

Оригинальная статья / Original article

УДК: 553.434:550.43

ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ И ЭЛЕМЕНТОВ, ОТРАЖАЮЩИЕ ЭТАПЫ ФОРМИРОВАНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МЕДИСТЫХ ПЕСЧАНИКОВ И СЛАНЦЕВ

© А.И. Трубачев¹

¹Забайкальский государственный университет,
Российская Федерация, 672039, г. Чита, ул. Александро-Заводская, 30.

РЕЗЮМЕ. Цель данной статьи – прослеживание этапов формирования минералов и элементов в рудах месторождений медистых песчаников и сланцев (ММПС), развитых во многих регионах мира. Главные **методы** – определение температурной устойчивости минералов и парагенезисов (по экспериментам и расчетным диаграммам), сравнение составов руд ММПС, находящихся на разных стадиях преобразований. **Результаты.** Каждому этапу соответствует свой набор типоморфных минералов и парагенезисов и форм их выделения, контролирующийся совокупностью факторов: величинами pH, Eh, карбонатностью, климатом, литолого-фациальной обстановкой, растворимостью сульфидов, концентрацией металлов, SO₄, H₂S, температурой, давлением и др. Источником металлов могут являться области сноса, вмещающие толщи, интрузивные комплексы. Большинство элементов-примесей являются седиментационно-диагенетическими, в ряде месторождений они привнесены постмагматическими растворами от различных интрузий, минеральные формы их начинают реализовываться в диагенезе, но большей частью при катагенезе и метаморфизме. **Выводы.** Особенности эволюции состава медных руд от седиментогенеза до метаморфизма, выраженные через изменение минерального состава (преобладание обогащенных или, наоборот, обедненных медью минералов) и морфологии должны учитываться в практике поисковых и разведочных работ.
Ключевые слова: месторождения медистых песчаников и сланцев, парагенезисы минералов и элементов, формы их выделения, этапы формирования, источники элементов, факторы рудоконтроля.

Формат цитирования: Трубачев А.И. Парагенезисы минералов и элементов, отражающие этапы формирования месторождений медистых песчаников и сланцев // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2017. Т. 40. № 2. С. 9–22.

MINERALS AND ELEMENTS PARAGENESES REFLECTING FORMATION STAGES OF CUPRIFEROUS SANDSTONE AND SHALE DEPOSITS

A.I. Trubachev

Transbaikal State University,
30, Aleksandro-Zavodskaya St., Chita, 672039, Russian Federation.

ABSTRACT. The **purpose** of this article is to trace the formation stages of minerals and elements in ores of cupriferous sandstone and shale deposits developed in many regions of the world. The main **methods** used in the study are determination of temperature stability of minerals and parageneses (by experiments and calculation diagrams), comparison of ore compositions of cupriferous sandstone and shale deposits featuring different transformation stages. **Results.** Each stage has its own set of typomorphic minerals and assemblages as well as the forms of their manifestation controlled by a combination of factors: values of pH, Eh, carbonate content, climate, lithofacies environment, sulphide solubility, metal concentration, SO₄, H₂S, temperature, pressure, etc. The source of metal can be represented by alimentation zones, enclosing strata, intrusive complexes. Most impurity elements are sedimentary-diagenetic. In some fields they were introduced by post-magmatic fluids from different intrusions, their mineral forms began to develop in diagenesis but mostly they developed under catagenesis and metamorphism. **Conclusions.** Evolution features of copper ore composition from sediment genesis to metamorphism expressed

¹Трубачев Алексей Иванович, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры обогащения полезных ископаемых и вторичного сырья, e-mail: jesika-m@yandex.ru

Aleksei I. Trubachev, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor of the Department of Minerals Dressing and Secondary Raw Materials, e-mail: jesika-m@yandex.ru

through the change in mineral composition of ores (predominance of enriched in copper or, on the contrary, copper depleted minerals) and morphology should be used in the practice of prospecting and exploration works.

Keywords: deposits of cupriferous sandstones and shales, assemblages of minerals and elements, forms of their manifestation, formation stages, sources of elements, ore control factors

For citation: Trubachev A.I. Minerals and elements parageneses reflecting formation stages of cupriferous sandstone and shale deposits. Proceedings of Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits. 2017, vol. 40, no. 2, pp. 9–22. (In Russian).

Введение

С позиций осадочного рудогенеза месторождения медистых песчаников и сланцев прошли стадии формирования от седиментогенеза до метаморфизма² [1–6]. Расшифровку этапов формирования оруденения можно сделать путем нескольких методических приемов – определения температурной устойчивости минералов и их парагенезисов по экспериментам, расчетным диаграммам и проведения сопоставительного сравнения составов «эталонов – месторождений», находящихся на разных стадиях преобразования.

Температурная устойчивость минералов и парагенезисов

Для решения этого вопроса важное значение имеют ведущие рудообразующие минералы и парагенезисы, формирующиеся при различных температурах в системе медь – железо – сера. Рассмотрим их устойчивость и геологическое положение, опираясь на сводные данные (рисунок).

Анилит по своему составу и экспериментам Р. Поттера является идентичным; устойчив он в температурных пределах 0–75°C и в очень узком поле Eh со значениями 150–180 мВ [10]. Эти данные свидетельствуют о том, что анилит может появляться в геологической обстановке, соответствующей: диагенезу, раннему катагенезу и гипергенезу. Исходя из этого, можно утверждать, что анилит

Удоканского месторождения большей частью является «реликтовым диагенетическим» минералом, так как он в виде редких пятен и пластинок заключен в халькозине, а также гипергенным, когда он замещает борнит и халькозин или срастается с гипергенным джарлеитом. На Джезказганском месторождении анилит в основном гипергенный и только в редких случаях – реликтовый диагенетический. Анилит также встречается в качестве гипергенного в рудах месторождений Кипуши и Камото [11] и диагенетического – в польских месторождениях, пермских толщах Анадаркской зоны, где он установлен в конкрециях, «запечатанных» в глинистых слоях [3, 12–14].

