

УДК 552.26:552.142:553.21

КОНТИНЕНТАЛЬНЫЕ ЖЕЛЕЗНЯКИ КИРЕЕВСКОГО ПРОЯВЛЕНИЯ (ОБЬ-ТЫМСКАЯ НИЗМЕННОСТЬ): МИНЕРАЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ

Даулетова Айгерим Бауыржановна¹,
abd7@tpu.ru

Рудмин Максим Андреевич¹,
rudminma@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность работы заключается в отсутствии комплексной модели изменений геохимического цикла железа в континентальных условиях, приводящих к формированию рудных залежей. Научная проблема данной работы охватывает важные вопросы условий концентрирования железа в континентальных плиоценовых отложениях Обь-Тымской низменности.

Цель данных исследований заключается в выявлении минералогических особенностей условий накопления железняков на примере плиоценового Киреевского рудопроявления для оценки механизмов поступления металлов и процессов минералообразования.

Методы: полевые наблюдения, петрографический анализ, рентгенодифракционный анализ, сканирующая электронная микроскопия, рентгенофлуоресцентный анализ и масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой.

Результаты. Преобладающими в минеральном составе континентальных залежей железняков Киреевского проявления являются сидерит и шамозит. Они указывают на субоксидные обстановки минералообразования в условиях пойменно-речных отложений. Концентрирование основных металлов, включая железо, могло происходить за счет создаваемых стабильных субоксидных условий седиментации в результате продуцирования углекислоты. Последнее зависело от активности бактериального разложения детритовой органики, регулярно приносимой поверхностными водотоками. Подобные условия подразумевают накопление алевропесчаников с железняками в донных обстановках заболачиваемых озёр, включая также пойменные равнины. Изученное континентальное залегание железняка относится к междуречью рек Обь и Тымь, которое расположено в восточной части Западно-Сибирской плиты. Обь-Тымская низменность полностью наследует мезозойско-кайнозойскую отрицательную структуру – Усть-Тымскую впадину. Железняки локализованы в осадочной толще Киреевского рудного проявления. Железосодержащие слои залегают в верхней части кочковской свиты, которая сложена неогеновыми и эоплейстоценовыми отложениями.

Ключевые слова:

Железняки, континентальные отложения, аутигенные минералы, минералогия, геохимия, Западная Сибирь.

Введение

Осадочные железняки имеют широкое распространение в определённые периоды фанерозойской эонотемы [1–3]. Осадочные железняки – это песчано-глинистые осадочные породы, состоящие более чем на 15 % из железа в форме *in situ* минералов [4–6]. По обстановкам осадения они подразделяются на континентальные и морские генетические типы [4, 7–10]. Континентальные железняки (или channel/continental ironstone deposit – CID) встречаются реже морских месторождений [8, 10]. В целом морские и континентальные железняки отличаются текстурно-структурными характеристиками пород, их минеральным составом и морфологией залежей. Континентальные железняки зачастую залегают среди широких вариаций литотипов (глинистые породы, алевриты, песчаники, гравелиты, конгломераты и т. д.) с однородной, параллельнослоистой или косослоистой, колломорфной, реже ооидовой структурой [4]. Континентальные железняки состоят из гидрооксидных минеральных фаз железа (гётит, гизингерит, лепидокрокит и гидрогётита), сидерита, бертьерина, шамозита и других филлосиликатов [7, 10, 11]. Железосодержащие залежи в континентальных отложениях указывают на отличительные палеоусловия формирования хемогенных пород [6, 7, 10] и имеют локальное промышленное значение [8, 11, 12]. Общие ресурсы

континентальных железных руд существенно меньше морских [8]. Часто железняки разных типов распространены в пределах крупных единых провинций, таких как провинция Хамерсли в Австралии [13–15], Аральско-Тургайская провинция в Казахстане [8, 16–18], Западно-Сибирская провинция в России [19–21] и т. д.

Геологическая характеристика объекта

Территория изучаемого бассейна с залежами континентальных железняков относится к междуречью рек Обь и Тымь (рис. 1, А, Б), которое располагается в юго-восточной части Западно-Сибирской плиты. Обь-Тымская низменность полностью наследует мезозойско-кайнозойскую отрицательную структуру – Усть-Тымскую мегаплатформу – и является районом развития аккумулятивных и эрозионно-аккумулятивных речных террас реки Обь и её крупных притоков [4].

Изучаемые железняки локализованы в верхних горизонтах кочковской свиты, отделяющей неогеновые отложения от плейстоценовых. Кочковская свита датируется эоплейстоценом [4] и пользуется широким распространением на водораздельных пространствах исследуемой территории. В естественных обнажениях верхняя часть свиты с залежами железняков, которые послужили объектами для отбора проб и исследований, вскрывается в бассейне реки Обь [4]. В раз-

ных фациальных зонах верхний горизонт свиты включает глинистые, алевроитовые, песчаные, песчано-глинистые отложения [4]. Отдельные скопления пластов железняков в верхней части кочковской свиты образуют Киреевское, Поздняковское, Казан-

ское проявления. Эти объекты Томского Приобья слабо изучены, поскольку не имеют сегодня промышленного значения, однако по археологическим данным эти руды служили источником для древней металлургии [22].

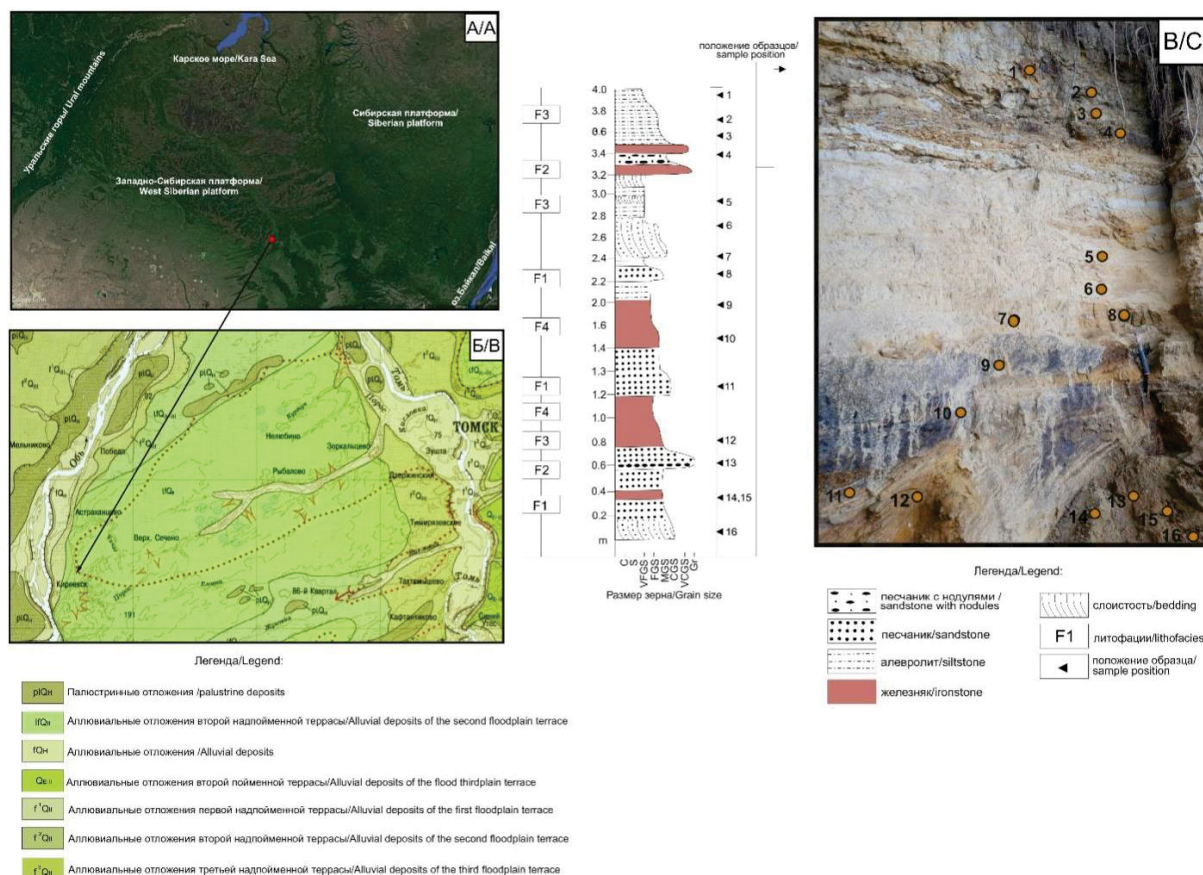


Рис. 1. А) Обзорная карта на основе Google Earth; Б) схематическая геологическая карта района; В) фото обнажения с положением образцов

