

УДК 551.242.3(234.85)

DOI: 10.24930/1681-9004-2018-18-4-593-606

## ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ МЕДИСТЫХ ПЕСЧАНИКОВ ОРЕНБУРГСКОГО ПРЕДУРАЛЬЯ

© 2018 г. А. В. Волков<sup>1</sup>, И. А. Новиков<sup>1</sup>, А. А. Разумовский<sup>2</sup>,  
К. Ю. Мурашов<sup>1</sup>, Н. В. Сидорова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,  
119017, г. Москва, Старомонетный пер., 35, e-mail: tma2105@mail.ru

<sup>2</sup>Геологический институт РАН, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., 7

Поступила в редакцию 26.11.2017 г., принята к печати 18.02.2018 г.

**Предмет исследования.** В статье рассмотрены новые геологические и геохимические данные по медистым песчаникам (МП) Оренбургского Предуралья. **Результаты.** Геохимические данные показывают, что вмещающая пермская толща могла служить источником РЗЭ и других микроэлементов для рудообразующих флюидов. Для МП Оренбуржья характерно обогащение широким спектром микроэлементов, включающим Cu, Ag, Au, Cd, Cr, Ni, Mn, Co, V, U, Sc, и Pb, по сравнению с их кларками в верхней коре. Они отличаются от МП Африканского пояса низкими содержаниями Co и низким Co/Ni отношением, характерным для низкотемпературных флюидов метеоритного происхождения. По геолого-генетическим особенностям и геохимическим индикаторным показателям установлено сходство МП Южного Предуралья с Cu-Ag месторождениями типа Манто в Чили и Иране, а также с МП Ирана и глинистыми сланцами Купфершифера. **Выводы.** Предложенная геолого-генетическая модель МП указывает на вероятное многоэтажное развитие Cu-Ag минерализации на глубину, как и на месторождениях типа Манто в Чили и Иране. Пермские МП Приуралья могут рассматриваться как весьма перспективный новый (“старый”) источник сырья для развития медной промышленности региона. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования новых месторождений.

**Ключевые слова:** Предуралье, медистые песчаники, месторождения, генезис, структура, геохимия, микроэлементы, РЗЭ

## GEOCHEMICAL FEATURES AND FORMATION CONDITIONS OF THE CUPRIFEROUS SANDSTONES OF THE ORENBURG PRE-URALS

Alexander V. Volkov<sup>1</sup>, Ivan A. Novikov<sup>1</sup>, Alexander A. Razumovsky<sup>2</sup>,  
Konstantin Y. Murashov<sup>1</sup>, Nina V. Sidorova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS,  
35 Staromonetnyi lane, Moscow, 119017, Russia, e-mail: tma2105@mail.ru

<sup>2</sup>Geological Institute, 7 Pyzhevsky lane, Moscow, 119017, Russia

Received 26.11.2017, accepted 18.02.2018

**Object.** The article describes a new geological and geochemical data for Permian host rocks and copper sandstones (CS) in Orenburg's Pre-Urals. **Methods.** X-ray fluorescence, atomic absorption for Au and Ag, and ICP-MS analysis were used during investigations. **Results.** The cupriferous sandstones are enriched in a quite broad range of microelements: Cu, Ag, Au, Cd, Cr, Ni, Mn, Co, V, U, Sc, and Pb, compared to the average values of the upper crust. The Co/Ni ratio in the CS is very low, which is typical of low-thermal fluids of meteoric origin. The CS are characterized by a REE spectrum without Eu-minima and maxima, which is close to the chondrite spectrum. Like in the host rocks, the “cerium” group of REE dominates in the CS over the “yttrium” and “scandium” groups. The spectra of REE of the CS and the host rocks have definitely similar morphology. The  $\delta\text{Ce}$  and  $\delta\text{Eu}$  combination indicates that CS was formed under oxidizing conditions. On geological and genetic characteristics and geochemical indicators installed the similarity of the CS in the southern Pre-Urals deposits and the Manto-type Cu-Ag deposits of Chile and Iran, and also with the CS of Iran and Cu-shales of Kupferschiefer. **Conclusion.** Proposed geological-genetic model of CS, points to possible high rise development of the Cu-Ag mineralization at depth as in the fields of the Manto-type copper deposits in Chile and Iran. Geochemical data show that accommodating the Permian strata could serve as a source of REE and other trace elements for ore-forming fluids. Perm CS

**Для цитирования:** Волков А.В., Новиков И.А., Разумовский А.А., Мурашов К.Ю., Сидорова Н.В. (2018) Геохимические особенности и условия образования медистых песчаников Оренбургского Предуралья. *Литосфера*, 18(4), 593-606. DOI: 10.24930/1681-9004-2018-18-4-593-606

**For citation:** Volkov A.V., Novikov I.A., Razumovskii A.A., Murashov K.Y., Sidorova N.V. (2018) Geochemical features and formation conditions of the cupriferous sandstones of the Orenburg Pre-Urals. *Litosfera*, 18(4), 593-606. DOI: 10.24930/1681-9004-2018-18-4-593-606

of Pre Urals can be considered as a very promising new (“old”) source of raw materials for the development of the copper industry of the region. The obtained results can be used to predict new ore fields in the Eastern Russia region.

**Keywords:** Pre-Urals, cuprous sandstones, deposits, genesis, structure, geochemistry, trace elements, REE

#### Acknowledgements

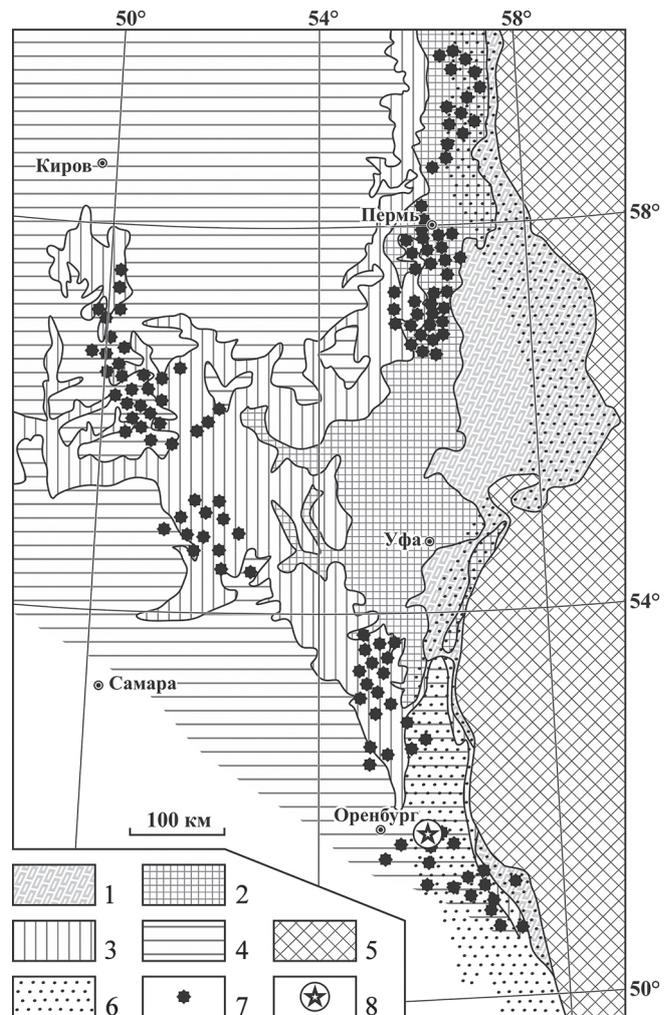
This work was supported by the program of the Presidium of the Russian Academy of Sciences No. 48 “Deposits of strategic and high-tech metals of the Russian Federation: patterns of location, formation conditions, innovative forecasting and development technologies”.

## ВВЕДЕНИЕ

Месторождения медистых песчаников – один из ведущих типов по запасам и добыче Cu (около 30%), а также Co и Ag в мире. В пределах южной части Предуралья Краевого прогиба и прилегающих областей Восточно-Европейской платформы выходы МП пермского возраста прослеживаются в виде двух полос шириной около 100 км на расстоянии более 1500 км. Известны три группы месторождений: Верхнекамская (Пермская), Вятско-Камская и Уфимско-Оренбургская (рис. 1).

Разработка МП в Предуралье продолжалась почти 200 лет. В XIX в. действовало около 10 тыс. мелких рудников с ежегодной добычей в среднем 3 тыс. т меди, большей частью экспортировавшейся на европейские рынки [Третьяков, 1928; Разумовский, 1929; Харитонов, 2011]. За этот период было добыто, по экспертной оценке, около 0.5 млн т меди [Разумовский, 1929]. В 1912 г. в Оренбургской области был остановлен последний завод (Верхоторский), работавший на руде из местных МП. При этом руды в Оренбургско-Уфимском районе (в отличие от Пермского) не были истощены: на 1913 г. сохранились сведения о разведанных и не извлеченных запасах 65 тыс. т руды с содержанием меди 3–6% [Разумовский, 1929]. Следует учитывать, что разведка в те годы проводилась на глубину не более 70 м. В то же время в Оренбуржье обрабатывались преимущественно богатые руды (>2.5% Cu), количество отвалов с содержаниями Cu 1.5–1.8% только в Каргалинском районе оценивалось в 820 тыс. т [Третьяков, 1928]. В советский период (60–70-е гг. прошлого века) периодически проводились поисково-оценочные работы на различных рудопоявлениях МП. Однако полученные результаты не удовлетворяли экономическим требованиям того времени. В последние годы “Росгеология” провела поисково-оценочные работы на Каргалинской площади в Оренбуржье, где, по данным этой компании, были получены положительные результаты.

Месторождения МП Предуралья не учтены в государственном балансе запасов и в прогнозных ресурсах меди. Тем не менее, поскольку они имеют промышленное значение в других регионах мира, в статье рассмотрены возможные перспективы этого минерального сырья для медной промышленности региона. Статья основана на имеющихся опубликованных



**Рис. 1.** Положение района работ на схеме распространения рудопоявлений в пермских медистых песчаниках Приуралья по [Харитонов, 2011], с изменениями.

1 – отложения ассельского, сакмарского, артинского и кунгурского ярусов нерасчлененные; 2 – отложения уфимского яруса; 3 – отложения казанского яруса; 4 – отложения татарского яруса; 5, 6 – Уральское горно-складчатое сооружение: 5 – Западно-Уральская, Центрально-Уральская и Тагильско-Магнитогорская зоны нерасчлененные, 6 – Предуральский краевой прогиб; 7 – рудопоявления медистых песчаников; 8 – район работ.

