

УДК 553.06, 553.2

МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ БАЗИЛЕВСКОГО МЕДНОГО РУДОПРОЯВЛЕНИЯ (ЮЖНОЕ ПРЕДУРАЛЬЕ)

Рахимов Ильдар Рашитович¹,
rigel92@mail.ru

Мичурин Сергей Васильевич¹,
s_michurin@mail.ru

Султанова Анна Геннадиевна¹,
anna_zakharova.ig@mail.ru

Киселёва Дарья Владимировна²,
kiseleva@igg.uran.ru

Карамова Алсу Мусаевна¹,
alsu.2013@bk.ru

¹ Институт геологии УФИЦ РАН,
Россия, 450077, г. Уфа, ул. К. Маркса, 16/2.

² Институт геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого Уральского Отделения РАН,
Россия, 620016, г. Екатеринбург, ул. Ак. Вонсовского, 15.

Актуальность исследования обусловлена обнаружением новых рудопроявлений меди и необходимостью выяснения условий их формирования в пермских отложениях Южного Предуралья на фоне слабой литологической и минералого-геохимической изученности последних. Генезис медистых песчаников Предуральского пояса всё ещё является предметом дискуссий. Возникновение Си-минерализации связывают как с син-, так и с эпигенетическими процессами, для последних предполагают инфильтрационный либо эксфильтрационный механизм миграции Си-растворов.

Цель: минералого-геохимическое исследование руд Базилевского медного рудопроявления и выяснение условий его формирования.

Методы исследования включают полевые геологические работы, оптическую и электронную микроскопию с рентгеноспектральным микроанализом, рентгеновскую дифрактометрию, рентгенофлуоресцентный, масс-спектрометрический и атомно-эмиссионный анализы с индуктивно связанной плазмой.

Результаты. Выполнена минералого-геохимическая характеристика руд Базилевского медного проявления Южного Предуралья, изучены условия образования вмещающих пород и рудных тел. Установлена их приуроченность к древесным фоссилитам с наследованием общей морфологии. Руды (0,2...18,8 мас. % Си, Ag до 150 г/т, Pb до 270 г/т) локализованы в сероцветных песчаных отложениях казанского яруса, представляющих собой аллювиальные отложения. Площадь рудопроявления составляет ≥ 1200 м², выявлено два рудоносных горизонта в разрезе. По внутреннему строению выделено три типа рудных тел. Главными рудными минералами являются гидрокарбонаты (азурит, малахит) и сульфиды Си (халькозин, борнит, халькопирит и др.). В целом минералого-геохимические особенности руд согласуются с полигенной гидротермально-осадочной моделью их образования при участии биогенных процессов. Источником рудных элементов служили нижележащие терригенные породы (в особенности красноцветные), а восходящая миграция минералообразующих растворов произошла по разрывным нарушениям.

Ключевые слова:

Южное Предуралье, казанский ярус, медистые песчаники, минерализованные деревья, минералогия, геохимия.

Введение

Формация медистых песчаников широко распространена в Предуралье, образуя 1500-км меденосный пояс от Пермского края на севере до Оренбургской области на юге. Оруденение приурочено к отложениям уфимского, казанского и уржумского ярусов пермской системы [1, 2]. На протяжении более 200 лет медистые песчаники Предуралья являлись одним из главных источников меди в Европе. В настоящее время в России медистые песчаники утратили своё значение, хотя в мире около 1/3 мировых запасов и добычи меди приходится именно на данный тип оруденения. Кроме Си, медистые песчаники являются концентраторами таких металлов, как Ag, Co, Zn, V, элементы платиновой группы и др. [2, 3].

В Южном Предуралье проявления медистых песчаников распространены в Башкортостане и Оренбург-

ской области, а наиболее богатой по суммарным запасам меди является Каргалинская группа месторождений, где небольшие по размерам рудные тела часто приурочены к растительным и животным остаткам [4, 5]. На территории Башкирии многочисленные мелкие месторождения и рудопроявления медистых песчаников (известно около 770 рудников) развиты в юго-западной части, общие запасы меди в них оцениваются в 176 тыс. т [6]. Рудники Башкирии и Оренбуржья разрабатывались в XVII – начале XX вв., а руды переплавлялись на Воскресенском медеплавильном заводе Уфимской губернии. В настоящее время изучение медистых песчаников в Башкирии практически не ведётся. Между тем результаты геолого-съёмочных работ и результаты шлихового опробования дают основание предполагать, что известные на сегодняшний день рудники – лишь часть того, что реально находится в

пермских отложениях. К примеру, разработки песчано-гравийных карьеров до сих пор приводят к открытию медных рудопоявлений. К таковым относятся Алыштанское, Новомихайловское, Базилевское рудопоявления, вскрытые при разработке песчано-гравийных месторождений в Фёдоровском районе республики Башкортостан. Базилевское и Новомихайловское рудопоявления находятся вблизи Дедовской группы рудников, отработывавшихся до 1910-х гг. [7]. Кроме того, в этом районе в песчаниках казанского яруса недавно была обнаружена Сабантуйская хромитовая палеороссыпь, в рудах которой концентрация Cr_2O_3 достигает 15–17 мас. % [8]. В связи с этим отложения казанского яруса в Южном Предуралья могут иметь ещё более важное научное и практическое значение.

Проблема генезиса медных руд в осадочных формациях актуальна до сих пор. Существуют различные взгляды для объяснения происхождения пермских медистых песчаников Предуралья, которые можно обобщить в три теории – биогенную, гидротермально-метасоматическую и осадочную [9]. До последнего времени наиболее популярной являлась гидрогенно-осадочная теория [10]. В настоящее время всё большее количество исследователей придерживаются полигенной модели образования стратиформных месторождений меди и отмечают множественность источников рудных элементов [11–13]. Основой для изучения происхождения медистых песчаников являются геохимические исследования [2, 14, 15]. Однако геохимическое изучение Предуральских медепоявлений проводилось более 40 лет назад ныне устаревшими методами, которыми многие элементы не определялись. В настоящей статье приведены результаты литологических и минералого-геохимических исследований пород и руд Базилевского медного рудопоявления, недавно обнаруженного авторами в сероцветных гравийно-песчаных отложениях казанского яруса, вскрытых карьером по добыче песчано-гравийного материала. Обсуждается его генезис и перспективы оруденения.

Геологическая позиция объекта исследования

Изучаемая территория в структурно-тектоническом отношении приурочена к Южно-Татарскому своду Восточно-Европейской платформы, а в геоморфологическом плане она отвечает южному отрогу Бугульминско-Белебеевской возвышенности (Фёдоровско-Стерлибашевский вал) [16]. По берегам ручьёв и оврагов на возвышенности обнажаются сероцветные (нижний подъярус) и красноцветные (верхний подъярус) карбонатно-терригенные преимущественно песчаные отложения казанского яруса. Их мощность в рассматриваемом районе достигает 50–100 м [17]. Залегание пород в основном субгоризонтальное. Стоит отметить, что эти отложения в стратиграфическом, литологическом и геохимическом отношении изучены слабо, в настоящее время они (достаточно условно) отнесены к белебеевской свите ($P_2kz\ bl$) [8].

Многочисленные медные рудопоявления Западной Башкирии (рис. 1, а) объединены в три группы месторождений: Сараево-Рудничную, Миякинско-

Стерлибашевскую и Фёдоровско-Кузьминовскую [6]. Рудовмещающими являются и сероцветные (преимущественно прибрежно-морские), и красноцветные (лагунно-континентальные) отложения. Базилевское проявление может быть отнесено к Фёдоровско-Кузьминовской группе, которая образует плотное скопление месторождений и проявлений по берегам р. Ашкадар (рис. 1, а). Наиболее известным среди них является Дедовское месторождение, площадь которого составляет ~200 тыс. м² [7].

Методы исследования

Геологическое описание разреза с отбором проб (25 шт.) было проведено в 2020–2021 гг. Образцы вмещающих пород и руд изучались в полированных шлифах и аншлифах на оптическом микроскопе Carl Zeiss Axioskop 40 (ИГ УФИЦ РАН, Уфа) и растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6390LV (ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН, Екатеринбург, аналитик Н.С. Чебыкин). Состав обломочной фракции песчаников определялся рутинным петрографическим методом на основе подсчёта 300–700 зёрен в шлифах. Химический анализ минералов получен на ЭДС-приставке INCA Energy 450 X-Max 80 Oxford Instruments при ускоряющем напряжении 20 кВ, время регистрации импульсов 30 с.

Химический состав образцов определялся при помощи рентгенофлуоресцентного анализа (Carl Zeiss VRA-30, ИГ УФИЦ РАН, Уфа, аналитики Р.Р. Ахмедова, С.В. Мичурин) и атомно-эмиссионного анализа (Shimadzu ICPE-9000, АО «ИНХП», Уфа, аналитики А.М. Карамова, З.Р. Биктимерова). Валовый микроэлементный состав получен масс-спектрометрическим анализом с индуктивно связанной плазмой после микроволнового растворения в смеси кислот $\text{HCl}+\text{HNO}_3+\text{HF}$ в блоке чистых помещений классов 6 и 7 ИСО (Perkin Elmer NexION 300S, ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН, аналитики Д.В. Киселёва, Н.В. Чередниченко). Для контроля правильности и точности определения микроэлементного состава использованы сертифицированные образцы базальта BCR-2 и андезита AGV-2 (USGS). Содержания рудных элементов (Cu, Ag, Pb, Zn, Co, Ni, Cr) в ряде проб дополнительно проверялись атомно-абсорбционным анализом (Спектр-5, ИГ УФИЦ РАН, Уфа, аналитик Н.Г. Христофорова).

Рентгенофазовый анализ проводился на дифрактометре ДРОН-4 (ИГ УФИЦ РАН, аналитик Г.С. Ситдикова). Съёмка выполнялась в $\text{Cu K}\alpha$ излучении с шагом $0,02^\circ$ и временем счёта, равным 10 с. Для расчётов использовалась длина волны $\text{K}\alpha_1=1,54060 \text{ \AA}$, полученная при напряжении и токе на рентгеновской трубке 40 кВ и 40 мА. Определение минералов проводилось по набору их межплоскостных расстояний и относительным интенсивностям соответствующих линий на дифрактограмме, ориентируясь на отражения минералов из открытой базы данных МИНКРИСТ Института экспериментальной минералогии РАН (Черноголовка).

