На правах рукописи

АСОЧАКОВА ЕВГЕНИЯ МИХАЙЛОВНА

МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЖЕЛЕЗОНАКОПЛЕНИЯ В МЕЛ-ПАЛЕОГЕНОВЫХ ТОЛЩАХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ НА ПРИМЕРЕ БАКЧАРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

25.00.05 – минералогия, кристаллография

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Томск – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Научный руководитель: ***Коноваленко Сергей Иванович***
кандидат геолого-минералогических наук, доцент

Официальные оппоненты: ***Цыкин Ростислав Алексеевич***
доктор геолого-минералогических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет», Институт горного дела, геологии и геотехнологии, кафедра геологии, минералогии и петрографии, профессор-консультант

Домаренко Виктор Алексеевич
кандидат геолого-минералогических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Институт природных ресурсов, кафедра геоэкологии и геохимии, доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», г. Новосибирск

Защита состоится «26» декабря 2013 г. в 14^{00} часов на заседании диссертационного совета ДМ 212.269.03 при ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, пр. Ленина, 2а, строение 5, корпус 20, аудитория 504.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Автореферат разослан «23» декабря 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, к.г.-м.н. Лепокурова Олеся Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Железо в XXI веке остается основным металлом современной цивилизации, в огромных масштабах используясь в очень многих важнейших отраслях промышленности. По состоянию 2007 г. подтверждённые мировые запасы железа составили 212,66 млрд. т, доля российских месторождений составляет 33 %, причем более 3/4 всего количества приходится на наиболее изученные ресурсы категории P_1, но качество железных руд российских месторождений ниже. При современных темпах производства и потребления железа в ближайшие 50 лет мировые запасы богатых железных руд начнут исчерпываться. В этой связи Бакчарская площадь является одним из перспективных участков локализации оолитовых железных руд осадочного геолого-промышленного типа со средним содержанием железа до 37,4 % и прогнозными ресурсами несколько десятков миллиардов тонн. Запасы и концентрация железных руд в оолитовых образованиях Бакчарского месторождения являются уникальными, но их возможная переработка осложняется структурно-текстурными неоднородностями и переменным минеральным составом. Кроме этого оолитовые руды характеризуются повышенными концентрациями многих элементов-примесей, среди которых находятся как ценные легирующие (Mn, V, Cr, Ti, Zr, Mo и др.), так и вредные (S, As, Cu, Pb, Zn, P). Для эффективного использования этих руд необходимо доизучение их минералого-геохимических особенностей с помощью новых прецизионных аналитических методов, которые позволяют сделать это на качественно новом уровне.

Цель: характеристика вещественного состава, анализ строения рудоносного комплекса и разработка минералого-геохимических индикаторов образования оолитовых железных руд Бакчарского месторождения.

Задачи:

1. По опубликованным и фондовым материалам описать историю открытия, состояния изученности и геологическое строение Бакчарского месторождения;
2. Дать характеристику локализации рудных горизонтов в разрезе Полынянского участка и описать основные разновидности руд;
3. Показать специфику минерального состава и строения оолитовых железных руд методами рентгеноструктурного, термического анализов, растровой электронной микроскопии (РЭМ) и рентгеноспектрального микроанализа (РСМА);
4. Изучить петрогеохимические особенности оолитовых железных руд по данным рентгенофлуоресцентного, эмиссионного спектрального анализов и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС);
5. Провести типизацию рудоносного комплекса на основе петрохимических данных. Определить главные факторы, определяющие разнообразие руд;
6. Исследовать распределение сидерофильных, халькофильных и редкоземельных элементов в рудах;
7. На основании полученных данных разработать минералого-геохимические индикаторы образования оолитовых железных руд Бакчарского месторождения.

Фактический материал и методы исследований. В основу работы положены образцы керна скважины № 9А Полынянского участка Бакчарского месторождения. Керновый материал был предоставлен генеральным директором ООО «Томская горно-металлургическая компания» Михаилом Степановичем Паровинчаком. В работе использованы фондовые материалы по железорудным объектам Томской области и литературные опубликованные данные по железорудным месторождениям осадочного происхождения.

Экспериментальные исследования проводились в Центре коллективного пользования «Аналитический центр геохимии природных систем» ТГУ. Рентгеноструктурный анализ проб оолитовых железный руд проводился на дифрактометре ДРОН - 2, модульном дифрактометре X'Pert Powder (PANalytical, Нидерланды) Аналитик - канд. геол.-минер. наук, ведущий инженер кафедры минералогии и геохимии ГГФ Т. С. Небера. Проанализировано 30 рентгенограмм. Автором произведен синхронный термический анализ образцов, который проводился на приборе STA 409 PC Luxx (Netzsch-Geraetebau GmbH, Германия). Обработано и обсчитано 60 термограмм. Анализ состава и строения оолитов проводился на сканирующем растровом электронном микроскопе VEGA II LMU, оснащенным энергодисперсионным спектрометром INCA Energy (OXFORD Instruments Analytical, Великобритания). Аналитик - канд. геол.-минер. наук, доцент кафедры минералогии и геохимии ТГУ О. В. Бухарова. Проанализировано 40 участков и снято 350 спектров. При участии автора был выполнен рентгенофлуоресцентный анализ на энергодисперсионном спектрометре OXFORD ED2000 (OXFORD Instruments Analytical, Великобритания). Выполнено 27 анализов. Методом ИСП-МС было определено 43 элемента, включая все редкие земли. Определение элементов проводилось на приборе Agilent 7500 cx (Agilent Technologies, США), аналитики – канд. хим. наук Ю.В. Аношкина и младший научный сотрудник Е.И. Никитина. Выполнено 80 анализов. Результаты ИСП-МС и спектрального анализов сопоставимы и лежат в пределах допустимых погрешностей. Эмиссионным спектральным анализом проведены параллельные определения 21 элемента. Аналитик – ведущий инженер кафедры минералогии и геохимии ТГУ Е.Д. Агапова.

Научная новизна.

1. На примере Полынянского участка Бакчарского месторождения минералогически и геохимически охарактеризованы три типа руд: бурые гётит-гидрогётитовые, зеленовато-серые глауконит-хлоритовые и переходные (промежуточные) разности руд.

2. Впервые проведена петрохимическая типизация железных руд, отражающая циклическое строение рудного комплекса и его положение в стратиграфическом разрезе, в зависимости от условий осадко- и рудонакопления.

3. Выделены группы минералов терригенного и аутигенного генезиса. Показаны формы их нахождения в рудах, особенности химического и структурного состава. В агрегатах оолитов железных руд установлены РЗЭ фосфат, сульфиды и самородное серебро.

4. Обобщены петрогеохимические исследования оолитовых железных руд Западно-Сибирского железорудного бассейна (ЗСЖБ). Изучено содержание сидерофильных, халькофильных и редкоземельных элементов в оолитовых железных рудах. Выявлены факторы, определяющие разнообразие руд, связанные с вариациями обломочных и аутигенных минералов, что также подтверждается распределением элементов-примесей.

5. Установлены закономерности распределения минералов, накопления полезных и вредных примесей в выделяемых типах руд в различных гранулометрических фракциях.

6. Методами РЭМ и РСМА выделены основные разновидности оолитов и предложен механизм их образования.

7. Разработаны минералогические и геохимические индикаторы, отражающие физико-химические условия образования оолитовых железных руд.

Практическая значимость. При разработке любых видов месторождений ведутся комплексные исследования руд на предмет присутствия в них полезных примесей, повышающих их рентабельность, а также наличие вредных, осложняющих технологию извлечения полезного компонента. Вещественный состав оолитовых железных руд осадочного генезиса отличается неоднородностью распределения промышленно значимых полезных и нежелательных вредных примесей, которые могут находиться в оолитах, в цементе, обломках пород и минералов. Установленные закономерности распределения примесных элементов, их приуроченность к текстурным элементам руд и минеральным фазам позволят при создании в будущем технологии извлечения и переработки руды выбрать наиболее оптимальный и эффективный вариант.

Апробация работы. Основные материалы диссертации докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры минералогии и геохимии ГГФ ТГУ (2011, 2013) и на мероприятиях регионального, общероссийского и международного уровней: на XI Международном научном симпозиуме им. акад. М.А. Усова студентов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2007); на VI Сибирском форуме недропользователей и предприятий ТЭК «Нефть. Газ. Геология. Экология» (Томск, 2010); на XXI молодежной научной конференции, посвященной памяти К.О. Кратца. (Санкт-Петербург, 2010); на III научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Комплексное изучение и оценка месторождений твердых полезных ископаемых» (Москва, 2011); на конференции молодых ученых «Современные проблемы геохимии» (Иркутск, 2011), The 6th International Siberian Early Career GeoScientists Conference (Новосибирск, 2012); на Всероссийской конференции с международным участием по аналитической спектроскопии (Краснодар, 2012)

Диссертационная работа выполнена в рамках программы «У.М.Н.И.К» Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (2008-2010 гг.) и Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (2009-2013 гг.)

Реализация и личный вклад. Автором проведен отбор проб на рудном интервале скважины Полынянского участка. Выполнена их подготовка к аналитическим исследованиям, расшифровка рентгенограмм, термограмм и данных РЭМ и РСМА, сделан расчета кристаллохимических формул минералов. Автор провел рентгенофлуоресцентное исследование и синхронный термический анализ. На основе экспериментальных работ были разработаны методики измерения СТО ТГУ 049-2009 «Количественное определение содержаний Na_2O, MgO, Al_2O_3, SiO_2, P_2O_5, K_2O, CaO, TiO_2, MnO, Fe_2O_3общ в горных породах и рудах методом рентгенофлуоресцентной спектрометрии» (авторы: Е.Д. Агапова, Е.М. Асочакова, П.А. Тишин) и СТО ТГУ 122-2013 «Методика определения экзо- и эндотермических эффектов, потерь массы при синхронном термическом анализе (ТГ-ДСК) горных пород, минералов и руд» (авторы: Е.М. Асочакова, П.А. Тишин). Автором самостоятельно выполнена интерпретация литогеохимических данных на основе математической обработки результатов рентгенофлуоресцентного, ИСП-МС и эмиссионно-спектрального анализов в пакете программ «STATISTICA».