**Fig. 1.** The position of the studied area on the scheme of distribution of ore occurrences in the Permian cop-

per Sandstone of the Pre-Urals [Kharitonov, 2011], with modifications.

1 – deposits Hasselskogian, Sakmarian, Artinskian and Kungurian stages undifferentiated; 2 – sediments of the Ufa stage; 3 – deposits of the Kazan stage; 4 – deposits of the Tatar stage; 5, 6 – Ural mountain-folded structure: 5 – West Urals, Central Urals and Tagil-Magnitogorsk zones undifferentiated, 6 – Pre-Urals trough; 7 – deposits of copper sandstones; 8 – studied area.

ликованных данных по известным месторождениям и проявлениям МП и на результатах геологического и геохимического доизучения ряда проявлений Оренбургского Предуралья. Одна из задач данной работы заключалась в создании прогнозно-поисковой модели месторождений МП в регионе и оценке возможности ее применения в других регионах России. Следует отметить, что представленные в статье данные о составе и распределении микроэлементов и РЗЭ в пермских МП Оренбургского Предуралья получены впервые.

#### ОСОБЕННОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МЕДИСТЫХ ПЕСЧАНИКОВ ПРЕДУРАЛЬЯ

Пермский осадочный разрез, вмещающий медную минерализацию, состоит главным образом из песчаников, гравелитов, известняков, глинистых сланцев, глин и конгломератов. Минерализация приурочена преимущественно к песчаникам с минимальным количеством пелитового матри-

ла и проявлена неравномерно. Кроме Cu в МП содержатся также V (до 1%), Ag (до 100 г/т), Au (до 2 г/т), Pb и Zn (до 2–3%), Cd, Ge, Se, Te, Co, Re в количествах, допускающих их попутное извлечение [Контарь, 2013]. Рудная минерализация в МП представлена в основном халькозинном, борнитом, халькопиритом и пиритом; в зоне окисления развиты ковеллин, куприт, тенорит, малахит, азурит, самородная Cu, фольбортит, водный ванадат Cu ( $CuCa[VO_4][OH]$ ), самородная S. Обогащенные минералами меди породы образуют линзы и гнезда, которые часто обнаруживают постепенные переходы в безрудные вмещающие разности. Наблюдается тесная связь медной минерализации со слоями углефицированного вещества, содержащими кости и растительные остатки [Чайковский, 2006; Контарь, 2013]. Последнее подчеркивает пластообразный характер рудных тел в частных разрезах и может маскировать текущее положение как обособленных малых тел, так и генерализованных структур.

Средние размеры рудных тел (с содержаниями Cu > 2.5%) за несколько лет добычи на примере трех заводов Кнауфа составляли: длина 150, ширина 78 и мощность 0.2 м [Третьяков, 1928]. Глубина залегания отработанных рудных тел обычно от 8 до 20 м, иногда достигала 50 и даже 65 м. Залегание рудных тел субгоризонтальное, реже слабо наклонное, стратиграфическая приуроченность отсутствует [Харитонов, 2011]. Рудные тела МП имеют ленто- и линзовидную форму (рис. 2). На месторождении Гребени в Оренбуржье (поисково-оценочные



Рис. 2. Выходы медистых песчаников в районе пос. Яровой Оренбургского района (фото И.А. Новикова, 2015 г.)

Fig. 2. The outcrops of copper sandstones near the village of Yarovoy of the Orenburg region (Ivan A. Novikov's photo, 2015)

работы завершены в 1973 г.) выделено рудное тело площадью около 10 км<sup>2</sup> со средним содержанием меди 1 % при средней мощности 0.38 м с запасами 103 тыс. т [Демина, 2002]. В большинстве рудников был открыт лишь один рудоносный слой, в некоторых встречено 2–3 [Третьяков, 1928], а на месторождении Гребени до 6 минерализованных слоев [Демина, 2002]. На рис. 2 видны морфологические особенности рудных тел Старо-Мясницкого месторождения Каргалинского рудного района Оренбургского Предуралья.

Изучение геолого-структурных особенностей залегания МП Оренбургского Предуралья показало отсутствие их отчетливой связи с конкретными стратиграфическими подразделениями перми [Лядский и др., 2013]. Так, на карте отмечены рудопроявления как вне-, так и внутри “рудноносных” пермских ярусов, что было подтверждено и нашими полевыми исследованиями. Некоторые слои, обогащенные органическим веществом, часто пространственно связаны (на что ранее не обращалось внимания) с определенными типами карбонатных пород – они выступают всего лишь благоприятной средой для рудного замещения. Если же формализовать картировочные признаки, то можно установить связь 97% известных рудопроявлений МП и точек минерализации с крыльями и апикальными частями соляно-купольных структур, осложненных разрывами и грабен-синклиналиями [Лядский и др., 2013]. Эта связь позволяет предположить существенно более молодой возраст медной минерализации.

### ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МЕДИСТЫХ ПЕСЧАНИКОВ

В 2016 г. в ходе полевых работ была собрана коллекция образцов руд и вмещающих пород из нескольких проявлений МП татарского яруса перми,

расположенных в районе пос. Яровой Оренбургского района (см. рис. 2).

По данным рентген-флуоресцентного анализа (табл. 1) в МП (6 проб с содержанием Cu > 0.3), SiO<sub>2</sub> варьирует от 35.21 до 75.76 (в среднем 55.84), CaO – 0.35–25.17 (ср. – 7.12), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 1.46–8.0 (5.46), MgO – 0.58–7.2 (4.68), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 1.51–4.67 (3.34), Na<sub>2</sub>O – 0.37–1.88 (1.23), K<sub>2</sub>O – 0.21–0.86 (0.61), TiO<sub>2</sub> – 0.15–0.55 (0.4), MnO – 0.03–0.48 (0.25), P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 0.06–0.08 (0.073) (все в мас. %). Сульфиды в изученных образцах МП практически отсутствуют (S<sub>общ</sub> < 0.02 мас. %).

Как видно из табл. 2, медистые песчаники содержат: Cu – 0.26–12.77% (в среднем 3.05%), Au – 0.1–0.48 г/т (в среднем 0.27 г/т), Ag (г/т) – 2.7–29.7 (8.47). Судя по представленным данным, МП Оренбургского Предуралья имеют сходный геохимический состав с месторождениями Ирана и Польши [Bechtel et al., 2002; Konari et al., 2013; Taylor et al., 2013; Hassanpour et al., 2015; Maghfouri et al., 2017; Radjabpour et al., 2017] и отличаются от МП Африканского Cu-пояса низкими содержаниями Co [Pettijohn et al., 1972].

На дискриминационных диаграммах (рис. 3) показатели МП Оренбургского Предуралья концентрируются в поле железистых песчаников и сланцев (см. рис. 3а) и образуют вытянутый тренд, пересекающий поля граувакков, литаренитов, субаркозов до кварцаренитов (см. рис. 3б). Однако наибольшее количество значений приурочено к полю литаренитов, как и на месторождениях Ирана и Польши.

Результаты анализа микроэлементов в МП и безрудных вмещающих породах представлены на рис. 4, они нормированы по средним значениям для верхней коры [Тейлор, Мак-Леннан, 1988]. Медистые песчаники характеризуются обогащением достаточно широким спектром микроэлементов (по мере уменьшения коэффициента обогащения): Cu,

**Таблица 1.** Силикатный состав медистых песчаников Оренбургского Предуралья (мас. %)

**Table 1.** Silicate composition of copper sandstones of the Orenburg Pre-Urals (wt %)

| Тип                 | Образец  | Компоненты       |                  |                                |                                |       |      |       |                   |                  |                               |                  | Σ     |        |
|---------------------|----------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-------|-------------------|------------------|-------------------------------|------------------|-------|--------|
|                     |          | SiO <sub>2</sub> | TiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MnO   | MgO  | CaO   | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | S <sub>общ</sub> |       | П.п.п. |
| Руда<br>(Cu > 0.2%) | OR-001/1 | 61.94            | 0.40             | 5.54                           | 3.03                           | 0.261 | 6.16 | 9.23  | 1.36              | 0.60             | 0.08                          | <0.02            | 10.46 | 99.06  |
|                     | OR-001/6 | 35.21            | 0.36             | 4.51                           | 2.44                           | 0.479 | 4.21 | 25.17 | 0.83              | 0.51             | 0.08                          | <0.02            | 23.96 | 97.76  |
|                     | OR-001/2 | 63.60            | 0.54             | 8.00                           | 4.67                           | 0.158 | 7.20 | 1.51  | 1.82              | 0.90             | 0.07                          | <0.02            | 7.16  | 95.63  |
|                     | OR-005   | 37.29            | 0.15             | 1.46                           | 1.51                           | 0.404 | 0.58 | 0.35  | 0.37              | 0.21             | 0.06                          | <0.02            | 10.03 | 52.41  |
|                     | OR-001/3 | 61.24            | 0.55             | 7.39                           | 4.10                           | 0.183 | 6.82 | 5.59  | 1.88              | 0.86             | 0.08                          | <0.02            | 8.54  | 97.23  |
|                     | OR-002/1 | 75.76            | 0.45             | 5.90                           | 4.29                           | 0.038 | 3.12 | 0.88  | 1.15              | 0.59             | 0.07                          | <0.02            | 5.01  | 97.26  |
| Вмещающие<br>породы | OR-004   | 53.40            | 0.83             | 9.35                           | 4.75                           | 0.123 | 2.49 | 12.85 | 2.40              | 1.08             | 0.14                          | <0.02            | 12.32 | 99.73  |
|                     | OR-003   | 16.98            | 0.31             | 2.96                           | 2.80                           | 0.645 | 2.67 | 40.53 | 0.40              | 0.38             | 0.16                          | 0.13             | 31.82 | 99.79  |
|                     | OR-007   | 58.52            | 0.03             | 0.51                           | 0.72                           | 0.042 | 7.60 | 14.23 | 0.10              | 0.07             | 0.03                          | 0.02             | 17.95 | 99.82  |
|                     | OR-006   | 3.16             | 0.08             | 1.05                           | 0.30                           | 0.452 | 0.84 | 52.37 | 0.11              | 0.13             | 0.08                          | 0.05             | 41.32 | 99.94  |

Примечание. Рентгенфлуоресцентный анализ, лаборатория ИГЕМ РАН (аналитик А.И. Якушев). П.п.п. – потери при прокаливании.