Джарлеит по своим температурным параметрам и величинами Eh может формироваться в тех же условиях, что и анилит. В медистых песчаниках и сланцах развит широко, в них он является реликтовым диагенетическим и катагенетическим (Джезказган, Удокан, Анадаркская зона, Приуралье, Донецкая зона, месторождения Польши) и гипергенным, замещающим халькозин, борнит и реже халькопирит (Удокан, Джезказган, Игарская зона и др.).

Дигенит образуется в очень широком диапазоне температур (50–507°C) и поэтому охватывает практически все этапы рудообразования – от конечных стадий диагенеза до регионального и контактового метаморфизма – и почти

²Габлина И.Ф. Метаморфизм и гипергенез медистых песчаников и сланцев: автореф. ... дис. д-ра геолог.-минералог. наук. М.: Изд-во ИЛСАН РАН, 1994. 45 с. / Gablina I.F. Metamorphism and hypergenesis of cupriferous sandstones and shales: Abstract of the Doctoral Dissertation in Geology and Mineralogy. Moscow, ILSAN RAN Publ., 1994. 45 p.

Минералы и парагенезы	Этапы формирования						
	Гипергенез T-0-40° P-1атм.	Диagenез T-10-25° P-1- Затм.	Катагенез		Метагенез T-110-300° /220-300°/ P-1500- 3000атм.	Метаморфизм	
			ранний T-50- 100° /60- 160°/ P-10- 1000атм	поздний T-50- 200° /160- 220°/ P-450- 2000атм.		региональный T-300-650° /300-400°/ P-2000-10000 атм.	контактовый T-/350-500° P-2000-10000 атм.
Анилит (Cu _{1,2} , 1,85S)			-	0-75°			
Джарлент (Cu _{1,3-1,98} S)				0-93°			
Дигенит (Cu _{1,2-2} (Fe)S)	50-507°	-					
Халькозин низкий (Cu _{1,98-2,0} S)				0-103,5°			
Халькозин высокий (Cu _{1,8-2,0} S)	93-435°		-				-
Борнит тетрагон.					25-240		
Борнит кубический		более 228°					
Халькопирит	25-547°						
Пирит	15-742						
Пирротин	25-988						
Гематит							
Магнетит	50-500						
Гидроокислы Fe							
Кварц							
Кальцит							
Полевые шпаты							
Бетехтинит	90-170						
Галенит	25-920						
Сфалерит	25-1200						
Графит							
Ильменит							
Арсенопирит	25-650						
Молибденит	250-1000						
Киноварь	25-600						
Блеклые руды	25-665						
Пирит- ковеллин	25-434						
Борнит-пирит	25-532						
Гематит-пирит	25-613						
Пирротин- магнетит	138-900						
Штроейерит- халькозин	0-90						
Халькозин- бетехтинит	до 390						

Диаграмма устойчивости минералов и парагенезов³ [3, 7-10]
 Diagram of minerals stability and parageneses³ [3, 7-10]

³Габлина И.Ф. Метаморфизм и гипергенез медистых песчаников и сланцев: автореф. ... дис. д-ра геолог.-минералог. наук. М.: Изд-во ИЛСАН РАН, 1994. 45 с. / Gablina I.F. Metamorphism and hypergenesis of cupriferous sandstones and shales: Abstract of the Doctoral Dissertation in Geology and Mineralogy. Moscow, ILSAN RAN Publ., 1994. 45 p.

не может появляться в гипергенных условиях. К диагенетическому можно отнести дигенит, встречающийся в микроконкрециях Вятско-Камской меденосной зоны [15], к метаморфогенному – дигенит, тесно срастающийся с кубическим халькозином в рудах Удокана, Бурпалы, Мангышлака, Балубы, к катагенетическому – дигенит Донецкой зоны, польских месторождений, Дзезказгана [3].

Халькозин в рудах медистых песчаников встречается в виде ромбической (низкий по Р. Поттеру), гексагональной и кубической (высокий по Р. Поттеру) модификаций. Низкий халькозин устойчив при 0–103,5°C и может появляться в условиях гипергенеза, диагенеза и начального катагенеза; высокий халькозин устойчив при температурах от 103,5 до 435°C и способен формироваться в условиях, соответствующих начальному катагенезу и метаморфизму. На основе анализа материалов по распространению халькозина, его формам, структуре и степени преобразования медистых песчаников и сланцев к диагенетическому можно отнести халькозин в микроконкрециях Вятско-Камской зоны, его глобулы и конкреции Любин-Серошевицкого и Мансфельдского месторождений, Ленских и Приангарских медистых песчаников; вкрапленность и конкреции – в отложениях ушаковской и айсинской свит; к катагенетическим – вкрапленные зерна и прожилковые формы Донецкой, Прибайкальской зон, Дзезказганского, частично Удоканского месторождений; к метаморфогенным – гнезда, просечки, густую вкрапленность, прожилки в рудах Удокана, Замбийских месторождений, Правого Ингамакита, Сюльбана⁴ [3, 11].

Ковеллин имеет два поля устойчивости: 0–75°C и около 507°C. Первое

соответствует диагенезу и гипергенезу, второе – метаморфизму. Имеющиеся материалы показывают, что ковеллин, встречающийся в конкрециях Вятско-Камской зоны, Ленских и Приангарских медистых песчаников, месторождений Германии и Польши можно отнести к диагенетическому; во всех других случаях ковеллин является гипергенным минералом, что доказывается его тесной ассоциацией с малахитом, азурином, лимонитом, развитием его в форме каемок и прожилков по первичным сульфидам, расположением вблизи поверхности и в зонах тектонических нарушений, по которым прошли процессы окисления [1, 3].

Таким образом, из приведенного материала можно заключить, что анилит, джарлеит, халькозин низкий и ковеллин характеризуют низкотемпературные (0–103,5°C) условия формирования руд медистых песчаников и по своей природе являются либо диагенетическими (иногда и катагенетическими), либо гипергенными. Дигенит и высокий (кубический и гексагональный) халькозин знаменуют собой более высокотемпературные условия формирования оруденения.

Разноокрашенные борниты – оранжевые, розовые, коричневые, характеризующиеся различным составом и структурами, как и минералы системы медь – сера, отражают температурные условия формирования медистых песчаников от 25 до 240°C и выше (см. рисунок).