Достоверность результатов работы. Работа выполнена в Центре коллективного пользования «Аналитический центр геохимии природных систем» ТГУ (директор канд. геол.-минер. наук П.А. Тишин), аккредитованной в системе аккредитации аналитических лабораторий (Аттестат РОСС RU.0001.517686). Достоверность

полученных выводов определена применением комплекса аналитических методов исследования, сопоставлением данных полученных разными методами и использованием математических методов анализа.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 работ, в том числе 3 в журналах, рекомендованных перечнем ВАК Минобразования России и 1 в международном журнале.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 155 наименований (на 16 страницах). Материал диссертации изложен на 193 страницах, содержит 24 таблицу, 38 рисунков и включает 27 приложений (на 32 страницах).

Благодарности. Автор выражает признательность генеральному директору ООО «ТомГМК» М.С. Паровинчаку за предоставление каменного материала, своему научному руководителю к.г.-м.н., доценту, заведующему кафедрой минералогии и геохимии С.И. Коноваленко за помощь при выполнении работы; к.г.-м.н., доценту кафедры палеонтологии и исторической геологии О.М. Гриневу за ценные советы. Автор благодарит директора ЦКП АЦГПС к.г.-м.н. П.А. Тишина за поддержку и консультации, к.г.-м.н. Т.С. Неберу и Л.М. Ламанову за помощь при расшифровке рентгенограмм, к.г.-м.н., доцента кафедры минералогии и геохимии О.В. Бухарову, к.х.н. Ю.В. Аношкину, И.В. Афонина за участие в обсуждении при выполнении отдельных этапов работы, а также всех сотрудников кафедры минералогии и геохимии и ЦКП АЦГПС.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена истории открытия и геологического изучения оолитовых железных руд ЗСБЖ. В ней дана краткая характеристика Бакчарского месторождения, рассммотрено положение рудных горизонтов в вертикальном разрезе и строение рудного комплекса на Полынянском участке, описаны основные типы руд. *Во второй главе* рассмотрен минеральный состав оолитовых железных руд, его терригенные и аутигенные ассоциации. *В третьей главе* изложены результаты изучения литогеохимического состава руд, с подробным описанием основных, рудных и примесных компонентов. Приведены петрохимические особенности руд и факторы, влияющие на их разнообразие. *Четвертая глава* посвящена исследованию вариаций минерального и геохимического состава оолитовых руд в зависимости от размерности. *В пятой главе* на основании полученных данных о минеральном составе, строении оолитов и руд, анализе литературных источников по другим провинциям приведены основные положения о происхождении оолитовых железных руд, об источниках железа и способах его поступления. Показано, что распределение минеральных и геохимических индикаторов в разрезе рудного комплекса обусловлено условиями осадконакопления.

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

Положение 1. **Строение рудного комплекса Бакчарского месторождения имеет циклический характер. Каждый из циклов включает два типа руд: бурые гётит-гидрогётитовые и зеленовато-серые глауконит-хлоритовые оолитовые железные руды, связанные между собой переходными разностями, фиксирующими зоны преобразования осадков на фоне смены режима седиментации.**

Железные руды Бакчарского месторождения залегают на глубине более 200 м от дневной поверхности, поэтому основным источником для получения сведении об их строении, залегании и вещественном составе является керн скважин. Наиболее детально

керновый материал отбирался из эталонной скважины Полынянского участка (восточная часть). Опробование керна проводилось на интервале (200-231 м). Он представляет собой толщи сближенных железорудных горизонтов, в дальнейшем именуемый *рудоносным комплексом.*

Все известные классификации типов руд Бакчарского месторождения отражают их вещественный состав или технологические свойства, и зачастую не имеют связи с условиями осадко- и рудонакопления. В ходе геолого-разведочных работ 2005-2010 гг. Полынянского и Бакчарского участков Бакчарского месторождения сотрудниками ГГФ ТГУ были выделены три типа железных руд, которые отличаются окраской, структурно-текстурными особенностями, минеральным составом цементирующей массы, а также спецификой положения в разрезе (Гринев, 2010).

Бурые сцементированные гётит-гидрогётитовые руды слагаются оолитами и бобовинами гётит-гидрогётитового агрегата, обломочным материалом и цементом (Рисунок 1, а). Текстура массивная, слоистость неявная.

а

б

в

Рисунок 1 – Типы руд. Примечание: а – бурая гётит-гидрогётитовая руда; б – зеленовато-серая глауконит-хлоритовая руда; в – переходный тип руд.

Есть участки с повышенным содержанием оолитов, что выражается в неравномерной окраске, создающей подобие слоистости. Сыпучая гётит-гидрогётитовая руда находится в подчиненном количестве и представляет собой плохо отсортированный концентрат, сформированный отполированными оолитами, бобовинами гётита и гидрогётита, обломками оолитов и примесью зерен кварца. В виде примеси в руде присутствуют терригенные и кремневые обломки, которые покрыты гидроксидами железа. Оолиты и рудные бобовины составляют 60 – 70 %, а терригенный материал 15 – 25 % от всего объема породы. Оолиты нередко окислены и с поверхности имеют буро-ржавый цвет. В сцементированных гётит-гидрогётитовых рудах в качестве цемента выступают карбонаты, а также обломки и фрагменты оолитов, заполняющие пространство между оолитами.

Зеленовато-серые глауконит-хлоритовые руды с разным соотношением оолитов и основной глинистой массы отличаются от прочих своим зеленовато-серым цветом и отсутствием или весьма слабо выраженной слоистостью (Рисунок 1, б). Текстура вкрапленная, реже массивная. Руда состоит из черных и темно-коричневых гётитовых и гидрогётитовых оолитов в глинисто-хлоритовой основной массе, легко рассыпается. Распределение оолитов в массе руды неравномерное. Отмечаются участки без оолитов, состоящие нацело из зеленоватой глинистой массы, либо участки темно-бурого до черного цвета, обусловленные скоплениями оолитов. Расположение таких участков в руде случайное, беспорядочное. Оолиты блестящие, правильной округлой формы, черные, реже бурые. Вместе с оолитами нередко присутствуют кварцевые гальки покрытие гидроксидами железа, окатанные и реже угловатые кварцевые зерна и остатки растительного детрита. Количество оолитов в руде составляет порядка 20-30 %, терригенных обломков - не более 5 %, остальное – плотный глинисто-хлоритовый

цемент. Особо можно отметить, что для этих руд характерны агрегаты глауконита, либо его отдельные зерна в массе цемента вместе с оолитами. Слегка округлые зерна глауконита отличаются насыщенностью зеленой окраски.

Переходный (промежуточный) тип руд отличается буроватым, реже зеленоватым цветом и различным соотношением оолитов, гётит-гидрогётитовой и глинисто-хлоритовой составляющих (Рисунок 1, в). Наблюдается присутствие алеврито-песчанистого материала, неравномерно распределенного в руде. Руды достаточно мягкие и обычно легко рассыпаются. Чередование в разрезе сцементированных оолитовых бурых гётит-гидрогётитовых и зеленовато-серых глауконит-хлоритовых руд обусловили вариации основных структурно-текстурных особенностей обоих типов руд, те или иные черты которых наблюдаются и в переходных разностях.

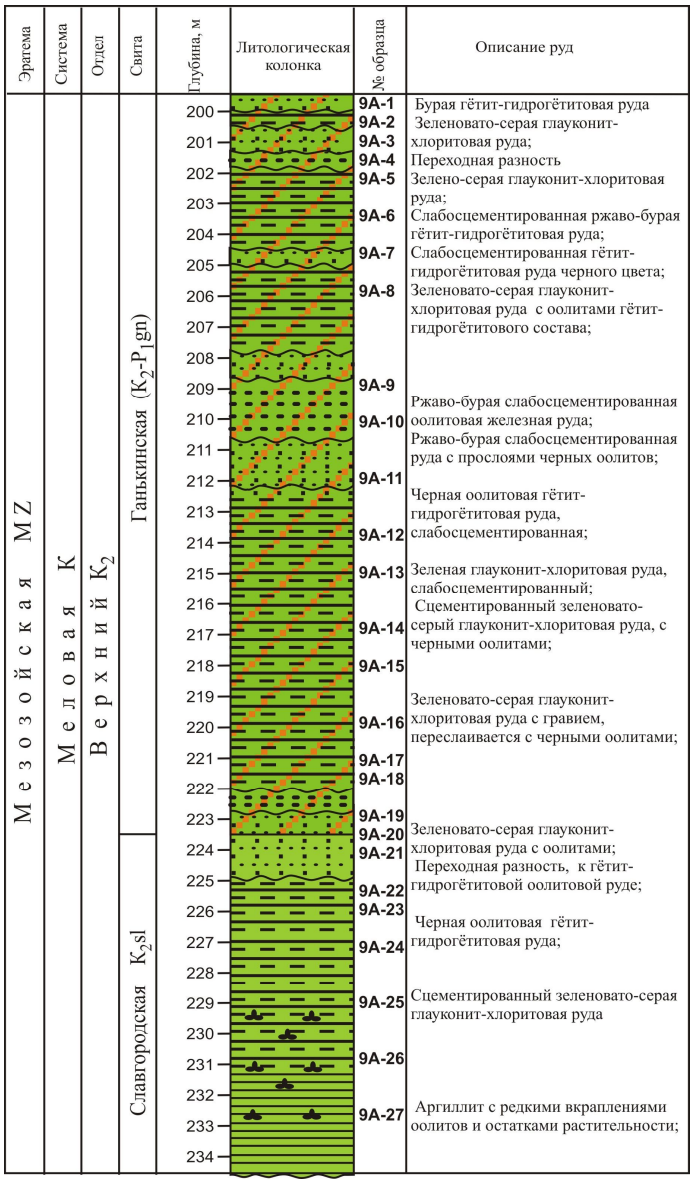

Рисунок 2 - Строение рудного комплекса Полынянского участка.

