

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.050.02 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
НАУКИ ИНСТИТУТА ГЕОЛОГИИ И МИНЕРАЛОГИИ ИМ. В.С. СОБОЛЕВА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПО
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ГЕОЛОГО-
МИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 21 декабря 2023 г. № 02/8

О присуждении **Некипеловой Анне Владиславовне**, гражданке РФ, ученой степени кандидата геолого-минералогических наук.

Диссертация «**Редкоземельные элементы в керченских железных рудах: особенности распределения и формы нахождения**» по специальности 1.6.4 – «**Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых**», принята к защите 20 октября 2023 г., протокол № 02/7 диссертационным советом 24.1.050.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (630090, г. Новосибирск, проспект академика Коптюга, д. 3), приказ МИНОБРНАУКИ России № 1113/нк от 23.05.2023 г.

Соискатель **Некипелова Анна Владиславовна**, 1995 года рождения, в 2019 году окончила магистратуру геолого-геофизического факультета Новосибирского государственного университета (Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет») по направлению 05.04.01 «Геология». В период 2019-2022 гг. обучалась очно в аспирантуре Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН) по направлению подготовки 05.06.01 «Науки о Земле». Соискатель работает младшим научным сотрудником в ИГМ СО РАН. Диссертационная выполнена лаборатории метаморфизма и метасоматоза (№440) ИГМ СО РАН.

Научный руководитель – доктор геолого-минералогических наук **Сокол Эллина Владимировна**, работает в должности главного научного сотрудника лаборатории метаморфизма и метасоматоза (№440) ИГМ СО РАН

Официальные оппоненты: 1) **Новоселов Константин Александрович** – кандидат геолого-минералогических наук по специальностям 04.00.20 – «Минералогия, кристаллография» и 04.00.11 – «Геология, поиски и разведка рудных и нерудных месторождений; металлогения», ведущий научный сотрудник лаборатории минералогии рудогенеза Института минералогии – обособленного подразделения ФГБУН Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии Уральского отделения Российской академии наук; 2) **Маслов Андрей Викторович** – член-корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук по специальности 04.00.01 – «Общая геология», главный научный сотрудник лаборатории стратиграфии верхнего докембрия Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геологического института Российской академии наук **дали положительные отзывы на диссертацию**.

Ведущая организация Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, в своем положительном заключении, подписанном **Мазуровым Алексеем Карповичем**, доктором геолого-

минералогических наук, профессором отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета и Рудминым Максимом Андреевичем, кандидатом геолого-минералогических наук, доцентом отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета, указала, что представленная работа направлена на решение фундаментальной проблемы реконструкции условий аккумуляции микроэлементов в ходе формирования специфичных оoidовых или оолитовых железистых образований.

Соискатель имеет 18 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации - 11, из них 4 статьи опубликованы в рецензируемых научных изданиях. Все статьи по теме диссертации опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК, а также индексируются в научометрических базах Web of Science и Scopus.

Наиболее важные работы, опубликованные по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях:

1. Sokol E.V., Kokh S.N., Kozmenko O.A., Nekipelova A.V., Rudmin M., Khvorov P.V., Artemyev D.A. Geochemistry and mineralogy of rare earth elements in high-phosphorus ooidal ironstones: a case study of the Kamyshev-Burun deposit (Azov-Black Sea iron Province). *Ore Geology Reviews*, 2020, 103827.
2. Некипелова А.В., Сокол Э.В., Кох С.Н., Хворов П.В. Редкоземельные фосфаты в керченских икряных рудах. *Геология и геофизика*, 2021, 62(10), 1447-1471.
3. Некипелова А.В., Сокол Э.В., Кох С.Н., Филиппова К.А. *Руды и металлы*, 2022, 1, 106-120.
4. Nekipelova A.V., Kokh S.N., Sokol E.V., Kozmenko O.A. Major and Trace Element Signatures in Lagoon Vivianite: A Case Study from the Kerch Ooidal Ironstones. In «XIII RMS General Meeting and Fedorov Session». Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences (Marin Y. eds). Cham: Springer International Publishing, 2023, 372-381.