Сопоставляя пределы устойчивости минералов по экспериментальным данным и температурные условия этапов преобразования по нашим замерам в жильных минералах [3], можно наметить различные группы минералов:

– сквозные, формирующиеся практически во все этапы (к ним относятся

⁴Гонгальский Б.И. Протерозойская металлогения Удокан-Чинейского рудного района (Северное Забайкалье): автореф. ... дис. д-ра геолог.-минералог. наук. М.: Изд-во ИГЕМ РАН, 2012. 43 с. / Gongalskiy B.I. Proterozoic metallogeny of the

Udokan-Chineisky ore district (Northern Transbaikalia): Abstract of the Doctoral Dissertation in Geology and Mineralogy. Moscow, IGEM RAN Publ., 2012. 43 p.

халькопирит, пирит, галенит, сфалерит, арсенопирит, молибденит, киноварь, блеклые руды, кальцит, кварц, полевые шпаты, которые встречены почти во всех рассмотренных нами объектах, находящиеся на самых различных стадиях преобразования);

– минералы, являющиеся типоморфными для той или иной стадии формирования (к ним можно отнести анилит, джарлеит, борнит тетрагональный, гидроокислы железа, характеризующие этапы седиментогенеза – диагенеза и гипергенеза, гематит, бетехтинит – катагенетические; графит и ильменит – метаморфогенные);

– минералы, которые как будто характеризуют довольно широкий диапазон формирования, однако по геологическим наблюдениям относятся к типично метаморфогенным (это хорошо видно на примере пирротина (устойчив при 25–988°C), магнетита (50–500°C) из месторождений Кодаро-Удоканской, Заир-Замбийской, Кондо-Каренгской зон [3].

Среди парагенетических пар минералов (см. рисунок) выделяются как типоморфные для того или иного этапа: штроемейерит – халькозин (диагенетические), халькозин – виттихенит (катагенез – метаморфизм), пирротин – магнетит, графит – пирротин (метаморфизм), так и более широкого диапазона: борнит – пирит, гематит – пирит, которые образуются в условиях от диагенеза до метаморфизма. Это подтверждается экспериментальными и геологическими наблюдениями.

Таким образом, геологические данные, подкрепленные экспериментами, позволяют судить об условиях формирования медистых песчаников и сланцев. С одной стороны, выясняется, что для каждого этапа рудообразования существуют свои типоморфные минералы и парагенезисы, а с другой – намечаются «сквозные» их представители, являющиеся

малоинформативными для расшифровки генезиса в отрыве от других данных.

Условия формирования парагенезисов минералов и элементов

Рассмотрим данный вопрос по этапам осадочного рудообразования, используя сопоставительные материалы хорошо изученных месторождений и проявлений (эталонных объектов), испытавших различную степень преобразований (табл. 1).

При седиментогенезе поступивший из областей питания рудный материал в виде взвесей, растворов различной природы (карбонаты, сульфаты, хлориды и др.), адсорбционных частиц, терригенного материала выпадает в форме карбонатов и окислов, органических соединений, механических обломков [1–4]. По фактическим материалам можно говорить о решающей роли в этом этапе:

– карбонатного материала, формирование которого контролируется величиной показателя рН (равна 6–8), определяющего дифференциацию меди, свинца, цинка и других металлов по конкретным литолого-фациальным комплексам (почти во всех месторождениях медистых песчаников и сланцев);

– сорбционных процессов глинами, органическим веществом, гелями гидроокислов железа, марганца, фосфора, кремнезема, играющих значительную роль в тонкозернистых бескарбонатных осадках (айсинская, иликтинская, ушаковская, намингинская свиты и др.) и еще большую роль в углисто-глинисто-органических толщах (месторождения мансфельд-замбийского типа);

– процессов механической дифференциации, оказывающих решающее влияние при формировании медистых конгломератов, гравелитов, реже песчаников (Среднеазиатские, Тувинские, Минусинские, Приуральские и другие районы).

Таблица 1

Минералы и элементы руд эталонных месторождений, находящихся
на разных стадиях преобразования^{5,6,7} [1–3, 5, 6, 11–14, 16]

Table 1

Minerals and ore elements of the reference fields being
at different transformation stages^{5,6,7} [1–3, 5, 6, 11–14, 16]

Этапы и стадии преобразования / Transformation phases and stages	Месторождения-эталонны / Reference fields	Минералы руд / Ore minerals		Элементы-примеси / Impurity elements	
		Главные / Major	Второстепенные и редкие / Minor and rare	Имеющие минеральную форму / Having mineral form	Не имеющие собственных минералов / Lacking own minerals
Начальный катагенез / Initial catagenesis	Приуральские / Ural region	Хк, Дг, Млх, Хп, Пи, Квн	Бн, Сф, Га, Мрк, Куп, Срб, От	Ag, Pb, Zn, Cd?	Mn, Cr, V, Zr, Ti, Ni
	Ленские / Lena region	Хк, Дг, Бн, Хп, Га	Бл р, Пи, Мрк, Сф, Гм, Срб, Злт, Мб	Ag, Au, Zn, As, Mo	Sn, Bi, Sb?
	Приангарские / Angara region	Хк, Дг, Бн, Хп	Пи, Злт, Срб, Гм, Квн, Мгт	Au, Ag, Pb, Zn	Ta, Ti, Cd, Ge, Bi, Jn, Sn, Mo, Co, Ni, V
	Мансфельд / Mansfeld	Хк, Бн, Дг, Хп, Га, Сф	Пи, Квн, Мрк, Ид, Бл р, Бтх, Мб, Арсп, Пир, Мгт, Гм, Эн, Срб, Штр, Лин, Мил, Злт	Pb, Zn, Ag, Co, Ni, Mo, Au, Re	Pt, Sc, Cd, Ti, V
	Любин-Серошевицы / Lubin-Sieroszewice	Хк, Бн, Хп	Ан, Дж, Дг, Бтх, Пи, Мрк, Га, Сф, Арсп, Бл р, Эн, Срб, Злт, Гм, Штр, Кб, Глд, Грс, Втх, Кст, Нк, Мх, Квн	Pb, Zn, Au, Ag, Co, Ni, Pt, As, Sb, U, Mo, Se, Ge, Pd, Hg	Re, Cd, Sn, Ga, Ti, Be
Поздний катагенез / Late Catagenesis	Прибайкальские / Baikal region	Хк, Дг, Бн, Х	Пи, Пир, Мрк, Мгт, Гм, Злт, Срб, Кар, Га, Сф, Бл р	Pb, Zn, Co, As, Au, Ag	Bi, Ni
	Джезказган / Dzhezkazgan	Хк, Дж, Бн, Хп, Га, Сф	Ан, Дг, Пи, Бл р, Бтх, Джз, Арсп, Мрк, Мгт, Гм, Срб, Эл, Мб, Кб, Штр, Глд, Дск, Злт	Au, Ag, Re, Ge, Co, Ni, As, Sb, Mo, Bi	Se, Te, Jn, Pt, Hg, Sn, Cd, Ti, Pd?