Текстура руд пятнисто-сгустковая, вкрапленная. Распределение оолитов в руде неравномерное, количество их в разных частях образцов изменяется от 15 % до 70 %. Окисленные оолиты буро-коричневого цвета, реже отмечаются черные. Они могут быть матовыми или блестящими. Терригенный материал представлен кварцевыми зернами и галькой, количество их в руде не превышает 15 %. Светло-коричневый глинисто-гидрослюдистый тип цемента переходных руд довольно мягкий, и он легко отслаивается по границам оолитов, оставляя на них тонкие корочки. Переходные разновидности располагаются между основными типами руд.

По результатам изучения строения рудоносного комплекса установлено, что в пределах разреза (Рисунок 2) выделяются ритмичные циклы рудного осадконакопления с последовательной сменой в них ассоциаций разного минерального состава. Мощность каждого цикла увеличивается вниз по разрезу, а весь рудный горизонт в целом подстилается слоистыми зеленовато-серыми аргиллитами. В основании каждого цикла устанавливаются глауконит-хлоритовые руды, которые вверх по разрезу сменяются переходными и далее гётит-гидрогётитовыми разностями. Переходный тип руд, как отмечено выше, располагается между двумя основными и фиксирует зону трансформации рудных осадков и соответственно смену условий седиментации, о чем свидетельствует появляющаяся здесь примесь алеврито-

песчанистого материала. Каждый тип руд характеризуется специфическими особенностями обстановки формирования. В частности, зеленовато-серые глауконит-хлоритовые руды формировались в относительно глубоководных условиях, в отличие от бурых гётит-гидрогётитовых оолитовых железных руд, которые возникали в более мелководной и субаэральной среде, что обусловило, окисление и перемыв оолитовых агрегатов и обогащение ими осадка. Следовательно, образование рудного комплекса в краевой части Западно-Сибирского морского бассейна протекало в условиях постоянных изменений трансгрессивно-регрессивного режима на фоне общей трансгрессии мелководного шельфа в кампан – маастрихтское время позднего мела и раннего палеоцена. Этот вывод полностью совпадает с представлениями предшественников (Николаева, 1967; Западно-Сибирский железорудный…, 1964).

Положение 2. **Минеральный состав руд определяется наличием терригенного и аутигенного комплексов. Терригенная часть состоит из кварца, полевых шпатов, магнетита, ильменита, рутила и циркона. Аутигенная минерализация представлена тремя ассоциациями восстановительной, гидролизатной и окислительной. При этом восстановительная ассоциация установлена в глауконит-хлоритовых рудах и объединяет глауконит, хлорит, сульфиды и самородное серебро. Гидролизатная ассоциация характеризует переходный тип руд и представлена каолинитом, иллитом, сидеритом и фосфатами. Окислительная ассоциация определяет состав бурых гётит-гидрогётитовых руд и включает лепидокрокит, гётит и гидрогётит.**

Все минералы, слагающие руды Полынянского участка разделены на две генетические группы: терригенные и аутигенные. *Терригенная часть* руд представлена кварцем, полевыми шпатами, магнетитом, ильменитом, цирконом и рутилом (Рисунок 3). Содержание кварца варьирует в разных типах руд: в бурых гётит-гидрогётитовых рудах оно изменяется от 1,33 до 7,1 %, в зеленовато-серых глауконит-хлоритовых от 1,95 до 4,3 %, в переходных разностях от 4,2 до 6,3 %. Полевые шпаты представлены чаще калиевой группой, реже кальциево-натровой (плагиоклазами). Магнетит и ильменит в виде субизометричных зерен наблюдаются в обломочной части руд. Количество их в рудах незначительное. Среди изоморфных примесей в магнетитах отмечаются Ti, V, Zn, Cr, Al, Mn. Нахождение магнетита и ильменита в рудах подчеркивает заметную роль магматических пород в формировании обломочной части руд.

а б в

Рисунок 3 – Терригенные минералы руд. Примечание: а - кварцевые зерна и ильменит в цементе бурых гётит-гидрогётитовых руд; б - калиевый полевой шпат (Kfs) в ядерной части оолита; в - магнетит в ядре оолита. Изображение BSE.

К *аутигенным минералам* отнесены карбонаты, глинистые минералы, рудные фазы (гётит, гидрогётит, лепидокрокит), а также фосфаты, сульфиды и самородное серебро. Среди *карбонатов* сидерит является преобладающей фазой, а кальцит находится в подчиненном количестве. Содержание сидерита в гётит-гидрогётитовых

рудах до 10 %, в глауконит-хлоритовых рудах - от 1,5 до 4 %, а в переходных разностях от 2 до 5 %. Для сидеритов Полынянского участка также как и всего ЗСЖБ характерны низкие содержания $MgCO_3$ с преобладанием среди примесей $MnCO_3$ и $CaCO_3$. По данным (Ветошкина, 2006) Ca-Mn-сидериты характерны для прибрежно-континентальных фаций, в то время как в морских глубоководных фациях всегда доминируют Ca-Mg и Mg-Ca-сидериты. Подобная геохимическая специфика сидеритов предполагает их образование в режиме последовательного уменьшения степени восстановленности среды осадконакопления в прибрежных условиях.

Глинистые минералы – каолинит, иллит, глауконит и хлорит.

Каолинит представлен неупорядоченными разностями, что подтверждается рентгеноструктурным и термическим анализами. Неупорядоченность структуры каолинита изменяется в пределах одного цикла осадконакопления, что отчетливо прослеживается по падению температуры его дегидратации в глауконит-хлоритовых рудах, которая уменьшается с глубиной. Химический состав чистого каолинита определить довольно сложно даже РСМА, так как он входит в состав цемента или наблюдается в оолитовых агрегатах совместно с гидроксидами железа и другими глинистыми минералами. Изоморфные замещения в структуре каолинита ограничены. Минерал чаще близок по составу к идеализированной формуле $Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$. Примеси MgO, CaO, Na_2O, K_2O в химических анализах каолинита, скорее всего, связаны с присутствием смешанослойных образований типа каолинит-монтмориллонит, поскольку собственных фаз монтмориллонита по результатам рентгеноструктурного и синхронного термического анализов руд не обнаружено. Образование каолинита происходило за счет трансформации глинистых минералов под воздействием кислых растворов, чему способствовало смешение континентальных вод с морскими в прибрежных условиях.

Гидрослюдистые минералы в рудах представлены иллитом и глауконитом. При электронно-микроскопическом исследовании установлено, что иллит встречается главным образом в переходных рудах в составе цементирующей массы смешанослойных образований совместно с другими глинистыми минералами. В оолитовых агрегатах он выполняет отдельные концентрические зоны, перемежаясь с зонами гётит-гидрогётитового состава.

На диаграмме соотношения калия и алюминия фигуративные точки иллита гётит-гидрогётитовых руд резко обособляются от иллита переходных руд (Рисунок 4, а).

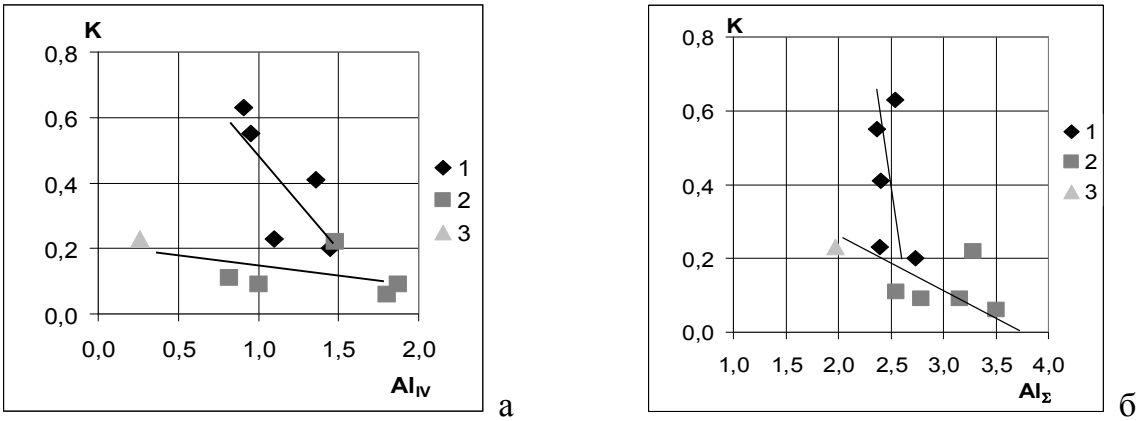

Рисунок 4 – Кристаллохимические диаграммы соотношения калия и алюминия в иллитах.
Al_{IV} - количество алюминия (в ф.е.), которым замещён кремнезём в тетраэдрических позициях; Al_{Σ} – общее количество алюминия (ф.е.). Условные обозначения: 1 – иллит гётит-гидрогётитовых руд, 2 – иллит переходных руд, 3 – гидрослюда (Западно-сибирский железорудный…, 1964)

Такое положение фигуративных точек говорит о разной степени преобразования смешанослойной фазы в иллит у разных типов руд, на фоне общей обратной зависимости содержаний калия от количества Al_{IV}. На диаграмме (б) хорошо видно, что содержание калия в иллите гётит-гидрогётитовых руд в отличие от иллита переходных разностей не влияет на суммарное количество в них алюминия, при одновременном резком увеличении глиноземистости последних. Подобная вариативность подчеркивает изменение упорядоченности структуры этого минерала в разных типах руд. При этом иллит гётит-гидрогётитовых руд имеет в целом более упорядоченную структуру, чем иллит переходных разностей, что указывает на различную степень их преобразования.