Fig. 1. A) Overview map based on Google Earth; B) schematic geological map of the area; C) photos of the outcrop with sample attached

Материал и методы

Для минералого-геохимических исследования было отобрано шестнадцать образцов железняков и вмещающих терригенных пород Киреевского месторождения из естественных обнажений (рис. 1, В). Для петрографических исследований были изготовлены полированные шлифы с использованием стандартных шлифовальных методик. Валовый минеральный состав, включая отдельный анализ глинистой фракции, определялся методом рентгенодифракционного анализа (РДА) с помощью дифрактометра Rigaku Ultima IV, оснащенного источником излучения Cu-K α и работающего при токе 30 мА и напряжении 40 кВ. Аналитические навески анализировались при диапазоне угла дифракционного отражения (2 θ) от 3 до 65 °С с шагом 0,02 °С со скоростью сканирования 1 с на шаг. Микроскопические исследования проводились на полированных шлифах с углеродным покрытием (толщина 15 нм) с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) TESCAN VEGA 3 SBU, оснащенного детектором OXFORD X-Max 50 для ло-

кального энергодисперсионного рентгеноспектрального анализа (ЭДС). Параметры СЭМ съёмки были следующие: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 3,5...12,2 нА и фокусное расстояние от 4 до 15 мм. Средний химический состав различных минералов определялся путем повторных ЭДС измерений (более 10 точек на каждый минерал).

Содержания основных оксидов в аналитических образцах определялись с помощью рентгенофлуоресцентного микроанализатора (РФА) HORIBA XGT 7200, работающего при токе 1 мА, диаметре сканирующего пучка 1,2 мм и напряжении 50 кВ. Препараты для РФА анализа готовились следующим образом: предварительное прессование аналитической навески и последующее плавление до 900 °С в течение 9 ч. Потери при прокаливании высчитывались как разница веса аналитической навески до и после спекания. Предел обнаружения основных оксидов составлял выше 0,001 вес. %. Рентгенофлуоресцентный микроанализатор (РФА) определяет петрогенные элементы, которые далее пересчитываются на оксиды.

Микроэлементы (в г/т) были получены методом ИСП-МС на масс-спектрометре ELAN DRC-e. Точность анализа определялась серией повторностей образцов и стандартов (USGS, BCR-2, GSD-1g и SCO-1), включая собственные стандарты. Аналитическая ошибка составляла менее 3 %.

Концентрации элементов были нормированы на содержания алюминия в пробах, чтобы исключить влияние терригенной фракции при использовании геохимических индексов. Факторы обогащения (enrichment factor – EF) рассчитывались для каждой пробы по стандартной формуле. Исключение Al EF, который высчитывался следующим образом: $Al\ EF = Al_{\text{проба}} / Al_{\text{PAAS}}$ (PAAS – средние содержания элемента в стандарте пост-архейского австралийского сланца). Индекс химического выветривания (chemical index alteration – CIA) определялся по следующей формуле: $100 \times (Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O))$. Ce^* , Eu^* , Y_{sn}/Ho_{sn} были получены из нормированных концентраций редкоземельных элементов (РЗЭ) на средние значения стандарта PAAS. Цериевая аномалия высчитывалась по формуле: $Ce^* = 2 \times Ce_{sn} / (La_{sn} + Pr_{sn})$, где sn – это значения, нормированные на PAAS. Европиевая аномалия – $Eu^* = Eu_{sn} / (2/3 Sm_{sn} + 1/3 Gd_{sn})$.

Результаты

Литологические характеристики

Полевые наблюдения:

В пределах изучаемого разреза распространены отложения плиоценовой кочковской свиты, вмещающие тонкие слои, линзы и пласты с железяками. Осадочная последовательность кочковской свиты в пределах Киреевского проявления (рис. 1, В) включает следующие литотипы: железяки, гравелиты, песчаники и алевропесчаники. Пласты железяков в пре-

делах проявления имеют мощность 0,2...0,6 м и прослеживаются на 100...800 м. В разрезе железяки имеют неровную (волнистую) поверхность кровли и однородное строение пластов и линз.

Изучение шлифов:

Железяки (рис. 2, В) имеют желтовато-коричневый, буроватый цвет, состоят из аутигенного сидерита и терригенных обломков кварца и полевых шпатов. Текстура железяков однородная, а структура преимущественно среднезернистая. Размер зерен железяков в среднем составляет 0,2...0,5 мм. Сидерит в железяках образует цемент в ассоциации с кальцитом (рис. 3, А, Б). Иногда карбонаты характеризуются зернами идиоморфной формы.

Алевропесчаники (рис. 2, Б) имеют параллельную слоистость текстуру, желтовато-коричневый цвет и мелкозернистую структуру. Они отличаются повышенной долей алевролитистых обломков и характеризуется тонкой, параллельно слоистой текстурой, наблюдаемой в обнажениях. В слоях алевропесчаника встречаются небольшие линзы серого мелкозернистого песчаника.

Песчаники (рис. 2, А) преимущественно среднезернистые с псаммитовой структурой и слабой, косо слоистой текстурой. Песчаники состоят из обломков кварца и реже из полевых шпатов. Часто в пластах песчаников отмечаются конкреции сидерита размером до 20 см в диаметре.

Гравелиты имеют буроватый оттенок, однородную, псефитовую структуру, состоят из аллотигенного кварца и сидеритового цемента. Размеры кварцевых зерен в гравелитах варьирует в диапазоне 0,7...1,5 мм. Обломки угловатые, наиболее крупные зерна слабо окатанные. Цемент гравелитов порохово-пленочный. Крупные окатанные обломки покрыты пленочным карбонатным цементом.

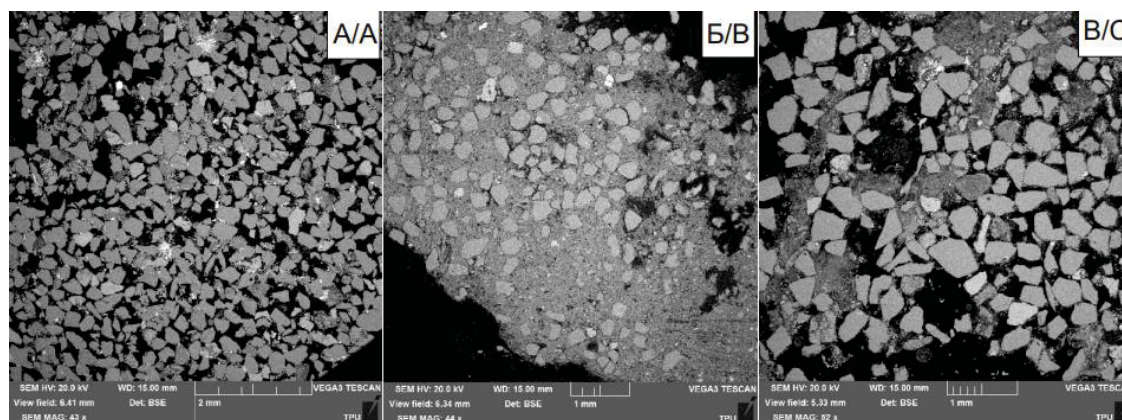


Рис. 2. СЭМ-снимки образцов в кочковской свите Киреевского проявления (А) песчаник среднезернистый, слабоцементированный (Б) алевропесчаник с глинистыми стяжениями (В) железяк мелко-среднезернистый

Fig. 2. SEM-images of samples from the Kochkov Formation of the Kireevsk occurrence. (A) sandstone medium-grained, weakly cemented (B) siltstone with clayey nodules (C) fine-medium-grained ironstone

Минеральный состав

Минералы в отложениях Киреевского проявления подразделяются на аллотигенные (привнесенные) и аутигенные (новообразованные или *in situ*). Основные аутигенные минералы следующие (в порядке убывания): железистый хлорит (шамозит), сидерит, гётит

(гидрогётит), каолинит, иллит, смектиты, кальцит, доломит, пирит, барит, брушит и галит. В группу аллотигенных минералов входят кварц, полевые шпаты (альбит, микроклин), циркон, рутил, монацит, ильменит, магнетит, гематит, титаномагнетит. Также среди привнесенного материала присутствуют петрокласты.