⁵Безродных Ю.П. Распределение и условия накопления серебра, золота и других элементов-примесей в медистых песчаниках и сланцах: автореф. ... дис. канд. геолог.-минералог. наук. Иркутск, 1969. 23 с. / Bezrodnykh Yu.P. Distribution and accumulation conditions of silver, gold and other impurity elements in cupriferous sandstones and shales: Abstract of the Candidate's Dissertation in Geology and Mineralogy. Irkutsk, 1969. 23 p.

⁶Габлина И.Ф. Метаморфизм и гипергенез медистых песчаников и сланцев: автореф. ... дис. д-ра геолог.-минералог. наук. М.: Изд-во ИЛСАН РАН, 1994. 45 с. / Gablina I.F. Metamorphism and hypergenesis of cupriferous sandstones and shales: Abstract of the Doctoral Dissertation in Geology and Mineralogy. Moscow, ILSAN RAN Publ., 1994. 45 p.

⁷Гонгальский Б.И. Протерозойская металлогения Удокан-Чинейского рудного района (Северное Забайкалье): автореф. ... дис. д-ра геолог.-минералог. наук. М.: Изд-во ИГЕМ РАН, 2012. 43 с. / Gongalskiy B.I. Proterozoic metallogeny of the Udokan-Chineisky ore district (Northern Transbaikalia): Abstract of the Doctoral Dissertation in Geology and Mineralogy. Moscow, IGEM RAN Publ., 2012. 43 p.

Региональ- ный мета- морфизм / Regional metamor- phism	Заирские / Zairean	Хк, Бн, Хп, Пи	Дж, Дг, Ан, Ид, Бл р, Эн, Га, Бтх, Кар, Пир, Мрк, Арсп, Сф, Гм, Мгт, Мил, Пд, Гал, Зг, Гер, Рен, Срб, Злт, Штр, Кат, Мел, Мб, Гф, Всм, Втх, Ур, Умг, Вфт	Co, Ni, Pb, Zn, U, Mo, Au, Ag, Pt, Au, Sb, Ge, Ga, Re, C, Se, Bi, Pd	
	Замбийские / Zambian	Хк, Дг, Бн, Хп, Пи	Кар, Пир, Мгт, Гм, Арсп, Га, Сф, Лин, Кат, Мел, Мб, Гф, Ур, Злт, Срб, Втх	Pb, Zn, As, Co, U, Bi, Ag, Au, C	
	Удокан / Udokan	Хк, Дг, Дж, Бн, Хп, Пи, Гм, Мгт	Ан, Ид, Бл р, Мрк, Пир, Гф, Злт, Срб, Штр, Арсп, Га, Сф, Лин, Кб, Саф, Мил, Мб, Илм, Втх, Влр, Кн	Pb, Zn, Au, Ag, Co, Ni, Bi, As, Sb, Hg, C	
	Айнак / Ainak	Бн, Хп, Пир	Хк, Пи, Арсп, Мгт Гм, Сф, Лин, Кб Саф, Глд, Зг, Мил, Грс, Пд, Мб, Илм, Гф, Шм, Кар, Мх, Мрк, Тлк, Срб?	Zn, Co, Ni, Mo, As, C	
	Витимские / Vitim	Хп, Бн, Мгт	Хк, Пи, Кар, Арсп, Гм, Га, Сф, Злт, Срб, Мб, Гф, Илм, Мх, Пир	Pb, Zn, Au, Ag, Co, Ni, As, C	
	Икабийская свита, хребет Кодар / Ikabi suite, the Kodar ridge	Хп, Пир, Гф	Пи, Илм, Мрк, Мгт, Мб, Гм, Арсп, Злт, Срб	Au, Ag, Mo, C	
Контакто- вый мета- морфизм / Contact metamor- phism	Бурпала / Burlpala	Бн, Хп, Пи	Хк, Дг, Мгт, Гм, Пир, Мрк, Га, Сф, Гф, Злт, Срб, Арсп, Пд, Мх, Шт, Кс, Кар	Ag, Au, Pb, Zn, C, Co, Ni, Sn, W	
	Красное / Krasnoe	Хп, Бн, Пир	Пи, Хк, Бр. р., Мгт Гм, Гф, Мб, Злт, Срб, Эл, Мрк, Арсп, Кб, Лин, Га, Сф	Ag, Au, Pb, Zn, Mo, Co, Ni, As, C, Sb	
	Сюльбанское / Syulbanskoe	Хп, Бн, Пир, Пи	Хк, Мрк, Кар, Мгт, Гм, Га, Сф, Арсп, Злт, Срб, Штр, Илм, Кб, Лин, Мил, Втх, Мб, Гф, Шм, Кн, Вфт, Тим, Кс	Ag, Fu, Co, Ni, As, Mo, C, W, Ti, Hg	

Условные обозначения минералов: Ан – анилит, Арсп – арсенопирит, Бл р – блеклые руды, Бн – борнит, Бтх – бетехтинит, Влр – валлериит, Всм – висмутин, Втх – виттихенит, Вфт – вольфрамит, Га – галенит, Галл – галлит, Глд – глаукоdot, Гм – гематит, Гер – германит, Грс – герсдорфит, Гф – графит, Дг – дигенит, Дж – джарлеит, Джз – джезказганит, Дск – дискразит, Зг – зигенит, Злт – золото, Ид – идаит, Илм – ильменит, Кар – карролит, Кат – катьерит, Кб – кобальтин, Квн – ковеллин, Кн – киноварь, Кс – касситерит, Кст – кастенит, Лин – линнеит, Мб – молибденит, Мгт – магнетит, Мел – мелонит, Мил – миллерит, Млх – малахит, Мрк – марказит, Мх – маухерит, Нк – никелин, От – отавит, Пд – пентландит, Пи – пирит, Пир – пирротин, Рен – реньерит, Саф – сафлорит, Срб – серебро, Сф – сфалерит, Тим – титаномагнетит, Тлк – тальк, Ур – урановые минералы, Хк – халькозин, Шм – шмальтин, Шт – шеелит, Штр – штроейерит, Эл – электрум, Эн – энаргит, Ял – ялпаит.