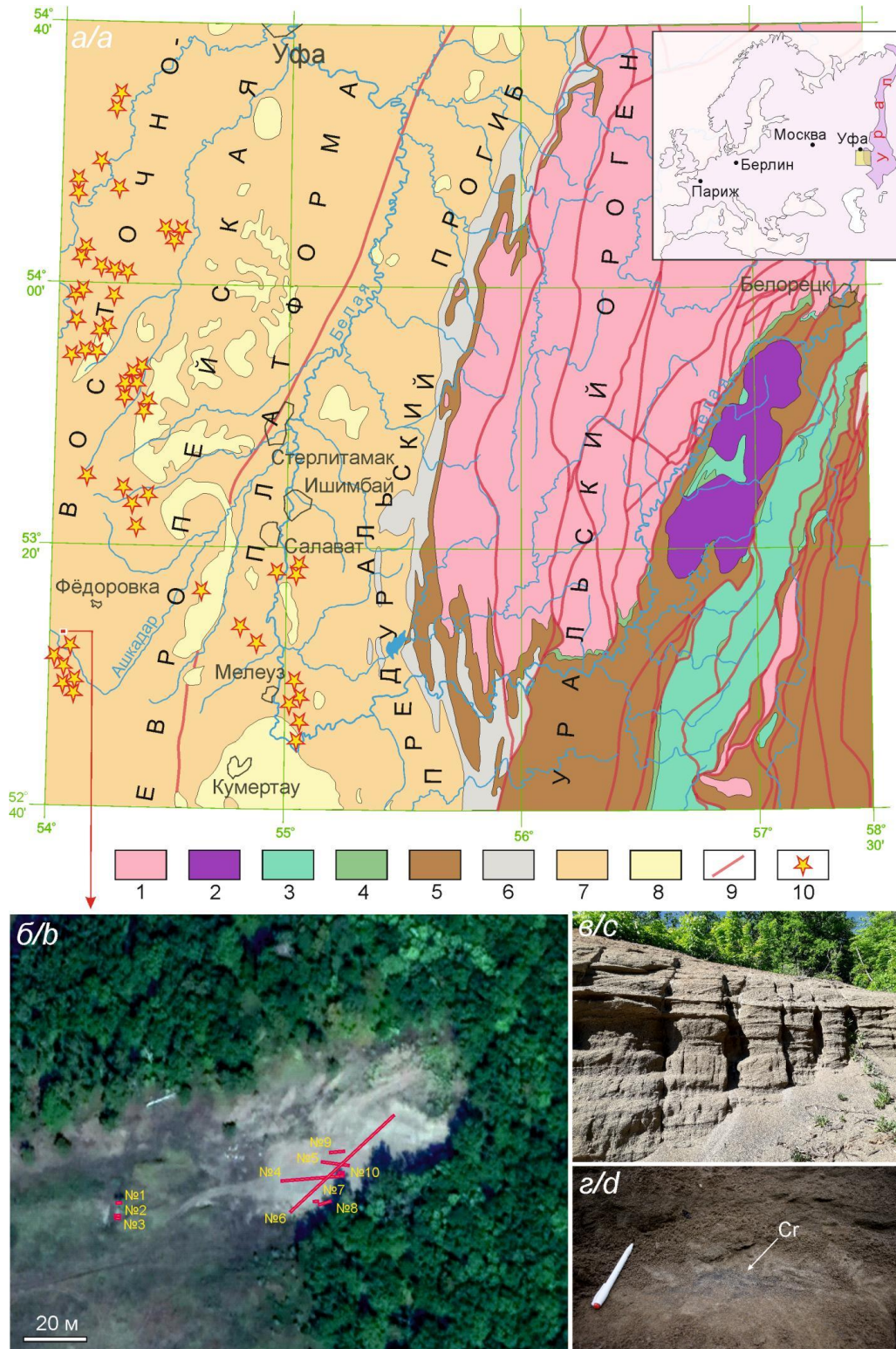


Рис. 1. Положение Базилевского медного проявления: а) фрагмент геологической карты по [18] с упрощениями; б) спутниковый снимок Google Базилевского карьера; в) субвертикальные трещины в кослоистых песчаниках стенки карьера; г) прослой хромитового песчаника. Легенда: 1 – рифейско-вендские осадочно-метаморфические комплексы; 2 – оphiолитовые массивы; 3–6 – вулканогенно-осадочные комплексы различного возраста: 3 – ордовикского, 4 – силурийского, 5 – девонского, 6 – каменноугольного; 7 – пермские осадочные отложения; 8 – мезо-кайнозойские отложения; 9 – разломы; 10 – медные рудники по [6]

Fig. 1. Position of the Bazilevo copper occurrence: a) offset of geological map after [18] with simplifications; b) Google satellite image of the Bazilevo quarry; c) subvertical faults in cross-bedded sandstones of quarry wall; d) chromite layers. Legend: 1 – Riphean-Vendian metamorphic and sedimentary complexes, 2 – ophiolites, 3–6 – different age volcanogenic-sedimentary complexes: 3 – Ordovician, 4 – Silurian, 5 – Devonian, 6 – Carboniferous complexes; 7 – Permian sedimentary complexes, 8 – Mesozoic-Cenozoic sediments, 9 – faults, 10 – copper mines according to [6]

Результаты исследования

Геолого-литологическая характеристика отложений

Мощность вскрытой части разреза в Базилевском карьере достигает 8,5 м. Разрез выполнен линзовидно-косослоистыми сероцветными песчаниками и слабо литифицированными гравелитами и конгломератами. В обнажении диагностирован плоскопараллельный тип косой слоистости с субширотным направлением наложения, мощность слоёв варьирует от 10–15 до 50–60 см. Они имеют преимущественно вогнутую форму, в средней части разреза – S-образную. Углы падения слоёв в косых сериях меняются от 9° до 35°, более крутые углы наблюдаются в более грубообломочных отложениях. Толщина отдельных слоёв варьирует в диапазоне 1–5 см. Вид соотношения косослоистых серий параллельный вогнуто-выпуклый. Серии прерываются прослоями субгоризонтальнослоистых песчаников мощностью 3–5 см, залегающих на размытой поверхности косых серий, реже – на серийном шве. Породы разбиты на отдельные блоки субвертикальными трещинами (рис. 1, в), простирание которых находится в пределах 156°–162°. Они имеют ширину до 10 см и заполнены рыхлым карбонатно-песчаным материалом. В верхней части разреза, в 40–50 см ниже почвенно-растительного слоя, обнаружены тонкие (1–2 мм), но выдержанные прослои хромитового песчаника (рис. 1, г, обр. В₂₀₋₁₄). Также 2-мм хромитсодержащий прослой был обнаружен в грубозернистом песчанике, вмещающем рудное тело № 4 (обр. В₂₀₋₄).

Песчаные гравелиты и конгломераты занимают подчинённое положение в разрезе, образуя редкие прослои мощностью от 5–10 до 40 см и выполнены в основном обломками красноватых и зеленоватых кремней размером 2–20 мм. В верхней части разреза песчаники имеют карбонатный и глинисто-карбонатный цемент контактового типа, образцы непрочные и достаточно легко крошатся. В самой нижней части разреза, где залегают рудные тела, состав цемента песчаников меняется на глинисто-кремнистый, кремнистый и глинисто-железистый (гётитовый) контактово-порового типа с реликтовым карбонатным цементом, образцы здесь механически более прочные. Обломки в песчаниках имеют размеры 0,1–0,6 мм, преобладает размерность 0,2–0,3 мм, сортировка варьирует от средней до хорошей. Отмечается общее погрубление обломочного материала сверху вниз по разрезу. Обломки имеют разную окатанность, в зависимости от их состава – от 0 до 4 по шкале Л.Б. Рухина. В составе обломков преобладают метаморфические породы – кварциты и кристаллические сланцы (суммарно более 50–60 %). В песчаниках непосредственно вмещающих рудные тела, доля обломков пород варьирует от 61 до 85 %, из которых обломки магматических пород – 0,4...1,7 %, осадочных пород – 1,2...11,7 %, метаморфических пород – 88–99 % (из них кварциты – 24–53 %, сланцы – 40–62 %, остальные метаморфиты – 7–21 %). Доля обломков кварца варьирует в пределах 10–17 %, руд-

ных минералов – 0,3...10,4 % (среди них преобладают хромшпинелиды), силикатных минералов 2,2...11,9 % (полевошпат, амфибол, хлорит, пироксен). На известных дискриминационных диаграммах В.Д. Шутова [19] изучаемые песчаники распределяются между лититовыми и кремнистыми граувакками.

Геохимия песчаных отложений

Песчаники, вмещающие рудные тела Базилевского проявления, характеризуются повышенным содержанием Cu (от 200 до 2000 г/т) в сравнении с типичными песчаниками казанского яруса в регионе (20–200 г/т) [17]. Концентрация Fe в граувакках умеренно низкая (FeO_t 2,8...6,5 мас. %), а содержания Ca меняются от низких до умеренно высоких (CaO 5,7...13,3 мас. %). При этом между содержаниями Cu, Fe и Ca выявлена положительная корреляция, отчётливая в паре Cu–Fe ($R^2=0,63$), и менее явная в паре Cu–Ca ($R^2=0,24$). Наиболее высокие количества CaO отмечаются в пробе из верхнего пласта песчаника, максимально удалённого от рудного горизонта, и в известково-песчаном материале, заполняющем 10-см трещину в разрезе (табл. 1). В песчаниках определены умеренные вариации содержаний Si, Al, Na, K и S (коэффициент вариации 13–22 %) при значимых вариациях концентраций Ti, Fe, Ca, Mg (коэффициент вариации 33–46 %). Это может быть связано с более равномерным распределением в песчаниках силикатов и алюмосиликатов (кварца, полевых шпатов) по сравнению с Fe–Mg силикатами и рудными минералами. Основное количество Ca находится в карбонатном цементе, вариации содержаний этого элемента зависят от распределения цементирующего материала. Большинство микроэлементов характеризуются слабыми количественными вариациями, исключением служат Cr, V, Co, Ni, имеющие резко повышенные концентрации в пробе хромитосодержащего песчаника (проба В₂₀₋₁₄, табл. 1). Величина Sr/Ba в большинстве проб <1, но в двух пробах с повышенным содержанием Ca отношение Sr/Ba=1 и 1,4.

Морфология рудных тел

В Базилевском рудопоявлении мы выявили десять рудных тел (рис. 1, б), имеющих сходную морфологию – значительную длину и округлую форму в поперечном сечении (рис. 2). Параметры рудных тел представлены в табл. 2. Все они однозначно приурочены к древесным фоссилиям и представляют собой минерализованные стволы деревьев, вскрытые на дне карьера. Рудные тела занимают в разрезе определённый горизонт мощностью ~1 м, а площадь их развития не менее 1200 м². Для установления реальных размеров зоны оруденения и отдельных рудных тел требуются дополнительные горные работы. Большинство рудных тел имеют близкое простирание – 85–96° (верхний горизонт). Рудное тело № 6 залегает под рудными телами №№ 4, 5 и 7, «пересекая» их направления – нижний горизонт. Рудные тела залегают под небольшим углом – до 5–7°.

Таблица 1. Химический состав песчаных пород и руд Базилевского медного рудопоявления
Table 1. Chemical composition of sandstones and ores of the Bazilevo ore occurrence