Note. X-ray fluorescence analysis, laboratory IGEM RAS (analyst A.I. Yakushev). П.п.п. – loss on ignition.

**Таблица 2.** Микроэлементы в медистых песчаниках Оренбургского Предураля (г/т)

**Table 2.** Trace elements of cupriferous sandstones of the Orenburg region (ppm)

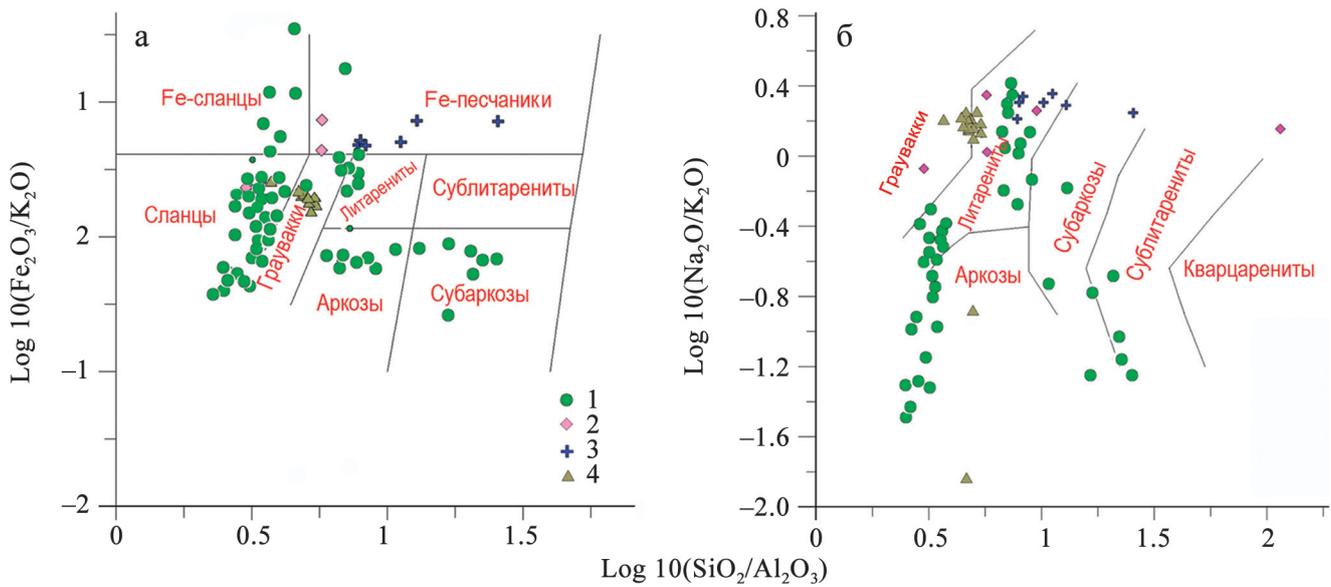
| Эле-<br>мент | Руда (Cu > 0.2%) |          |          |        |          |          | Вмещающие породы |        |        |        |        |         |
|--------------|------------------|----------|----------|--------|----------|----------|------------------|--------|--------|--------|--------|---------|
|              | OR-001/1         | OR-001/6 | OR-001/2 | OR-005 | OR-002/1 | OR-001/3 | С                | OR-003 | OR-007 | OR-004 | OR-006 | С       |
| Cu           | 2656             | 9975     | 19345    | 127757 | 12062    | 11169    | 30494            | 138    | 245    | 72     | 36     | 122.75  |
| Ag           | 8.0              | 4.3      | 4.9      | 0.21   | 29.7     | 3.7      | 8.47             | 0.53   | 2.7    | 0.47   | 0.47   | 1.04    |
| Au           | 0.1              | 0.29     | 0.48     | 0.24   | 0.22     | <ПО      | 0.27             | 0.18   | 0.25   | 0.24   | 0.17   | 0.21    |
| Pb           | 5.2              | 4.4      | 7.4      | 62     | 72       | 7.3      | 26.38            | 14     | 1.7    | 7.3    | 36     | 14.75   |
| Zn           | 43               | 38       | 66       | 18     | 47       | 54       | 44.33            | 37     | 10     | 37     | 5.9    | 22.47   |
| Cr           | 1576             | 748      | 620      | 96     | 1048     | 1191     | 879.83           | 441    | 294    | 323    | 11     | 267.25  |
| Ni           | 332              | 220      | 421      | 97     | 254      | 384      | 284.67           | 167    | 38     | 96     | 11     | 78      |
| Co           | 37               | 16       | 27       | 17     | 28       | 28       | 25.5             | 14     | 4.4    | 15     | 2.0    | 8.85    |
| Rb           | 19               | 19       | 32       | 11     | 23       | 28       | 22               | 14     | 1.0    | 34     | 5.2    | 13.55   |
| Sr           | 116              | 279      | 114      | 83     | 81       | 127      | 133.33           | 279    | 538    | 121    | 293    | 307.75  |
| Ba           | 201              | 188      | 295      | 680    | 127      | 210      | 283.5            | 96     | 144    | 344    | 44     | 157     |
| V            | 84               | 58       | 75       | 94     | 524      | 71       | 151              | 53     | 85     | 78     | 11     | 56.75   |
| Ta           | 0.32             | 0.35     | 0.34     | 0.13   | 0.49     | 0.34     | 0.33             | 0.32   | 0.028  | 0.39   | 0.13   | 0.22    |
| Zr           | 44               | 43       | 67       | 29     | 63       | 59       | 50.83            | 32     | 4.2    | 85     | 5.3    | 31.62   |
| Nb           | 2.8              | 3.2      | 4.4      | 1.9    | 5.7      | 4.1      | 3.68             | 3.1    | <ПО    | 5.0    | 1.1    | 3.07    |
| Mn           | 1918             | 3273     | 1074     | 3678   | 247      | 1261     | 1908.5           | 3835   | 294    | 861    | 2586   | 1894    |
| Hf           | 1.2              | 1.2      | 1.7      | 0.7    | 1.7      | 1.5      | 1.33             | 1.0    | 0.1    | 2.3    | 0.20   | 0.9     |
| Ti           | 2110             | 1744     | 2964     | 1050   | 2558     | 2940     | 2227.67          | 1420   | 82     | 4205   | 280    | 1496.75 |
| Be           | 0.44             | 0.42     | 0.61     | 0.29   | 0.81     | 0.71     | 0.55             | 0.37   | 0.16   | 0.84   | 0.13   | 0.37    |
| Li           | 17               | 15       | 28       | 6.0    | 15       | 30       | 18.5             | 12     | 8.0    | 17     | 3.8    | 10.2    |
| Sc           | 17               | 15       | 18       | 5.7    | 20       | 15       | 15.12            | 9.9    | 5.9    | 15     | 2.6    | 8.35    |
| Ga           | 11               | 9        | 17       | 20     | 11       | 13       | 13.5             | 5.7    | 5.1    | 17     | 2.0    | 7.45    |
| Y            | 12               | 32       | 13       | 8.1    | 10       | 12       | 14.52            | 17     | 1.2    | 19     | 3.8    | 10.25   |
| Cd           | 5.7              | 14.5     | 6.5      | 0.42   | 0.22     | 0.38     | 4.62             | 0.24   | 0.15   | 0.39   | 0.28   | 0.26    |
| Cs           | 0.77             | 1.0      | 1.5      | 0.52   | 1.2      | 1.2      | 1.03             | 0.67   | 0.12   | 1.2    | 0.36   | 0.59    |
| La           | 8.8              | 20       | 10       | 6.1    | 8.1      | 8.1      | 10.18            | 17     | 0.84   | 16     | 6.0    | 9.96    |
| Ce           | 18               | 32       | 26       | 11     | 18       | 18       | 20.5             | 42     | 1.9    | 25     | 13     | 20.47   |
| Pr           | 2.2              | 5.0      | 2.9      | 1.5    | 2.2      | 2.2      | 2.67             | 3.9    | 0.17   | 4.0    | 1.4    | 2.37    |
| Nd           | 9.0              | 21       | 12       | 5.5    | 8.3      | 9.0      | 10.8             | 16     | 0.67   | 16     | 5.2    | 9.47    |
| Sm           | 2.0              | 4.5      | 2.4      | 1.2    | 1.8      | 2.0      | 2.32             | 2.9    | 0.073  | 3.3    | 0.71   | 1.75    |
| Eu           | 0.52             | 1.2      | 0.67     | 0.26   | 0.42     | 0.53     | 0.6              | 0.76   | 0.013  | 0.88   | 0.18   | 0.46    |
| Gd           | 1.8              | 4.1      | 2.2      | 1.1    | 1.4      | 1.9      | 2.08             | 2.4    | 0.15   | 3.0    | 0.66   | 1.55    |
| Tb           | 0.30             | 0.76     | 0.37     | 0.19   | 0.26     | 0.32     | 0.37             | 0.38   | 0.010  | 0.52   | 0.10   | 0.25    |
| Dy           | 2.0              | 4.5      | 2.2      | 1.2    | 1.6      | 2.1      | 2.27             | 2.4    | 0.16   | 3.2    | 0.59   | 1.59    |
| Ho           | 0.40             | 0.95     | 0.43     | 0.22   | 0.33     | 0.41     | 0.46             | 0.51   | 0.032  | 0.64   | 0.13   | 0.33    |
| Er           | 1.2              | 2.7      | 1.4      | 0.71   | 1.0      | 1.2      | 1.37             | 1.4    | 0.088  | 2.0    | 0.32   | 0.95    |
| Tm           | 0.17             | 0.39     | 0.20     | 0.09   | 0.15     | 0.17     | 0.19             | 0.19   | 0.018  | 0.29   | 0.048  | 0.14    |
| Yb           | 1.1              | 2.6      | 1.4      | 0.58   | 1.1      | 1.2      | 1.33             | 1.3    | 0.094  | 1.8    | 0.31   | 0.88    |
| Lu           | 0.16             | 0.37     | 0.20     | 0.10   | 0.16     | 0.18     | 0.19             | 0.17   | 0.017  | 0.27   | 0.047  | 0.13    |
| Th           | 1.7              | 2.5      | 2.9      | 0.94   | 2.2      | 2.4      | 2.121            | 1.3    | <ПО    | 4.7    | 0.37   | 2.12    |
| U            | 8.4              | 5.6      | 7.4      | 21     | 2.6      | 4.8      | 8.3              | 1.2    | 22     | 1.1    | 1.9    | 6.55    |

Примечание. Метод плазменной масс-спектропии (ICP-MS), лаборатория ИГЕМ РАН, аналитик Я.В. Бычкова. ПО – предел обнаружения, С – среднее арифметическое.