Mineral conventional symbols: Ан – anilite, Арсп – arsenopyrite, Бл р – faded ores, Бн – bornite, Бтх – bethelite, Влр – vallerite, Всм – vismutin, Втх – vittichhenite, Вфт – wolframite, Га – galena, Галл – gallite, Глд – glaucodotum, Гм – hematite, Гер – germanite, Грс – gersdorffite, Гф – graphite, Дг – digenite, Дж – jarlite, Джз – dzhezkazganite, Дск – dyscrasite, Зг – zigenite, Злт – gold, Ид – idaite, Илм – ilmenite, Кар – carrolite, Кат – cattierite, Кб – cobaltin, Квн – covellite, Кн – cinnabar, Кс – cassiterite, Кст – kastenite, Лин – linnaeite, Мб – molybdenite, Мгт – magnetite, Мел – melonite, Мил – millerite, Млх – malachite, Мрк – marcazite, Мх – mauherit, Нк – nickeline, От – otavite, Пд – pentlandite, Пи – pyrite, Пир – pyrrhotite, Пен – renierite, Саф – safflorite, Срб – silver, Сф – sphalerite, Тим – titanomagnetite, Тлк – talc, Ур – uranium minerals, Хк – chalcocine, Шм – schmalin, Шт – scheelite, Штр – stromeyerite, Эл – electrum, Эн – enargite, Ял – jalpaite.

Приуроченность оруденения к определенным частям ритмичных колонн осадочных формаций – наиболее достоверное и объективное доказательство фактического накопления оруденения при седиментогенезе, и это подтверждается повсеместно [1–6, 11, 12]. Зональные ряды в размещении металлов – меди, свинца, цинка и других, а также различных минералов меди в рудоносных залежах начали непосредственно оформляться при седиментогенезе, поскольку они отражают палеотектонические режимы развития бассейнов седиментации – трансгрессивные или регрессивные. Морфологическим выражением парагенезов являются слои, пласты, линзы, «струи», находящиеся на этом этапе в рыхлом состоянии. Состав седиментационных парагенезов определяется составом материалов, поступающих с областей питания. Весь фактический материал подтверждает различную металлогенетическую специализацию меденосных регионов и месторождений рассматриваемого типа, особенно по многим характерным элементам-примесям⁸ [1–3, 17].

Таким образом, в седиментогенезе закладываются контуры рудоносных залежей, их ритмичное положение в разрезе, зональное распределение металлов в залежах в зависимости от рН среды и фаций; оформляется «качество»

будущих руд (по числу и концентрации элементов) в зависимости от состава областей сноса. Решающее значение на этом этапе имеет вертикальная климатическая зональность: гумидная обстановка в области питания и аридная – в бассейнах седиментации, установленная во всех известных меденосных провинциях [1, 3, 9]. Седиментогенные парагенезы формируются в условиях невысоких температур (0–30°C) и давлений (порядка 1 атм.). То, что «заложено» в седиментогенезе, в дальнейшем находит свое развитие и отражение на последующих этапах, на которых начинают действовать уже иные факторы: существенно меняется термодинамическая обстановка (температура, давление, величины Eh), понижается роль фациального и климатического фактора.

Главными отличительными особенностями диагенеза по мнению ряда исследователей является:

– перевод седиментационных карбонатно-окисных форм металлов в сульфиды;

– перераспределение седиментогенного рудного вещества с формированием вкрапленности, конкреций, сгущений, линз, пластов и залежей различного масштаба – от проявлений до месторождений;

⁸Безродных Ю.П. Распределение и условия накопления серебра, золота и других элементов-примесей в медистых песчаниках и сланцах: автореф. ... дис. канд. геолог.-минералог. наук. Иркутск, 1969. 23 с. / Bezrodnykh Yu.P. Distribution and

accumulation conditions of silver, gold and other impurity elements in cupriferous sandstones and shales: Abstract of the Candidate's Dissertation in Geology and Mineralogy. Irkutsk, 1969. 23 p.

– осуществление рудообразования в восстановительной обстановке⁹ [1, 3, 9, 16].

Верхний температурный предел диагенетических процессов, как показывают сопоставительные данные по многим месторождениям, находящимся на различных стадиях преобразования, был не более 45°C, нижний – около 15–25°C.

Самой ранней следует считать стадию, на которой накапливается рассеянная адсорбированная (не минеральная) форма меди. Такие концентрации меди устанавливаются в пермских отложениях Вятско-Камской зоны [15], в средне-верхнекембрийских толщах юга Сибирской платформы¹⁰ [3]. В следующую стадию диагенеза начинают появляться микроконкреции размером от миллиметров до долей сантиметров шаровидно-глобулярной формы, состоящие из сульфидов, а иногда и окислов и карбонатов, наблюдающиеся в Приуральских, Приангарских меденосных формациях, на месторождениях Польши и Германии. Одними из первых при диагенезе образуются фрамбонд-пириты, устанавливаемые на очень многих объектах медистых сланцев и мергелей и реже – медистых песчаников. Возрастные взаимоотношения с другими сульфидами указывают на более раннее появление фрамбонд-пиритов по отношению к сульфидам меди, железа, свинца и других металлов [16].

Конкреции сложно-зонального строения размером до нескольких сантиметров, состоящие из более мелких

конкреций, желваков, а также вкрапленно-слоистые, сгустковые скопления парагенезов отражают уже более поздние стадии диагенеза. Наблюдения за внутренним строением первично диагенетических минералов, особенно в неизмененных конкрециях, «запечатанных» в глинистых слоях, показывают, что формирование их осуществлялось нередко из коллоидных растворов. Этот вывод подтверждается рядом характерных признаков, выявленных травлением минералов различными реактивами: почковидное, комковатое, скрытокристаллическое, дендритоподобное строение агрегатов и отдельных минералов, наличие типичных «трещин усыхания» в пирите, халькозине, борните.