№/no.	1	2	3	4*	5	6*	7	8	9	10	11	12*	13*	14*
Элемент/Element	B ₂₀₋₁	B ₂₀₋₂	B ₂₀₋₃	B ₂₀₋₄	B ₂₀₋₅	B ₂₀₋₆	B ₂₀₋₈	B ₂₀₋₉	B ₂₀₋₁₀	B ₂₀₋₁₄	B ₂₀₋₁₅	B ₂₀₋₁₆	B ₂₀₋₁₇	B ₂₁₋₁
SiO ₂	69,40	58,40	9,06	55,90	69,93	38,70	67,82	56,60	59,40	47,20	65,90	68,73	60,50	56,50
TiO ₂	0,24	0,32	0,07	0,74	0,56	0,39	0,53	0,70	0,45	0,89	0,54	0,35	0,73	0,46
Al ₂ O ₃	3,85	2,36	0,21	8,49	7,47	4,75	8,30	6,98	4,47	8,09	8,33	5,30	9,38	6,19
FeO _i	2,50	7,56	30,70	5,59	4,40	5,60	3,81	6,20	4,90	6,49	4,64	2,81	5,56	3,48
MnO	0,23	0,03	0,02	0,24	0,03	0,04	0,08	0,07	0,05	0,16	0,09	0,13	0,15	0,09
CaO	10,11	6,73	3,02	9,12	1,64	0,72	0,83	2,01	1,74	12,90	5,70	7,70	6,30	13,30
MgO	1,76	1,06	0,46	5,32	1,61	1,65	5,04	3,54	1,63	5,91	4,65	2,06	4,80	3,10
Na ₂ O	0,55	0,42	0,05	1,77	1,40	0,77	1,62	1,12	1,03	1,59	1,75	1,19	2,30	1,39
K ₂ O	0,26	0,18	0,09	0,52	0,92	0,16	0,72	0,88	0,59	0,33	0,36	0,29	0,41	0,34
P ₂ O ₅	0,13	0,06	0,03	0,30	0,06	0,12	0,20	0,07	0,04	0,14	0,16	0,22	0,27	0,24
CuO	0,31	8,93	23,55	0,29	2,70	22,40	0,62	9,59	13,38	0,10	0,02	0,02	0,03	0,02
S	0,04	0,57	9,33	<0,01	0,04	0,06	<0,01	0,02	0,03	0,02	<0,01	0,01	0,01	0,01
ППП/LOI	10,00	11,60	24,00	11,10	7,90	23,20	7,50	11,02	11,12	16,58	6,68	7,20	8,41	13,71
Сумма/Total	99,38	98,24	100,58	99,38	98,67	98,55	97,08	98,80	98,82	100,40	98,82	96,01	98,85	98,83
Li	10	11	1,5	21,8	12	16,2	17	28	14	9	15	15,8	23,9	16,4
Be	0,19	0,19	0,14	–	0,32	–	0,31	0,5	0,36	0,2	0,31	–	–	–
Sc	6	5	2,1	20	7	17	10	17	7	21	11	12	20	13
V	40	60	190	121	90	123	90	130	130	200	80	53	129	63
Cr	100	130	60	1138	700	372	800	1130	900	2300	250	155	405	211
Mn	1100	190	180	–	180	–	380	400	400	1200	400	–	–	–
Co	7	30	160	26	15	13	22	70	80	25	12	11	21	13
Ni	60	70	280	352	80	106	170	260	110	230	110	106	227	133
Zn	13	15	9	64	23	21	30	50	30	50	30	16	75	24
Ga	3	4	2,5	–	6	–	6	9	7	9	6	–	–	–
Ge	0,8	22	220	–	4	–	6	14	12	1	0,8	–	–	–
As	0,53	29,1	251	–	1,3	–	2,4	2,8	4,5	2,2	0,53	–	–	–
Se	0,28	4,6	10,3	–	0,28	–	0,35	0,72	1,21	0,62	0,3	–	–	–
Rb	14	14	3,2	–	14	–	19	32	25	14	19	–	–	–
Sr	80	400	260	151	100	95	100	110	120	170	100	116	148	151
Y	8	5	4	18	5	12	10	10	8	16	12	12	177	12
Zr	29	30,8	19	128	61	33	56	75	67	63	58	88	116	88
Nb	2,6	2,6	0,6	–	4,1	–	4	5,5	5,2	5,4	5	–	–	–
Mo	0,5	14	110	–	3,1	–	1,4	1,1	3,1	0,5	0,4	–	–	–
Ag	2,3	30	150	–	15	–	4,8	18	20	0,34	0,17	–	–	–
Cd	0,03	<0,01	<0,01	–	0,03	–	0,04	0,06	0,05	0,05	0,04	–	–	–
Sn	0,5	0,4	0,1	–	0,7	–	0,6	0,6	0,51	0,7	0,6	–	–	–
Sb	0,16	1	9	–	0,4	–	0,4	0,3	0,4	0,21	0,18	–	–	–
Te	0,021	0,031	0,023	–	0,046	–	0,018	0,032	0,045	0,018	0,014	–	–	–
Cs	0,42	0,47	0,11	–	0,8	–	0,6	1,1	0,8	0,46	0,6	–	–	–
Ba	110	200	180	176	150	403	180	170	200	120	120	139	216	150
La	4	4	0,8	12	3,3	3	5	6	5	10	7	7	13	9
Ce	8	7	1,8	9	6	7	11	10	11	18	12	1,6	13	<1,0
Pr	1,1	0,9	0,26	–	0,7	–	1,5	1,3	1,1	2,3	1,7	–	–	–
Nd	5	3,4	1,2	–	2,5	–	6	5	4,2	10	7	–	–	–
Sm	1	0,7	0,36	–	0,49	–	1,5	1,1	0,9	2,2	1,6	–	–	–
Eu	0,3	0,2	0,1	–	0,2	–	0,5	0,4	0,3	0,7	0,5	–	–	–
Gd	1,3	0,8	0,5	–	0,6	–	1,7	1,3	1,0	2,8	2,0	–	–	–
Tb	0,2	0,1	0,1	–	0,1	–	0,3	0,2	0,2	0,4	0,3	–	–	–
Dy	1,2	0,8	0,6	–	0,8	–	1,7	1,6	1,6	2,6	1,9	–	–	–
Ho	0,2	0,2	0,1	–	0,2	–	0,4	0,4	0,4	0,6	0,4	–	–	–
Er	0,7	0,6	0,4	–	0,6	–	1,1	1,1	1,4	1,6	1,2	–	–	–
Tm	0,1	0,1	0,1	–	0,1	–	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	–	–	–
Yb	0,7	0,6	0,4	–	0,7	–	1,0	1,2	1,5	1,4	1,1	–	–	–
Lu	0,1	0,1	0,1	–	0,1	–	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	–	–	–
Hf	0,7	0,7	0,3	–	1,3	–	1,4	1,9	1,5	1,5	1,3	–	–	–
Ta	0,2	0,2	0,1	–	0,3	–	0,3	0,4	0,3	0,4	0,3	–	–	–
W	0,3	0,4	0,28	–	0,5	–	0,4	0,5	0,6	1,2	0,4	–	–	–
Tl	0,4	1	4,8	–	0,2	–	0,15	0,19	0,24	0,05	0,05	–	–	–
Pb	2,4	26	270	7	15	88	6	19	22	2,9	2,3	10	4,3	10
Bi	0,016	0,024	0,002	–	0,044	–	0,027	0,05	0,046	0,054	0,014	–	–	–
Th	0,9	1	0,19	–	1,1	–	1,3	2,1	1,1	1,3	1,3	–	–	–
U	0,9	6	10	–	4,5	–	1,5	3,9	8	0,9	0,9	–	–	–

Примечание: 1–9 – руды: 1, 4, 7 – внешняя зона рудных тел, 2, 5, 8 – средняя часть рудных тел, 3, 6, 9 – внутренняя часть рудных тел; 10–14 – песчаники: 10 – надрудный песчаник с хромитовыми прослойками, 11–13 – надрудные песчаники, 14 – известково-песчаный материал из трещины; FeO_i=FeO+Fe₂O₃, * микроэлементы определены методом ICP AES, остальные – ICP MS; < – ниже предела обнаружения, «–» не определялось.

Note: 1–9 – ores: 1, 4, 7 – outer part of ore bodies, 2, 5, 8 – middle part of ore bodies, 3, 6, 9 – inner part of ore bodies; 10–14 – sandstones: 10 – overlying sandstone with chromite layers, 11–13 – overlying sandstones, 14 – lime-sandy material from fault; FeO_i=FeO+Fe₂O₃, * trace elements determined by ICP AES, others – ICP MS; < below detection limit, «–» not determined.

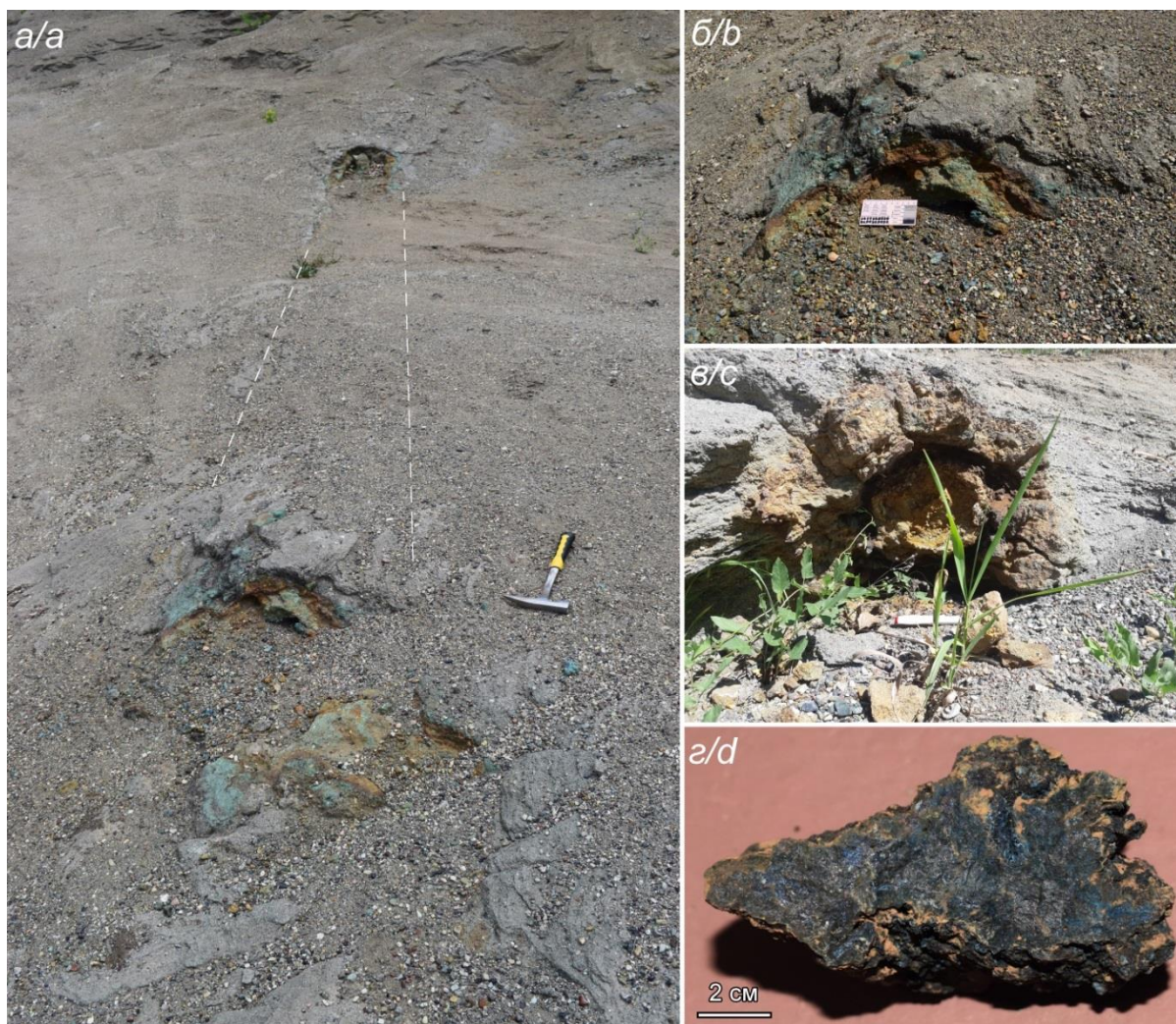


Рис. 2. Руды Базилевского медного рудопроявления: а) рудное тело № 5 во вмещающих породах; б) деталь снимка (а); в) рудное тело № 1 в поперечном сечении; г) фрагмент внутренней сульфидной оболочки рудного тела № 4

Fig. 2. Ores of the Bazilevo copper occurrence: a) ore body no. 5 in host rocks; b) detail of (a); c) ore body no. 1 in cross-section; d) fragment of inner sulfide shell of ore body no. 4

Таблица 2. Параметры рудных тел Базилевского медного рудопроявления

Table 2. Parameters of ore bodies of the Bazilevo copper occurrence

№ рудного тела No. of ore-body	Длина, м Length, m	Диаметр, м Diameter, m	Простираание, ° Strike, °	Тип зональности Type of zoning
1	>1	0,40	90	II
2	>1	0,20	88	III
3	>1	0,30	96	III
4	>22	0,60	85	I-II
5	>9	0,70	96	II
6	>40	0,70	48	II-III
7	>1	0,45	83	II
8	>3	0,40	67	I
9	>4,5	0,35	85	II
10	>1	0,50	87	II

По внутреннему строению (в поперечном сечении) установлено три типа рудных тел:

I. Первый концентрически-зональный тип. Центральная часть (5–10 см) сложена охристо-чёрным углистым материалом с остатками древесины, ко-

торый заключён в «сульфидную» оболочку (обогащённую сульфидами часть рудного тела) чёрного цвета толщиной до 10 см. Сульфидная оболочка окружена песчаным материалом (30–35 см) с цементом из сине-зелёных гидрокарбонатов Cu (азурит и малахит) и бурых гидроксидов Fe. Во внешней оболочке иногда снова появляется тонкая сульфидная оторочка (1–3 см) тёмно-серого цвета со смесью ржаво-коричневых и синезелёных полос с отпечатками структуры древесины. Краевая часть (сильно изменчивая по мощности – 1–25 см) выполнена песчано-гравийным материалом серого, ржаво-бурого и синезелёного цвета, сцементированным гидроксидами Fe и гидрокарбонатами Cu.

II. Второй концентрически-зональный тип. Центральная часть (15–20 см) сложена желтовато-бурым с пятнами синей и зелёной окраски песчаным материалом с цементом из гидроксидов Fe и гидрокарбонатов Cu. Выявляется кольцевая зональность в распределении бурой окраски. Внутренняя часть окружена зоной тёмно-бурого рых-

лого материала (4–7 см) с фрагментами углефицированной древесины. Присутствуют твёрдые участки синего и зелёного цвета. На границе с центральной зоной наблюдается тонкий охристый слой. Далее следует слой рыжевато-гравелистого песчаника (6–8 см) с пятнами синего и зелёного цвета. Он окружён тонкой (0,2...0,5 см) тёмно-бурой сульфидной оболочкой. Краевая часть имеет неравномерную толщину (от 2 до 15 см) и представлена жёлто-бурым песчаником.

III. Незональный тип. Древесина полностью замещена песчаным рыжевато-бурым материалом с пятнами синей и зелёной окраски, в котором развиты гидротрикарбонаты Си и гидроксиды Fe.

В некоторых рудных телах по длине наблюдается переход от одного типа к другому (табл. 2).