Глауконит встречается в основном в зеленовато-серых глауконит-хлоритовых рудах. Форма выделения глауконита разнообразная: округлые и лапчатые зерна, пелитоморфные агрегаты. Содержание минерала доходит до 25 %.

При электронно-микроскопическом изучении глауконит-хлоритовых руд установлено, что глауконит представлен округлыми ооидными образованиями в смеси с гидроксидами железа. Внутренне строение глауконитовых ооидов неоднородное, часто наблюдаются включения обломочного кварца и других минеральных фаз. По строению кристаллической решетки глаукониты входят в группу диоктаэдрических слюд, но в отличие от них в составе глауконита присутствуют Fe^{2+} и Fe^{3+} (Николаева, 1977). На кристаллохимической диаграмме (Рисунок 5) среди проанализированных глауконитов ясно обособились две группы точек. Одна, из которых попадает в поле маложелезистых и существенно глиноземистых гидрослюд, другая концентрируется в поле глауконита и частично лейкофиллита (Дриц, Коссовская, 1991). Глаукониты в структурном отношении часто представляют собой смешаннослойные образования монтмориллонит-слюдистого состава (Жабин, 2000), что выражается в значительной гидратации, замещении гидроксидами железа, колебаниями содержания K^+. Отмечается тенденция изменения кристаллохимического состава глауконита Западной Сибири, равно как и глауконита аналогичного возраста Днепропетровско-Донецкой впадины, что свидетельствует об эволюции или вызревании минерала.

Таким образом, образование глауконита происходило в близповерхностном слое глинистого осадка за счет его трансформации через смешанослойные фазы монтмориллонит-гидрослюдистого состава в щелочной и слабощелочной среде. Ассоциация гидрогётита, железистого хлорита и глауконита говорит о том, что её силикаты возникают под влиянием процессов выветривания и, одновременно разрушаются этими же процессами, замещаясь гётитом и гидрогётитом.

Хлорит широко распространен в зеленовато-серых глауконит-хлоритовых рудах, где он находится в основном в цементе, который представляет собой биминеральный глинисто-хлоритовый агрегат. В сцементированных бурых гётит-гидрогётитовых рудах основная масса хлорита сосредоточена в концентрических зонах оолитов, где минерал образует каймы вокруг ооидов глауконита и частично заполняет тонкие трещины.

Хлорит Полынянского участка относится к железистым разностям. Содержание основных компонентов в минерале изменяются в пределах: FeO – 12,08-45,6 % ($Fe^{2+}_{1,29-3,69}$); Al_2O_3 – 6,39-24,38 % ($Al^{IV}_{0,01-1,32}$; $Al^{VI}_{0,91-3,09}$); SiO_2 – 21,87-36,9 % ($Si^{IV}_{2,68-3,99}$); хлориты всегда содержат MgO 0,33-3,13 %, CaO 0,29-3,6 %, TiO_2 до 1 % и V_2O_5 до 0,5 %. Повышенное содержание Fe^{3+} (до 3,24 ф.е.) в изученных хлоритах обусловлено окислением Fe^{2+}, в связи, с чем содержание OH-группы снижается до 1. При соблюдении электронейтральности зарядов хлориты обычно содержат больше Fe^{2+} (до 3,69 ф.е.).

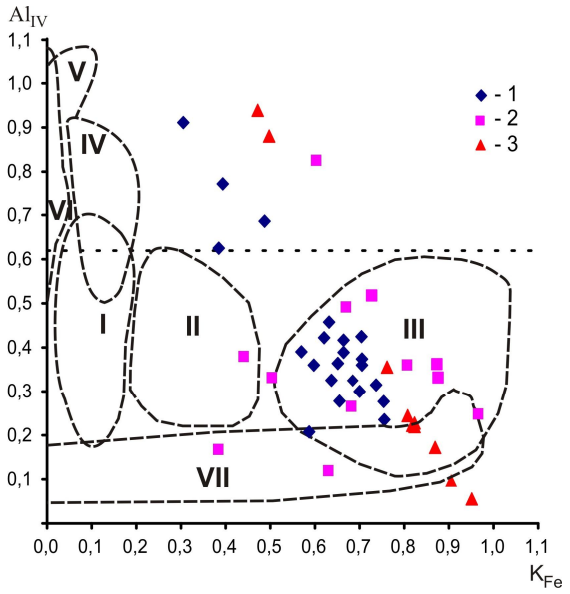

Рисунок 5 - Кристаллохимическая характеристика диоктаэдрических слюд:

I - Al-гидрослюд и иллита политипной модификации 1M-1Md, неизмененных катагенезом, II - ферроиллит; III - глауконит; IV - Al - иллит 1M-1Md из катагенетически измененных пород; V - Al - иллит и серициты из пород начальных стадий метаморфизма; VI - Al - иллит гидротермального генезиса; VII - лейкофиллит и селадонит; фигурными знаками нанесены конкретные анализы. Условные обозначения: 1 – глауконит Полынянский участок; 2 – глауконит (Западно-сибирский железорудный…, 1964; Николаева, 1977); 3 – глауконит мел-палеогенового возраста Днепропетровско-Донецкой впадины (Бутенко, Логвиненко, 1981)

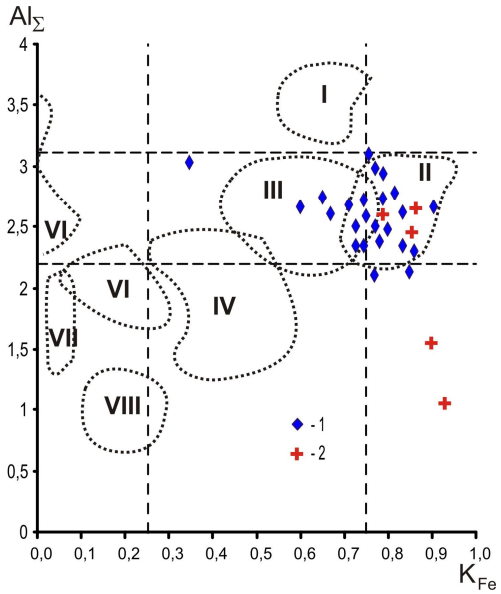

Рисунок 6 - Кристаллохимическая характеристика хлорита различного генезиса:

I - ди-триоктаэдрические Al-Fe-Mg - хлорит; II - Fe-хлорит железных руд; III - Fe-Mg-хлорит кластогенных формаций; IV -Fe-Mg и Mg-Fe-хлорит основных магматических пород; V - Mg-хлорит эвапоритовых формаций; VI - Mg-хлорит из галитов и Mg-K-солей высоких стадий осолонения бассейнов; VII - Mg-хлорит из серпентинитов; VIII - Mg-хлорит из кимберлитов; фигурными знаками нанесены конкретные анализы; Условные обозначения: 1 – хлорит, Полынянский участок; 2 – хлорит (Западно-сибирский железорудный…, 1964).

Фигуративные точки хлорита на кристаллохимической диаграмме (Рисунок 6) попадают в поле Fe-хлорита из осадочных железных руд, а часть из них в поле Fe-Mg-хлорита кластогенных формаций. Это указывает на то, что источником вещества хлорита мог выступать кластический (обломочный) материал, что предполагает гетерогенную – терригенно-хемогенную природу минерала.

Гидроксиды железа являются основными минералами руд и широко распространены во всех типах, где слагают оолиты и ооиды. Они представлены гётитом, гидрогётитом и реже лепидокрокитом. Содержание гидрогётита в бурых рудах изменяется от 48 % до 75 %, в глауконит-хлоритовых - от 19,6 % до 61,2 %, в переходных типах руд - от 22,2 % до 65,1 %.

Главной составляющей «бакчарских» железных руд являются оолиты, которые выступают основными концентраторами гидроксидов железа. Они обычно имеют скрытокристаллическое строение, некоторые из них состоят из мелких сгустков, многие разбиты тонкими трещинами. Зональность оолитов обусловлена чередованием прослоев гётита и гидрогётита. Это выражается в изменении содержания Fe_2O_3общ в разных концентрических зонах, которое варьирует от 63,61 % до 90,6 %, при среднем содержании 79,74 %. Характер зональности оолитов инверсионный, т.е. наблюдается равномерное чередование содержания Fe_2O_3общ, как в центральных, так и в периферийных частях оолита (Рисунок 7).

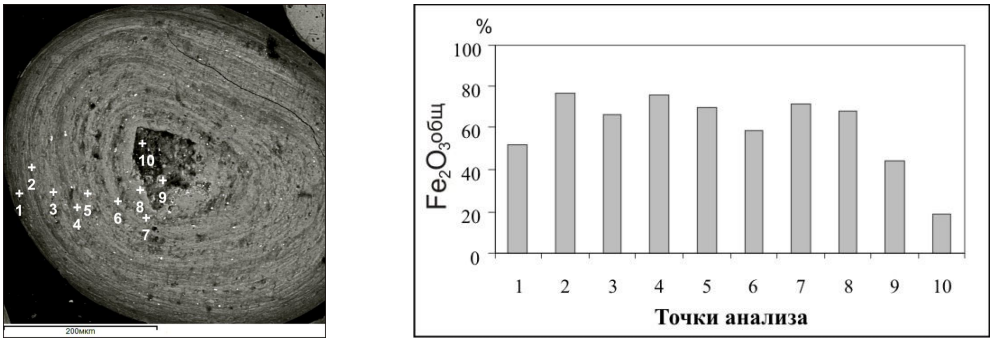

Рисунок 7 – Изменение содержания $Fe_2O_{3общ}$ (%) в концентрах оолита. Изображение BSE.