Note. The method of plasma mass spectroscopy (ICP-MS), laboratory IGEM RAS, analyst Ya.V. Bychkova. ПО – detection limit, С – arithmetic mean.

Ag, Au, Cd, Cr, Ni, Mn, Co, V, U, Sc, Pb (см. рис. 4), по сравнению со средними значениями верхней коры [Тейлор, Мак-Леннан, 1988]. Коэффициенты обогащения варьируют в МП от нескольких раз (Mn, Co, V, U, Sc, Pb) – до десятков (Cd, Cr, Ni), сотен (Ag, Au) и тысяч (Cu) раз (см. рис. 4), что свидетельствует о геохимическом родстве микроэлементов и их синхронном участии в рудообразовании.

Рудовмещающие породы (Cu < 0.0003 мас. %) характеризуются незначительным обогащением (всего в несколько раз) узкого спектра микроэлементов (Cr, Cu, Ni, Mn, Cd, U) и заметным обогащением Au и Ag (десятки раз) (см. рис. 4). Следует отметить, что коэффициенты обогащения Au и Ag в безрудных породах незначительно уступают таковым в рудах. Величина отношения Co/Ni в изученных

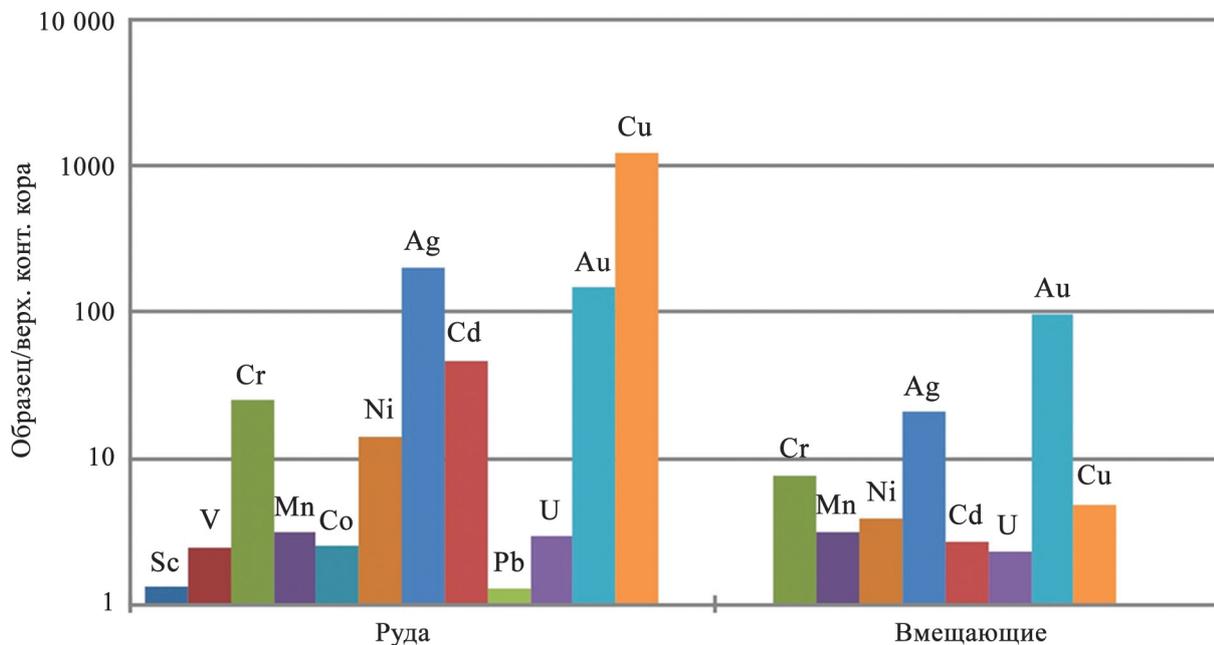


**Рис. 3.** Классификация проб медистых песчаников Оренбургского Предураля на основе дискриминационных диаграмм:  $\log_{10}(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ – $\log_{10}(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O})$  [Herron, 1988] (а) и  $\log_{10}(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ – $\log_{10}(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$  [Pettijohn et al., 1972] (б).

1 – медистые песчаники и сланцы Купершифера, 2 – песчаники (безрудные) Оренбургского Предураля, 3 – медистые песчаники Оренбургского Предураля, 4 – медистые песчаники месторождения ЧешмешКонан (Иран).

**Fig. 3.** Classification of copper sandstones samples of the Orenburg region on the basis of discriminatory diagram  $\log_{10}(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ – $\log_{10}(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O})$  [Herron, 1988] (a) and  $\log_{10}(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ – $\log_{10}(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$  [Pettijohn et al., 1972] (б).

1 – copper sandstones and shale's of the Kupferschiefer, 2 – sandstones (barren) of the Orenburg region, 3 – copper sandstones of the Orenburg region, 4 – copper sandstones Cheshmeh-Konan deposit (Iran).



**Рис. 4.** Распределение микроэлементов (средние значения), нормированных по верхней коре [Тейлор, Мак-Леннан, 1988], в пробах медистых песчаников и вмещающих пород Оренбургского Предураля.

**Fig. 4.** The distribution of trace elements (average values) upper crust normalized [Taylor, Mak-Lennan, 1988], in cupriferous sandstones and host rocks samples of the Orenburg Pre-Urals.

образцах МП (табл. 3) очень низкая (в среднем 0.1), что характерно для низкотемпературных гидротермальных флюидов метеорного происхождения [Kun et al., 2014].

Изучение распределения РЗЭ позволило установить, что в рудах, как и во вмещающих породах, преобладают легкие “гидрофильные” лантаноиды [Жариков и др., 1999] “цериевой” над “итриевой” и “скандиевой” группами (см. табл. 3) [Минеев, 1974]. Количество РЗЭ в рудах незначительно превышает их количество во вмещающих породах (см. табл. 3). Для руд и пород характерен близкий к хондритовому слабонаклонный спектр РЗЭ, конфигурация которого характеризуется отсутствием Еу-минимумов и максимумов (рис. 5). Спектры РЗЭ рудных проб и вмещающих пород по морфологии обладают явным сходством, что позволяет предполагать наследование РЗЭ рудами и, соответственно, накладывает ограничения на применение анализа распределения РЗЭ для реконструкции условий рудообразования.

Известно, что гидротермальные флюиды, содержащие Сl, эффективно концентрируют легкие РЗЭ, но бедны тяжелыми РЗЭ, в этом случае отношения Hf/Sm, Nb/La и Th/La в рудах, как правило, меньше 1. Флюиды, обогащенные F, синхронно концен-

трируют легкие и тяжелые РЗЭ – значения Hf/Sm, Nb/La и Th/La обычно больше 1 [Kun et al., 2014]. Медистые песчаники имеют значения Hf/Sm, Nb/La и Th/La значительно меньше 1 (см. табл. 3). Следовательно, рудообразующие флюиды принадлежали гидротермальной системе NaCl–H<sub>2</sub>O.

Возможность эффективного использования отношения Y/No для оценки происхождения рудообразующих флюидов показана ранее. Значения отношения Y/No (см. табл. 3) в изученных рудах варьируют от 28.61 до 36.3, что соответствует диапазону флюида, сформировавшегося при параметрах низкоградного регионального зеленокаменного метаморфизма вмещающих пород [Jones, Manning, 1994; Monecke et al., 2002]. Значение отношения Y/No составляет в среднем 31.17 (см. табл. 3), что характерно для современных гидротермальных флюидов задуговых бассейнов [Monecke et al., 2002]. Данный факт, по-видимому, отражает наследование рудным веществом литогеохимических характеристик обломочных пород, состав которых связан с поступавшим в Предуральский краевой прогиб материалом – продуктом разрушения доколлизийных островодужных и океанических комплексов.

Значения δCe и δEu варьируют от слабо отрицательных до умеренно положительных: δCe =

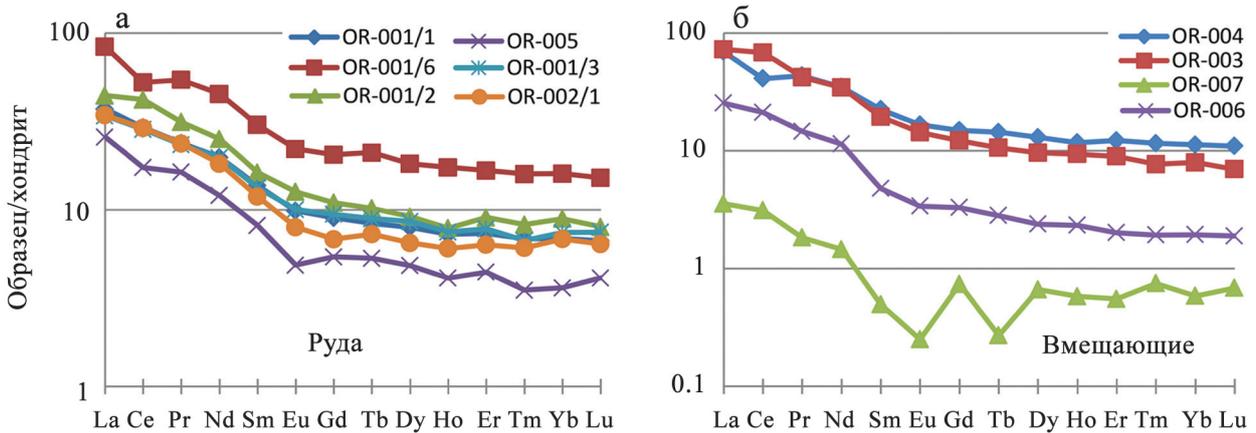
Таблица. 3. Геохимические индикаторные показатели медистых песчаников Оренбургского Предураля