Минералогия и геохимия руд

Детальные минералогические и геохимические исследования проводились в двух рудных телах – № 5 и 9 (табл. 2). По результатам рентгенофазового анализа (рис. 3) в рудах диагностированы следующие минералы: малахит, азурит, пирит, халькозин, борнит, халькопирит, ковеллин, кубанит, куприт, гётит. Среди них наиболее распространены малахит (15–35 %), азурит (15–30 %), пирит (7–35 %), халькопирит (5–20 %). Количества других минералов обычно не превышают 5–10 % для каждого.

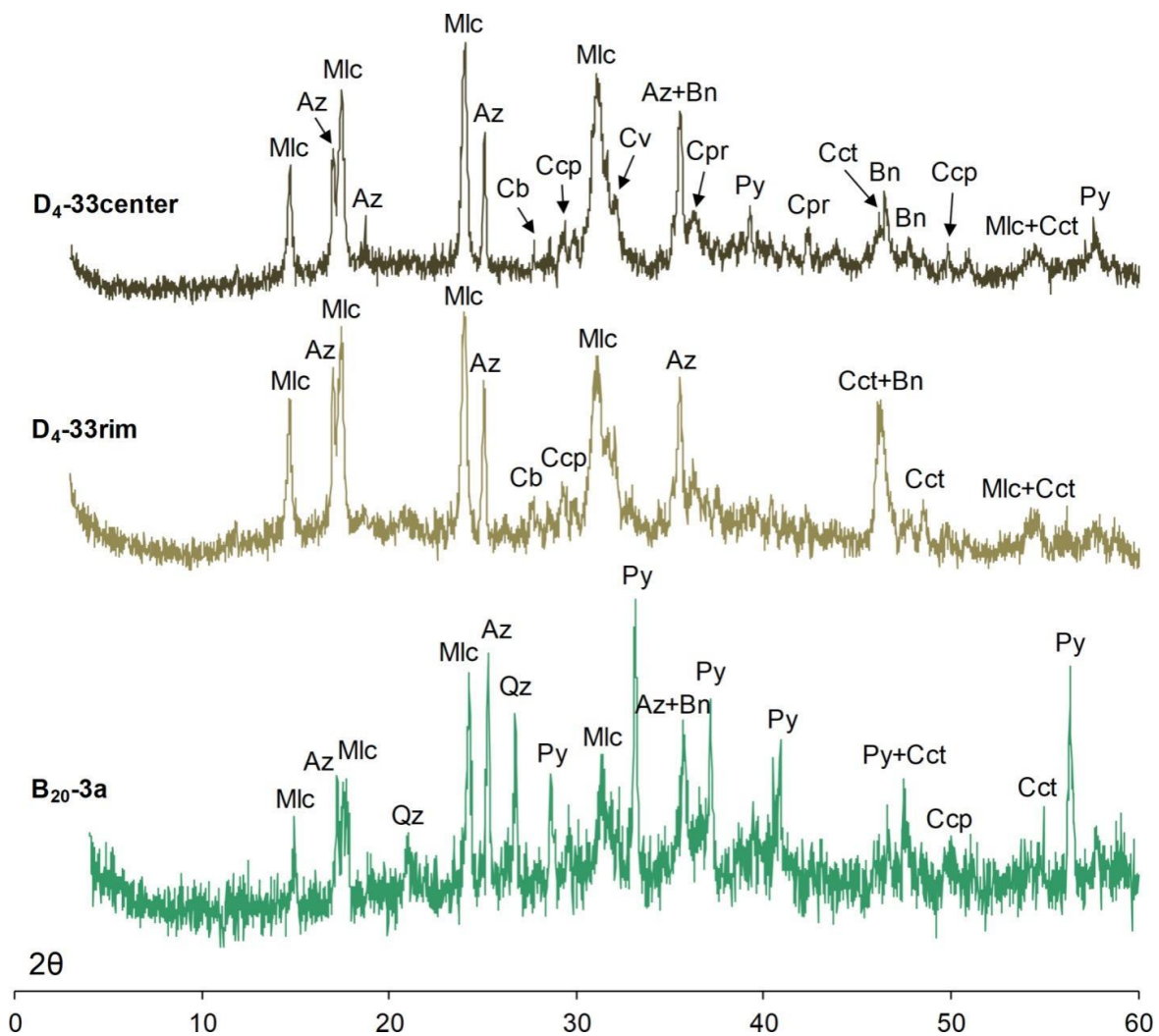


Рис. 3. Дифрактограммы порошковых проб руд Базилевского медного рудопоявления: Az – азурит, Bn – борнит, Cb – кубанит, Ccp – халькопирит, Cct – халькозин, Cpr – куприт, Cv – ковеллин, Mlc – малахит, Py – пирит, Qz – кварц

Fig. 3. XRD powder patterns of copper ores from Bazilevo ore occurrence: Az – azurite, Bn – bornite, Cb – cubanite, Ccp – chalcocopyrite, Cct – chalcocite, Cpr – cuprite, Cv – covellite, Mlc – malachite, Py – pyrite, Qz – quartz

С помощью оптической и электронной микроскопии с рентгеноспектральным микроанализом подтверждено наличие минералов, выявленных дифрактометрией, и установлены их взаимоотношения. Кроме того, обнаружены такие минералы, как брошантит и барит. Основная часть азурита и малахита находится

в мелкодисперсной форме в цементе песчаной части рудных тел (рис. 4, а), окружающей сульфидизированные части древесных стволов. Хотя они также присутствуют и в массе сульфидных оболочек. Азурит также был встречен в виде тонких жил, прорывающих сульфидные агрегаты (рис. 4, б).

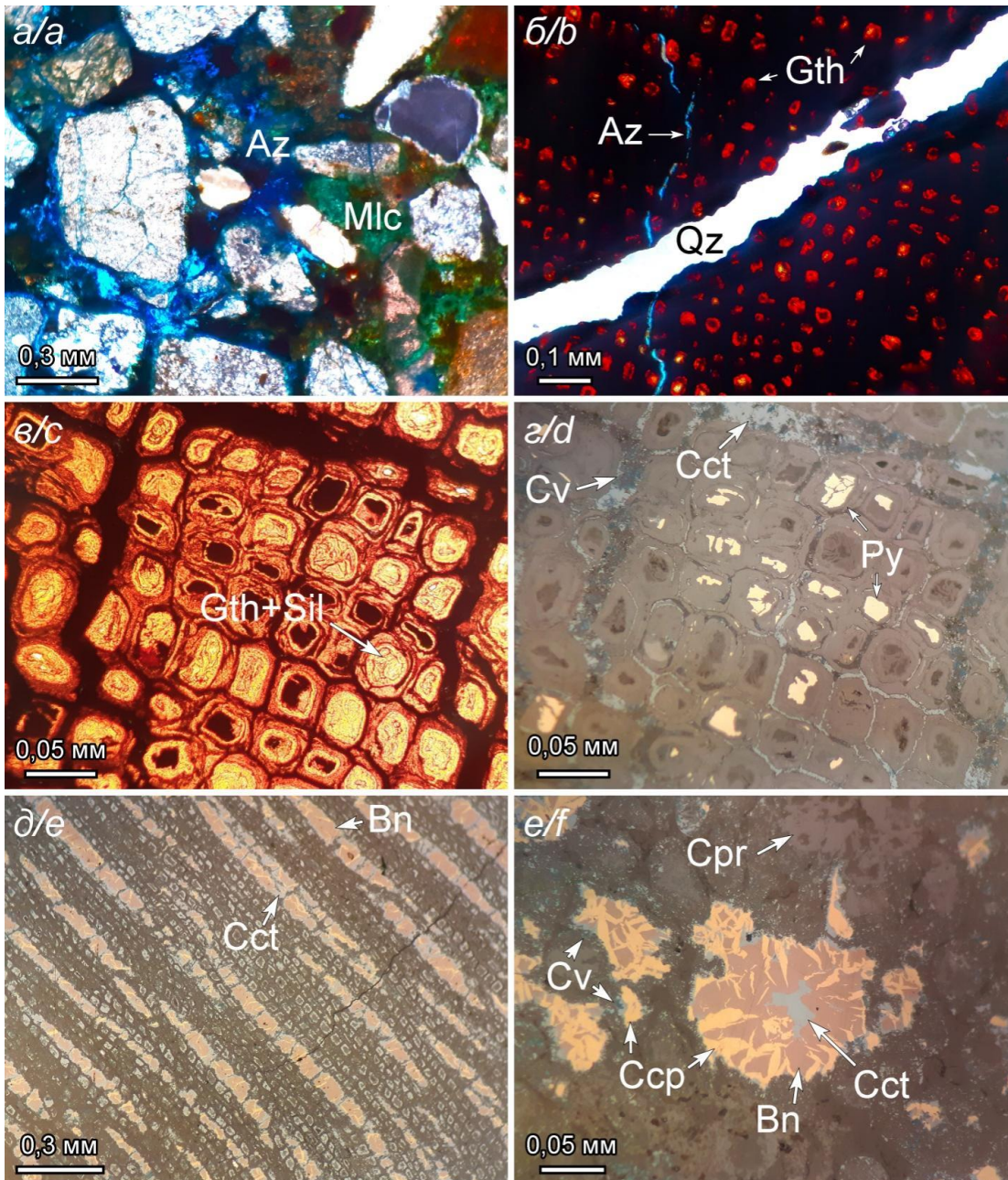


Рис. 4. Микрофотографии руд Базилевского медного рудопроявления: а) азурит и малахит в цементе песчаника; б) минеральный агрегат в структуре древесной ткани, пересечённый жилкой азурита и последующей жилкой кварца; в, г) деталь минерализованной древесной ткани; д) сульфиды меди в структуре древесной ткани; е) зональное сульфидное зерно. Примечание: Az – азурит, Bn – борнит, Ccp – халькопирит, Cct – халькозин, Cv – ковеллин, Gth – гётит, Mlc – малахит, Py – пирит, Qz – кварц, Sil – кремнезём

Fig. 4. Photomicrographs of ores of the Bazilevo copper occurrence: a) azurite and malachite in sandstone cement; b) mineral assemblage replaced wood, cutting by the azurite vein and late quartz vein; c, d) detailed localities of mineralized wood tissue; e) Cu sulfides replaced wood; f) polymineral sulfide grain. Note: Az – azurite, Bn – bornite, Ccp – chalcocopyrite, Cct – chalcocite, Cv – covellite, Gth – goethite, Mlc – malachite, Py – pyrite, Qz – quartz, Sil – silica

В сульфидной оболочке руд хорошо выражена сохранившаяся текстура древесной ткани, замещённая сульфидами и оксидами (рис. 4, б–д). Между ячейками (бывшими клетками и ситовидными трубками) частично сохранилось углефицированное органическое вещество (фитолейма). В строении отдельных ячеек отмечается зональность: ядра сложены пиритом, внешние оболочки – халькозином (иногда с оторочкой ковеллина). Иногда встречаются ячейки, нацело

выполненные пиритом (сферолиты с диаметром 10–15 мкм). Однако часто сульфиды замещены кремнезёмом (халцедоном и опалом), гидроксидами Fe или гидрокарбонатами Cu (рис. 4, в, г). На границе сульфидной и песчаной оболочек рудное вещество представлено тонкодисперсной смесью сульфидов, гидрокарбонатов, сульфатов и гидросульфатов, в которой сложно диагностировать отдельные минеральные фазы. Борнит представлен удлинёнными агрега-

тами 30–80 мкм в толщину, внешние каймы которых сложены халькозином (рис. 4, *д*). Кроме того, борнит встречается в зональных сульфидных агрегатах, окружая халькозин, слагающий центральную часть, а по краям борнит обрастает замещающим его халькопиритом (рис. 4, *е*). Ковеллин встречается по краям полиминеральных агрегатов (рис. 4, *е*), а также в скоплениях, состоящих из пластинчатых зёрен, окружённых азуриком. Куприт представлен прожилковидными выделениями в мелкодисперсной матрице, состоящей из смеси халцедона и сульфидов, сульфатов с гидрокарбонатами Cu и гидроксидами Fe (рис. 4, *е*; 5, *а*). В этой смеси также встречаются отчётливые ксеноморфные и редко идиоморфные выделения барита размером до 0,4 мм (рис. 5, *а*). Кубанит выявлен в форме тончайшей венообразной сети прожилков в пирите (рис. 5, *а*). Брошантит образует

сплошные тонкодисперсные выделения в сульфидно-гидрокарбонатной смеси или сложную сеть тонких прожилков вместе с азуриком по борниту. Агрегаты рудных минералов местами пересечены тонкими кварцевыми жилами (рис. 4, *б*).