Судя по структурно-морфологическим особенностям, оолиты возникали в придонном слое ила в спокойной гидродинамической обстановке. Специфическими условиями оолитообразования были ритмические изменения геохимической среды (кислотности-щелочности, окислительно-восстановительного потенциала и др.). Изначально оолиты не имели внутренней структурированности, это были своего рода сгустки округлой формы, состоящие из гидроксидов железа и глинистого вещества. Последующий диагенез привел к изменению их облика и обособлению минеральных агрегатов.

Лепидокрокит в рудах имеет незначительную распространенность в сравнении с гётитом и гидрогётитом, что объясняется его образованием в узких значениях pH (близких к нейтральным) и только при относительном медленном окислении Fe^{2+} (Cornell, Schwerman, 2003). С изменением геохимических условий он легко трансформируется в гётит и гидрогётит. Они являются более термодинамически стабильными минералами, образование которых возможно в широком диапазоне значений pH, а само их присутствие указывает на доминирование окислительных условий.

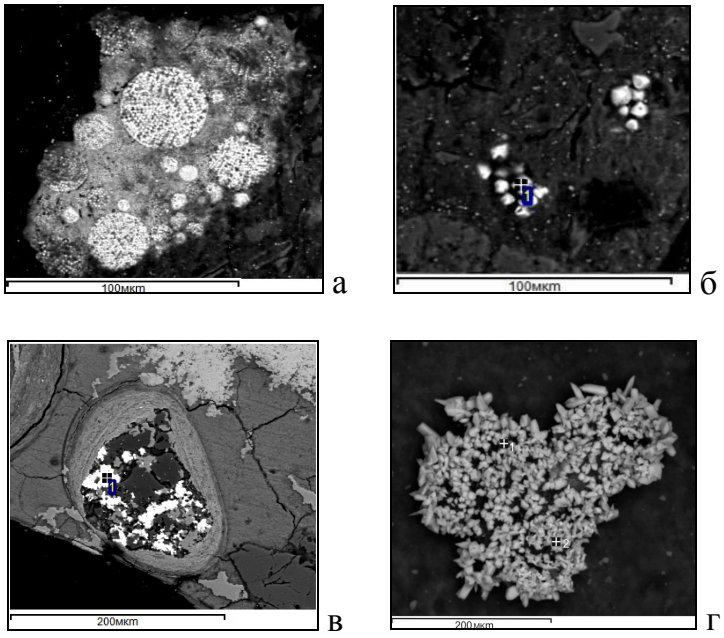

Рисунок 8 – Аутигенные минералы. Примечание: пирит – а – фрамбоиды; б – идиоморфные кристаллы; в – сфалерит в ядерной части оолита; г - дендриты самородного серебра. Изображение BSE.

При исследовании микролокальных включений (размер ~ 5 мкм) в оолитовых рудах было обнаружено, что они представляют собой минеральные обособления, состоящие из сульфидов, самородного серебра и фосфатов. По составу и по характеру локализации в рудах все включения можно разделить на сульфидную, фосфатную и сульфидно-фосфатную ассоциации. Сульфидная ассоциация представлена микровключениями пирита, сфалерита, ковеллина и антимонита (Рисунок 8). Главным сульфидным минералом в оолитах является мышьяковистый пирит, который представлен двумя генерациями – фрамбоидальной и идиоморфной (Рисунок 8, а, б). Фосфатная ассоциация представлена соединениями редких земель. Микровключения фосфатов наблюдаются в оолитах

повсеместно. Количество их в одном оолите может превышать 10 шт. Установлено, что фосфаты представляют собой ультратонкую смесь монацита (Ce, La, Nd) [PO_4] и апатита $Ca_5[PO_4]_2(OH)_2$. Характер распределения легких лантаноидов Ce > La > Nd, и реже Ce > Nd > La. Сульфидно-фосфатная ассоциация включает сульфиды серебра, самородное серебро и РЗЭ фосфаты, которые находятся в виде микрозернистых и волосовидных включений в оолитах. В глинисто-пелитовом цементе глауконит-хлоритовых руд вместе с включениями пирита также обнаружены дендриты самородного серебра (Рисунок 8, г), покрытые сульфидом серебра – акантитом. Данная ассоциация свидетельствует о нестабильных физико-химических условиях в период формирования оолитов. Изменение окислительно-восстановительного потенциала фиксируется чередованием в строении оолитов гидроксидов железа и глинистых минералов с соответствующими адсорбированными комплексами. Гидроксиды железа адсорбировали фосфор и РЗЭ, а глинистое вещество - металлы. Дальнейшие преобразования способствовали появлению из них микрокомковатых обособлений РЗЭ фосфатов, сульфидов и самородного серебра. Таким образом, аутигенная минерализация в оолитовых рудах представлена тремя группами минералов, формирование которых связано с восстановительными, окислительными и гидролизатными условиями.

Положение 3. **Петрогеохимическая неоднородность руд Бакчарского месторождения определяется дискретным поведением SiO_2 и Al_2O_3, MgO и K_2O, Fe_2O_3общ и P_2O_5, что указывает на вариативность восстановительных, окислительных и гидрализатных процессов. Это подтверждается распределением халькофильных и сидерофильных элементов соответственно обогащающих глауконит-хлоритовые и гётит-гидрогётитовые руды. Повышенные концентрации фосфора и РЗЭ в гётит-гидрогётитовых рудах определяется устойчивостью редкоземельных фосфатов к процессам окисления.**

Для характеристики химического состава оолитовых железных руд Бакчарского месторождения были использованы опубликованные литературные данные и результаты рентгенофлуоресцентного анализа проб Полынянского участка. Общая проанализированная выборка насчитывает около 150 анализов. Кластерный анализ отчетливо выделил две группы компонентов, в первую из которых вошли: SiO_2, K_2O, Al_2O_3, TiO_2, MnO, MgO, Na_2O; а во вторую – CaO, P_2O_5, Fe_2O_3общ и П.П.П. (Рисунок 9). Первая группа определяет терригенно-хемогенную и глинистую составляющую оолитовых железных руд, вторая - её рудно-фосфатную часть. При петрохимической типизации рудного комплекса Полынянского участка все три типа руд четко обособились в соответствии с различием их химического состава, что подчеркивает циклическое строение разреза (Таблица 1). Указанные циклы различались, по всей видимости, общей направленностью процессов поступления железистых осадков, что контролировалось скоростью и интенсивностью выветривания на палеоводосборах, связанной с тектоническими и палеогеографическими обстановками. Особенно хорошо это видно по изменению содержания в рудном комплексе SiO_2, Fe_2O_3общ, индекса химического выветривания (CIA), индекса изменения состава (ICV), гидролизатного модуля и отношения K_2O/Al_2O_3. По данным факторного анализа, первый фактор (F_1) на 54 % определяет распределение компонентов и характеризуется высокими значениями SiO_2, K_2O, MgO, Al_2O_3, и значимыми отрицательными нагрузками - Fe_2O_3общ, P_2O_5, П.П.П. Второй фактор (F_2) не значим (Рисунок 10). Из этого следует, что главными факторами, определяющими разнообразие руд, являются вариации количества терригенных и рудных компонентов.

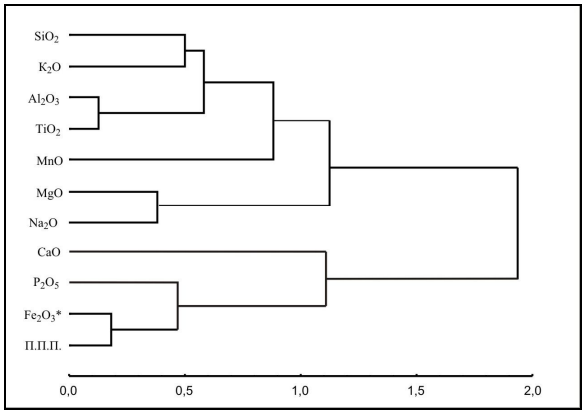

Рисунок 9 - Дендрограмма кластерного анализа для основных петрогенных оксидов оолитовых железных руд Западно-Сибирского железорудного бассейна

Примечание: метод расчета расстояний – коэффициент корреляции Пирсона

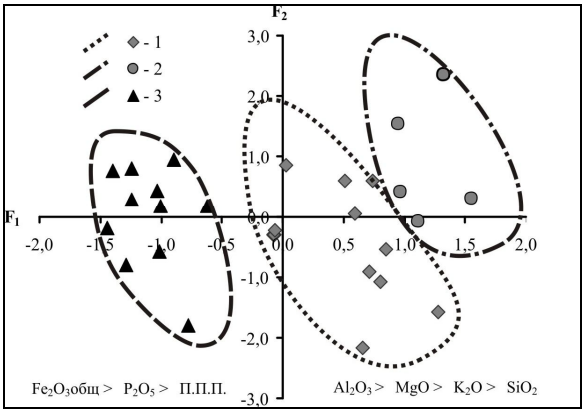

Рисунок 10 – Факторная диаграмма оолитовых железных руд Полынянского участка.

Условные обозначения: 1 – глауконит-хлоритовые руды; 2 – переходный тип руд; 3 – гетит-гидрогётитовые руды.