Table. 3. Geochemical indicators of copper sandstones of the Orenburg region

| Образцы     | Руды (Cu > 0.2%) |          |          |        |          |          |         | Вмещающие породы |        |        |        |         |
|-------------|------------------|----------|----------|--------|----------|----------|---------|------------------|--------|--------|--------|---------|
|             | OR-001/1         | OR-001/6 | OR-001/2 | OR-005 | OR-001/3 | OR-002/1 | Среднее | OR-004           | OR-003 | OR-007 | OR-006 | Среднее |
| ∑REE        | 47.62            | 99.76    | 62.22    | 29.40  | 46.75    | 44.61    | 55.06   | 77.28            | 91.00  | 4.24   | 28.67  | 50.30   |
| ∑LREE       | 40.56            | 83.49    | 53.72    | 25.24  | 39.25    | 38.64    | 46.81   | 65.64            | 82.24  | 3.67   | 26.47  | 44.51   |
| ∑HREE       | 7.06             | 16.28    | 8.50     | 4.16   | 7.51     | 5.97     | 8.25    | 11.64            | 8.76   | 0.57   | 2.20   | 5.79    |
| ∑LREE/∑HREE | 5.75             | 5.13     | 6.32     | 6.06   | 5.23     | 6.47     | 5.83    | 5.64             | 9.39   | 6.45   | 12.03  | 8.38    |
| Hf/Sm       | 0.61             | 0.27     | 0.73     | 0.61   | 0.77     | 0.96     | 0.66    | 0.68             | 0.34   | 0.96   | 0.29   | 0.57    |
| Nb/La       | 0.32             | 0.16     | 0.42     | 0.31   | 0.51     | 0.70     | 0.40    | 0.31             | 0.18   | Н.о.   | 0.18   | 0.22    |
| Th/La       | 0.19             | 0.12     | 0.28     | 0.15   | 0.29     | 0.27     | 0.22    | 0.29             | 0.08   | Н.о.   | 0.06   | 0.14    |
| Y/No        | 29.25            | 33.45    | 29.96    | 36.30  | 28.61    | 29.42    | 31.17   | 29.28            | 32.82  | 36.40  | 29.97  | 32.12   |
| U/Th        | 4.92             | 2.26     | 2.55     | 22.60  | 2.04     | 1.19     | 5.93    | 0.24             | 0.88   | Н.о.   | 5.25   | 2.12    |
| Rb/Sr       | 0.16             | 0.07     | 0.28     | 0.13   | 0.22     | 0.28     | 0.19    | 0.28             | 0.05   | 0.00   | 0.02   | 0.09    |
| Sr/Ba       | 0.58             | 1.49     | 0.39     | 0.12   | 0.60     | 0.63     | 0.63    | 0.35             | 2.90   | 3.74   | 6.69   | 3.42    |
| Co/Ni       | 0.11             | 0.07     | 0.07     | 0.18   | 0.07     | 0.11     | 0.10    | 0.16             | 0.08   | 0.12   | 0.19   | 0.14    |
| Au/Ag       | 0.01             | 0.07     | 0.10     | Н.о.   | Н.о.     | 0.01     | 0.05    | 0.21             | 0.34   | 0.09   | 0.36   | 0.25    |
| δEu         | 0.88             | 0.87     | 0.93     | 0.76   | 0.89     | 0.84     | 0.86    | 0.89             | 0.93   | 0.70   | 0.88   | 0.85    |
| δCe         | 1.00             | 0.80     | 1.20     | 0.87   | 1.05     | 1.08     | 1.00    | 0.77             | 1.25   | 1.23   | 1.14   | 1.10    |
| LaN/YbN     | 5.40             | 5.24     | 4.98     | 7.16   | 4.58     | 5.03     | 5.40    | 6.16             | 9.12   | 6.07   | 13.11  | 8.62    |
| LaN/SmN     | 2.71             | 2.77     | 2.73     | 3.17   | 2.55     | 2.89     | 2.80    | 3.08             | 3.74   | 7.16   | 5.33   | 4.83    |
| GdN/YbN     | 1.31             | 1.28     | 1.23     | 1.50   | 1.27     | 1.00     | 1.27    | 1.33             | 1.53   | 1.26   | 1.70   | 1.45    |
| LaN/LuN     | 5.58             | 5.53     | 5.54     | 6.28   | 4.56     | 5.37     | 5.48    | 6.31             | 10.40  | 5.19   | 13.45  | 8.84    |
| ∑Ce         | 38.01            | 77.84    | 50.65    | 23.77  | 36.74    | 36.46    | 43.91   | 61.43            | 78.61  | 3.59   | 25.59  | 42.30   |
| ∑Y          | 7.00             | 15.92    | 8.30     | 4.15   | 7.22     | 5.73     | 8.05    | 11.53            | 9.32   | 0.44   | 2.36   | 5.91    |
| ∑Sc         | 2.45             | 5.62     | 3.07     | 1.39   | 2.62     | 2.27     | 2.90    | 4.03             | 2.89   | 0.20   | 0.68   | 1.95    |

Примечание. Н.о. – невозможно определить; δEu = Eu<sub>N</sub>/(Sm<sub>N</sub>\*(Tb<sub>N</sub>\*Eu<sub>N</sub>)<sup>1/2</sup>), δCe = Ce<sub>N</sub>/((2La<sub>N</sub> + Sm<sub>N</sub>)/3).

Note. Н.о. – impossible to determine; δEu = Eu<sub>N</sub>/(Sm<sub>N</sub>\*(Tb<sub>N</sub>\*Eu<sub>N</sub>)<sup>1/2</sup>), δCe = Ce<sub>N</sub>/((2La<sub>N</sub> + Sm<sub>N</sub>)/3).



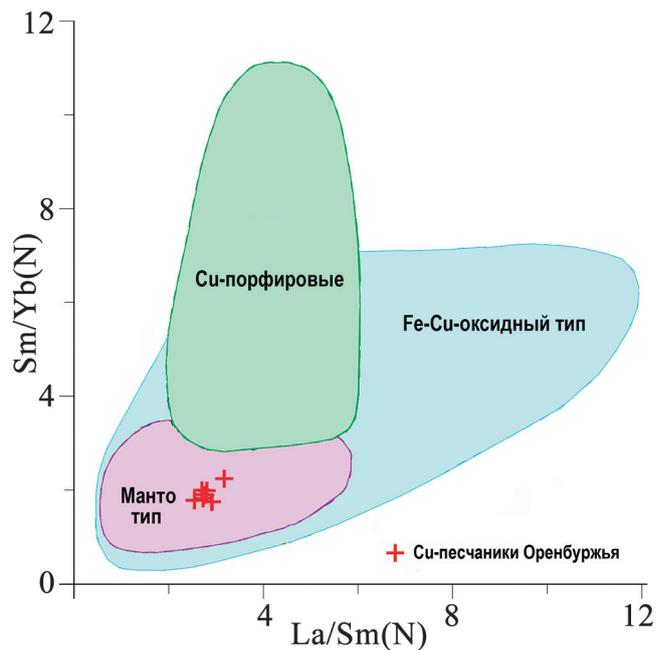
**Рис. 5.** Распределение РЗЭ, нормированных по хондриту [McDonough, Sun, 1995], в пробах медистых песчаников и вмещающих пород Оренбургского Предуралья.

**Fig. 5.** The chondrite normalized REE distribution [McDonough, Sun, 1995], in cupriferous sandstones and host rocks samples of the Orenburg region.

= 0.8–1.08 и  $\delta Eu = 0.76–0.93$  (см. табл. 3). Такое сочетание  $\delta Ce$  и  $\delta Eu$  указывает на окислительные условия, существовавшие при рудообразовании [Jones, Manning, 1994; Kun et al., 2014]. Последнее не противоречит наблюдаемой структурной и пространственной связи Cu-минерализации МП с разнообразными литохимическими восстановителями, так как по своим характеристикам относительно восстановленные (высветленные и сероцветные) разности рудоносных пород по соотношению  $Fe_2O_3/FeO$  также характеризуются высоким окислительным потенциалом [Мирошников, Козлов, 1966].

На диаграмме La/Sm–Sm/Yb (рис. 6) индикаторные показатели МП Оренбургского Предуралья отчетливо попадают в центр поля значений медных месторождений типа Манто (МТМ) [Figueroa-Cisterna et al., 2011], что свидетельствует о сходстве условий образования месторождений этих типов.

Богатые месторождения Cu типа Манто – уникальная особенность Андского пояса, как правило, они находятся в вулканических толщах юрского возраста, образующих пояс Ла Негро, в северной и центральной части Чили [Espinoza et al., 1996; Ramirez et al., 2006] на высоте около 1 тыс. м недалеко от берегового уступа Анд (рис. 7а). Типичные МТМ обычно представлены слоистыми или стратиформными рудными залежами (рис. 7б, 8), но иногда включают жилы, рудные брекчии, штокверки и др. [Vivallo, Henríquez, 1998]. Парагенезис первичных руд МТМ довольно простой и представлен, как и в МП Предуралья [Чайковский, 2006], халькозином, борнитом, халькопиритом, пиритом и гематитом. Руды, кроме того, содержат первые десятки г/т Ag. Примечательная особенность МТМ, как и в МП Предуралья, – практически полное