На основе анализа сопоставительного материала по составу парагенезисов и пределов их температурной устойчивости (см. рисунок) можно утверждать, что при диагенезе формируются анилит, джарлеит, халькозин низкий, борнит низкотемпературный, пирит, халькопирит, сфалерит и ряд других минералов, которые составляют основу главных парагенезисов всех месторождений меди.

Постдиагенетические этапы включают катагенез (эпигенез) начальный (ранний) и глубинный (поздний), региональный, а также контактовый метаморфизм с воздействием интрузий и даек кислого и основного состава¹¹ [1, 2, 3, 5, 11, 18].

На этих этапах продолжают действовать те же факторы, что и при

⁹Габлина И.Ф. Метаморфизм и гипергенез медистых песчаников и сланцев: автореф. ... дис. д-ра геолог.-минералог. наук. М.: Изд-во ИЛСАН РАН, 1994. 45 с. / Gablina I.F. Metamorphism and hypergenesis of cupriferous sandstones and shales: Abstract of the Doctoral Dissertation in Geology and Mineralogy. Moscow, ILSAN RAN Publ., 1994. 45 p.

¹⁰Безродных Ю.П. Распределение и условия накопления серебра, золота и других элементов-примесей в медистых песчаниках и сланцах: автореф. ... дис. канд. геолог.-минералог. наук.

Иркутск, 1969. 23 с. / Bezrodnykh Yu.P. Distribution and accumulation conditions of silver, gold and other impurity elements in cupriferous sandstones and shales: Abstract of the Candidate's Dissertation in Geology and Mineralogy. Irkutsk, 1969. 23 p.

¹¹Гонгальский Б.И. Протерозойская металлогения Удокан-Чинейского рудного района (Северное Забайкалье): автореф. ... дис. д-ра геолог.-минералог. наук. М.: Изд-во ИГЕМ РАН, 2012. 43 с. / Gongalskiy B.I. Proterozoic metallogeny of the Udokan-Chineisky ore district (Northern Trans-

диагенезе – величины Eh, pH, концентрация металлов, что подтверждается закономерно-зональным расположением минералов и элементов, но их роль, по всей видимости, не столь велика. Здесь на первый план выдвигаются в качестве ведущих температура и давление, которые постепенно нарастают по направлению от начального катагенеза до метаморфизма (см. рисунок). Вероятно, немалую роль играет при этом также состав метаморфогенных растворов, самих вмещающих толщ, а также режим серы и кислорода [2, 7].

Достоверно постдиагенетическими минералами, как это явствует из сопоставления состава эталонных месторождений (см. табл. 1) и экспериментов (см. рисунок), можно считать гематит, бетехтинит, магнетит, пирротин, графит, титаномагнетит, ильменит, а также халькозин высокий, борнит кубический, галенит, сфалерит, пирит, халькопирит, слагающие массивные, просечковые, гнездово-линзовидные, густовкрапленные руды и участвующие в составе жил альпийского типа.

Как показывают фактические данные, каждому парагенезу минералов соответствуют свои парагенезисы элементов. В месторождениях Польши, на Удокане, на Джекказгане (см. табл. 1) четко просматривается приуроченность элементов к определенным минеральным зонам в зависимости от окислительно-восстановительного потенциала среды рудообразования¹².

Сравнение набора элементов-примесей в рудах (см. табл. 1) свидетельствует о том, что в одних устанавливается довольно большое их число, в других – наоборот, малое. К первым

относятся медистые сланцы и мергели (мансфельд-замбийский тип месторождений), ко вторым – медистые песчаники, конгломераты, алевролиты (удоканский тип). Причинами столь резкого различия в количестве микроэлементов, как показал В.М. Гавшин [19], являются ресурсы их в седиментационном бассейне, продолжительность обмена между наддонной водой и обогащенным органикой осадком. Обилие элементов в рудах Мансфельда, Любин-Серошевицких, Заир-Замбийских месторождений как раз и можно объяснить полным извлечением их из наддонной седиментационной воды глинисто-углисто-органическим веществом (осадком). В медистых песчаниках органики и глинистого вещества было значительно меньше, поэтому в них нет такого разнообразия элементов. Из сказанного можно заключить, что: элементы-примеси по своей природе являются седиментационно-диагенетическими; источником их являются наддонные седиментационные (морские) воды, в которые они поступали большей частью из областей питания. Геологическая ситуация месторождений медистых песчаников и предполагаемых областей питания в большинстве случаев свидетельствует о поступлении элементов также из областей сноса: в Джекказгане, например, такие элементы как Co, Ni, Pt, частично Cu поступали за счет разрушения эффузивных толщ основного состава; Mo, Bi, Sb, Hg – при выветривании гранитоидных интрузий; а Cu, Pb, Zn, Re – из осадочных и осадочно-вулканических толщ девонского возраста [1, 3, 17].

Сопоставительные данные по эталонным месторождениям (см. табл. 1) показывают, что на стадии диагенеза и

baikalia): Abstract of the Doctoral Dissertation in Geology and Mineralogy. Moscow, IGEM RAN, 2012. 43 p.

¹²Безродных Ю.П. Распределение и условия накопления серебра, золота и других элементов-примесей в медистых песчаниках и сланцах:

автореф. ... дис. канд. геолог.-минералог. наук. Иркутск, 1969. 23 с. / Bezrodnykh Yu.P. Distribution and accumulation conditions of silver, gold and other impurity elements in cupriferous sandstones and shales: Abstract of the Candidate's Dissertation in Geology and Mineralogy. Irkutsk, 1969. 23 p

начального катагенеза многие элементы-примеси, встречаясь в повышенных количествах, собственных минералов не образуют.