Таблица 1 – Результаты кластерного анализа химического состава рудного комплекса

Оксиды	1 кластер Глауконит-хлоритовый		2 кластер Переходный тип		3 кластер Гётит-гидрогётитовый	
	$\bar{x}$	S	$\bar{x}$	S	$\bar{x}$	S
SiO_2	37,06	4,59	51,93	8,83	20,12	3,71
TiO_2	0,13	0,07	0,07	0,08	0,22	0,13
Al_2O_3	4,29	0,94	4,93	1,06	2,67	0,75
Fe_2O_3общ	38,73	4,71	26,39	5,32	57,97	3,64
MnO	0,05	0,03	0,04	0,01	0,03	0,03
MgO	3,01	0,64	2,80	1,26	1,31	0,44
CaO	0,71	0,31	0,48	0,08	0,42	0,13
Na_2O	1,56	0,82	1,08	0,72	0,88	1,12
K_2O	1,17	0,52	1,75	0,86	0,31	0,07
P_2O_5	1,34	0,29	0,95	0,17	2,29	0,20
ППП	10,62	1,05	8,33	2,04	12,67	1,28

Примечание: $\bar{x}$ – среднее арифметическое (вес.%); S – стандартное отклонение (вес.%); Значимость результатов оценивалась с использованием коэффициента Фишера

На это могли влиять: 1) климатические условия на палеоводосборах и как следствие изменение интенсивности химического выветривания и степени зрелости поступающего в область седиментации обломочного материала; 2) смена тектонического режима, выражающаяся в изменении гидродинамики бассейна седиментации, способствующая накоплению гидроксидов железа и фосфора.

Геохимической спецификой проанализированных руд является надкларковые содержания Be, Sc, Ge, Y, Mo, W, Th, P, а также элементов группы железа Cr, Co, Ni, V и халькофилов Zn, Pb, Sb, Ag, As. Последние элементы в оолитовых рудах представлены сульфидами, фосфор – фосфатами РЗЭ и кальция. Для выяснения возможной связи генетических особенностей выделяемых на месторождении типов руд с определенной геохимической ассоциацией элементов проведен факторный статистический анализ методом главных компонент.

Факторные нагрузки в схематическом виде можно представить следующим образом: $F_1(32\,\%) = \frac{Mo_{85}V_{74}Sb_{73}}{Tl_{86}Cd_{79}Cs_{77}Hf_{71}Sr_{70}}$, $F_2(16\,\%) = \frac{1}{U_{85}Th_{75}}$, $F_3(12\,\%) = Ni_{90}Co_{79}Zn_{76}$, где в числителе - оценки элементов со значимой положительной нагрузкой, в знаменателе - оценки со значимой отрицательной нагрузкой, цифры в скобках - вклад фактора в общую дисперсию, выраженный в % от нее.

Концентрации Mo, V, Sb связаны с гётит-гидрогётитовым типом руд, а Tl, Cd, Cs, Hf, Sr – с глауконит-хлоритовым типом руд. Два основных типа руд характеризуются одинаковым уровнем накопления U и Th в отличие от переходных разностей. Третий фактор характеризует только гётит-гидрогётитовые руды. В целом геохимическая специализация «бакчарских» оолитовых руд схожа с аналогичными типами руд Керченского и Лисаковского месторождений. Стоить отметить значительные содержания сидерофильных (V, Cr, Co, Ni, Mo) и халькофильных (Zn, As, Ag, Cd, Sb, Pb) элементов, основополагающую роль в распределении которых играли процессы сорбции. Причем, окислительная среда рудообразования способствовала концентрированию сидерофилов, а восстановительные условия - халькофилов и образованию сульфидов в составе руд.

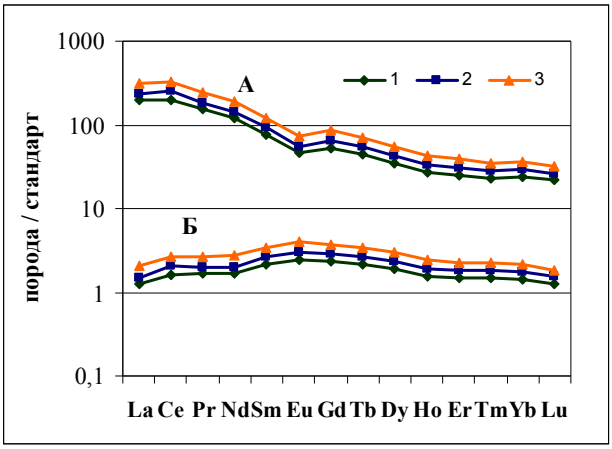

Рисунок 11 – Кривые распределения РЗЭ в оолитовых железных рудах, нормированные по хондриту (А) и составу глин Русской платформы (Б). Условные обозначения: 1 – глауконит-хлоритовый тип, 2 – переходный тип, 3 – гётит-гидрогётитовый тип.

В изученных оолитовых железных рудах Полынянского участка среднее содержание суммы РЗЭ составляет 424 г/т, максимальные содержания (до 600 г/т) характерны для гётит-гидрогётитовых руд, а минимальные (~ 320 г/т) – для глауконит-хлоритовых. Согласно рисунку 11 спектры трех типов руд отличаются по содержанию РЗЭ. На кривых распределения РЗЭ, нормированных на хондрит (А), отчетливо видно, что легкие лантаноиды в рудах преобладают над тяжелыми и хорошо выражен Eu-минимум. Результаты, нормированных данных к глинам Русской платформы (Б), показывают обогащенность руд Ce и средними РЗЭ, что говорит о тропическом климате в период формирования руд, способствовавшим предпочтительному выносу Ce в бассейны седиментации в гидролизатных условиях.

Таким образом, главными факторами обусловившим разнообразие руд являются вариации терригенных и рудных составляющих в сочетании с комплексами примесных элементов, появление которых контролировалось как обстановками рудообразования, так и спецификой бассейна осадконакопления. Высокие концентрации РЗЭ, халькофильных элементов, особенно мышьяка и сурьмы в осадочных толщах обычно связывают с зонами повышенной проницаемости и массо-водообмена (Патык-Кара и др., 2007; Sliwinski, 2010). Это могут быть зоны повышенной трещинноватости пород, вдоль которых происходят более активные постседиментационные изменения, а также участки восходящей разгрузки подземных (катагенных) вод (Павлов и др., 1995). Такими участками в ЗСБЖ, согласно О.М. Гриневу (2010), служили системы разрывов и листрических сбросов, которые образовались при проявлении активной тектоники ложа бассейна.

Положение 4. **Вертикальная изменчивость минералогических и геохимических индикаторов в рудном комплексе отражают цикличность физико-химических условий формирования оолитовых железных руд. Глауконит-хлоритовые руды образовались в прибрежно-морских условиях, переходные руды фиксируют их выветривание в континентальной обстановке, а бурые гётит-гидрогётитовые руды формируются в результате перемыва и окисления последних в замкнутых прибрежных водоемах.**

Изменчивость минерального состава, как в оолитах, так и в рудном комплексе в целом указывает на циклические вариации особенностей формирования, как первых, так и последних. Образование железистых и глауконитовых ооидов происходило совместно в иловом осадке, причем в верхней части шло формирование агрегатов гидроксидов железа, а в нижней – глауконита. Изученный глауконит имеет структуру гидрослюдистого типа, но некоторые индивиды его представляют собой смешанослойные образования монтмориллонит-слюдистого состава, что свидетельствует о смене условий, в ходе которых происходило их образование. В щелочной среде морского ила нередко происходит растворение вещества органических остатков и обломков силикатов, с одновременным синтезом новых слоистых минералов, устойчивых к этим условиям. Если процесс начинается в самой верхней части осадка, где pH среды не очень высок, то образуется гидрослюда. Если в глубине осадка или при переносе его в более отдаленные от берега части бассейна, где щелочность выше, то начинается образование смектита (Жабин, Золототрубова, 2008). Хлорит осаждался совместно с глинистыми фазами. Источником некоторых из них служил обломочный материал темноцветных минералов. В гидролизатных условиях железистые и глауконитовые ооиды покрываются гётит-гидрогётитовым агрегатом (Рисунок 12). Начало процесса иллитизации фиксируется появлением слабо упорядоченной разновидности иллита. Гидрослюдизация происходит по схеме: смектит + K + Al $\rightarrow$ иллит + Si + Mg (и Fe), т.е. побочными продуктами процесса становятся аутигенный кварц и хлорит (Япаскурт, 2008).

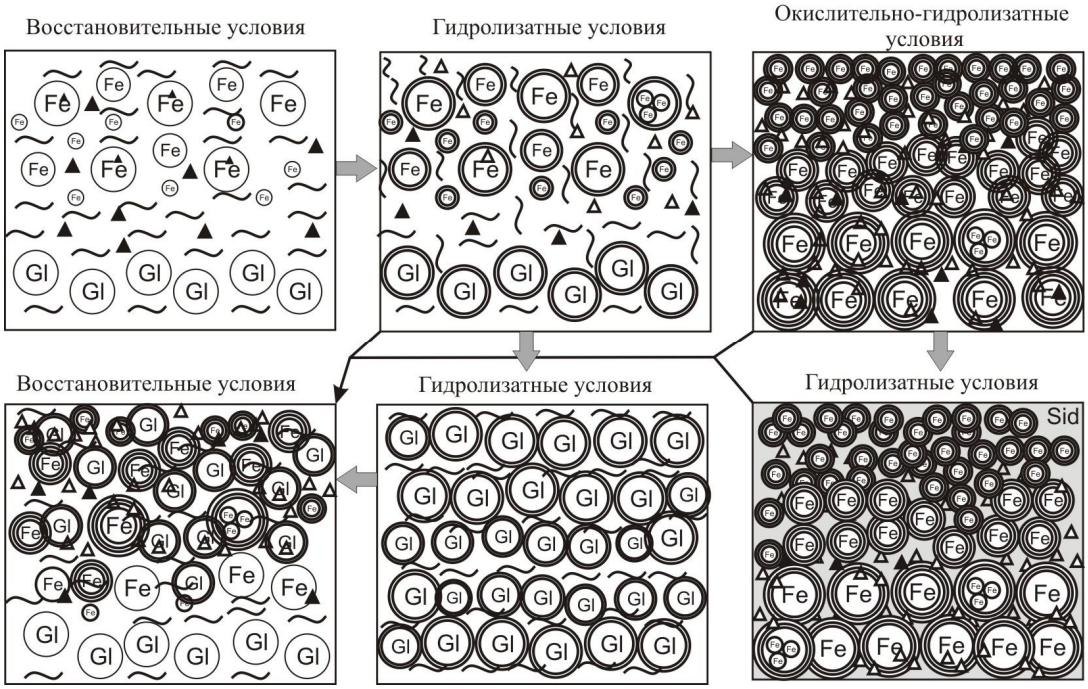

Рисунок 12 – Схема стадийности формирования оолитовых железных руд.
Условные обозначения: Fe – гидроксиды железа; Gl – глауконитовые глобули;Sid – сидеритовый цемент; Δ – обломочные минералы; ~ - глинисто-хлоритовый агрегат