Содержание основных минералов в железомещающей толще Киреевского проявления варьирует в следующих пределах: кварц 56...83 %, полево

шпат 13...32 %, сидерит 5...14 %, хлорит (шамозит) 1,4...5,1 % и другие минералы (гётит, кальцит, доломит, каолинит, иллит, смектиты, брусит и др.) до 5 %.

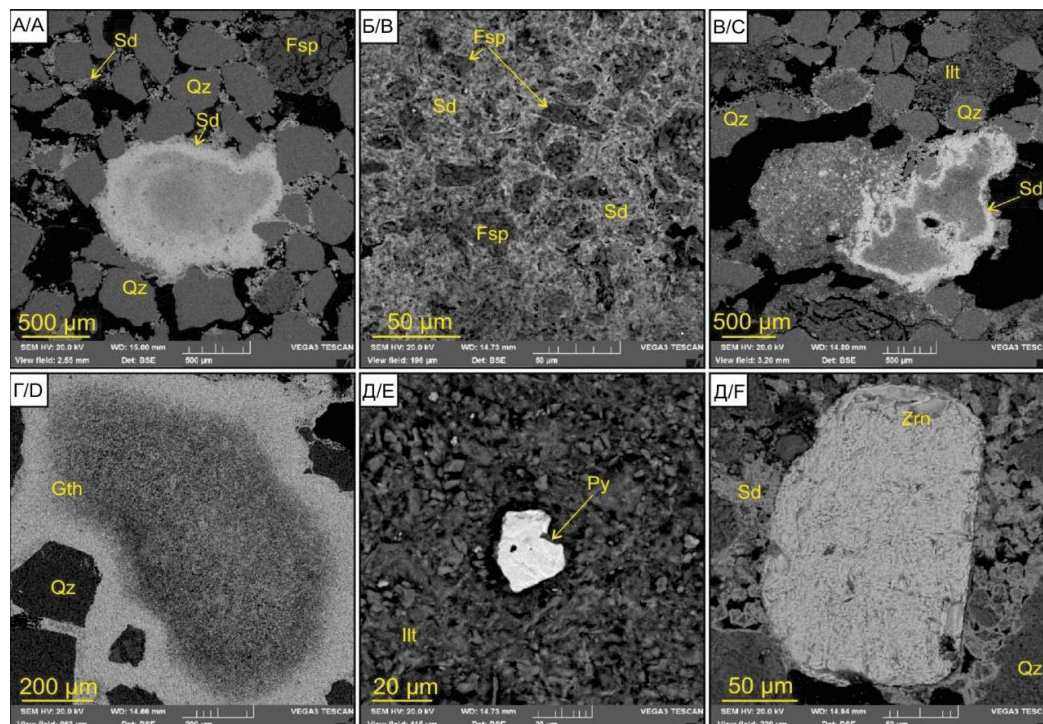


Рис. 3. СЭМ-снимки минералов в железяках кочковской свиты Киреевского проявления: А) сидерит в виде микроконкреций или цемента; Б) сидеритовый цемент железяков; В) пленочные формы сидерита в гравелите; Г) микроконкреции гётита; Д) пирит в иллитовом матриксе; Е) крупный акцессорий циркона среди сидеритового цемента железяка. Gth – гетит, Ill – иллит, Py – пирит, Qz – кварц, Sd – сидерит, Zrn – циркон

Fig. 3. SEM-images of minerals of ironstones within the Kochkov Formation of the Kireevsk occurrence: A) microconcretion of siderite; B) siderite cement of ironstone; C) film forms of siderite in gritstone; D) microconcretions of goethite; E) pyrite in the clay matrix; F) large zircon within siderite cement of ironstone. Gth – goethite, Ill – illite, Py – pyrite, Qz – quartz, Sd – siderite, Zrn – zircon

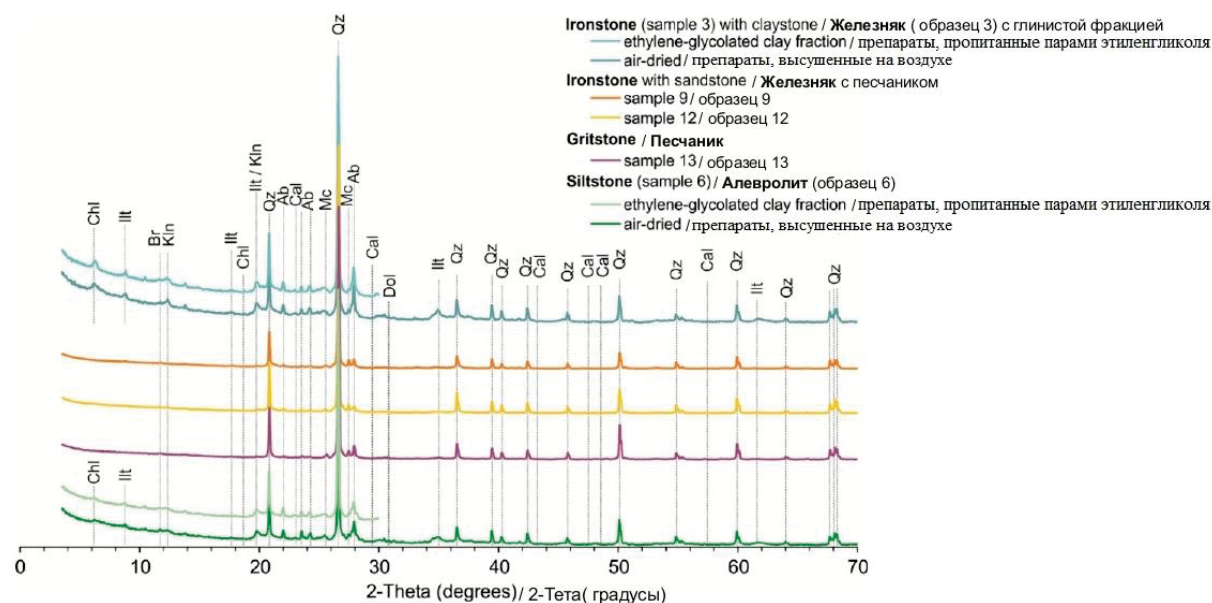


Рис. 4. Рентгеновские дифрактограммы репрезентативных образцов железяков, вмещающих пород и их глинистых фракций. Ab – альбит, Br – брусит, Cal – кальцит, Chl – хлорит, Dol – доломит, Ill – иллит, Kln – каолинит, Mc – микроклин, Qz – кварц

Fig. 4. XRD patterns of representative samples of the ironstones, host-rocks and their clay fractions. Ab – albite, Br – brushite, Cal – calcite, Chl – chlorite, Dol – dolomite, Ill – illite, Kln – kaolinite, Mc – microcline, Qz – quartz

Хлориты характеризуются базальными рефлексами при 12 и 6 Å (рис. 4). Базальный рефлекс (001) смещается с 12 до 14,2 Å при анализе в высушенном и пропитанном парами этиленгликоля препаратах, соответственно, что идентифицирует эту фазу как хлорит (шамозит). Кварц отличается рефлексами 4,3; 3,4; 2,5; 2,3; 1,8; 1,5; 1,4 Å. Брушит характеризуется рефлексом (100) при 7,5 Å.

Железосодержащие породы Киреевского проявления отличаются обильным присутствием карбонат-гидрооксидной ассоциации *in situ* минералов, которая слагает как цемент, так и отдельные агрегированные образования (рис. 3, А, В, Г).