На рис. 5 показаны ЭДС-карты распределения отдельных химических элементов в одном из участков руды, в котором развиты и сульфидные, и гидрокарбонатные минералы Cu. Распределение Cu достаточно равномерно по всей поверхности образца (рис. 5, *б*) (исключая прожилков пирита) за счёт вхождения этого элемента в состав и сульфидных, и гидрокарбонатных фаз. Распределение S и Fe во многом сходно (рис. 5, *в*, *г*), поскольку они совместно входят в состав пирита, борнита и кубанита. Ba сконцентрирован почти исключительно в барите (рис. 5, *д*), Ag слабо концентрируется в барите, но в основном рассредоточено по образцу (рис. 5, *е*).

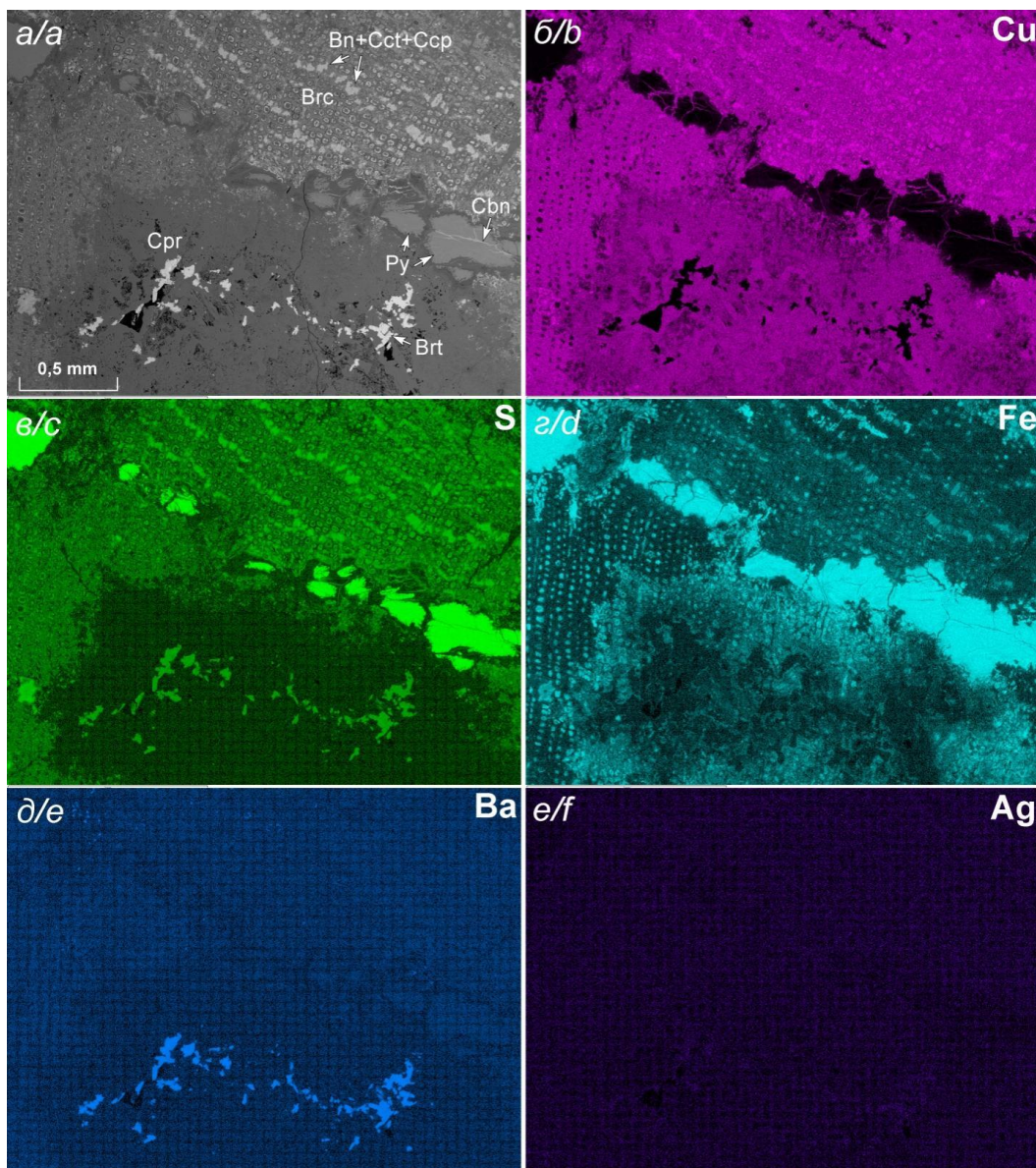


Рис. 5. BSE-изображение полированного участка рудного образца (*а*) и ЭДС-карты распределения химических элементов (*б–е*) на этом участке

Fig. 5. BSE-image of polished section of hand specimen (*a*) and EDS-maps of some chemical element distribution (*b–f*) on this locality

Содержание Cu в рудах варьирует от 0,2 до 18,8 мас. %, в среднем составляя 7,2 %. Наиболее высокие содержания Cu выявлены во внутренних оболочках рудных тел (10,7...18,8 мас. %), в особенности – в сульфидных (9,3 мас. % S), а во внешних оболочках содержится от 0,2 до 7,7 мас. % Cu. Содержания Fe (FeO_t , 2,5...30,7 мас. %) слабо коррелируют с Cu, что может быть связано с некоторыми различиями распределения в рудах сульфидов железа и меди. В изученных образцах встречаются участки с преобладающим развитием либо сульфидов Cu (борнита, халькозина, ковеллина), либо Fe (пирита). Выявлена отрицательная корреляция между содержаниями Cu и Ca ($R^2=0,6$). В богатой сульфидами пробе установлены высокие концентрации Ag и Pb – 150 и 270 г/т соответственно (проба В₂₀₋₃, табл. 1). При этом количества данных элементов снижаются в направлении от центров рудных тел к перифериям. Максимальные концентрации As, Se, Ag, Pb, Co и Ni также приурочены к богатой сульфидами медной руде, что определяет тесную связь указанных элементов с сульфидными минералами. Наиболее схожи между собой распределения As, Se, Ag, Pb, Co и S. Концентрации Zn меняются незакономерно в разных рудных телах, а содержания Ba во всех пробах руд очень стабильны и характеризуются слабыми вариациями.

Обсуждение результатов

Источники сноса и палеогеография отложений

Петрографическое изучение песчаников, вмещающих рудные тела Базилевского медепроявления, показало, что источником обломочного материала служили в основном метаморфические и осадочные комплексы. Согласно ранее проведённым исследованиям на протяжении всего пермского периода снос терригенного материала в области осадконакопления восточной части Восточно-Европейской платформы происходил со складчатого Урала [20, 21]. Показано, что песчаники молассовой формации в южной части Предуральяского прогиба, к которым отнесены и породы казанского яруса [21], формировались за счёт разрушения вещественных комплексов складчатонадвигового пояса с выведенными на поверхность коллизионными сутурами, а также продуктов рециклированного орогена. Большинство детритовых цирконов из песчаников молассовой формации имеют протерозойский U-Pb изотопный возраст, меньшая часть – раннепалеозойский [21]. Таким образом, в качестве основного поставщика обломочного материала для изучаемых песчаников предполагаются рифейские осадочно-метаморфические комплексы Башкирского мегантиклинория Южного Урала [20].

Проведённые структурно-текстурные исследования пород позволяют определить условия их накопления. Однонаправленная линзовидно-косая слоистость с довольно крутыми углами наклона (до 35°) наряду со слабой окатанностью обломков и средней-хорошей сортировкой терригенного материала при общем погружении материала сверху вниз в разрезе являются характерными признаками речных отложений [22, 23]. Преимущественно песчаный материал

отложений отвечает фации аллювиальной равнины, присутствие грубообломочных отложений связано с увеличением гидродинамической активности среды осадконакопления [22]. Судя по направлению слоёв в косых сериях, движение потока шло с востока на запад. Наличие древесных фоссилий свидетельствует о наличии прирусловых отмелей, отгороженных береговыми барами [23, 24]. Деревья могли быть как перенесёнными речным потоком, так и упавшими вблизи места произрастания. Наклонное положение рудных тел в разрезе говорит о том, что один конец дерева мог находиться на берегу, а другой – в воде, направляясь водным потоком. В изученном разрезе выявлено два рудных горизонта с разным простиранием минерализованных деревьев (нижний вскрыт слабее), что может говорить, во-первых, о смене направления течения во времени, и во-вторых, о наличии на глубине ещё не одного горизонта с рудными телами.

Некоторые микроэлементы очень чувствительны к изменениям физико-химических условий осадконакопления и используются для реконструкции среды образования осадков [25, 26]. Как отмечено выше, в песчаниках Базилевского рудопроявления величина Sr/Ba < 1 в большинстве проб, что свидетельствует о формировании песчаников в континентальных условиях, подтверждая их речную природу [27, 28]. В двух пробах с повышенным содержанием Ca увеличение Sr/Ba отношения (1–1,4), возможно, связано с наложенными процессами кальцитизации. Величина $V/(V+Ni) < 0,5$ во всех пробах характеризует окислительную обстановку водной среды [29, 30].

Древесная растительность среднепермского времени территории современного Предуралья была представлена хвойными, древовидными папоротниковыми, плауновидными, хвощевидными и др. семействами [31]. Судя по размерам древесных фоссилий, морфологии поверхности стволов, текстуре и структуре древесной ткани, минерализованные деревья Базилевского рудопроявления принадлежали одному из семейств хвойных голосеменных растений. Отметим, что в Каргалинских рудниках, находящихся в 120 км южнее Базилево, медная минерализация была приурочена, в том числе, к хвойным из родов *Sashimia* и *Geinitzia*, предполагается также присутствие кордаитов [5].

Условия образования медных руд

Знания особенностей генезиса позволяют оценить перспективы выявленного оруденения, а также прогнозировать обнаружение новых объектов. В целом, рассматривая геолого-литологические особенности размещения медной минерализации в Южном Предуралье, мы выделяем два главных типа рудных залежей: 1) субпластовые, приуроченные к литологическим границам, обычно к горизонтам развития тонко распылённого органического вещества; 2) штокверки, приуроченные к растительным и животным остаткам – стеблям и древесине, скелетам позвоночных. Возраст медного оруденения, приуроченного к пермским глинисто-терригенным отложениям Южного

Предуралья, оценивается как ранне- или среднемезозойский [2].

Морфология и размеры рудных тел во многом зависят от положения и распределения в разрезе органического вещества [32]. Органическое вещество является биохимическим барьером (восстановителем окисленных растворов), обуславливающим осаждение минералов меди. Общим механизмом для таких рудопроявлений считается первичное осаждение сульфидов Fe (пирита, марказита) при синседиментационных или диагенетических процессах на органическом восстановителе (растительные остатки) в результате деятельности сульфатредуцирующих бактерий [12, 33]. Для реализации процесса минерализации древесной ткани (petrified или permineralization) захоронение стволов должно было произойти быстро, чтобы предотвратить интенсивное гниение древесины. Хорошая сохранность клеточной структуры свидетельствует о достаточно быстром процессе сульфидизации fossilized древесины [34]. Впоследствии сульфиды Fe замещаются сульфидами Cu (халькозином, борнитом, кубанитом, халькопиритом) за счёт наложения Cu-содержащих флюидов из нижележащих слоёв [12]. В дальнейшем миграция окисленных вод в поровом пространстве приводит к частичному растворению сульфидов и образованию за счёт них поздних сульфатов и гидрокарбонатов Cu, а также гидроксидов железа.

В разрезе Базилевского карьера рудные тела исключительно отвечают штокверкам. В изученном медном проявлении перечисленные выше процессы отражены в особенностях вещественного состава и минералогии: сохранившееся углефицированное органическое вещество и текстуры древесной ткани, замещение органики сульфидами и оксидами, широкое развитие гидроксидов Fe и гидрокарбонатов Cu, переменивый состав и сложные взаимоотношения минеральных фаз с пересечением и замещением одних другими. Всё это говорит о схожем с вышеописанным механизмом формирования руд. Таким образом, изученная медная минерализация имеет полигенное происхождение. Выявленные особенности позволяют предположить четыре стадии минералообразования в изученных рудах: 1) возникновение пирита на органическом восстановителе за счёт деятельности сульфатредуцирующих бактерий; 2) замещение сульфидов Fe сульфидами Cu (пиритовые ячейки окружены медными жилами либо замещены медными минералами) при циркуляции Cu-содержащих растворов; 3) развитие гидрокарбонатов Cu при циркуляции и взаимодействии окисленных водных растворов (Cu-содержащих?) с карбонатом из цемента песчаников и частичным растворением сульфидов Fe и Cu; 4) образование гидроксидов Fe, ассоциирующих с кварцевыми жилами, секущими медные руды.