В гётит-гидрогётитовых рудах всегда отмечаются более упорядоченные разности иллита, фиксирующие этап преобразования смектита в гидрослюду. Формирование каолинита происходило за счет трансформации гидрослюды или глинистых минералов под воздействием кислых растворов. Не менее важными минеральными индикаторами в составе оолитовых железных руд являются фосфаты и сульфиды. Согласно модели фосфатонакопления за счет рециркуляции железа (Батурин, 2004), гидроксиды железа сорбируют фосфор из морской воды и осаждаются на дно, где в толще осадка восстанавливаются за счёт органики, затем поступают в поровые воды и диффундируют к поверхности раздела вода-осадок, где вновь образуются гидроксиды железа увлекающие с собой часть фосфора. Таким образом, последовательность минералообразования в оолитовых железных рудах, как и железонакопление, тоже носило циклический характер (Рисунок 12). Рециркуляция гидроксидов железа способствовала накоплению огромного количества железных руд, что обеспечивалось постоянным поступлением металла в область седиментации. РЗЭ в данном процессе являются соосажденными с Ca-фосфатами. Органическое вещество морских илов выступало катализатором процесса образования сульфидов железа и возможно других элементов. В этих же обстановках, но в более глинистых илах, диагенез начинается в щелочных и восстановительных условиях. Затем осадки подвергались частичному перемыву (и аэрации) донными течениями и мутьевыми потоками, т.е. среда из восстановительной превращалась в окислительную. В этой обстановке и дозревают глауконит и фосфатные стяжения.

Геохимические данные позволяют провести наиболее точную реконструкцию обстановок и условий осадкообразования. Содержание и закономерности распределения рассеянных элементов в осадочных толщах находятся в тесной взаимосвязи с первично-осадочными факторами и характером минерального питания. Наиболее ярко и контрастно индикаторную роль смены фациальных обстановок демонстрируют элементы-примеси и их отношения Ti/Zr, Sr/Ba, Σ(REE+Y), ΣCe/ΣY и La/Yb, а изменение окислительно-восстановительных условий осадконакопления отношения – V/Cr, V/Cu, Mo/Co и U/Th (Рисунок 13). Повышенными значениями Ti/Zr характеризуются глауконит-хлоритовые и переходные типы руд и в разрезе наблюдается постепенное увеличение этого показателя с глубиной, что может быть связано с ростом объёма обломочного материала. Отношение Sr/Ba используется как индикатор палеосолености, величина Sr/Ba в пресноводных водах составляет менее 1, а в морских – более 1 (Маслов, 2005). В оолитовых железных рудах участка данное отношение не превышает 0,46, но его значения в разрезе варьирует и четко коррелируют со сменой типов руд, что явно указывает на изменение солености в ходе рудообразования. Повышенные значения показателя Σ(REE+Y) связаны с интенсивным перемывом осадка на фоне его высокой сортированности и накоплением акцессорных минералов. Для верхней части рудного комплекса по отношению La/Yb фиксируется приоритет терригенного способа накопления, для средней – терригенно-хемогенного, а в нижней – доля хемогенного накопления лантаноидов превалирует. Изменения формы кривой ΣCe/ΣY в разрезе в верхней и средней части рудного интервала, указывают на промежуточные семиаридно-семигумидные условия осадкообразования.

Особо важную роль среди всех геохимических индикаторов несут данные об окислительно-восстановительных обстановках, существовавших когда-то в бассейнах седиментации (Юдович, 2011). Увеличение значений отношения V/Cr характеризуют субоксические и аноксические обстановки. Минимальные значения V/Cr (2-3) характерны для глауконит-хлоритовых руд, максимальные (до 10) - переходным рудам.

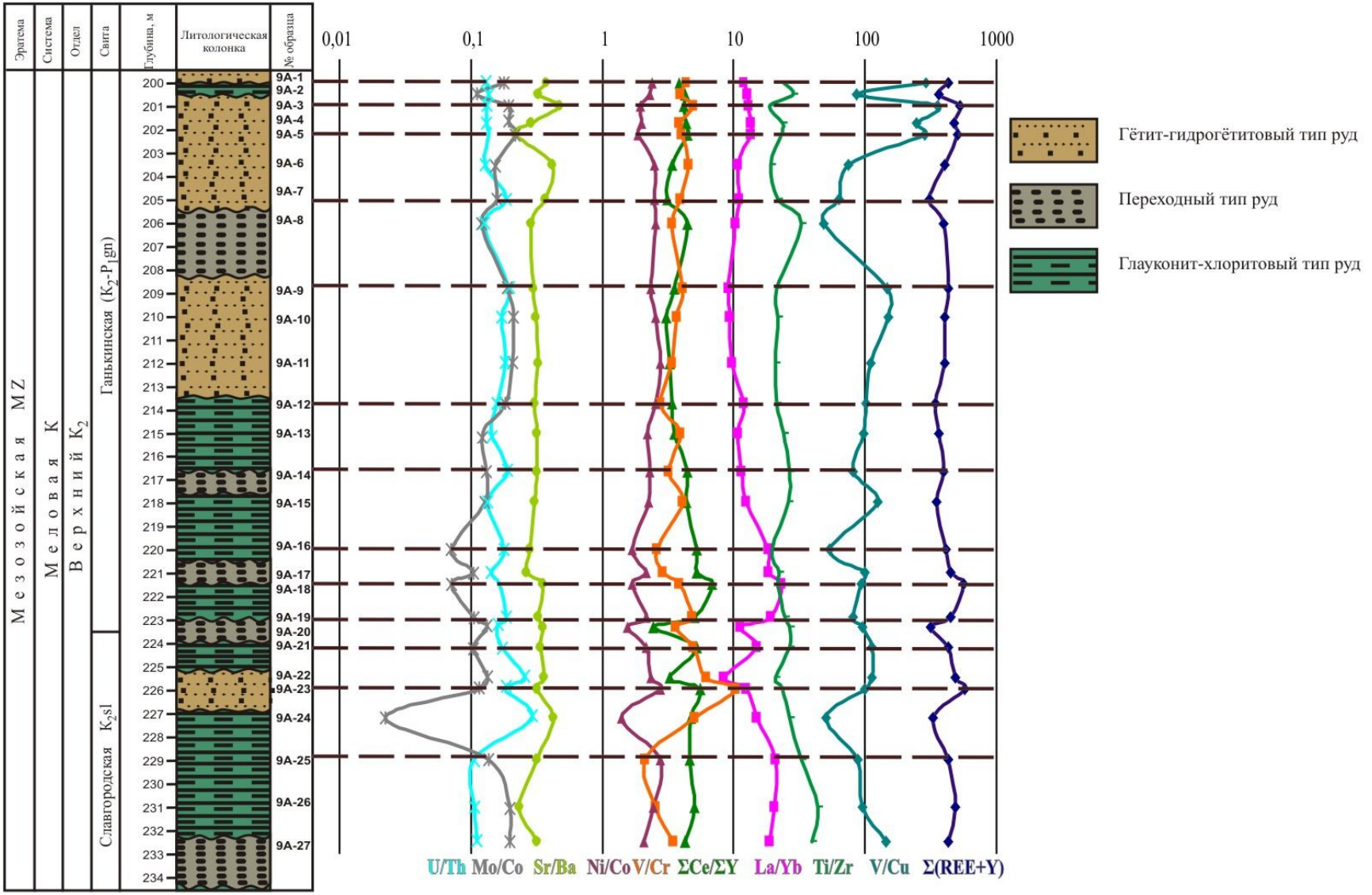

Рисунок 13 - Изменение основных геохимических индикаторов руд в разрезе Полынянского участка

Максимальные значения V/Cu (до 300) свойственны для гётит-гидрогётитовых руд, накопление которых происходило в окислительных условиях, минимальные 50-100 подчеркивают резкую смену типа руды в разрезе. Значения отношения Mo/Co (0,22) указывают на оксические и субоксические условия и хорошую аэрируемость бассейна седиментации. Перепады значений Mo/Co до 0,07 характерны для средней и нижней части рудной толщи, которые представлены глауконит-хлоритовыми рудами и свидетельствуют о смене субокисных на аноксинные обстановки. Максимальное разрешение кривой U/Th характерно для средней и нижней частей разреза. Увеличение отношения U/Th в рудном интервале свидетельствует о смене субокисных обстановок к бескислородным и подчеркивает границу изменения типа руды.