Сидерит обнаруживается в виде отдельных микроконкреций и цемента в песчаниках и железняках со средними размерами 10...50 мкм в длину (рис. 3, А, В) либо в виде кристаллического цемента (рис. 3, Б, Е). В микроконкрециях сидерита (рис. 3, А–В) отмечается концентрическая зональность, выраженная изменением фазового состава. Средний химический состав сидерита следующий: 57,7...83,2 мол. % FeCO_3 , до 1,8 мол. % MnCO_3 , до 2 мол. % MgCO_3 , 0,6...1,5 мол. % CaCO_3 .

Глинистые минералы представлены железистым хлоритом (шамозитом) и иллитом (рис. 3, В, Д). Хлорит (шамозит) образует основную массу в виде параллельно ориентированных коротко-чешуйчатых микроагрегатов в железосодержащих и терригенных породах.

Реже среди железистых минералов наблюдается гётит (или гидрогётит) в виде стяжений (рис. 3, Г) с существенно меньшим распространением относительно сидерита. Средний состав гётита Киреевского проявления следующий: $\text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{total})}$ 70,1...95,9 %, SiO_2 3,9...15,8 %, Al_2O_3 0,7...10,2 %, MnO 0,4...2,8 %, P_2O_5 0,4...0,9 %, CaO 0,3...0,7 %. Гётит (рис. 3, Г) образует отдельные зёрна и их скопления в среднем размером около 50 мкм (до 600 мкм). Другой разновидностью железистых гидроокислов является аморфный или скрытокристаллический цементирующий материал железняков или алевропесчаников – гизингерит и лепидокрокит.

Агрегаты кристаллов барита размером от 25 до 50 мкм и более представлены глобулярными включениями в железняках. Среди примеси в составе барита отмечается натрий (Na). Редко встречается детритовый пирит в матриксе алевропесчаников (рис. 3, Д). Пирит характеризуется субизометричными агрегатами размером до 27 мкм с обломочными формами. Кристаллы пирита преимущественно кубического габитуса. Также имеются зёрна циркона (рис. 3, Е) относительно крупных размеров до 500 мкм в длину.

Геохимия

Железосодержащие породы имеют долю валового оксида железа ($\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}}$) от 9,7 до 15,9 % (табл. 1). Валовый химический состав алевропесчаников характеризуется долей $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}}$ ниже 4,8 %, при SiO_2 51,0...69,0 %, Al_2O_3 11,0...14,0 %. Гравелиты в нижней части залежей отличаются повышенной долей CaO до 15,0 %.

Три группы микроэлементов можно выделить среди редких металлов (рис. 6, табл. 2) в железняках и вмещающей толще на основе их распределения относительно среднего содержания в земной коре [23, 24]. Первая группа металлов с повышенными содержаниями Zn, As, Ag, Cd, Sb. Вторая группа металлов (Cr, Ni, Cu, Zr, Sn, Cs, Hf, W, Tl, Pb, Th) характеризуется низкими содержаниями. Третья группа элементов (Co, Mo, Ba, Ta, W, Bi, U) имеет содержания близкие к кларкам и характеризуется высоким разбросом значений (кроме Ba).

Суммарное содержание P3Э+Y (REY) изменяется от 39,5 до 210,4 ppm (табл. 3). При этом в P3Э преобладает группа легких $\text{P3Э (LREE, 32,3–167,5 ppm)}$ над группой тяжелых $\text{P3Э (HREE, 2,4–14,2 ppm)}$, что отражается в изменении показателя LREE/HREE на уровне 10,7–13,8. Цериевая аномалия (Ce^*) выдержана пределах от 3,2 до 4,5 и характеризуется высокой флуктуацией на уровне средних значений 1,0–1,1. В целом в изучаемом разрезе отмечается слабая положительная европиевая аномалия (Eu^*) с диапазоном 0,2–0,3.

Таблица 1. Основные оксиды изучаемых пород (%)

Table 1. Basic oxides of the studied rocks (%)

№	Образец/Rock	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	K_2O	CaO	TiO_2	MnO	$\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{т}}$	LOI
001	Алеврит/Siltstone	0,9	1,0	16,0	54,6	0,09	1,9	0,7	1,1	0,2	15,9	7,4
002	Алеврит/Siltstone	1,4	1,2	16,0	60,6	0,09	1,8	0,9	1,1	0,2	7,4	9,4
003	Алеврит/Siltstone	1,2	1,1	16,1	59,9	0,09	1,9	0,9	1,2	0,1	9,7	7,8
004	Песчаник/Sandstone	1,0	0,3	11,2	67,8	0,09	1,4	0,6	0,7	0,1	9,8	7,1
005	Алеврит/Siltstone	1,2	1,0	16,0	68,3	0,09	1,6	0,8	1,0	0,1	3,7	6,2
006	Песчаник/Sandstone	1,6	0,1	8,9	78,4	0,09	1,7	0,3	0,3	0,0	1,8	6,9
007	Алеврит/Siltstone	1,5	0,1	10,0	77,3	0,09	1,6	0,4	0,4	0,0	2,5	6,1
008	Песчаник/Sandstone	1,2	0,0	6,5	78,5	0,09	1,3	0,3	0,3	0,1	1,8	9,9
009	Железняк/Ironstone	1,0	0,0	6,1	71	0,09	1,4	0,3	0,3	0,4	10,4	9
010	Железняк/Ironstone	0,8	0,0	7,0	71,9	0,09	1,2	0,2	0,3	0,2	10,4	7,8
011	Песчаник/Sandstone	1,0	0,0	5,8	80,2	0,09	1,2	0,2	0,2	0,0	1,5	9,8
012	Железняк/Ironstone	1,1	0,2	11,3	72,2	0,09	1,4	0,4	0,4	0,1	5,2	7,6
013	Песчаник/Sandstone	1,2	0,1	8,0	76,8	0,09	1,5	0,4	0,3	0,5	6,6	4,5
014	Железняк/Ironstone	1,2	0,0	6,9	74,8	0,09	1,7	0,4	0,3	0,2	5,1	9,4
015	Песчаник/Sandstone	1,5	0,0	8,0	79,3	0,09	1,6	0,3	0,3	0,0	1,8	7,1
016	Песчаник/Sandstone	1,8	0,1	9,7	77,2	0,09	1,8	0,4	0,3	0,0	2,3	6,3

Таблица 2. Микроэлементы изучаемых пород (ppm)

Table 2. Trace elements of the studied rocks (ppm)

№	Образец/Rock	Co	Ni	Cu	Zn	Sr	Zr	Mo	Ag	Ba	Pb	Bi	Th	U
001	Алеврит/Siltstone	33,4	42	42,4	118	124,1	175	3,3	0,2	447,2	23	0,28	8,7	8,6
003	Алеврит/Siltstone	32,7	12,6	39,2	95,4	166,7	142	2,2	0,2	462,6	19,4	0,17	7,5	5,6
004	Песчаник/Sandstone	29,2	1,3	13,2	38,1	126,5	89,6	3,7	0,1	360,7	11,7	0,05	3,6	3,9
005	Алеврит/Siltstone	19,9	8,8	25,6	58,3	156,3	134,3	0,9	0,3	464,4	14,1	0,15	6,4	3,4
008	Песчаник/Sandstone	3,3	1,2	3,9	10,7	114,3	33,9	0,9	0,2	408,2	6,9	0,03	1,6	0,7
009	Железняк/Ironstone	19,3	0,0	7,2	18	101,2	33,2	1,4	0,1	395,1	6,1	0,04	1,7	1,4
011	Песчаник/Sandstone	3,1	0,0	3,1	40,5	88	26,8	0,6	0,2	322,8	3,9	0,03	1,2	0,6
012	Железняк/Ironstone	18,5	2,9	13,4	26,2	96	56,3	1	0,2	357,6	11,5	0,06	2,9	1,7
014	Железняк/Ironstone	9,2	0,0	5	20,8	136,4	37,1	1,1	0,2	464,5	5,9	0,0	1,8	2,3
016	Песчаник/Sandstone	4,8	0,0	5,7	20,1	161,8	48	0,2	0,1	556,8	7,6	0,0	1,9	1,3