На диссертацию и автореферат поступило 10 отзывов (все положительные, из них 3 без замечаний) от: 1) Саттаровой Валентины Владимировны, к.г.-м.н., заведующего лабораторией геохимии осадочных процессов ФГБУН Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильинцева ДВО РАН; 2) Киселевой Дарьи Владимировны, к.г.-м.н., старшего научного сотрудника лаборатории физических и химических методов исследования минерального вещества ФГБУН Института геологии и геохимии им. А.Н. Заварецкого УрО РАН; 3) Крупенина Михаила Тихоновича, к.г.-м.н., ведущего научного сотрудника лаборатории литологии ФГБУН Института геологии и геохимии им. А.Н. Заварецкого УрО РАН; 4) Брусницына Алексея Ильича, д.г.-м.н., заведующего кафедрой минералогии Санкт-Петербургского государственного университета); 5) Чайковского Ильи Ивановича, д.г.-м.н., заведующего лабораторией геологии месторождений полезных ископаемых Горного института УрО РАН – филиала ФГБУН Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН; 6) Асочаковой Евгении Михайловны, к.г.-м.н., доцента кафедры минералогии и геохимии геолого-географического факультета ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет»; 7) Челнокова Георгия Алексеевича, к.г.-м.н., ведущего научного сотрудника лаборатории тепломассопереноса ФГБУН Геологического института РАН и Лаврушина Василия Юрьевича, д.г.-м.н., заместителя директора ФГБУН Геологического института РАН; 8) Кулешова Владимира Николаевича, д.г.-м.н., главного научного сотрудника лаборатории геохимии изотопов и геохронологии ФГБУН Геологического института РАН; 9) Солотчиной Эмилии Павловны, д.г.-м.н.,

ведущего научного сотрудника лаборатории геологии кайнозоя, палеоклиматологии и минералогических индикаторов климата ФГБУН Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН; 10) Шевченко Владимира Петровича, к.г.-м.н., ВРИО директора ФГБУН Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН. В отзывах отмечено, что работа основана на обширном фактическом материале, выполнена на высоком профессиональном и научном уровне, имеет теоретическую и практическую значимость; все защищаемые научные положения обоснованы приведенными результатами и выводами, позволяющими расширить представления о геохимии диагенеза морских железистых осадков.

Основные замечания и вопросы касаются: 1) типизации оoidовых или оолитовых железистых образований (ведущая организация) и керченских железных руд (Брусницын А.И.); 2) модели формирования керченских руд (ведущая организация, официальные оппоненты Новоселов К.А. и Маслов А.В.); 3) генетической связи процессов грязевого вулканизма и рудообразования в киммерийское время (официальные оппоненты Новоселов К.А. и Маслов А.В.); 4) геохимических сигналов, позволяющих реконструировать источники рудного вещества (ведущая организация, Брусницын А.И.) и физико-химические условия осадконакопления (Киселева Д.В.); 5) диагенетических преобразований рудоносного осадка (Челноков Г.А., Лаврушин В.Ю., Чайковский И.И., Солотчина Э.П., Кулешов В.Н.); 6) роли слоистых силикатов и аутигенных фосфатов Fe^{2+} и $\text{Ca}-\text{Fe}^{2+}$ в концентрировании REE в рудах (Асочакова Е.М.); 7) потенциала керченских железных руд как нетрадиционного источника REE сырья (официальный оппонент Новоселов К.А.; Брусницын А.И.).

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что Новоселов Константин Александрович и Маслов Андрей Викторович являются широко известными высококвалифицированными специалистами в области геологии, минералогии и геохимии рудных месторождений, а также геохимии и литологии осадочных образований. Оппоненты имеют многочисленные публикации в соответствующей данной диссертационной работе сфере исследования и способны объективно оценить работу.

Выбор ведущей организации обосновывается тем, что в Национальном исследовательском Томском политехническом университете (ТПУ) проводятся фундаментальные научные исследования по исследованию геологии и металлогении осадочных бассейнов. Сотрудники ТПУ, известные и признанные в нашей стране и за рубежом эксперты в области месторождений осадочных железных руд и геохимии осадочных процессов могут аргументированно оценить научную и практическую значимость диссертационной работы.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований: был определен вклад каждого компонента осадка в их интегральный REE+Y бюджет керченских железных руд. Установлено, что аккумуляцию REE в керченских железных рудах обеспечили два главных процесса: сорбция редкоземельных элементов на поверхности Fe(окси)гидроксидов и кристаллизация аутигенных водных фосфатов LREE. Седиментационные обстановки и условия диагенеза рудного осадка были реконструированы на базе следующих генетически-информационных характеристик руд и отдельных их составляющих: тренды накопления макро- и микрокомпонентов, особенности PAAS-нормализованных спектров распределения REE+Y, изотопные характеристики С и О карбонатов.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что впервые для керченских железных руд и их индивидуальных компонентов систематически исследован их микроэлементный (с акцентом на редкоземельные элементы и иттрий)