Анализ полученных данных по строению и минералого-геохимическим особенностям рудного комплекса Полынянского участка показал, что образование оолитовых железных руд могло реализоваться в полузакрытых прибрежно-морских условиях по типу лагун с застойными впадинами. В позднем мелу - среднем палеогене юго-восточная окраина Западной Сибири представляла собой прибрежно-морскую часть палеобассейна. Ведущим фактором формирования рудоносного комплекса явилась продолжительная трансгрессия моря, максимум которой пришелся на маастрихт. Появление застойных впадин в прибрежной части связано с расчленением дна бассейна седиментации и с заболачиванием дельт палеорек и образование озерно-лагунных зон. По О.М. Гриневу (2010, 2011) в пределах перехода «море – лагуна - континет» Западно-Сибирской плиты существовала линейная тектоническая зона повышенной проницаемости, формирование которой связано с деформацией накопившихся к верхнему мелу осадочных толщ по типу систем листрических сбросов и образованием микститоподобных толщ. Разброс абсолютных отметок поднятий и впадин расчлененного дна составлял от десятков до 100-200 м. В таких впадинах в обстановках спокойного гидродинамического режима формировались глауконитовые глобули. Источником вещества для них служили, как поступающие с континента пресные воды (болотные и грунтовые), несущие обломочный и взвешенный материал, так и потоки минерализованных (катагенных) вод, фильтрующиеся по системам разрывов зоны повышенной проницаемости. Рост глауконитовых микроконкреций происходил в придонном слое глинистого осадка. Наравне с ними в осадок поступали различные обломки, включая кварц, циркон, тяжелые минералы (ильменит, магнетит, хромит и др.) и мелкозернистый железосодержащий глинистый материал, по которому образовывался хлорит. В этих участках возникали восстановительные обстановки, реализация которых происходила за счет разложения органики и, как следствие, локального повышения содержания сероводорода, что способствовало образованию сульфидов и самородного серебра. Новообразованный глауконит разносился донными течениями, а позже в результате механической дифференциации возникли пласты глауконитовых глобулей. В режиме максимума трансгрессии при смешении континентальных вод с морскими, происходило разложение исходных минеральных парагенезисов и окисление высвобождающегося железа с образованием гётита и гидрогётита. Последующее увеличение кислотности среды минералообразования, трансформация глинистых минералов (смектит→гидрослюда, гидрослюда→каолинит) и поступление терригенного материала вело к формированию переходного типа руд. Неоднократные изменения условий седиментации (регрессия-трансгрессия моря) приводили к активному перемыву слабожелезоносных пород и появлению рыхлых гётит-гидрогётитовых разностей руд. Позже в результате воздействия на рыхлые и проницаемые оолитовые руды поровых вод формировался карбонатный цемент.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В пределах опробованного рудного комплекса выделяется 3 типа руд, положение которых в разрезе отражает его циклическое строение. Отчетливо прослеживаются циклы, каждый из которых состоит из двух типов руд: бурых гётит-гидрогётитовых и зеленовато-серых глауконит-хлоритовых оолитовых железных руд. Переходный тип железных руд фиксирует зону смены условий седиментации. Выделенные типы руд имеют свои отличительные черты, что выражается в структурно-текстурных особенностях и вариации минерального состава.

2. Все минералы, слагающие руды, разделяются на две генетические группы: терригенные и аутигенные. Терригенные минералы представлены кварцем, полевыми шпатами, магнетитом, ильменитом, цирконом и рутилом. Аутигенные минералы распространены более широко и представлены карбонатами, глинистыми, гидроксидами железа (гётит, гидрогётит, лепидокрокит), фосфатами, сульфидами и самородным серебром. Среди аутигенныхи минералов в рудах присутствуют две основные контрастные группы минералов, одна из которых образованна в восстановительных, а другая - в окислительных условиях. Восстановительная ассоциация характеризует глауконит-хлоритовые руды, окислительная - определяет состав бурых гётит-гидрогётитовых оолитовых руд. Кроме них выделяется гидролизатная ассоциация, которая характеризует переходный тип руд и отличается смешанной ассоциацией присутствующих аутигенных минералов.

3. Изучение петрохимических особенностей оолитовых железных руд показало, что главной причиной, определяющей их разнообразие, является вариация количества терригенных и рудных компонентов. Она контролирует и распределение примесных элементов, которое в разрезе рудного комплекса неравномерно. Ключевую роль в обогащении железных руд примесями играли процессы сорбции и соосаждения геохимически родственных элементов. Оолитовые железные руды обогащены сидерофильными (Cr, Co, Ni, V), халькофильными (Zn, Pb, Sb, Ag, As) и редкоземельными (Ce-группа) элементами. Обогащенность РЗЭ обусловлено повсеместным присутствием вкрапленности РЗЭ фосфатов, которые устойчивы к процессам окисления.

4. Исследования показали, что формирование оолитовых железных руд Бакчарского месторождения подчиняется четкой стадийности, которая сочетается с циклическим характером минералообразования. В основе цикличности лежит трансгрессивно-регрессивный режим рудонакопления. Минеральными индикаторами данного режима выступают широкий круг аутигенных минералов руд (гидроксиды железа, глауконит, сидерит, каолинит, пирит). Геохимическими индикаторами являются отношения элементов, характеризующие окислительно-восстановительные условия и фациальный режим формирования руд внутри выделяемых циклитов.

Установленные минералого-геохимические особенности оолитовых железных руд Бакчарского месторождения позволяют говорить об исключительности и уникальности объектов Западно-Сибирского железорудного бассейна. Процесс рудонакопления в нём представляется как сопряжение многочисленных благоприятных факторов, таких как, существование на континенте мощной площадной коры выветривания, продолжительная трансгрессия моря, заболачивание больших участков дельт палеорек, возникновение региональной тектонической зоны трещиноватости, связанной с активной тектоникой дна, где происходила разгрузка катагенных вод и регрессия, обеспечивающая природное обогащение руд за счет перемыва слабожелезоносных пород.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, опубликованные в изданиях, входящих в перечень ВАК:

1) **Асочакова Е.М.** Геохимические особенности железных руд Бакчарского месторождения (Западная Сибирь) / Е.М. Асочакова, С.И. Коноваленко // Вестник Томского государственного университета. – 2007. - № 305. - С. 219-223
2) **Асочакова Е.М.** К геохимии оолитовых и болотных железных руд Томской области / Е.М. Асочакова, С.И. Коноваленко // Вестник Томского государственного университета. - 2010. - № 341. - С. 222-225
3) **Асочакова Е.М.** Микровключения в оолитовых железных рудах Бакчарского месторождения (Западная Сибирь) / Е.М. Асочакова, О.В. Бухарова // Вестник Томского государственного университета, - 2013. - № 369. - С. 168–172.

Работы, опубликованные в других изданиях:

4) **Асочакова Е.М.** К геохимии оолитовых железных руд Бакчарского месторождения (Западная Сибирь) // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XI Международного научного симпозиума им. акад. М.А. Усова студентов и молодых ученых. – Томск: ТПУ, 2007. - С. 51-53
5) **Асочакова Е.М.** Геохимия осадочных железных руд Бакчарского месторождения (ЮВ Западной Сибири) / Е.М. Асочакова, С.И. Коноваленко // Петрология магматических и метаморфических комплексов. Материалы Всероссийской петрографической конференции, Томск, 26-29 ноября 2007 года. – Томск: ЦНТИ, 2007. - Вып. 6. - С. 172-175
6) **Асочакова Е.М.** Сравнительная геохимия мезо-кайнозойских железных руд Томской области /Е.М. Асочакова, С.И. Коноваленко // Нефть. Газ. Геология. Экология: современное состояние, проблемы, новейшие разработки, перспективные исследования: Материалы круглых столов. – Томск: ТПУ, 2010. - С. 82-88
7) **Асочакова Е.М.** Вещественный состав и условия образования оолитовых железных руд Западно-Сибирского бассейна на примере Бакчарского месторождения // Актуальные проблемы геологии докембрия, геофизики и геоэкологии. Материалы XXI молодежной научной конференции, посвященной памяти К.О. Кратца. г. Санкт-Петербург. 18-25 октября 2010 г. – СПб., 2010. - С. 153-156
8) **Асочакова Е.М.** Особенности вещественного состава оолитовых железных руд Бакчарского месторождения (Западная Сибирь) // Электронный сборник тезисов Пятой Сибирской конференции молодых учёных по наукам о Земле. Новосибирск. 29 ноября-2 декабря 2010 г. – Режим доступа: http://sibconf.igm.nsc.ru.
9) **Асочакова Е.М.** Минералогия оолитовых железных руд Бакчарского месторождения // Комплексное изучение и оценка месторождений твердых полезных ископаемых. Тезисы докладов третьей научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. – М.: ФГУП «ВИМС», 2011, С.21-23
10) **Асочакова Е.М.** Редкоземельные элементы в оолитовых железных рудах Бакчарского месторождения (Западная Сибирь) / Е.М. Асочакова, Ю.В. Аношкина // Современные проблемы геохимии: Материалы конференции молодых ученых – Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2011. - С.14-18
11) **Asochakova E.M.** Mineral inclusions of iron ores of the Bakchar deposit (Western Siberia) // The 6th International Siberian Early Career Geoscientists Conference: Proceedings of the Conference (9-23 June 2012, Novosibirsk, Russia). IGM, IPPG SB RAS & NSU – Novosibirsk, 2012. -P. 32

12) **Асочакова Е.М.** Микровключения в оолитовых железных рудах Бакчарского месторождения по данным РЭМ совмещенного с рентгеноспектральным анализатором // Материалы Всероссийской конференции по аналитической спектроскопии с международным участием. – Краснодар, 2012. – С.143
13) **Асочакова Е.М.** Глинистые минералы оолитовых железных руд Бакчарского месторождения (Западная Сибирь) // Минералогия, геохимия и полезные ископаемые Азии. – Томск: Томский ЦНТИ – филиал ФГБУ «РЭА» Минэнерго России, 2012. –Вып. 2. - С.22-34
14) **Asochakova E.M.** Petrochemical typification of the oolitic iron ores from the Bakchar deposit (Western Siberia) // Mineralogical Magazine. - v.77 (5). - 2013. - P. 626
15) **Асочакова Е.М.** Распределение элементов-примесей в оолитовых железных рудах Бакчарского месторождения (Западная Сибирь) // Современные проблемы геохимии: Материалы конференции молодых ученых – Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2013. - С. 7-8