Таблица 3. Редкоземельные элементы и иттрий в изучаемых породах (ppm)

Table 3. Rare earth elements and yttrium in the studied rocks (ppm)

№	Образец/Rock	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	REE	Ce*	Eu*
001	Алеврит/Siltstone	33,6	78,4	8,4	32,6	6,3	1,6	6,6	0,9	5,4	1	3,1	0,5	2,8	0,4	28,7	210,4	3,7	0,2
003	Алеврит/Siltstone	28,8	79,9	6,9	28,2	5,5	1,5	6,2	0,8	4,9	0,9	2,8	0,4	2,4	0,4	20,2	189,8	4,5	0,2
004	Песчаник/Sandstone	14,7	35,1	3,5	14,8	2,9	0,9	3	0,4	2,3	0,5	1,3	0,2	1,3	0,2	12,9	94,0	3,8	0,3
005	Алеврит/Siltstone	23,1	49,9	5,5	22,3	4,5	1	3,8	0,6	2,9	0,6	1,8	0,2	1,7	0,3	14,1	132,2	3,5	0,2
008	Песчаник/Sandstone	9,8	19,9	2,3	8,8	1,6	0,5	1,6	0,2	1,3	0,3	0,6	0,1	0,6	0,1	7,7	55,3	3,3	0,3
009	Железняк/Ironstone	11,2	24,7	2,6	10,4	2,4	0,6	2,4	0,4	1,8	0,4	1,1	0,2	1	0,1	10,1	69,5	3,6	0,2
011	Песчаник/Sandstone	7	14,8	1,5	6,3	1,2	0,3	1,2	0,1	0,9	0,2	0,5	0,1	0,5	0,1	4,8	39,5	3,5	0,2
012	Железняк/Ironstone	15,8	37	4,1	16,2	3,2	0,8	3,2	0,4	2,6	0,4	1,3	0,2	1,2	0,2	12,3	98,8	3,7	0,2
014	Железняк/Ironstone	10,6	22,1	2,3	9,4	2	0,5	2	0,2	1,4	0,4	0,9	0,1	0,7	0,1	7,6	60,4	3,4	0,2
016	Песчаник/Sandstone	11,7	23,1	2,6	9,9	2,1	0,5	2,1	0,3	1,5	0,3	0,8	0,1	0,8	0,1	10	65,9	3,2	0,2

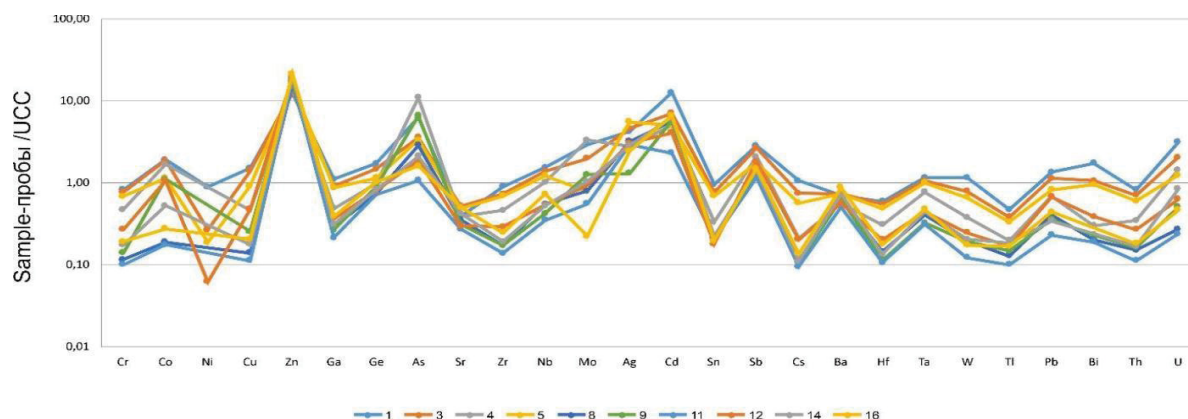


Рис. 5. Спайдер-диаграмма, показывающая диапазон концентраций микроэлементов в железняках и вмещающих породах, нормированные на средние содержания в земной коре [24, 25]

Fig. 5. Upper Continental Crust (UCC)-normalized [24, 25] spider diagrams showing the range of concentrations of trace elements in ironstones and wall rocks

Слои железняков и песчаников совпадают с увеличением индексов биопродуктивности (P EF, Cu EF) в изучаемом разрезе. Значения P EF и Cu EF в двух пробах превышают порог обогащения выше 1 в интервалах накопления железняков с песчаником (рис. 6).

Показатель терригенного привноса Ti EF и Si EF имеют максимальные значения 1,8 и 3,2 (рис. 6), соответственно, в алевритопесчаниках с сидеритовыми конкрециями и песчаниках. Фактор обогащения Mn повышается в железняках до значений 10,6. Фактор обогащения железа имеет синхронное поведение с Mn EF. Fe EF изменяется в железосодержащих породах в пределах 2,7...4,7 (рис. 6).

Прокси палеосолённости Sr/Ba и Ca/(Ca+Fe) имеют два схожих интервала увеличения их значения (рис. 6), которые соответствуют алевритам и сидеритизированным конкрециям в алевритопесчаниках, где

Sr/Ba достигает максимального значения 0,4. Данные тенденции схожи с изменением прокси палеоклимата (Sr/Cu). CIA увеличивается в серых алевритах с глинистыми стяжениями в кровле изучаемого разреза до 81,8 (рис. 6).

Редокс-чувствительные прокси (Mo EF, U EF) имеют разброс значений в пределах 0,4...2,5 (рис. 6). Для железосодержащих пород значения прокси Mo EF и U EF 1,3...4,6, соответственно, выше чем для песчаников и алевритопесчаников, что указывает на субокисные условия осадконакопления (дефицит кислорода в системе осадконакопления). Mo EF выше 1 отмечается во всех литотипах кроме песчаников с сидеритовыми конкрециями и алевритопесчаников. U EF ниже 1 отмечается лишь в двух образцах, в интервале разреза 0,9...2,2 м в слабосцементированных желтовато-серых песчаниках и среднезернистых, слабосцементированных железняках.