Общим для многих осадочных проявлений меди является их тесная связь с красноцветными отложениями, рассматриваемыми в качестве источника Cu [1, 10]. Отмечается важнейшая роль разрывных нарушений, обеспечивающих миграцию рудоносных флюидов [11]. Руды Базилевского проявления зале-

гают в коричнево-серых песчаных отложениях (предположительно – нижний подъярус), а красноцветные породы (верхний подъярус), судя по геологическому строению района, залегали стратиграфически выше и впоследствии были эродированы. Ниже меденосного горизонта залегают голубовато-серые и зеленовато-серые морские терригенно-глинистые породы, известняки, эвапориты и красноцветные терригенные отложения средней–ранней перми [17]. Проведённые нами наблюдения показывают, что, во-первых, образование медных руд произошло позже формирования песчаных отложений (эпигенетический тип) и, во-вторых, возникновение медной минерализации могло быть связано с разрывными нарушениями, обеспечившими возможность миграции минералообразующих растворов. В 2021 г. из изученных нами 23 разрезов на площади >1000 кв. км в Южном Предуралье только в трёх была обнаружена медная минерализация, при том что fossilized растительные остатки присутствуют почти в каждом из этих разрезов. Хотя красноцветные терригенные отложения верхнеказанского подъяруса на данной площади распространены очень широко. Данный факт свидетельствует о поступлении меди не из вышележащих красноцветных толщ, а из нижезалегающих пород при движении восходящих потоков (эксфильтрационный класс месторождений [35]) по разрывным нарушениям. Отметим, что признаками эксфильтрационных месторождений являются связь рудных тел с разломами и наличие в разрезе, с одной стороны, эвапоритов, а с другой – красноцветных толщ [35]. Температура минералообразования в таких месторождениях оценивается в 50–100 до 200–300 °C [36]. Мы полагаем, что также нельзя исключать вероятность поступления рудного вещества из более древних нижезалегающих медных руд (медистых песчаников).

Особенности распределения микроэлементов используются для реконструкции условий формирования медистых песчаников [2]. Низкая величина Co/Ni (0,07...0,57) в рудах может быть обусловлена воздействием низкотемпературных метеорных вод [37]. Величины европиевой ($\delta Eu = 0,83...1,04$) и цериевой ($\delta Ce = 0,83...1,12$) аномалий в изученных пробах сходны с таковой для медистых песчаников Оренбургского Предуралья, локализованных в верхнепермских отложениях [2], и свидетельствуют об умеренно окислительной обстановке Cu-минерализации. Характер спектров распределения редкоземельных элементов (REE) в них также очень близок с относительной обогащённостью LREE и в меньшей мере HREE по сравнению с MREE (рис. 6). Схожая картина распределения REE наблюдается и в рудах месторождения Синьчжай в Северном Лаосе, для которого предлагается близкая к описанной выше для Базилевского рудопроявления модель формирования [13]. В медных рудах Купфершифера в Польше хондрит-нормированное распределение REE также схожее, но в них отмечается более высокое содержание REE в сравнении с тремя вышеуказанными проявлениями [38]. Приведённые данные свидетельствуют о близости Базилевского Cu-проявления не только к Манс-

фельдскому (Купфершифер) типу месторождений, как это отмечалось ранее [39], но и к типу Манто [2]. Отметим, что и для первого, и для второго типов

предполагается связь Cu-минерализации с гидротермально-метасоматическими флюидами, источниками которых являлись магматические тела [15, 40].

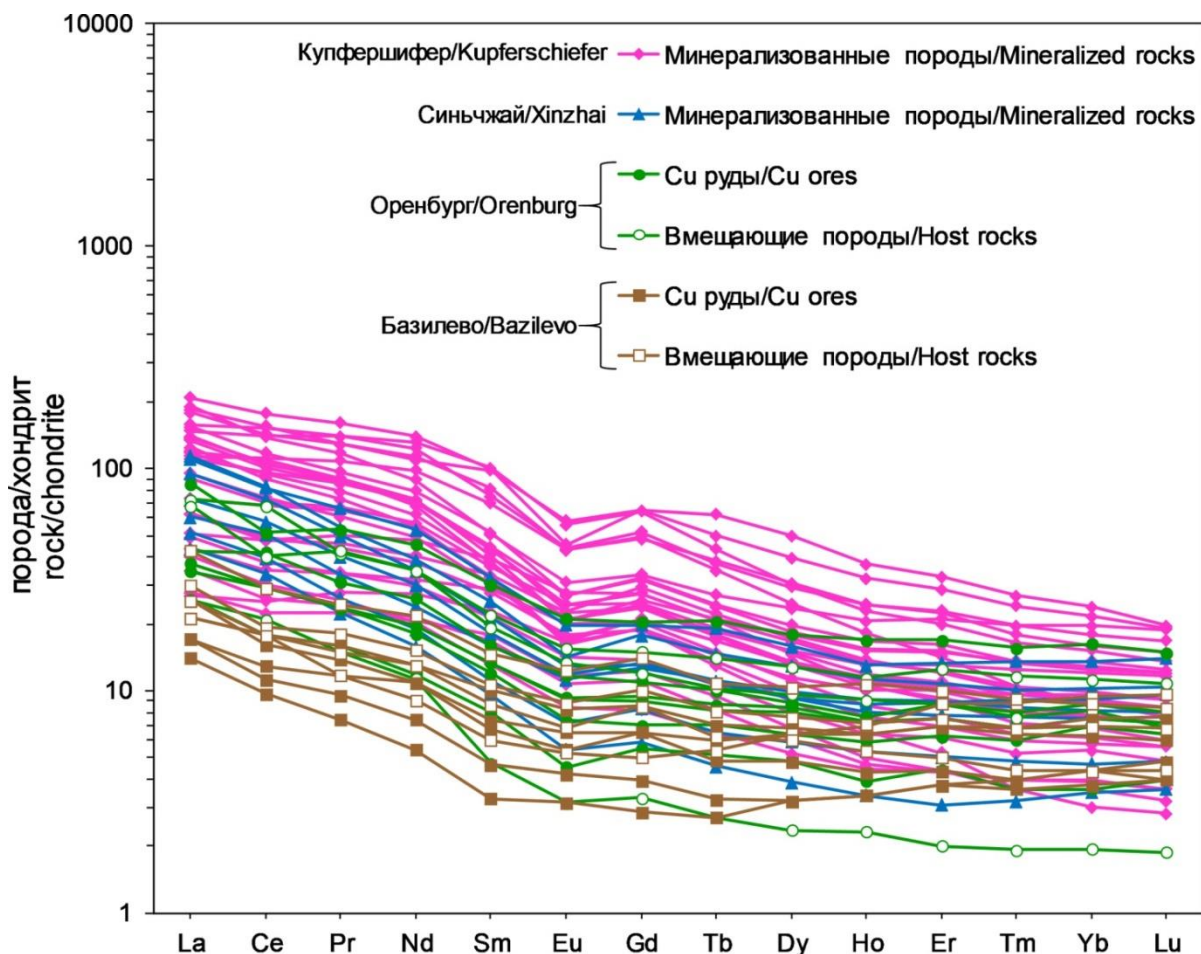


Рис. 6. Хондрит-нормированная диаграмма распределения редкоземельных элементов в рудах и вмещающих породах разных медных месторождений: Купфершифер по [38], Синьчжай по [13], Оренбуржье по [2], Базилево – авторские данные

Fig. 6. Chondrite-normalized REE patterns in copper ores from different deposits: Kupferschiefer from [38], Xinzhai from [13], Orenburg from [2], Bazilevo – authors' data

Представляется, что видимые масштабы оруденения на Базилевском проявлении пока не достаточны для промышленного интереса. Однако вскрыта лишь небольшая часть разреза, а рудные тела располагаются на разной глубине в разрезе, что позволяет рассчитывать на количественное наращивание руды как по литорали, так и по вертикали. Многие известные в регионе месторождения имеют ярусное строение. Из десяти вскрытых в разрезе рудных тел ни одно не было прослежено целиком. В природе обычно длина хвойных деревьев зависит от диаметра ствола, поэтому мы можем предположить, что рудные тела с большим диаметром будут иметь и большую длину. Это важно для оценки размеров рудных тел в условиях их недостаточной обнаженности. Анализ геохимических данных показывает, что песчаники Базилевского карьера повсеместно заражены медью. Высокие концентрации Cu отмечаются не только в хорошо выраженных рудных телах, но и во вмещающих их песчаных породах. Это даёт основание рассматривать в

качестве объекта добычи не только узкие рудные тела, но и околорудные породы.

Факт обнаружения во вмещающих медепроявление породах хромитоносных прослоев показывает, что изученный стратиграфический горизонт является не только меденосным, но и хромитоносным. Механизм образования двух типов минерализации совершенно разный. Но это диктует необходимость дальнейшего более пристального изучения обоих типов минерализации в песчаных отложениях Южного Предуралья. Отметим, что в 15 км к СВ от Базилевского карьера недавно было обнаружено новое Сабантуйское хромитовое россыпное проявление площадью ~20 тыс. м² и содержанием Cr₂O₃ в рудах 2–17 мас. % [8].

Заключение

Изучено новое Базилевское медное рудопроявление в Южном Предуралье, приуроченное к сероцветным терригенным отложениям казанского яруса. Литологические и геохимические данные свидетель-

ствуют о накоплении вмещающих песчаников во флювиальной обстановке. Обнаружено 10 рудных тел линейной морфологии, приуроченных к древесным фоссилиям, вероятно, принадлежащим семейству хвойных. В рудопроявлении выделено два рудных горизонта: к верхнему горизонту приурочено большинство рудных тел, имеющих субширотное простирание (83–96°), а рудное тело нижнего горизонта имеет СВ простирание (48°). В длину они достигают 40 м и более, а в диаметре варьируют от 0,2 до 0,7 м. В поперечном срезе установлено три типа зональности рудных тел: I концентрически-зональный тип с хорошо сохранившимся в центре органическим веществом, широким развитием сульфидов и наиболее высоким содержанием Cu; II концентрически-зональный тип с преимущественно песчаным материалом, сцементированным азуритом и малахитом; III незональный тип, сложенный песчаным материалом, сцементированным гидроксидами Fe и гидрокарбонатами Cu. Согласно выявленной зональности закономерно меняются содержания Cu (от 0,2 до 18,8 мас. %) и других рудных элементов. Наибольшие концентрации Cu, а также Ag (150 г/т), Pb (270 г/т), As (251 г/т), Ni (280 г/т), Co (160 г/т) и др. выявлены в богатых сульфидами рудах.

В целом для изученной медной минерализации предполагается гидротермально-осадочная модель формирования при участии, как минимум на раннем этапе, биогенной составляющей. Минералогические и геохимические данные позволили выделить четыре

стадии минералообразования в рудах: 1) осаждение пирита на углефицированной древесине в результате бактериальной сульфат-редукции; 2) образование сульфидов меди (халькозин, борнит, халькопирит, ковеллин и др.) при циркуляции восходящих Cu-содержащих окисленных растворов; 3) развитие гидрокарбонатов меди (азурит, малахит) при циркуляции окисленных водных растворов, реагирующих с карбонатом из цемента песчаников; 4) образование гидроксидов железа, ассоциирующих с кварцевыми жилами.

В качестве источников Cu предполагаются ниже лежащие терригенные отложения, в особенности красноцветные породы. Источником минералообразующих растворов, вероятно, были погребённые воды из нижних водоносных горизонтов, возможно, смешивавшиеся с метеорными водами.

Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации № МК-857.2021.1.5. Полевые исследования и часть аналитических работ проведены при поддержке Госзадания ИГ УФИЦ РАН (№ 0246-2019-0080) и гранта РБ НОЦ-ГМУ-2021. Аналитические исследования, включающие сканирующую электронную микроскопию и ICP MS, выполнены в ЦКП «Геоаналитик» УрО РАН в рамках тем № АААА-А18-118052590029-6 и № АААА-А18-118053090045-8 Госзадания ИГГ УрО РАН. Дооснащение и комплексное развитие ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН осуществляется при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-15-2021-680.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Габлина И.Ф., Малиновский Ю.М. Периодичность меденосаждения в осадочной оболочке Земли // Литология и полезные ископаемые. – 2008. – № 2. – С. 155–173.
2. Геохимические особенности и условия образования медистых песчаников Оренбургского Предураля / А.В. Волков, И.А. Новиков, А.А. Разумовский, К.Ю. Мурашов, Н.В. Сидорова // Литосфера. – 2018. – № 4. – С. 593–606.
3. Абрамов Б.Н. Особенности распределения благородных металлов в медистых песчаниках Кодаро-Удоканского рудного района // Литосфера. – 2006. – № 4. – С. 168–174.
4. Ефремов И.А. Местонахождения пермских наземных позвоночных в медистых песчаниках юго-западного Приуралья // Известия Академии наук СССР. VII серия. Отделение математических и естественных наук. – 1931. – Вып. 5. – С. 691–704.
5. Гоманьков А.В. Хвойные из пермских отложений Каргалинских рудников (Южное Приуралье) // Палеоботаника. – 2010. – Т. 1. – С. 5–21.
6. Полезные ископаемые Республики Башкортостан (руды меди, цинка, свинца) / Д.Н. Салихов, В.В. Масленников, И.Б. Серавкин, Г.И. Беликова, Б.Г. Галиуллин, В.Н. Никонов. – Уфа: Гилем, 2010. – 376 с.
7. Грек И.О., Долотов Ю.А. Исследования древних рудников в Оренбургской области и Башкирии // Спелестологический Ежегодник РОСИ. – М., 2000. – С. 61–66.
8. Уникальная Сабантуйская хромитовая палеороссыпь в осадочном чехле Восточно-Европейской платформы / И.Р. Рахимов, Д.Е. Савельев, В.В. Холоднов, Д.А. Замятин // Геология рудных месторождений. – 2020. – № 6. – С. 568–573.
9. Харитонов Т.В. Три стадии образования медистых песчаников Пермского края: теоретические рассуждения и поисковые выводы // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского. – Пермь: ПГНИУ, 2019. – Вып. 22. – С. 263–272.
10. Лурье А.М. Генезис медистых песчаников и сланцев. – М.: Наука, 1988. – 183 с.
11. Desouky H.A.E., Muchez P., Tyler R. The sandstone-hosted stratiform copper mineralization at Mwitapile and its relation to the mineralization at Lufukwe, Lufilian foreland, Democratic Republic of Congo // Ore Geology Reviews. – 2008. – V. 34. – Iss. 4. – P. 561–579.
12. Geology and geochemistry of the sediment-hosted stratabound red bed-type Cu-Pb (Zn-Ag) mineralization in the Dozkand-Moshampa Area, NW Zanjan, Iran / H. Azizi, M.R. Hosseinzadeh, M. Moayyed, K. Siahcheshm // Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie. – 2018. – V. 195. – № 2. – P. 123–143.
13. Huang J., Ren T., Zou H. Genesis of Xinzhai sandstone-type copper deposit in Northern Laos: geological and geochemical evidences // Journal of Earth Science. – 2019. – V. 30. – № 1. – P. 95–108.
14. Subías I.F., Mateo E., García-Veigas J. A model for the diagenetic formation of sandstone-hosted copper deposits in Tertiary sedimentary rocks, Aragón (NE Spain): S/C ratios and sulphur isotope systematics // Ore Geology Reviews. – 2003. – V. 23. – № 1–2. – P. 55–70.
15. Kojima S., Trista-Aguilera D., Hayashi K.-i. Copper deposits based on geochemical studies of North Chilean deposits. Genetic aspects of the Manto-type // Resource Geology. – 2009. – V. 59. – P. 87–98.
16. Турикешев Г.Т.-Г., Данукалова Г.А., Кутушев Ш.И.-Б. Южное Предуралие: география, геология, тектоника и геоморфология. – М.: Изд-во «Инфра-М», 2016. – 260 с.
17. Синицын И.И., Синицына Г.И. Объяснительная записка к геологической карте СССР масштаба 1:200000, лист № 40-XXVI. – М.: Министерство геологии, БГУ, 1965. – Т. 1. – 170 л. – Инв. номер 7150.
18. Rakhimov I.R., Pushkarev E.V., Gottman I.A. Chromite Paleoplacer in the Permian sediments at the East Edge of the East European Platform: composition and potential sources // Minerals. – 2021. – V. 11. – № 7:691.
19. Шутов В.Д. Классификация песчаников // Литология и полезные ископаемые. – 1967. – № 5. – С. 86–102.

20. Пучков В.Н. Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала. – Уфа: ГИЛЕМ, 2000. – 146 с.
21. Литогеохимия терригенных ассоциаций южных впадин Предуралья прогиба / А.В. Маслов, Г.А. Мизенс, Л.В. Бадида, М.Т. Крупенин, Г.М. Вовна, В.И. Киселёв, Ю.Л. Ронкин. – Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2015. – 308 с.
22. Ботвинкина Л.Н. Слоистость осадочных пород. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 542 с.
23. Черданцева Д.А., Кравченко Г.Г., Краснощёкова Л.А. Условия формирования песчаных пластов-коллекторов яковлевской свиты на территории Лодочного нефтегазоконденсатного месторождения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 10. – С. 115–127.
24. Тельнова О.П., Шумилов И.Х. Терригенные отложения среднего-верхнего девона бассейна р. Цильма (Средний Тиман) и их палинологическая характеристика // Стратиграфия. Геологическая корреляция. – 2019. – Т. 27. – № 1. – С. 31–56.
25. Yan Y., Xia B., Lin X.J. Geochemistry of the sedimentary rocks from the Nanxiong Basin, South China and implications for provenance, paleoenvironment and paleoclimate at the K/T boundary // *Sedimentary Geology*. – 2007. – V. 197. – P. 127–140.
26. Gao G., Titi A., Yang S.R. Geochemistry and depositional environment of fresh lacustrine source rock: a case study from the Triassic Bajiantan Formation shales in Junggar Basin, northwest China // *Organic Geochemistry*. – 2017. – V. 113. – P. 75–89.
27. Cai G.Q., Guo F., Liu X.T. Carbon and oxygen isotope characteristics and palaeoenvironmental implications of lacustrine carbonate rocks from the Shahejie formation in the Dongying Sag // *Earth and Environment*. – 2009. – V. 37. – P. 347–354.
28. The Sr/Ba ratio response to salinity in clastic sediments of the Yangtze River Delta / A.H. Wang, Z.H. Wang, J.K. Liu, N.C. Xu, H.L. Li // *Chemical Geology*. – 2021. – V. 559. – P. 119923.
29. Jones B., Manning D.A.C. Comparison of geochemical indexes used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones // *Chemical Geology*. – 1994. – V. 111. – P. 111–129.
30. Tribouillard N., Algeo T.J., Lyons T. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: an update // *Chemical Geology*. – 2006. – V. 232. – P. 12–32.
31. Наугольных С.В. Растительный мир пермского периода: Приуралье // Труды Геологического института. – М.: ГЕОС, 2016. – Вып. 612. – 336 с.
32. Copper deposits in sedimentary and volcanogenic rocks / Ed. by E.V. Tourtelot, J.D. Vine. – Washington: U.S. Dept. of the Interior, Geological Survey, 1976. – 44 p.
33. Механизмы замещения сульфидами меди растительных остатков в пермских отложениях Вятско-Камской меденосной полосы / Р.Р. Хасанов, Р.Р. Гайнов, Е.С. Варламова, А.Ф. Исламов // Ученые записки казанского государственного университета. Естественные науки. – 2009. – Т. 151. – № 4. – С. 162–169.
34. Controls on the pyritization of exceptionally preserved fossils: an analysis of the Lower Devonian Hünshück Slate of Germany / D.E.G. Briggs, R. Raiswell, S.H. Bottrell, D. Hatfield, C. Bartels // *American Journal of Science*. – 1996. – V. 296. – P. 633–663.
35. Рудничный В.Ф. Основы учения о полезных ископаемых. 3-е изд., испр. и доп. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2015. – 245 с.
36. Контарь Е.С. Геолого-промышленные типы месторождений Cu, Zn, Pb на Урале (геологические условия размещения, история формирования, перспективы). – Екатеринбург: Уралнедра, 2013. – 199 с.
37. Trace element and REE geochemistry of the Zhewang gold deposit, southeastern Guizhou Province, China / L. Kun, Y. Ruidong, Ch. Wenyong, L. Rui, T. Ping // *Chinese Journal of Geochemistry*. – 2014. – V. 33. – P. 109–118.
38. Oszczepalski S., Chmielewski A., Mikulski S.Z. Controls on the distribution of rare earth elements in the Kupferschiefer series of SW Poland // *Geological Quarterly*. – 2016. – V. 60. – № 4. – P. 811–826.
39. Лурье А.М., Габлина И.Ф. Об источнике меди при формировании месторождений мансфельдского типа в Западном Приуралье // *Геохимия*. – 1972. – № 1. – С. 75–88.
40. An overview of the European Kupferschiefer deposits / G. Borg, A. Piestrzyński, G.H. Bachmann, W. Puttman, S. Walther, M. Fiedler // Special publication: Society of Economic Geologists (U.S.). – 2012. – V. 16. – P. 455–486.

Поступила: 29.09.2021 г.

Информация об авторах

Рахимов И.Р., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории магматизма и метаморфизма Института геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН.

Мичурин С.В., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геохимии и изотопной геологии Института геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН.

Султанова А.Г., младший научный сотрудник лаборатории геохимии и изотопной геологии Института геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН.

Киселёва Д.В., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории физических и химических методов исследования Института геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого Уральского Отделения РАН.

Карамова А.М., кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории геохимии и изотопной геологии Института геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН.

UDC 553.06, 553.2

MINERALOGY, GEOCHEMISTRY AND GENESIS OF THE BAZILEVO COPPER OCCURRENCE (SOUTHERN PRE-URALS)

Ildar R. Rakhimov¹,
rigel92@mail.ru

Sergey V. Michurin¹,
s_michurin@mail.ru

Anna G. Sultanova¹,
anna_zakharova.ig@mail.ru

Daria V. Kiseleva²,
kiseleva@igg.uran.ru

Alsu M. Karamova¹,
alsu.2013@bk.ru

¹ Institute of Geology, Ufa Federal Research Center RAS,
16/2, K. Marks street, Ufa, 450077, Russia.

² A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry Ural Branch RAS,
15, Acad. Vonsovsky street, Ekaterinburg, 620016, Russia.

The relevance of the research results from the discovery of new copper ore occurrences and the need to clarify the conditions of their formation in the Permian deposits of the Southern Pre-Urals against the background of poor lithological, mineralogical and geochemical studies of the latter. The genesis of copper sandstones of the Pre-Ural belt is still a matter of debate. The emergence of Cu mineralization is associated with both syn- and epigenetic processes, while infiltration or exfiltration mechanism of Cu-bearing fluid migration is assumed for the latter.

The work is aimed at the mineralogical and geochemical study of the ores of the Bazilevo copper occurrence and clarification of conditions of its formation.

Methods of research include field geological work, optical and scanning electron microscopy with X-ray spectral microanalysis, X-ray diffraction, X-ray fluorescence spectrometry, as well as mass spectrometric and atomic emission analysis with inductively coupled plasma.

Results. The mineralogical and geochemical characteristics of the ores of the Bazilevo copper occurrence in the Southern Pre-Urals were completed; the conditions for the formation of host rocks and ore bodies were studied. Their association with tree fossils with inheritance of general morphology is established. Ores (0.2–18.8 wt. % Cu, Ag up to 150 ppm, Pb up to 270 ppm) are localized in gray-colored sandy deposits of the Kazanian Stage, which are alluvial sediments. The area of ore occurrence is ≥ 1200 m², two ore-bearing beds were identified in the section. Three types of ore bodies were identified according to their internal structure. The main ore minerals are hydrocarbonates (azurite, malachite) and Cu sulfides (chalcocite, bornite, chalcopyrite, etc.). On the whole, the mineralogical and geochemical features of ores are consistent with the polygenic hydrogenic-sedimentary model of their formation with the participation of biogenic processes. The underlying terrigenous rocks (especially red-colored ones) served as the source of ore elements, and the ascending migration of mineral-forming fluids occurred along faults.