состав. Выявление геохимических особенностей аккумуляции макро- и микроэлементов (в том числе REE и Y) различными типами руд и их отдельными компонентами, позволило реконструировать механизмы их формирования и, тем самым, расширить представления о геохимии диагенетических процессов, происходящих в морских железистых осадках. Доказаны следующие положения:

1. В керченских железных рудах вивианит и анапаит возникли на разных этапах преобразования рудного осадка. Вивианит ($\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) неоднократно кристаллизовался на раннедиагенетической стадии созревания осадка; источником железа были восстановленные поровые воды, а фосфора – продукты биодеградации белковых тел моллюсков. Кристаллизация анапаита ($\text{Ca}_2\text{Fe}(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) связана с эпизодом повторного погружения уже консолидированной рудной толщи ниже уровня моря, что доказывает наличие геохимических меток морской воды в его $(\text{REE}+\text{Y})_N$ спектре. Оба минерала бедны ΣREE (0.6-30 ppm) и не вносят заметного вклада в интегральный редкоземельный бюджет керченских железных руд.
2. Максимальные концентрации REE и Y присущи оолитовым разностям керченских железных руд: коричневые руды содержат $\Sigma\text{REE} = 300\text{-}570$ ppm, а икряные – 410-700 ppm. В тонких (<0.25 mm) фракциях этих руд количество ΣREE возрастает на порядок (1100-3000 ppm), преимущественно за счет накопления MREE и LREE. Главными концентриаторами LREE являются аутигенные рабдофаноподобные фазы ($\text{LREE}(\text{PO}_4) \cdot n\text{H}_2\text{O}$).
3. Высокие уровни накопления REE в керченских железных рудах (3-5-крат относительно PAAS) главным образом обеспечил процесс сорбции этих элементов на поверхности (окси)гидроксидов Fe и Mn. В осциллирующих редокс-условиях диагенеза рудного осадка многократное растворение-осаждение Fe(Mn)-(окси)гидроксидов сопровождалось гистерезисной сорбцией-десорбцией REE. Геохимической меткой этого процесса является обогащение MREE, присущее всем типам керченских руд.

Применительно к проблематике диссертации результативно использован широкий комплекс современных минералого-геохимических и изотопно-геохимических методов анализа (количественный рентгенофазовый анализ, электронная микроскопия, рентгеноспектральный микроанализ, масс-спектрометрия с индуктивно связанный плазмой и лазерным пробоотбором). В процессе работы было исследовано 140 образцов коричневых, икряных и карбонатных руд, базального рудного горизонта и понтийского известняка (Ni^{3+}), фаунистических останков, а также псевдоморфоз Mn карбонатов по ископаемой фауне и фосфатов Fe^{2+} и Ca-Fe^{2+} . Часть образцов типоморфных для керченских руд фосфатов (вивианита и анапаита) была любезно предоставлена Минералогическим музеем им. А.Е. Ферсмана, г. Москва. Все образцы были исследованы лично автором по единой схеме

В диссертационной работе дана **систематическая геохимическая характеристика** трех типов осадочных железных руд керченского типа (карбонатных, коричневых и икряных) и их отдельных компонентов (размерных фракций руд, рудных частиц и цементов, индивидуальных минералов). **Определены** характерные особенности распределения макро- и микроэлементов, включая REE и Y, в керченских рудах и их индивидуальных компонентах. **Установлен** вклад каждого компонента рудного осадка в общий REE+Y бюджет керченских руд. Доказано, что ведущую роль в процессах аккумуляции REE и Y керченскими рудами играют сорбция REE (преимущественно MREE) на Fe-(окси)гидроксидах, а также обильная аутигенная минерализация LREE фосфатов (рабдофаноподобных фаз). **Выявлены** устойчивые сочетания генетически-