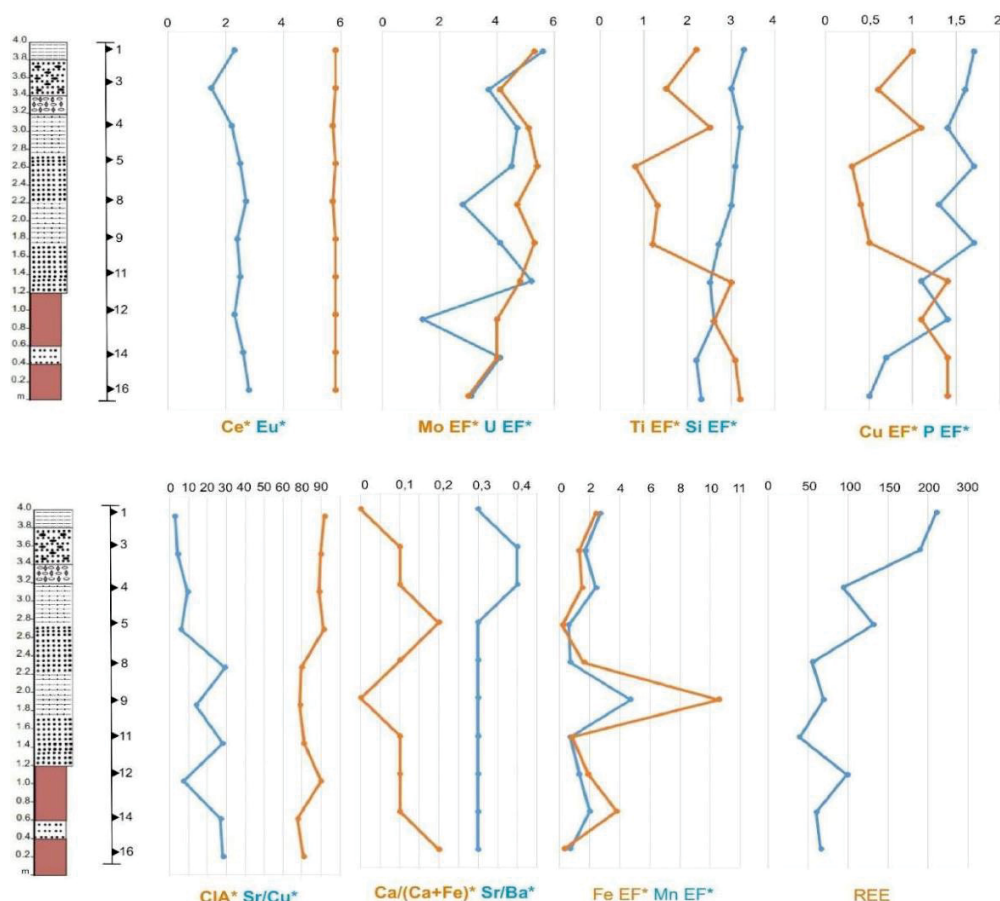


Рис. 6. Литостратиграфическая колонка, показывающая распределение геохимических кривых Ce^* , Eu^* , индексов обогащения (EF) и других геохимических показателей (CIA, Sr/Cu , $Ca/(Ca+Fe)$, Sr/Ba)

Fig. 6. Lithocolumn showing distribution of geochemical profiles of REE, Ce^* and Eu^* , elemental enrichment factors (EFs) and geochemical proxies of CIA, Sr/Cu , $Ca/(Ca+Fe)$, Sr/Ba

Обсуждения

Часто встречающиеся минералы в виде агрегатов и стяжений в цементе континентальных железяков Киреевского проявления отличаются преобладанием филлосиликатных или карбонатных фаз в минеральном составе. Сидерит и шамозит указывают на субоксидную обстановку минералообразования в условиях аллювиальной равнины. Концентрирование основных металлов среды, включая железо, могло происходить за счет создаваемых стабильных субоксидных условий в донной среде бассейна седиментации в результате *in situ* продуцирования углекислоты [23]. Последнее зависело от активности бактериального разложения детритовой органики, регулярно приносимой речным водотоками [23] в пределах Киреевского проявления. Данный факт указывает на накопление алевропесчаников с железяками в донных условиях заболачиваемых озёр. Индикаторами мезотрофного и эвтрофного режима в донной части палеоозёра являются слои с карбонатами. Карбонатная ассоциация характеризуется преобладанием сидерита, что соответствует условиям железистых озёр [6], в связи с чем справедливо рассматривать условия накопления богатых железом слоёв в пределах кочковской свиты как заболачиваемые палеоозёра. Наличие примеси Mg в карбонатах железяков в кочковской свите говорит о благоприятных

условиях для трансформации карбонатов [23]. В озёрно-болотных условиях, возможно, происходила модификация части сидерита в гётит при активном участии гуминовых кислот с локальным образованием брусита [24, 25], который постоянно присутствует в составе железистых пород (рис. 3).

Минералогические и геохимические особенности железовмещающей толщи позволяют предположить, что переносимое рекой мобильное железо концентрировалось в застойных водах старичных озёр и болот в области палеоречной системы, совпадающей с современной долиной р. Обь. Вследствие разложения органического вещества продуцировались углекислотные анионы, которые способствовали осаждению карбонатов. В результате обмеления водоёмов происходила последующая диагенетическая трансформация новообразованных минералов, что способствовало накоплению железистых филлосиликатов и/или гётита.

На примере разрезов континентальных отложений Обь-Тымской низменности можно изучить поведение геохимического цикла железа осадков речного, делювиального, пролювиального и других генетических типов относительно морской седиментации железяков, которая была широко распространена в течение мелового и палеогенового времени [4, 6, 23, 25–28]. Их накопление на огромной равнине не могло быть

повсеместным, как в морских эпиконтинентальных бассейнах, покрывавших территорию в эпохи морских трансгрессий [13, 29, 30, 31]. Как правило, локализованные в отдельные промежутки времени, периоды континентального осадконакопления были подвержены неоднократным изменениям в связи с тектоническими и климатическими изменениями.

Разложение органического вещества и генерация HCO_2^- в условиях палеоводоёмов отражается в увеличении индексов биопродуктивности (Cu EF и P EF), что интерпретируется как благоприятная физико-химическая среда для образования карбонатов как основных аутигенных минералов. Изменение прокси терригенного привноса (Ti EF , Si EF) для отложений, предшествующих слоям алевропесчаников с сидеритовыми конкрециями и песчаниками, указывает на периоды подтопления территорий и последующего развития болотно-озерной среды. Палеосолёность среды (Sr/Ba and $\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Fe})$) осадконакопления была выдержана, как и значения прокси палеоклимата (Sr/Cu) и выветривания (CIA). Алевропесчаники в кровле кочковской свиты накапливались в условиях гумидизации и слабого выветривания, что отражается в изменениях Sr/Cu и CIA , соответственно. В результате эта обстановка способствовала осаждению органики. Увеличение факторов обогащения Fe и Mn можно связать с иммобилизацией этих металлов в биогеохимическом цикле речной системы как следствие минералообразования.

Наиболее родственные по условиям образования меловые континентальные железняки Чулымо-Енисейской впадины [25] отличаются пониженными содержаниями Ba по отношению к континентальным железнякам кочковской свиты.

Заключение

Проведенные исследования позволили получить следующие основные выводы.

Основными аутигенными минералами изученных залежей являются: карбонаты (сидерит и кальцит), хлориты (шамозит), филосиликаты (иллит, смектиты). Алевропесчаники в кровле кочковской свиты накапливались в условиях гумидизации и слабого выветривания, что отражается в изменении Sr/Cu и CIA , соответственно. Эта обстановка способствовала осаждению органики.

Предполагается, что переносимое рекой мобильное железо первично концентрировалось в застойных водах старичных озёр и болот палеоречной системы. Вследствие разложения органического вещества происходило продуцирование углекислоты и формирование карбонатов. В результате их последующей диагенетической трансформации часть железа проникала в слабо восстановительные и окислительные условия от пойменно-озерных до прибрежно-руслowych фаций, что способствовало накоплению железистых филосиликатов и/или гётита.

