, формирующие микровключения в кортексе ооидов, что указывает на механизм соосаждения и фиксации элементов в процессе седиментации и раннего диагенеза.

Список опубликованных работ по теме диссертации

Статьи

1. **Максимов П.Н.**, Рудмин М.А. Минералого-геохимические особенности верхнемеловых морских железняков аятской свиты (Тургайский прогиб) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 5. – С. 70-80.
2. **Maximov, P.**, Rudmin, M., 2023. Origin of Upper Cretaceous marine ironstones of Ayat Formation (Turgay depression, Northern Kazakhstan). Solid Earth Sciences. V. 8, Is. 1, 2023, P. 1-11. (IF - 4.2 CiteScore, Q2)
3. Rudmin, M., Banerjee, S., **Maximov, P.**, Novoselov, A., Trubin, Y., Smirnov, P., Abersteiner, A., Tang, D., Mazurov, A., 2022. Origin of ooids, peloids and micro-oncoids of marine ironstone deposits in Western Siberia (Russia). Journal of Asian Earth Sciences 105361. <https://doi.org/10.1016/J.JSEAES.2022.105361> (IF - 3.374, Q1)
4. Kalinina, N.A., Rudmin, M.A., Sherstyukov, M., **Maximov, P.**, Kerimov, A.-G., 2024. Origin of iron-rich minerals, ooids and pisoids in the Jurassic ooidal ironstones of the Labino-Malkin region (Caucasus). Journal of Palaeogeography. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jop.2024.04.003> (IF - 2.9, Q1)
5. Kalinina, N., **Maximov, P.**, Molukpayeva, D., Sherstyukov, M., Kerimov, A.-G., Rudmin, M., 2024. Depositional palaeoenvironment of the Middle Jurassic (Aalenian) ooidal ironstones in Labino-Malkin zone (north-western Caucasus). Marine and Petroleum Geology 106744. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2024.106744> (IF - 4.2, Q1)

Тезисы

1. **Максимов П.Н.**, Рудмин М.А. Особенности минерального состава аутигенных фаз верхнемеловых ооидовых железняков аятской свиты Тургайского прогиба // Новое в познании процессов рудообразования: Десятая Российская молодёжная научно-практическая Школа с международным участием. Москва: ИГЕМ РАН, 2021. Р. 177–180.
2. **Максимов П.Н.** Геохимические особенности ооидовых железняков аятской свиты (Тургайский прогиб, Северный Казахстан) // XXVI Международный научный симпозиум молодых ученых и студентов имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр», посвященный 90-летию со дня рождения Н.М. Рассказова, 120-летию со дня рождения Л.Л. Халфина, 50-летию научных молодежных конференций имени академика М.А. Усова. Томск: ТПУ, 2022. С. 90–91.
3. **Максимов П.Н.**, Рудмин М.А. Геохимические особенности морских железняков аятской свиты (Тургайский прогиб, Северный Казахстан) // XXXIII Молодежная научная школа-конференция, посвящённая памяти чл.-корр. АН СССР К.О. Кратца и акад. РАН Ф.П.

Митрофанова «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГЕОЛОГИИ ДОКЕМБРИЯ, ГЕОФИЗИКИ И ГЕОЭКОЛОГИИ». Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2022. С. 119–121.

4. **Максимов П.Н.**, Рудмин М.А. Потенциальные источники сноса аллотигенных минералов морских железняков аятской свиты (Тургайский прогиб, Северный Казахстан) // XXXIII Молодежная научная школа-конференция, посвящённая памяти чл.-корр. АН СССР К.О. Кратца и акад. РАН Ф.П. Митрофанова «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГЕОЛОГИИ ДОКЕМБРИЯ, ГЕОФИЗИКИ И ГЕОЭКОЛОГИИ». Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2022. С. 122–123.

5. **Максимов П.Н.** Оценка сходства минералого-геохимических особенностей железняков Тургайского прогиба (Северный Казахстан). XXVII Международный научный симпозиум молодых ученых и студентов имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр», посвященный 160-летию со дня рождения В.А. Обручева, 140-летию со дня рождения М.А. Усова, основателей Сибирской горно-геологической школы. 3 - 7 апреля 2023 г. Томск, ТПУ.

6. **Максимов П.Н.** Потенциальные источники рудного вещества верхнемеловых железняков Тургайского прогиба (Северный Казахстан). XXVII Международный научный симпозиум молодых ученых и студентов имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр», посвященный 160-летию со дня рождения В.А. Обручева, 140-летию со дня рождения М.А. Усова, основателей Сибирской горно-геологической школы. 3 - 7 апреля 2023 г. Томск, ТПУ.

7. **Максимов, П.Н.**, Рудмин, М.А., Тажиев, С.Р., 2024. Изучение роли геотектонических условий в накоплении морских ооидовых железняков аятской свиты Тургайского прогиба (Северный Казахстан): РУДНАЯ ШКОЛА ЦНИГРИ 2024. ФГБУ «ЦНИГРИ», Москва, с. 113–115.

8. Калинина Н.А., **Максимов П.Н.**, Рудмин М.А. Редкоземельные элементы в морских мезозойских ооидовых железняках: минеральные формы и перспективы освоения // Всероссийская конференция «VIII Российский день редких земель», Нижний Новгород, 13–16 февраля 2024. Материалы докладов. Нижний Новгород: ННГУ – ИМХ РАН 2024. С. 101–102.

9. **Максимов П.Н.**, Рудмин М.А., 2024. Индикаторная роль эвапоритовой минерализации морских ооидовых железняков аятской свиты Тургайского прогиба (Северный Казахстан): XXVIII Международный молодежный научный симпозиум имени академика М.А. Усова, посвященный 125-летию со дня рождения академика Академии наук СССР, профессора К.И. Сатпаева и 130-летию со дня рождения члена-корреспондента Академии наук СССР, профессора Ф.Н. Шахова. Томский политехнический университет, Томск.

10. **Максимов, П.Н.**, Калинина, Н.А., Рудмин, М.А., Тажиев, С.Р., 2024. Условия формирования ооидовых морских железняков Аятского железорудного бассейна Тургайского прогиба (Северный Казахстан): XI Сибирская Конференция Молодых Ученых По Наукам о Земле. ИПЦ НГУ, Новосибирск, с. 67–69.

11. **Максимов П.Н.**, Рудмин М.А., Тажиев С.Р., 2024. Ооидовые формы железосодержащих минералов морских железняков Аятского железорудного бассейна: 14-е Уральское литологическое совещание «Гетерогенность в осадочных системах» и 5-ая Всероссийская школа по литологии «Литология: проблемы интеграции фундаментальной и прикладной науки». Уральского отделения РАН, Екатеринбург.