По мере нарастания степени трансформации оруденения повсеместно отмечается тенденция образования элементами-примесями своих минеральных форм, и уже на стадии метаморфизма все установленные элементы имеют свою собственную минеральную форму (см. табл. 1), а некоторые из них – даже несколько. Таким образом, элементы-примеси, являющиеся по своей природе седиментационно-диагенетическими, формируют свои минералы, начиная со стадии раннего катагенеза, но особенно усиленно – при метаморфизме. Структурные взаимоотношения таких вновь образованных редких минералов, как например, карролит, виттихенит, пентландит, миллерит, герсдорфит, молибденит, арсенопирит, кобальтин и другие свидетельствуют либо об их более позднем образовании по отношению к основным рудообразующим сульфидам, либо об их близко одновременном выделении. Как правило, эти минералы имеют идиоморфную форму, либо форму метакристаллов, нередко корродируют ранее выделившиеся минералы, проникают в них по трещинкам, «заключают их в себя».

Несколько иную природу имеют некоторые элементы-примеси и их минералы в рудах Бурпалинского, Сюльбанского, Правоингамакитского, частично Удоканского и некоторых других месторождений, подвергшихся контактовым воздействиям кислых и основных интрузий. Минералы кобальта и никеля – линнеит, полидимит, миллерит, пентландит, карролит, зигенит, маухерит, герсдорфит, судя по их структурным взаимоотношениям с другими минералами и формам выделения, сформировались на последних этапах рудообразования. Геологическая ситуация в предполагаемых областях сноса не дает оснований считать их

привнесенными отсюда. Следовательно, какая-то часть рассматриваемых элементов поступила из других источников, которыми предположительно можно считать раннепротерозойские дайки и интрузии основного состава. Такой вывод подкрепляется тем, что данные интрузивные образования характеризуются именно специализацией на Ni, Co и Pt [2, 3].

По тем же соображениям можно считать, что киноварь, касситерит, шеелит, вольфрамит, являющиеся экзотическими минералами в рудах медистых песчаников, сформировались под воздействием кислых интрузий, широко развитых в Кодаро-Удоканской зоне и нередко специализированных на олово, вольфрам, ртуть. Имеются указания о формировании таких редких минералов, как реньерит, галлит, германит в рудах ряда Заирских месторождений под воздействием интрузий [6], большую часть кобальтовой минерализации в рудах Замбийских месторождений считают связанной с внедрением амфиболитовых силлов и даек.

Приведенные данные в какой-то мере свидетельствуют о наличии второго источника элементов-примесей в рудах рассматриваемых месторождений, которыми могут быть интрузии различного состава.

Выводы

Минералы и их парагенезисы формируются на всех этапах рудообразования от седиментогенеза до метаморфизма и гипергенеза; состав, форма, размеры парагенезисов полностью отражают особенности соответствующей стадии, на каждой из них формируются свои типоморфные парагенезисы, которые контролируются совокупностью факторов: в седиментогенезе главными являются pH, карбонатность, климат, фации; в диагенезе – Eh, pH, растворимость сульфидов, концентрации металлов, сульфат-ионов, сероводорода; в катагенезе и метаморфизме – температура, давление, реде Eh, pH, а также состав метаморфогенных

растворов и вмещающих толщ; в направлении от седиментогенеза до метаморфизма устанавливаются следующие четко выраженные тенденции: возрастание температур и давления; увеличение размеров и изменение морфологии агрегатов от глобулей, микроконкреций, слоев до вкрапленности, просечек, прожилков, гнезд, линз, массивных залежей, на более высоких ступенях преобразований (амфиболитовая и гранулитовая фации метаморфизма) происходит рассеяние меди и обеднение ею руд за счет перехода более богатых медных сульфидов в железистые минералы; разнообразные формы органического вещества на ранних стадиях с течением времени и увеличением степени трансформации

переходят в единую минеральную форму – графит; элементы-примеси в большинстве своем являются седиментационно-диагенетическими и только в некоторых случаях привнесены интрузиями; минеральные формы их начинают реализовываться еще в диагенезе, но большей частью – при катагенезе и наиболее полно реализуются при метаморфизме.

Особенности эволюции состава медных руд от седиментогенеза до метаморфизма, выраженные через изменение минерального состава руд (преобладание обогащенных или, наоборот, обедненных медью минералов) и морфологии, должны найти свое применение в практике поисковых и разведочных работ.

Библиографический список

1. Богданов Ю.В., Кутырев Э.И., Феоктистов В.П. Стратифицированные месторождения меди СССР. Л.: Недра, 1973. 312 с.
2. Володин Р.Н., Быков Ю.В., Четкин В.С. Удоканское медное и Катугинское редкометалльное месторождение Читинской области России. Чита: Поиск, 2004. 522 с.
3. Наркелюн Л.Ф., Салихов В.С., Трубачев А.И. Медистые песчаники и сланцы мира. М.: Недра, 1983. 414 с.
4. Попов В.М. Пластовые месторождения цветных металлов и вопросы их генезиса // Проблемы генезиса руд. М.: Наука, 1964. С. 350–368.
5. Трубачев А.И., Салихов В.С., Васильев В.Г. Стратиформные место-

References

1. Bogdanov Yu.V., Kutyrev E.I., Feoktistov V.P. *Stratified copper deposits of the USSR*. Leningrad, Nedra Publ., 1973. 312 p.
2. Volodin R.N., Bykov Yu.V., Chechetkin V.S. *Udokanskoe mednoe i Katuginskoe redkometal'noe mestorozhdeniya Chitinskoj oblasti Rossii* [Udokan copper and Katuginskoe rare metal deposits of the Chita region of Russia.]. Chita, Poisk Publ., 2004. 522 p.
3. Narkelyun L.F., Salikhov V.S., Trubachev A.I. *Medistyje peschaniki i slantsy mira* [Cupriferous sandstones and shales of the world]. Moscow, Nedra Publ., 1983. 414 p.
4. Popov V.M. *Plastovye mestorozhdeniya tsvetnykh metallov i voprosy ikh genezisa* [Stratified deposits of non-ferrous metals and their genesis issues]. *Problemy genezisa rud* [Problems of ore genesis]. Moscow, Nauka Publ., 1964, pp. 350–368. (In Russian).
5. Trubachev A.I., Salikhov V.S., Vasil'ev V.G. *Stratiformnye mestorozhdeniya*

рождения Забайкалья. Чита: Изд-во ЗабГУ, 2014. 305 с.