Работа выполнена при поддержке Российского научно-го фонда в рамках гранта № 20-77-00007.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Taylor S.R., McLennan S.M. The continental crust: its composition and evolution. An examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks. – Oxford: Blackwell, 1985. – 674 p.
2. Van Houten F.B. Review of cenozoic ooidal ironstones // *Sedimentary Geology*. – 1992. – V. 78. – P. 101–110.
3. Xing B., Graham N., Yu W. Transformation of siderite to goethite by humic acid in the natural environment // *Communications Chemistry*. – 2020. – V. 3. – P. 1–11.
4. Архипов С.А., Мартынов В.А. Кочковский горизонт Западной Сибири и его возрастные аналоги в смежных районах. – Новосибирск: Изд-во Наука, 1980. – 452 с.
5. Bekker A., Kovalick A. Ironstones, iron formations and iron ore // *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. – 2020. – V. 2. – P. 1–8.
6. Сурков В.С. Неогеновая эволюция молодой Урало-Сибирской платформы // *Геология и геофизика*. – 2002. – V. 43. – P. 754–761.
7. Microbially mediated iron ore formation, Silicic Superunit, Rudabánya, Hungary / S. Bodor, M. Polgári, I. Szentpétery, J. Földessy // *Ore Geology Reviews*. – 2016. – V. 72. – P. 391–401.
8. Роль сдвиговых разломов в позднелазовской-раннемезозойской тектонике и геодинамике Алтае-Саянской и Восточно-Казахстанской складчатой зоны / М.М. Буслов, Т. Ватанабе, Л.В. Смирнова, И. Фудживара, К. Ивата, И. де Граве, Н.Н. Семаков, А.В. Травин, А.П. Кирьянова, Д.А. Кох // *Геология и геофизика*. – 2003. – V. 44. – P. 49–75.
9. Geochemical and mineralogical features of the substrates of the Vasyugan Mire, Western Siberia, Russia / M. Rudmin, M.J. Wilson, L. Wilson, O. Savichev, T. Yakich, M. Shalbybin, A. Ruban, R. Tabakaev, K. Ibraeva, A. Mazurov // *CATENA*. – 2020. – V. 194. – P. 1–12.
10. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust // *Treatise on Geochemistry*. – 2014. – V. 3. – P. 1–51.
11. Quantitative mineralogy from infrared spectroscopic data. II. Three-dimensional mineralogical characterization of the Rocklea channel iron deposit, Western Australia / M. Haest, T. Cudahy, C. Laukamp, S. Gregory // *Economic Geology*. – 2012. – V. 107. – P. 229–249.
12. Quantitative mineralogy from infrared spectroscopic data. I. Validation of mineral abundance and composition scripts at the Rocklea channel iron deposit in Western Australia. / M. Haest, T. Cudahy, C. Laukamp, S. Gregory // *Economic Geology*. – 2012. – V. 107. – P. 209–228.
13. Западно-Сибирский железорудный бассейн / Н.Х. Белоус, И.В. Николаева, Ю.В. Казанский, А.П. Бердников, В.М. Кляровских, В.П. Кузнецов, А.А. Бабин. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1964. – 230 с.
14. Ramanaidou E.R., Morris R.C., Horwid R.C. Channel iron deposits of the Hamersley Province, Western Australia // *Australian Journal of Earth Sciences*. – 2003. – V. 50. – P. 669–690.
15. Simonson B.M., Schubel K.A., Hassler S.W. Carbonate sedimentology of the early Precambrian Hamersley Group of Western Australia // *Precambrian Research*. – 1993. – V. 60. – P. 287–335.
16. Chemostratigraphy and sedimentary facies analysis of the Permian Lucaogou Formation in the Jimusaer Sag, Junggar Basin, NW China: implications for tight oil exploration / C. Liu, K. Liu, X. Wang, L. Wu, Y. Fan // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2019. – V. 178. – P. 96–111.
17. Paleoenvironmental conditions of Cretaceous ironstone deposit formation in Chulym-Yenisey basin (Western Siberia) / M. Rudmin, S. Banerjee, A. Dauletova, A. Ruban // *Minerals*. – 2021. – V. 11. – P. 1–21.
18. Страхов Н.М. Железорудные фации и их аналоги в истории Земли (опыт историко-геологического анализа процесса осадконакопления). – М.: Изд-во АН СССР, 1947. – 267 с.
19. Сравнительный анализ разрезов и биоты морского палеогена Западной Сибири и Арктики / М.А. Ахметиев, Н.И. Запорожец, А.И. Яковлева, Г.Н. Александрова, В.Н. Беньямовский, Т.В. Орешкина, З.Н. Гнибиденко, Ж.А. Доля // *Стратиграфия. Геологическая корреляция*. – 2010. – V. 18. – P. 635–659.
20. Oscillating redox conditions in the Vocontian Basin (SE France) during Oceanic Anoxic Event 2 (OAE 2) / J. Danzelle, L. Riquier,

- F. Baudin, C. Thomazo, E. Pucéat // *Chemical Geology*. – 2018. – V. 493. – P. 136–152.
21. Николаева И.В. Бакcharское месторождение оолитовых железных руд. – Новосибирск: Изд-во «Наука», 1967. – 134 с.
22. Водясов Е.В., Асочакова Е.М. В поисках железных рудников: георхеологический взгляд // *Сибирские исторические исследования*. – 2020. – V. 170. – P. 188–231.
23. Authigenic and detrital minerals in peat environment of Vasyugan Swamp, Western Siberia / M. Rudmin, A. Ruban, O. Savichev, A. Mazurov, A. Dauletova, O. Savinova // *Minerals*. – 2018. – V. 8. – P. 1–13.
24. Brucite-aragonite precipitates as weathering products of historic non-MgO-based geomaterials / J. Martínez-Martínez, D. Benavente, N. Fusi, J.C. Cañaveras // *Minerals*. – 2020. – V. 10. – P. 599–629.
25. Poulton S.W., Canfield D.E. Development of a sequential extraction procedure for iron: Implications for iron partitioning in continentally derived particulates // *Chemical Geology*. – 2005. – V. 8. – P. 214.
26. Van Houten F.B., Bhattacharyya D.P. Phanerozoic oolitic ironstones – geologic record and facies model // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. – 1982. – V. 10. – P. 441–457.
27. Poulton S.W., Canfield D.E. Development of a sequential extraction procedure for iron: Implications for iron partitioning in continentally derived particulates // *Chemical Geology*. – 2005. – V. 214. – P. 209–221.
28. Raiswell R., Canfield D.E. The iron biogeochemical cycle past and present // *Geochemical Perspectives*. – 2012. – V. 1. – P. 220–232.
29. Rudmin M., Mazurov A., Banerjee S. Origin of ooidal ironstones in relation to warming events: Cretaceous-Eocene Bakchar deposit, south-east Western Siberia // *Marine and Petroleum Geology*. – 2019. – V. 100. – P. 309–325.
30. Ooidal ironstones in the Meso-Cenozoic sequences in western Siberia: assessment of formation processes and relationship with regional and global earth processes / M. Rudmin, S. Banerjee, E. Abdullayev, A. Ruban, E. Filimonenko, E. Lyapina, R. Kashapov, A. Mazurov // *Journal of Palaeogeography*. – 2020. – V. 9. – P. 1–21.
31. Cretaceous paleogeography of the West Siberian sedimentary basin / A.E. Kontorovich, S.V. Ershov, V.A. Kazanekov, Y.N. Karogodin, V.A. Kontorovich, N.K. Lebedeva, B.L. Nikitenko, N.I. Popova, B.N. Shurygin // *Russian Geology and Geophysics*. – 2014. – V. 55. – P. 582–609.

Поступила 15.05.2022 г.

Информация об авторах

Даулетова А.Б., аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Рудмин М.А., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 552.26:552.142:553.21

CONTINENTAL IRONSTONES OF THE KIREEVSK OCCURRENCE (OB-TYM DEPRESSION): MINERAL FORMATION AND GEOCHEMISTRY

Aigerim B. Dauletova¹,
abd7@tpu.ru

Maxim A. Rudmin¹,
rudminma@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the work consists in absence of a multifactor model of a change of geochemical iron cycle in the continental environment led to accumulation of iron-bearing sediments. The scientific issue covers questions about formation conditions of iron precipitation in Pliocene continental deposits of Ob-Tym depression.

The main aim of this work is to reveal mineralogical and geochemical features of ironstone sedimentation on the example of Pliocene Kireevsk occurrence to assess metal sources, the mechanisms of their migration and mineral formation.

Methods include field observation, petrographic analysis, X-ray diffraction analysis (XRD), scanning electron microscopy (SEM), X-ray fluorescence analysis (XRF) and inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS).

Results. Siderite and chamosite are predominate in situ minerals of channel ironstone deposit. They indicate to suboxic conditions of mineral formation in the alluvial plain. The major metals precipitation, including iron, could occur in the stable suboxic conditions in the bottom environment due to a carbon dioxide production. This depends on a microbial decomposition of detrital organic matter regularly inputted by river watercourses. This factor indicates the aleurosand accumulation with ironstone in waterlogged lakes conditions. The studied continental ironstone occurrence belongs to the interfluvial of the Ob and Tom rivers, which is located in the eastern part of the West Siberian Plate. The Ob-Tym lowland completely inherits the Mesozoic-Cenozoic negative structure – the Ust-Tym uplift. The ironstones are localized in the sedimentary sequence of the Kireevsk ore deposit. Iron-bearing layers occur at the top of the Kochkov Formation, which is composed of Neogene and Pleistocene sediments.

Key words:

Ironstones, channel deposits, authigenic minerals, mineral formation, geochemistry, Western Siberia.

The research was supported by the Russian Science foundation within the grant no. 20-77-00007.