Key words:

Southern Pre-Urals, Kazanian Stage, copper sandstones, mineralized trees, mineralogy, geochemistry

The research was supported by the grant of the president of the Russian Federation no. MK-857.2021.1.5. Field studies and a part of analytical works were carried out with the support of the State task of IG, UFRC RAS (no. 0246-2019-0080) and the grant RB NOTs-GMU-2021. Analytical researches, including scanning microscopy and ICP MS were carried out in CFC «Geoanalitik» UB RAS within the subjects no. AAAA-A18-118053090045-8 and no. AAAA-A18-118053090045-8 of the State task of IGG UB RAS. Re-equipment and complex development of CFC «Geoanalitik» IGG UB RAS are financially supported by the grant of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, agreement no. 075-15-2021-680.

The authors thank R.M. Rakhimov for assistance in field studies.

REFERENCES

- Gablina I.F., Malinovskii Yu.M. Periodicity of copper accumulation in the Earth's sedimentary shell. *Lithology and Mineral Resources*, 2008, vol. 43, no. 2, pp. 136–153.
- Volkov A.V., Novikov I.A., Razumovsky A.A., Murashov K.Y., Sidorova N.V. Geochemical features and formation conditions of the cupriferous sandstones of the Orenburg Pre-Urals. *Lithosphere (Russia)*, 2018, no. 4, pp. 593–606. In Rus.
- Abramov B.N. Features of the distribution of precious metals in copper sandstones of the Kodar-Udokan ore region. *Lithosphere (Russia)*, 2006, no. 4, pp. 168–174. In Rus.
- Efremov I.A. Mestonakhozhdeniya permskikh nazemnykh pozvonochnykh v mestnykh peschanikakh yugo-zapadnogo Priuralya [Localities of Permian terrestrial vertebrates in copper sandstones of the southwestern Pre-Urals]. *Bulletin of AS USSR. VII series. Department of Mathematical and Natural Sciences*, 1931, vol. 5, pp. 691–704.
- Gomankov A.V. Khvoynye iz permskikh otlozheniy Kargalinskikh rudnikov [Conifers from the Permian deposits of the Kargaly mines (Southern Pre-Urals)]. *Paleobotanika*, 2010. vol. 1, pp. 5–21.
- Salikhov D.N., Maslennikov V.V., Seravkin I.B., Belikova G.I., Galiullin B.G., Nikonov V.N. *Poleznye iskopaemye Respubliki Bashkortostan (rudy medi, tsinka, svintsa)* [Mineral resources of the Republic of Bashkortostan (copper, zinc, lead ores)]. Ufa, Gilem Publ., 2010. 376 p.
- Grek I.O., Dolotov Yu.A. Issledovaniya drevnikh rudnikov v Orenburgskoy oblasti i Bashkirii [Research of ancient mines in the

- Orenburg oblast and Bashkiria]. *Speleological Yearbook of ROSI*. Moscow, 2000. pp. 61–66.
8. Rakhimov I.R., Saveliev D.E., Kholodnov V.V., Zamyatin D.A. The unique Sabantuy chromite paleoplacer in the sedimentary cover of the Eastern European Platform. *Geology of Ore Deposits*, 2020, vol. 62, no. 6, pp. 542–546.
 9. Kharitonov T.V. Tri stadii obrazovaniya medistykh peschanikov Permskogo kraya: teoreticheskie rassuzhdeniya i poiskovye vyvody [Three stages of the formation of cuprous sandstones of the Perm Territory: theoretical reasoning and prospecting conclusions]. *Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii. Nauchnye chteniya pamyati P.N. Chirvinskogo* [Problems of mineralogy, petrography and metallogeny. Scientific readings in memory of P.N. Chirvinskiy]. Perm, PSNIU, 2019. Vol. 22, pp. 263–272.
 10. Lurie A.M. *Genesis medistykh peschanikov i slantsev* [Genesis of cuprous sandstones and schists]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 183 p.
 11. Desouky H.A.E., Muchez P., Tyler R. The sandstone-hosted stratiform copper mineralization at Mwitapile and its relation to the mineralization at Lufukwe, Lufilian foreland, Democratic Republic of Congo. *Ore Geology Reviews*, 2008, vol. 34, Iss. 4, pp. 561–579.
 12. Azizi H., Hosseinzadeh M.R., Moayyed M., Siahchesm K. Geology and geochemistry of the sediment-hosted stratabound red bed-type Cu-Pb (Zn-Ag) mineralization in the Dozkand-Moshampa Area, NW Zanjan, Iran. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie*, 2018, vol. 195, no. 2, pp. 123–143.
 13. Huang J., Ren T., Zou H. Genesis of Xinzhai sandstone-type copper deposit in Northern Laos: geological and geochemical evidences. *Journal of Earth Science*, 2019, vol. 30, no. 1, pp. 95–108.
 14. Subías I.F., Mateo E., García-Veigas J. A model for the diagenetic formation of sandstone-hosted copper deposits in Tertiary sedimentary rocks, Aragón (NE Spain): S/C ratios and sulphur isotope systematics. *Ore Geology Reviews*, 2003, vol. 23, no. 1–2, pp. 55–70.
 15. Kojima S., Trista-Aguilera D., Hayashi K.-i. Copper deposits based on geochemical studies of North Chilean deposits. Genetic aspects of the Manto-type. *Resource Geology*, 2009, vol. 59, pp. 87–98.
 16. Turikeshv G.T.-G., Danukalova G.A., Kutushev Sh.I.-B. *Yuzhnoe Preduralye: geografiya, geologiya, tektonika i geomorfologiya* [Southern Pre-Urals: geography, geology, tectonics and geomorphology]. Moscow, «Infra-M» Press, 2016. 260 p.
 17. Sinityn I.I., Sinityna G.I. *Obiyasnitelnaya zapiska k geologicheskoy karte SSSR masshtaba 1:200000, list № 40-XXVI* [Explanatory note to geological map of USSR scale 1:200000, sheet № 40-XXVI]. Moscow, Ministerstvo geologii, BTGU Publ., 1965. Vol. 1. 170 sh. Inv. no. 7150.
 18. Rakhimov I.R., Pushkarev E.V., Gottman I.A. Chromite paleoplacer in the Permian sediments at the East Edge of the East European Platform: composition and potential sources. *Minerals*, 2021, vol. 11, no. 7:691.
 19. Shutov V.D. Klassifikatsiya peschanikov [Classification of sandstones]. *Lithology and Mineral Resources*, 1967, no. 5, pp. 86–102.
 20. Puchkov V.N. *Paleogeodinamika Yuzhnogo i Srednego Urala* [Paleogeodynamics of the Southern and Middle Urals]. Ufa, Gilem Publ., 2000. 146 p.
 21. Maslov A.V., Mizens G.A., Badida L.V., Krupenin M.T., Vovna G.M., Kiselev V.I., Ronkin Yu.L. *Litogeokhimiya terrigenykh assotsiatsiy yuzhnykh vpadin Preduralskogo progiba* [Lithochemistry of terrigenous associations of the southern depressions of the Ural Foredeep]. Yekaterinburg, IGG UB RAS Publ., 2015. 308 p.
 22. Botvinkina L.N. *Sloistost osadochnykh porod* [Layering of sedimentary rocks]. Moscow, AS USSR Press, 1962. 542 p.
 23. Cherdantseva D.A., Kravchenko G.G., Krasnoshchekova L.A. The Yakovlevskaya suite oil-bearing sandstone formation conditions in the Lodochnoe oil field. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 10, pp. 115–127. In Rus.
 24. Telnova O.P., Shumilov I.K. Middle–Upper Devonian Terrigenous rocks of the Tsil'ma River basin and their palynological characteristics. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2019, vol. 27, pp. 27–50.
 25. Yan Y., Xia B., Lin X.J. Geochemistry of the sedimentary rocks from the Nanxiong Basin, South China and implications for provenance, paleoenvironment and paleoclimate at the K/T boundary. *Sedimentary Geology*, 2007, vol. 197, pp. 127–140.
 26. Gao G., Titi A., Yang S.R. Geochemistry and depositional environment of fresh lacustrine source rock: a case study from the Triassic Bajiantan Formation shales in Junggar Basin, northwest China. *Organic Geochemistry*, 2017, vol. 113, pp. 75–89.
 27. Cai G.Q., Guo F., Liu X.T. Carbon and oxygen isotope characteristics and palaeoenvironmental implications of lacustrine carbonate rocks from the Shahejie formation in the Dongying Sag. *Earth and Environment*, 2009, vol. 37, pp. 347–354.
 28. Wang A.H., Wang Z.H., Liu J. K., Xu N. C., Li H. L. The Sr/Ba ratio response to salinity in clastic sediments of the Yangtze River Delta. *Chemical Geology*, 2021, vol. 559, 119923.
 29. Jones B., Manning D.A.C. Comparison of geochemical indexes used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones. *Chemical Geology*, 1994, vol. 111, pp. 111–129.
 30. Tribouillard N., Algeo T.J., Lyons T. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: an update. *Chemical Geology*, 2006, vol. 232, pp. 12–32.
 31. Naugolnykh S.V. Rastitelny mir permskogo perioda: Priurale [Plant World of Permian Period: Cis-Urals]. *Trudy Geologicheskogo instituta* [Geological Institute Proc.]. Moscow, GEOS Publ., 2016. Vol. 612, 336 p.
 32. *Copper deposits in sedimentary and volcanogenic rocks*. Eds. E.B. Tourtelot, J.D. Vine. Washington, U.S. Dept. of the Interior, Geological Survey, 1976. 44 p.
 33. Khasanov R.R., Gainov R.R., Varlamova E.S., Islamov A.F. Mechanisms of replacement of plant residues by copper sulfides in Permian sediments of the Vyatka-Kama copper-bearing belt. *Uchenye zapiski Kazanskogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennye nauki*, 2009, vol. 151, no. 4, pp. 162–169. In Rus.
 34. Briggs D.E.G., Raiswell R., Bottrell S.H., Hatfield D., Bartels C. Controls on the pyritization of exceptionally preserved fossils: An analysis of the Lower Devonian Hünshück Slate of Germany. *American Journal of Science*, 1996, vol. 296, pp. 633–663.
 35. Rudnitskiy V.F. *Osnovy ucheniya o poleznykh iskopaemykh* [Fundamentals of the doctrine of minerals]. 3rd ed. Yekaterinburg, USGU Press, 2015. 245 p.
 36. Kontar E.S. *Geologo-promyshlennye tipy mestorozhdeniy na Urale (geologicheskie usloviya razmeshcheniya, istoriya formirovaniya, perspektivy)* [Geological and industrial types of Cu, Zn, Pb deposits in the Urals (geological conditions of placement, history of formation, prospects)]. Yekaterinburg, Uralnedra Publ., 2013. 199 p.
 37. Kun L., Ruidong Y., Wenyong Ch., Rui L., Ping T. Trace element and REE geochemistry of the Zhewang gold deposit, southeastern Guizhou Province, China. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2014, vol. 33, pp. 109–118.
 38. Oszczepalski S., Chmielewski A., Mikulski S.Z. Controls on the distribution of rare earth elements in the Kupferschiefer series of SW Poland. *Geological Quarterly*, 2016, vol. 60, no. 4, pp. 811–826.
 39. Lurye A.M., Gablina I.F. Ob istochnike medi pri formirovani mestorozhdeniy mansfeldskogo tipa v Zapadnom Priuralye [On the source of copper during the formation of deposits of the Mansfeld type in the Western Pre-Urals]. *Geochemistry International*, 1972, no. 1, pp. 75–88.
 40. Borg G., Piestrzyński A., Bachmann G.H., Puttman W., Walther S., Fiedler M. An overview of the European Kupferschiefer deposits. *Special publication: Society of Economic Geologists (U.S.)*, 2012, vol. 16, pp. 455–486.

Received: 29 September 2021.

Information about the authors

Ildar R. Rakhimov, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Geology, Ufa Federal Research Center RAS.

Sergey V. Michurin, Cand. Sc., leading researcher, Institute of Geology, Ufa Federal Research Center RAS.

Anna G. Sultanova, junior researcher, Institute of Geology, Ufa Federal Research Center RAS.

Daria V. Kiseleva, Cand. Sc., senior researcher, A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry Ural Branch RAS.

Alsu M. Karamova, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Geology, Ufa Federal Research Center RAS.