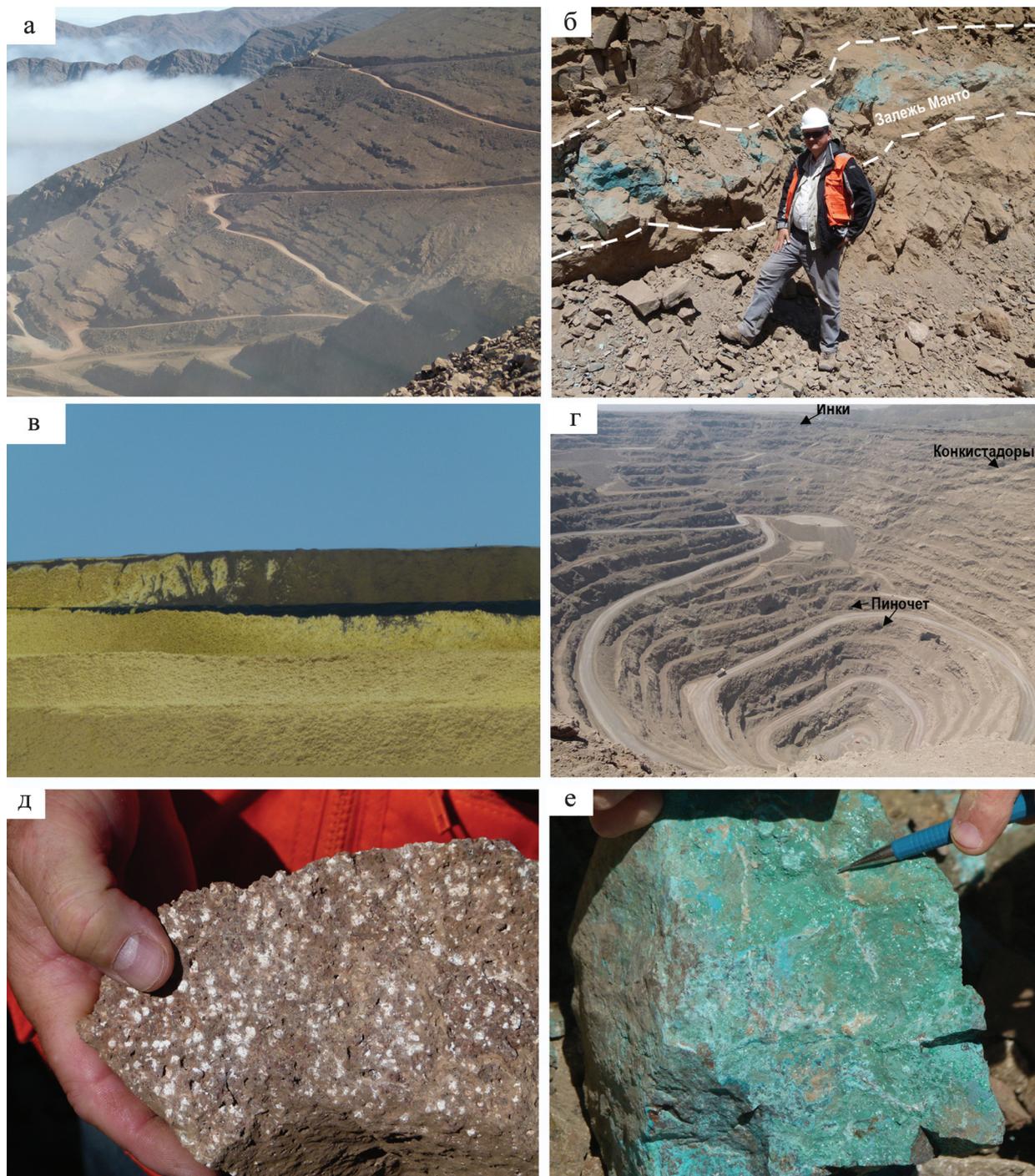


**Рис. 6.** Классификация проб медистых песчаников Оренбургского Предуралья (красные крестики) на диаграмме La/Sm–Sm/Yb (нормированных по хондриту [McDonough, Sun, 1995]).

Поля месторождений Cu типа Манто, Fe-Cu-оксидного типа, Cu-порфирового типа нанесены по [Figueroa-Cisterna et al., 2011].

**Fig. 6.** Classification the copper sandstones samples of the Orenburg’s region (red crosses) in the diagram of La/Sm–Sm/Yb (chondrite normalized [McDonough, Sun, 1995]).

The Manto type Cu deposits, Fe-Cu-oxide type, Cu-porphyry fields applied by [Figueroa-Cisterna et al., 2011].

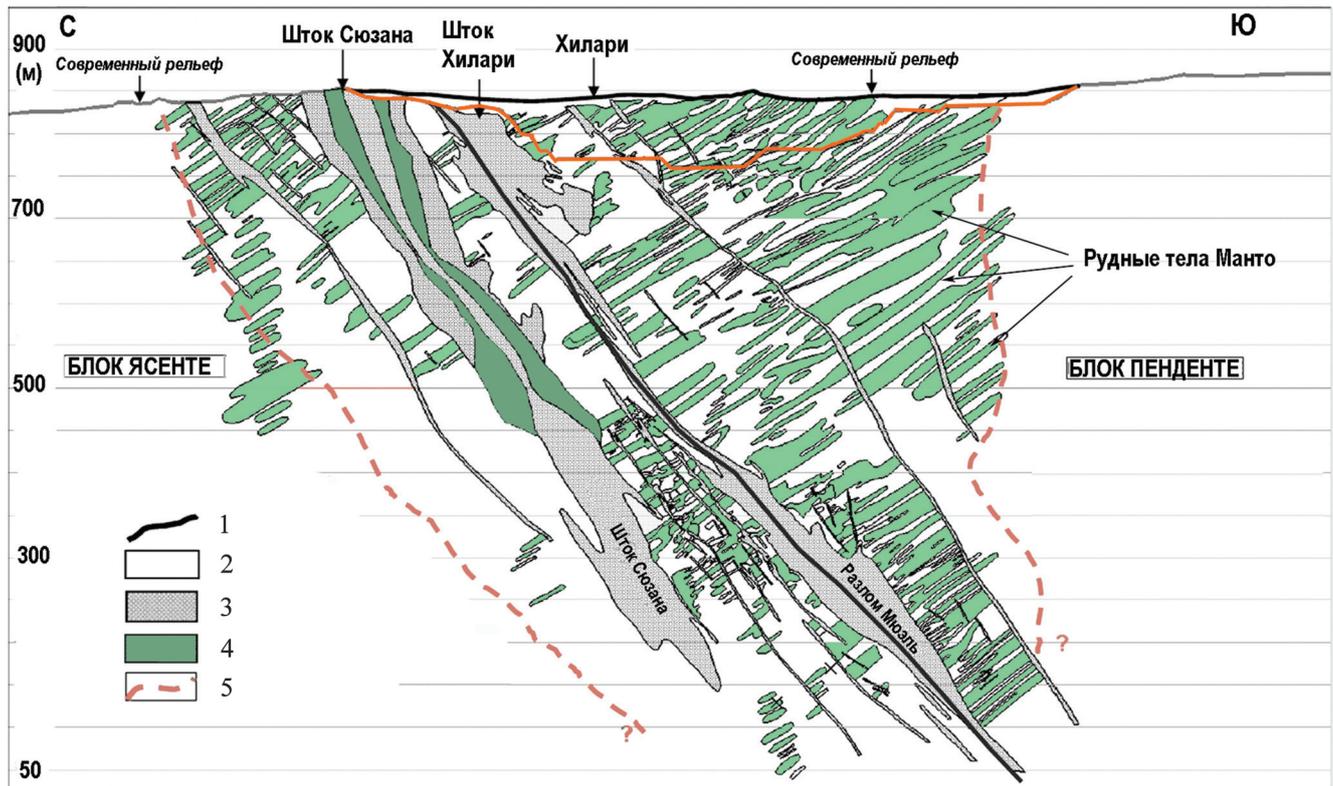


**Рис. 7.** Месторождения меди типа Манто в чилийских Андах (фото А.В. Волкова, 2011 г.).

а – вид в сторону Тихого океана (сплошная облачность) с края карьера месторождения Мантос де ла Луна; б – стратифицированная рудная залежь Манто в уступе карьера того же месторождения; в – вид на поле кучного выщелачивания рудника Мантос де ла Луна; г – карьер на месторождении ЛинсЕстефания; отмечены исторические горные выработки разных периодов, вскрытые уступами карьера на разной глубине; д – амигдалоиды в андезит-порфирах; е – хризакола и атакмит – главные минералы, слагающие залежь Манто (см. “б”).

**Fig. 7.** The Manto type Copper deposits in the Chilean Andes (A.V. Volkov's photo, 2011).

а – a view toward the Pacific ocean (overcast) from the edge of the deposit Mantos La Luna open pit; б – stratified Manto ore body in the open pit face of the same deposit; в – heap leaching field of Mantos La Luna mine; г – open pit of the LinsEstephanie deposit; selected historical mine workings are marked; д – amygdaloids of andesite-porphyrries; е – chrysacola and atacamite – the main minerals of the Manto body (see “б”).



**Рис. 8.** Морфология эшелона рудных тел типа Манто в разрезе месторождения ЛинсЕстефания, по данным компании “MineraMichilla”.

1 – разлом Мюэль, 2 – андезиты и брекчии, 3 – интрузивные породы, 4 – околоинтрузивная брекчия, 5 – бортовое содержание CuT 0.1 мас. %.

**Fig. 8.** The ore bodies of Manto type of the LinsEstefanie deposit, according to the “MineraMichilla” company.

1 – the Muel rift, 2 – andesites and breccias, 3 – intrusive rocks, 4 – near-intrusive breccia, 5 – host content 0.1 wt % CuT.

отсутствие в рудных телах кварца, в чем лично мог неоднократно убедиться один из авторов статьи в 2008 г. на ныне эксплуатирующихся месторождениях Мантос Бланко, Линс Естефания, Мантос де ла Луна и др. Минерализация замещает так называемые амигдолоиды в стратиформных лавовых потоках (рис. 7д), переслаивающихся с массивными вулканитами. Околорудные изменения представлены пропилитизацией. Минерализация типа Манто, как и в МП, отложилась в эпитермальном низкотемпературном диапазоне. На МТМ широко проявлены коры выветривания и зона вторичного обогащения руд (хризакола, атакомит, рис. 7е), которые в основном и обрабатываются методом кучного выщелачивания (см. рис. 7в). Запасы руды этих месторождений, содержащей 1–2 мас. % Cu, иногда составляют до 500 млн т (Мантос Бланко, Эль Солдато), но обычно они не превышают 1–10 млн т (Линс Естефания, Мантос де ла Луно и др.).

Сходство МП Предуралья с месторождениями типа Манто в Чили наблюдается и в истории их освоения. Как видно на рис. 7г, борта карьера место-

рождения Линс Естефания вскрыли на приповерхностных горизонтах горные выработки инкских времен, которыми обрабатывались руды зоны вторичного обогащения с содержанием Cu > 10 мас. % и Ag > 0.5 кг/т, ниже расположены штольни испанских конкистадоров, добывавших также богатые руды с содержанием Cu 5–7 мас. % и Ag > 300 г/т, еще ниже расположены штольни XIX в. (Cu = 3–5 мас. % и Ag > 100 г/т), затем штольни XX в. – времен Пиночета (Cu = 2–2.5 мас. % и Ag > 50 г/т), и, наконец, все перечисленные горизонты руд были вскрыты современным карьером (среднее содержание в руде Cu 1.0 мас. % и Ag > 20 г/т). Таким же образом можно проследить добычу Cu и на МП Предуралья. Вначале добычу Cu вели в бронзовом веке чудские племена, затем с XVIII по XX в. – российские и зарубежные заводчики, содержание Cu в разрабатываемых рудах с течением времени также неуклонно снижалось [Третьяков, 1928; Разумовский, 1929]. Но для карьерной отработки и кучного выщелачивания оставшихся залежей МП или их подземного скважинного выщелачивания время еще не наступило.