REFERENCES

1. Taylor S.R., McLennan S.M. *The continental crust: its composition and evolution. An examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks*. Oxford, Blackwell, 1985. 674 p.
2. Van Houten F.B. Review of cenozoic ooidal ironstones. *Sedimentary Geology*, 1992, vol. 78, pp. 101–110.
3. Xing B., Graham N., Yu W. Transformation of siderite to goethite by humic acid in the natural environment. *Communications Chemistry*, 2020, vol. 3, pp. 1–11.
4. Arhipov S. A., Martynov V. A. *Kochkovsky gorizont Zapadnoy Sibirii i ego vozrastnye analogi v smezhnykh rayonakh* [Kochkov horizon of Western Siberia and its age analogues in adjacent areas]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1980. 452 p.
5. Bekker A., Kovalick A. Ironstones, iron formations, and iron ore. *In Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, 2020, vol. 2, pp. 1–8.
6. Surkov V.S. Neogenovaya evolutsiya molodoy Uralo-Sibirskoy platformy [Neogene evolution of the young Ural-Siberian platform]. *Geologiya i Geofizika*, 2002, no. 43, pp. 754–761.
7. Bodor S., Polgári M., Szentpétery I., Földessy J. Microbially mediated iron ore formation, Silicic Superunit, Rudabánya, Hungary. *Ore Geology Reviews*, 2016, vol. 72, pp. 391–401.
8. Buslov M.M., Watanabe T., Smirnova L.V., Fujiwara I., Iwata K., De Grave I., Semakov N.N., Travin A.V., Kiryanova A.P., Kokh D.A. Rol sdvigovykh razlomov v pozdnepalaeozoysko-rannemезozoyskoy tektonike i geodinamike Altae-Sayanskoy i Vostochno-Kazakhstanskoy skladchatoy zony [Role of strike-slip faults in Late Paleozoic-Early Mesozoic tectonics and geodynamics of the Altai-Sayan and East Kazakhstan folded zone]. *Geologiyai Geofizika*, 2003, no. 44, pp. 49–75.
9. Rudmin M., Wilson M.J., Wilson L., Savichev O., Yakich T., Shal'dybin M., Ruban A., Tabakaev R., Ibraeva K., Mazurov A. Geochemical and mineralogical features of the substrates of the Vasyugan Mire, Western Siberia, Russia. *CATENA*, 2020, vol. 194, pp. 1–12.
10. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust. *In Treatise on Geochemistry*, 2014, vol. 3, pp. 1–51.
11. Haest M., Cudahy T., Laukamp C., Gregory S. Quantitative mineralogy from infrared spectroscopic data. II. Three-dimensional mineralogical characterization of the rocklea channel iron deposit, Western Australia. *Economic Geology*, 2012, vol. 107, pp. 229–249.
12. Haest M., Cudahy T., Laukamp C., Gregory S. Quantitative mineralogy from infrared spectroscopic data. I. Validation of mineral abundance and composition scripts at the rocklea channel iron deposit in Western Australia. *Economic Geology*, 2012, vol. 107, pp. 209–228.
13. Belous N.C., Nikolaeva I.V., Kazansky Yu.P., Berdnikov A.P., Klyarovskiy V.M., Kuznetsov V.P., Babin A.A. *Zapadno-Sibirskiy zhelezorudny basseyin* [The Western-Siberian iron ore basin]. Novosibirsk, Siberian Branch of the Academy of Sciences of the USSR Publ., 1964. 230 p.
14. Ramanaidou E.R., Morris R.C., Horwid R.C. Channel iron deposits of the Hamersley Province, Western Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2003, vol. 50, pp. 669–690.
15. Simonson B.M., Schubel K.A., Hassler S.W. Carbonate sedimentology of the early Precambrian Hamersley Group of Western Australia. *Precambrian Research*, 1993, vol. 60, pp. 287–335.
16. Liu C., Liu K., Wang X., Wu L., Fan Y. Chemostratigraphy and sedimentary facies analysis of the Permian Lucaogou Formation in the Jimusaer Sag, Junggar Basin, NW China: Implications for tight oil exploration. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, vol. 178, pp. 96–111.
17. Rudmin M., Banerjee S., Dauletova A., Ruban A. Paleoenvironmental conditions of Cretaceous ironstone deposit formation in Chulym-Yenisey basin (Western Siberia). *Minerals*, 2021, vol. 11, pp. 1–21.

18. Strakhov N.M. Zhelezorudnye fatsii i ikh analogi v istorii Zemli (opyt istoriko-geologicheskogo analiza protsesssa osadkonakopleniya) [Iron ore facies and their analogues in the Earth's history: experience of historical-geographical analysis of sedimentary processes]. *Trud IGN AN SSSR. Geol. Ser. publ.*, 1947, vol. 22, pp. 261–267.
19. Akhmetev M.A., Zaporozhets N.I., Iakovleva A.I., Aleksandrova G.N., Beniamovsky V.N., Oreshkina T. V., Gnibidenko Z.N., Dolya Z.A. Sravnitelny analiz razrezov i bioty morskogo paleogena Zapadnoy Sibiri i Arktiki [Comparative analysis of marine paleogene sections and biota from West Siberia and the Arctic Region]. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2010, vol. 18, pp. 635–659.
20. Danzelle J., Riquier L., Baudin F., Thomazo C., Pucéat E. Oscillating redox conditions in the Vocontian Basin (SE France) during Oceanic Anoxic Event 2 (OAE 2). *Chemical Geology*, 2018, vol. 493, pp. 136–152.
21. Nikolaeva I.V. *Bakcharskoe mastorozhdenie oolitovykh zheleznykh rud* [Bakchar oolitic iron ore deposit]. Novosibirsk, Siberian Branch of the Academy of Sciences of the USSR Publ., 1967. 134 p.
22. Vodyasov E.V., Asochakova E.M. V poiskakh zheleznykh rudnikov: geoarkheologicheskii vzglyad [In search of iron ore mines: a geo-archaeological perspective]. *Sibirskie istoricheskie issledovaniya*, 2020, vol. 170, pp. 188–231.
23. Rudmin M., Ruban A., Savichev O., Mazurov A., Dauletova A., Savinova O. Authigenic and Detrital Minerals in Peat Environment of Vasyugan Swamp, Western Siberia. *Minerals*, 2018, vol. 8, pp. 1–13.
24. Martínez-Martínez J., Benavente D., Fusi N., Cañaveras J.C. Brucite-Aragonite Precipitates as Weathering Products of Historic Non-MgO-Based Geomaterials. *Minerals*, 2020, vol. 10, pp. 599–629.
25. Poulton S.W., Canfield D.E. Development of a sequential extraction procedure for iron: Implications for iron partitioning in continentally derived particulates. *Chemical Geology*, 2005, vol. 8, pp. 214.
26. Van Houten F.B., Bhattacharyya D.P. Phanerozoic oolitic ironstones – geologic record and facies model. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1982, vol. 10, pp. 441–457.
27. Poulton S.W., Canfield D.E. Development of a sequential extraction procedure for iron: Implications for iron partitioning in continentally derived particulates. *Chemical Geology*, 2005, vol. 214, pp. 209–221.
28. Raiswell R., Canfield D.E. The iron biogeochemical cycle past and present. *Geochemical Perspectives*, 2012, vol. 1, pp. 220–232.
29. Rudmin M., Mazurov A., Banerjee S. Origin of ooidal ironstones in relation to warming events: Cretaceous-Eocene Bakchar deposit, south-east Western Siberia. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, vol. 100, pp. 309–325.
30. Rudmin M., Banerjee S., Abdullayev E., Ruban A., Filimonenko E., Lyapina E., Kashapov R., Mazurov A. Ooidal ironstones in the Meso-Cenozoic sequences in western Siberia: assessment of formation processes and relationship with regional and global earth processes. *Journal of Palaeogeography*, 2020, vol. 9, pp. 1–21.
31. Kontorovich A.E., Ershov S.V., Kazanekov V.A., Karogodin Y.N., Kontorovich V.A., Lebedeva N.K., Nikitenko B.L., Popova N.I., Shurygin B.N. Cretaceous paleogeography of the West Siberian sedimentary basin. *Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, pp. 582–609.

Received: 15 May 2022.

Information about the authors

Aigerim B. Dauletova, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

Maxim A. Rudmin, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.