информационных вещественных характеристик отдельных составляющих руд (особенности накопления макро- и микрокомпонентов (геохимические метки), аномалии в нормализованных на постархейский глинистый сланец (PAAS) [Taylor, McLennan, 1985] спектрах распределения REE+Y, изотопные характеристики С и О карбонатов), пригодные для реконструкции седиментационных обстановок и условий диагенеза рудного осадка. Выполнен сравнительный анализ геохимических особенностей и REE потенциала оолитовых керченских Fe руд, руд фанерозойских месторождений-аналогов и иных осадочных руд различного генезиса.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики состоит в сопоставлении геохимических особенностей и REE потенциала оолитовых керченских Fe руд, руд фанерозойских месторождений-аналогов и иных осадочных руд различного генезиса. Особенности распределения и формы нахождения REE+Y в керченских железных рудах дают основание квалифицировать их как перспективный тип нетрадиционного REE сырья.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что основу диссертационной работы составляют аналитические данные, полученные методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), количественного рентгенофазового, рентгенофлуоресцентного (РФА) и рентгеноспектрального (РСМА) анализов, а также масс-спектрометрии с индуктивно связанный плазмой (МС-ИСП) и лазерной абляцией (ЛА-МС-ИСП). Комплекс аналитических исследований выполнен на высокоточном оборудовании, прошедшем необходимые юстировки и техобслуживание: оптический микроскоп Olympus BX51 и сканирующий электронный микроскоп MIRA 3 LMU TESCAN Ltd.; дифрактометр XRD-6000, Shimadzu (рентгенофазовый анализ); энергодисперсионный спектрометр AZtec Energy XMax-50, рентгеновский спектрометр ARL-9900-XP (Thermo Fisher Scientific Ltd), плазменный спектрометр Agilent Technologies 7700x в сочетании с системой лазерной абляции NewWave Research (химический анализ); масс-спектрометр FINNIGAN MAT 253 с приставкой GasBench II (изотопный анализ).

Теоретическая часть результатах комплексного изучения керченских железных руд. Идеи диссертации базируются на общепринятых моделях формирования фанерозойских оолитовых железняков [Zitzmann, 1978; McGregor et al., 2010; Maynard, 1986; Kimberley, 1989; Young, 1989; Холодов и др., 2012 и др.] и диагенетического преобразования морских железистых осадков [Sholkovitz, 1990; Nozaki, 2001; Дубинин, 2004; Censi et al., 2010; Kim et al., 2012; Surya Prakash, 2012; Liao et al., 2019; Yang et al., 2017 и др.]. Сложное поведение REE в морских железистых осадках контролируют процессы диагенетического преобразования осадка, в значительной мере связанные с микробиальным дыханием. Эти процессы сопровождает каскад химических превращений, в результате которых в осадке последовательно формируются аутигенные фазы – фосфаты LREE, карбонаты и фосфаты Fe²⁺. При этом каждая из твердых фаз осадка и существующие с ними поровые воды приобретают уникальные геохимические метки, в частности, профили распределения REE и Y. В работе использовано сравнение результатов авторского исследования с литературными данными по условиям формирования фанерозойских оолитовых железняков России и мира [Kafle, 2011; Franceschelli et al., 2000; Gloaguen et al., 2007; Taj, Mesaed, 2013; Rahiminejad, Zand-Moghadam, 2018; Shaltami et al., 2017; Rudmin et al., 2019; Diab et al., 2020; Li et al., 2021 и др.]. Установлена согласованность результатов, полученных соискателем, с данными по редкоземельной нагрузке морских фанерозойских оолитовых Fe руд. Полученные данные не противоречат общизвестным фактам, являются научно-обоснованными и аргументированными.

Личный вклад состоит в изучении представительной коллекции руд и пород Камыш-Бурунской мульды (~140 обр.), часть из которых была отобрана лично

автором в ходе полевых работ 2020 г. Валовые пробы руд и пород Камыш-Бурунской мульды, а также их индивидуальные компоненты (гранулометрические фракции, цементы, скелетные останки, псевдоморфозы по ископаемой фауне, отдельные минералы) были исследованы лично автором по единой схеме с использованием комплекса аналитических методов на базе лабораторий Аналитического Центра ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск) и Южно-Уральского Федерального Научного Центра Минералогии и Геоэкологии УрО РАН (ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, г. Миасс). Автором работы был осуществлен полный цикл пробоподготовки и освоены методики исследования фазового, химического, микроэлементного и изотопного состава минерального вещества. Получение, систематизация и интерпретация аналитических данных выполнены в период 2019-2022 гг. Основные положения диссертации опубликованы в 11 научных работах, 4 статьях в рецензируемых научных журналах, из них в **3 статьях за первым авторством**.

На заседании 21 декабря 2023 г. диссертационный совет принял решение присудить Некипеловой Анне Владиславовне учёную степень кандидата геолого-минералогических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 17 докторов наук по специальности 1.6.4 и 1 кандидат наук по специальности 1.6.4, участвовавших в заседании, из 23 человек, входящего в состав совета, проголосовали: за – 18, против – 0, недействительных - 0.

Председатель

диссертационного совета, академик РАН, д.г.-м.н.

Н.П. Похilenко

Учёный секретарь

диссертационного совета, д.г.-м.н.

О.Л. Гаськова

22.12.2023 г.