## ГЕОЛОГО-ГЕНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Присутствие в рудоносных разрезах определенных карбонатных пород (вторичных известняков – каличе), обладающих высокой реакционной способностью по отношению к фильтрующимся водам, может указывать на исходный кислый состав вод, транспортирующих рудное вещество. Нейтрализация вод, по-видимому, играет заметную роль для дальнейшего осаждения. Отмечены высокие содержания Si в известняках, полностью измененных осадочно-метасоматическими процессами, – силицитах (рис. 9а). Такая тотальная силицитизация кислыми водами с нисходящей фильтрацией подробно описана в [Новиков, 2011]. При этом ведущим необходимым компонентом для осаждения, безусловно, будут выступать восстановители – факелообразные ореолы осветления вокруг окаменевших древесных остатков (рис. 9б). Последнее согласуется с классическими схемами рудоотложения, за тем исключением, что восстановителями могли являться не только внутрипластовые скопления органического вещества, но и восходящие потоки метана и углекислоты от подстилающих нефтеносных пород. Наибольшую интенсивность эти флюидные потоки могли иметь в разрывных нарушениях, осложняющих купола. Именно в этих зонах закартировано большинство проявлений Si [Лядский и др., 2013]. Вариации состава восходящих потоков флюида полностью объясняют многообразие руд и позволяют рассматривать карбонатные и силикатные руды как первичные наряду с сульфидными рудами.

К настоящему времени известно множество фактов, подтверждающих эпигенетическую модель формирования МП Предураля. Условно их можно разделить на три категории: структурные, гео-

химические и минералогические. С представлениями о первично-осадочном и близком к нему происхождении не согласуются описываемые в ряде случаев секущие линейные зоны, обогащенные медью, а также жильные тела [Лядский и др., 2013], в том числе связанные с протрузиями углеводородов высокой вязкости [Овчинников, Пономарева, 2015]. При этом зональность МП, рассматриваемая в большинстве случаев как “замещение” компонентов осадочной породы разными минеральными ассоциациями, также носит секущий характер по отношению к осадочным пологозалегающим слоям. Это структурное противоречие зафиксировано на Государственной геологической карте, в объяснительной записке к которой говорится о связи руд с определенными пачками осадочных пород, а в структурном плане закартированы линейные секущие тела малой протяженности [Лядский и др., 2013].

Основная геохимическая проблема существующей модели первично-осадочного происхождения МП – транспортировка Si в бассейне осадконакопления от вероятных ее первичных источников [Миросников, Козлов, 1966]. Несмотря на оригинальные модели [Чайковский, 2006; Харитонов, 2011], перенос Si в растворимой или коллоидной форме в условиях суперэрируемого водоема с высокой активностью кислорода представляется проблематичным. Проблема, которую можно охарактеризовать как “минералогическую”, сводится к невозможности на большинстве проявлений отчетливо выделить “первичные” и “вторичные” минеральные ассоциации [Чайковский, 2006]. На большинстве объектов условная “первичная сульфидная” и “вторичные” ассоциации (карбонатов и окислов Si, и хризоколлы) оказываются в сложной структурной взаимосвязи и обнаруживают ча-

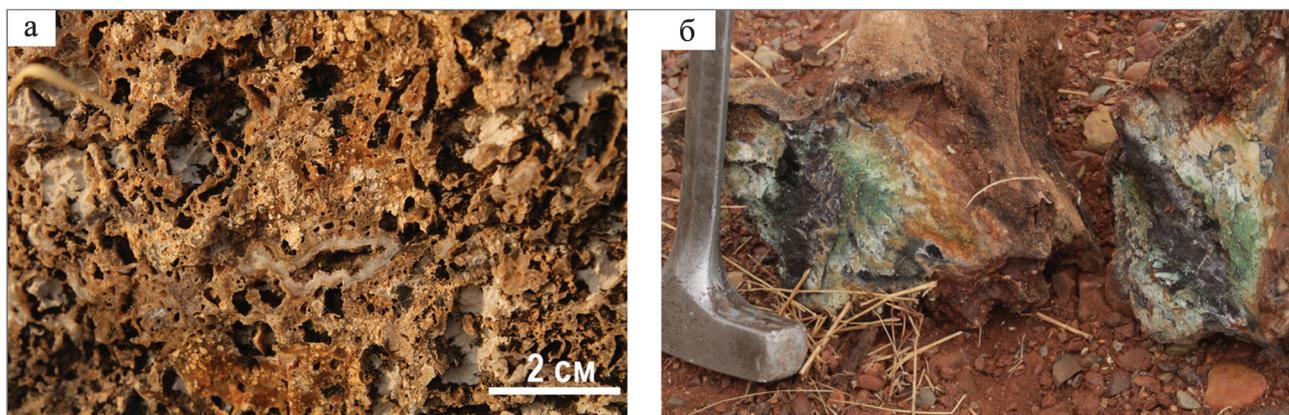


Рис. 9. Агатовидные силицитолиты (а) и минерализованные окаменевшие древесные остатки (б) в горизонтах медистых песчаников Оренбургского Предураля (фото И.А. Новикова, 2015 г.).

Fig. 9. The Agate similar siliceous rocks (a) and mineralized petrified wood remains (b) in the horizons of copper sandstones of the Orenburg area (I.A. Novikov's photo, 2015).

сто признаки одновременного образования [Чайковский, 2006].

Таким образом, МП – не осадочные руды, не эпигенетические в классическом понимании, а осадочно-метасоматические, образовавшиеся на фронте восстановления кислых вод, предварительно нейтрализованных карбонатными породами, с участием восстановителей, как внутрипластовых, так и фильтрующихся по разрывным нарушениям в восходящих потоках замыканий осложненных купольных структурах. При этом возраст Си-минерализации существенно моложе перми: они отлагались, когда уже был сформирован общий структурный план. Кислый состав рудоносных флюидов, осуществлявших транспорт рудных компонентов, и размещение рудопроявлений относительно мезозойских толщ позволяют предполагать юрский возраст руд.

Рассмотренные выше модельные построения не противоречат представлениям ряда исследователей [Демина, 2002; Демина, Тараборин, 2006] о связи формирования МП с развитием геолого-гидрогеологических систем покрова Приуральского осадочного бассейна, с эволюцией гидродинамики и гидрохимии позднефанерозойских водоносных комплексов в ходе проявления структурообразующих фаз позднепалеозойской, киммерийской и новейшей тектоники.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что медистые песчаники Предуралья отличаются от МП Африканского медного пояса низкими содержаниями Со.

По индикаторным геохимическим параметрам установлено сходство условий рудообразования МП Южного Предуралья с месторождениями типа Манто в Чили и Иране, а также с МП Ирана и глинистыми сланцами Купфершифера.

Показано, что вмещающая пермская толща могла служить источником РЗЭ и других микроэлементов для рудообразующих флюидов.

Полученные результаты подтверждают возможность применения конвекционной модели для объяснения генезиса МП Оренбургского Предуралья. В этом случае возраст Си минерализации может быть существенно моложе пермского.

Конвекционная модель указывает на многоэтажное развитие минерализации МП на глубину, как и на месторождениях типа Манто в Чили (см. рис. 9). Как и на последних, извлечение Си, Аг, Ау из медистых песчаников Предуралья возможно способом кучного выщелачивания [Халезов, 2011]. Следовательно, пермские МП Юго-Западного Предуралья могут рассматриваться как весьма перспективный новый источник Си, Аг и Ау сырья для развития горнодобывающей промышленности региона.

Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования подобных месторождений МП на Северо-Востоке России и в других регионах.

*Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН № 48 “Месторождения стратегических и высокотехнологичных металлов Российской Федерации: закономерности размещения, условия формирования, инновационные технологии прогноза и освоения”.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Демина Т.Я. (2002) Геолого-гидрогеологические системы и пластово-инфильтрационное рудообразование. Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 228 с.
- Демина Т.Я., Тараборин Г.В. (2006) Меденосность покровных формаций позднего фанерозоя в Приуральском осадочном бассейне. *Мат-лы науч. сессии ГИ УрО РАН*. Пермь, 83-85.
- Жариков В.А., Горбачев Н.С., Латфут П., Дохерти В. (1999) Распределение редкоземельных элементов и иттрия между флюидом и базальтовым расплавом при давлениях 1–12 кбар (по экспериментальным данным). *Докл. АН*, **366**(2), 239-241.
- Контарь Е.С. (2013) Геолого-промышленные типы месторождений меди, цинка, свинца на Урале (геологические условия размещения, история формирования, перспективы). Екатеринбург: УГГУ, 199 с.
- Лядский П.В., Кваснюк Л.Н., Жданов А.В., Чечулина О.В. (2013) Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Уральская. Лист М-40 (Оренбург) с клапаном М-41. Объяснительная записка. СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 392 с. + 1 вкл.
- Минеев Д.А. (1974) Лантаноиды в рудах редкоземельных и комплексных месторождений. М.: Наука, 237 с.
- Мирошников А.Е., Козлов Е.И. (1966) К характеристике верхнепермских красноцветных отложений восточной части Оренбургского Предуралья. *Литология и полез. ископаемые*, (2), 50-56.
- Новиков И.А. (2011) Батские коры выветривания Московской области. М.: Реал Тайм, 56 с.
- Овчинников В.В., Пономарева Г.А. (2015) К вопросу о генезисе Садкинского месторождения асфальтита. *Вестн. Оренбургского государственного университета*, **178**(3), 171-176.
- Разумовский Н.К. (1929) Запасы меди в медистых песчаниках и перспективы их использования. *Вестн. Геол. комитета*, **IV**(3), 3-10.
- Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. (1988) Континентальная кора: ее состав и эволюция. М.: Мир, 384 с.
- Третьяков Н.А. (1928) К вопросу о возрождении медной промышленности в Пермском районе пермских медистых песчаников. *Материалы по изучению Камского Приуралья. Вып. 1*. Пермь: Полиграфтрест, 3-15.
- Халезов А.Б. (2011) Перспективы и проблемы промышленного освоения месторождений меди верхнепермской красноцветной формации Западного Предуралья (способами подземного и кучного выщелачивания). *Руды и металлы*, (5), 5-14.