6. Annels A.E., Vaughan D.J., Craig J.R. Conditions of ore mineral formation in Zambian copperbelt deposit with special reference to the role of cobalt // *Miner. Deposita*. 1983. Vol. 18. № 1. Pp. 71–88.

7. Воган Д. Крейг Дж. Химия сульфидных минералов. М.: Мир, 1981. 576 с.

8. Логвиненко Н.В. Постдиагенетические изменения осадочных пород. Л.: Наука, 1968. 92 с.

9. Страхов Н.М. Основы теории литогенеза. М.: Изд-во АН СССР. 1962. Т. 2. 576 с.

10. Potter R.W. An electrochemical investigation of system copper-sulfur // *Econ. Geol.* 1977. Vol. 72. № 8. Pp. 1524–1542.

11. Sweenly M.A., Binda P.L., Vaughan D.J. Genesis of the ores of the Zambian copperbelt // *Ore geol. rev.* 1991. Vol. 6. № 1. Pp. 51–76.

12. Boule R.W. Sediment – hosted stratiform copper deposit – geologist association of Canada // *Special papers*, 36. Ottawa, 1989. 695 p.

13. Haranczuk C., Jarosz J. Minerality kruscowe zloza miedzi monokliny Przed-sudeckiej // *Rudy i metale niezelazne*. 1973. R.18-nr.10. Pp. 398–413.

14. Kucha H. Precious metal bearing shale from Zechstein copper deposits, Lower Silesia, Poland // *Trans. Inst. Mining and Met.* 1983. Vol. 92. May. Pp. 72–79.

15. Полянин В.А., Изотов В.Г. Минералогия и геохимия медных руд Вятско-Камской полосы // *Ученые записки Казанского университета*, 1967. Т. 126. Кн. 2. С. 98–143.

Zabaikal'ya [Transbaikal stratiform deposits]. Chita, Zabaikal'skii gosudarstvennyi universitet Publ., 2014. 305 p.

6. Annels A.E., Vaughan D.J., Craig J.R. Conditions of ore mineral formation in Zambian copperbelt deposit with special reference to the role of cobalt. *Miner. Deposita*, 1983, vol. 18, no. 1, pp. 71–88.

7. Vogan D. Kreig Dzh. *Khimiya sulfidnykh mineralov* [Chemistry of sulfide minerals]. Moscow, Mir Publ., 1981. 576 p.

8. Logvinenko N.V. *Postdiageneticheskie izmeneniya osadochnykh porod* [Postdiagenetic changes in sedimentary rocks]. Leningrad, Nauka Publ., 1968. 92 p.

9. Strakhov N.M. *Osnovy teorii litogeneza* [Fundamentals of the theory of lithogenesis]. Moscow, Akademiya nauk Soyuza Sovetskikh Sotsialisticheskikh Respublik Publ., 1962. Vol. 2. 576 p.

10. Potter R.W. An electrochemical investigation of system copper-sulfur. *Econ. Geol.*, 1977, vol. 72, no. 8, pp. 1524–1542.

11. Sweenly M.A., Binda P.L., Vaughan D.J. Genesis of the ores of the Zambian copperbelt. *Ore geol. rev.*, 1991, vol. 6, no. 1, pp. 51–76.

12. Boule R.W. Sediment – hosted stratiform copper deposit – geologist association of Canada. *Special papers*, 36. Ottawa, 1989. 695 p.

13. Haranczuk C., Jarosz J. Minerality kruscowe zloza miedzi monokliny Przed-sudeckiej. *Rudy i metale niezelazne*, 1973, r.18-nr.10, pp. 398–413.

14. Kucha H. Precious metal bearing shale from Zechstein copper deposits, Lower Silesia, Poland. *Trans. Inst. Mining and Met.*, 1983, vol. 92, may, pp. 72–79.

15. Polyanin V.A., Izotov V.G. *Mineralogiya i geokhimiya mednykh rud Vyatsko-Kamskoi polosity* [Mineralogy and geochemistry of copper ores of the Vyatka-Kama strip]. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta* [Scientific notes of Kazan

16. Скрипченко Н.С. Прогнозирование месторождений цветных металлов в осадочных породах. М.: Недра, 1989. 208 с.

17. Младенцев Г.Д., Гурба В.В. К вопросу об источнике рудного материала в Дзезказганском месторождении // Геология рудных месторождений. 1978. № 3. С. 74–89.

18. Wolf K.H. Handbook of strato-bound and stratiform ore deposits. Amsterdam: Elsevier, 1976. Vol. 6. 573 p.

19. Гавшин В.М. Проблема седиментационно-диагенетического накопления микроэлементов в черных сланцах и метрологические основы ее решения // Ассоциация микроэлементов с органическим веществом в осадочных толщах Сибири. Новосибирск: Наука, 1984. С. 6–16.

University], 1967, vol. 126, book 2, pp. 98–143. (In Russian).

16. Skripchenko N.S. *Prognozirovanie mestorozhdenii tsvetnykh metallov v osadochnykh porodakh* [Forecasting deposits of non-ferrous metals in sedimentary rocks]. Moscow, Nedra Publ., 1989. 208 p.

17. Mladentsev G.D., Gurba V.V. *K voprosu ob istochnike rudnogo materiala v Dzhez-kazganskom mestorozhdenii* [To the problem of the source of ore material in the Dzhezkazgan deposit]. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of ore deposits], 1978, no. 3, pp. 74–89. (In Russian).

18. Wolf K.H. Handbook of strato-bound and stratiform ore deposits. Amsterdam, Elsevier, 1976. Vol. 6. 573 p.

19. Gavshin V.M. *Problema sedimentatsionno-diaгенетического накопления mikro-elementov v chernykh slantsakh i metrologicheskie osnovy ee resheniya* [The problem of sedimentation-diagenetic accumulation of microelements in black shales and metrological bases for its solution]. *Assotsiatsiya mikroelementov s organicheskim veshchestvom v osadochnykh tolshchakh Sibiri* [Association of microelements with organic matter in the sedimentary strata of Siberia]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1984, pp. 6–16. (In Russian).

Статья поступила 16.02.2017 г.
The article was received 16.02.2017.