- Харитонов Т.В. (2011) Медеплавильные заводы Пермского края. Пермь: 43 с. <http://docplayer.ru/26586940-Medeplavilnye-zavody-permskogo-kraia.html>
- Чайковский И.И. (2006) Рудные минералы медистых песчаников пермского Прикамья. *Годичное собрание РМО. "Современные методы минералогическо-геохимических исследований как основа выявления новых типов руд и технологии их комплексного освоения"*. СПб.: СПГИ, 65-68.
- Bechtel A., Gratzner R., Püttmann W., Oszczepalski S. (2002) Geochemical characteristic across the oxic-anoxic interface within the Kupferschiefer of the Lubin-Sieroszowice mining district. *Chem. Geol.*, **185**(1-2), 9-31.
- Espinoza S., Véliz H., Esquivel J., Arias J., Moraga A. (1996) The cupriferous province of the Coastal Range, northern Chile. *Andean copper deposits: new discoveries mineralization styles and metallogeny* (Ed. F. Camus, R.H. Sillitoe, R. Petersen). *SEG Spec. Publ.*, (5), 19-32.
- Figueroa-Cisterna J., Morales-Ruano S., Moreno-Rodriguez V., Ruis-Cardenas M. (2011) Geology and preliminary REE and trace elements geochemistry of Boris Angelo Cu-(Ag) deposit, Central Chile. *II SGA Biennial Meeting*. Antofagasta, Chile: Springer, 241-243.
- Hassanpour S., Senemari S. (2015) Mineralogy and Geochemistry Studies of the Sorkheh Sediment-hosted Stratiform Copper (SSC) Deposit, NW Iran. *Iran. J. Earth Sci.*, (7), 89-105.
- Herron M.M. (1988) Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. *J. Sediment. Petrol.*, **58**, 820-829.
- Jones B., Manning D.A.C. (1994) Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones. *Chem. Geol.*, (111), 111-129.
- Konari M.B., Rastad E., Kojima S., Omran N.R. (2013) Volcanic redbed-type copper mineralization in the Lower Cretaceous volcano-sedimentary sequence of the Keshtmahaki deposit, southern Sanandaj-Sirjan Zone. *Iran. J. Min. Geochem.*, **190**(2), 107-121.
- Kun L., Ruidong Y., Wenyong Ch., Rui L., Ping T. (2014) Trace element and REE geochemistry of the Zhwang gold deposit, southeastern Guizhou Province, China. *Chin. J. Geochem.*, **33**, 109-118.
- McDonough W.F., Sun S. (1995) The composition of the Earth. *Chem. Geol.*, **120**, 223-253.
- Maghfouri S., Hosseinzadeh M.R., Moayyed M. et al. (2017) Geology, mineralization and sulfur isotopes geochemistry of the Mari Cu (Ag) Manto-type deposit, northern Zanjan, Iran. *Ore Geol. Rev.*, **81**, 10-22.
- Monecke T., Kempe U., Gotze J. (2002) Genetic significance of the trace element content in metamorphic and hydrothermal quartz: a reconnaissance study. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, **202**, 709-724.
- Pettijohn F.J., Potter P.E., Silver R. (1972) Sand and Sandstone. N. Y.: Springer, 618 p.
- Rajabpour S., Abedini A., Alipour S. Yon S. (2017) Geology and geochemistry of the sediment-hosted Cheshmeh-Konan redbed-type copper deposit, NW Iran. *Ore Geol. Rev.*, **86**, 154-171.
- Ramirez L.E., Palacios C., Townley B., Lehman B. (2006) The Mantos Blancos copper deposit: an upper Jurassic breccia-style hydrothermal system in the Coastal Range of Northern Chile. *Min. Depos.*, **41**, 246-258.
- Taylor C.D., Causey J.D., Denning P.D., Hammarstrom J.M., Hayes T.S., Horton J.D., Kirschbaum M.J., Parks H.L., Wilson A.B., Wintzer N.E., Zientek M.L. (2013) Descriptive Models, Grade-Tonnage Relations, and Databases for the Assessment of Sediment-Hosted Copper Deposits – With Emphasis on Deposits in the Central African Copperbelt, Democratic Republic of the Congo and Zambia. Scientific Investigations Report 2010–5090–J. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 154 p.
- Vivallo W., Henriquez F. (1998) Génesis común de los depósitos estratoligados y vetiformes de cobre del Jurásico Medio a Superior en la Cordillera de la Costa, Región de Antofagasta, Chile. *Revista Geológica de Chile*, **25**, 199-228.

## REFERENCES

- Bechtel A., Gratzner R., Püttmann W., Oszczepalski S. (2002) Geochemical characteristic across the oxic-anoxic interface within the Kupferschiefer of the Lubin-Sieroszowice mining district. *Chem. Geol.*, **185**(1-2), 9-31.
- Chaikovskii I.I. (2006) Ore minerals of copper sandstones of Perm-Kama region. *Godichnoe sobranie RMO "Sovremennye metody mineralogo-geokhimicheskikh issledovaniy kak osnova vyavleniya novykh tipov rud i tekhnologii ikh kompleksnogo osvoeniya"* [Annual meeting of the RMO "Modern methods of mineralogical-geochemical researches as a basis of identifying new types of ores and technologies of their complex development"]. St.Petersburg, SPGGI Publ., 65-68. (In Russian)
- Demina T.Ya. (2002) *Geologo-gidrogeologicheskie sistemy i plastovo-infil'tratsionnoe rudoobrazovanie* [Geological-hydrogeological systems and bed-infiltration ore formation]. Orenburg, IPK GOU OGU Publ., 228 p. (In Russian)
- Demina T.Ya., Taraborin G.V. (2006) Copper mineralization of late Phanerozoic cover formations in the Pre-Ural sedimentary basin. *Mat-ly nauch. ses. GI UrO RAN* [Materials of Science Session of Mining Institute, Ural Branch of RAS]. Perm, 83-85. (In Russian)
- Espinoza S., Véliz H., Esquivel J., Arias J., Moraga A. (1996) The cupriferous province of the Coastal Range, northern Chile. *Andean copper deposits: new discoveries mineralization styles and metallogeny* (Eds F. Camus, R.H. Sillitoe, R. Petersen). *SEG Spec. Publ.*, (5), 19-32.
- Figueroa-Cisterna J., Morales-Ruano S., Moreno-Rodriguez V., Ruis-Cardenas M. (2011) Geology and preliminary REE and trace elements geochemistry of Boris Angelo Cu-(Ag) deposit, Central Chile. *II SGA Biennial Meeting*, Antofagasta. Chile, Springer, 241-243.
- Hassanpour S., Senemari S. (2015) Mineralogy and Geochemistry Studies of the Sorkheh Sediment-hosted Stratiform Copper (SSC) Deposit, NW Iran. *Iran. J. Earth Sci.*, (7), 89-105.
- Herron M.M. (1988) Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. *J. Sediment. Petrol.*, **58**, 820-829.
- Jones B., Manning D.A.C. (1994) Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones. *Chem. Geol.*, (111), 111-129.
- Khalezov A. B. (2011) Prospects and problems of industrial development of the copper deposits of the Upper

- Permian red formation, Western Pre-Urals (by means of underground and heap leaching). *Ores and Met.*, (5), 5-14. (In Russian)
- Kharitonov V.T. (2011) *Medeplavil'nye zavody Permskogo kraya* [Copper-Smelting factories in Perm region]. Perm, 43 p. (In Russian) <http://docplayer.ru/26586940-Medeplavilnye-zavody-permskogo-kraya.html>
- Konari M.B., Rastad E., Kojima S., Omran N.R. (2013) Volcanic redbed-type copper mineralization in the Lower Cretaceous volcano-sedimentary sequence of the Keshtmahaki deposit, southern Sanandaj-Sirjan Zone. *Iran. J. Min. Geochem.*, **190**(2), 107-121.
- Kontar' E.S. (2013) *Geologo-promyshlennyye tipy mestorozhdenii medi, tsinka, svintsya na Urale (geologicheskie usloviya razmeshcheniya, istoriya formirovaniya, perspektivy)* [Geological and industrial types of deposits of copper, zinc, lead in the Urals (geological conditions of localization, history of formation, prospects)]. Ekaterinburg, UGGU Publ., 199 p. (In Russian)
- Kun L., Ruidong Y., Wenyong Ch., Rui L., Ping T. (2014) Trace element and REE geochemistry of the Zhewang gold deposit, southeastern Guizhou Province, China. *Chin. J. Geochem.*, **33**, 109-118.
- Lyadskii P.V., Kvasnyuk L.N., Zhdanov A.V., Chechulina O.V. (2013) *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Masshtab 1 : 1 000 000 (tret'e pokolenie). Seriya Ural'skaya. List M-40 (Orenburg) s klapanom M-41. Ob'yasnitel'naya zapiska* [State geological map of Russian Federation. The scale of 1 : 1.000.000 (third generation). A Series of The Ural. Sheet M-40 (Orenburg) with valve M-41. An explanatory note]. St.Petersburg, Kartograficheskaya fabrika VSEGEI Publ., 392 p. (In Russian)
- Maghfouri S., Hosseinzadeh M.R., Moayyed M. et al. (2017) Geology, mineralization and sulfur isotopes geochemistry of the Mari Cu (Ag) Manto-type deposit, northern Zanjan, Iran. *Ore Geol. Rev.*, **81**, 10-22.
- McDonough W.F., Sun S. (1995) The composition of the Earth. *Chem. Geol.*, **120**, 223-253.
- Mineev D.A. (1974) *Lantanoidy v rudakh redkozemel'nykh i kompleksnykh mestorozhdenii* [Lanthanides in ores of rare-earth and complex deposits]. Moscow, Nauka Publ., 237 p. (In Russian)
- Miroshnikov A.E., Kozlov E.I. (1966) To the characterization of the Upper Permian red beds deposits of the Eastern part of the Orenburg Urals. *Litol. Polezn. Iskop.*, (2), 50-56. (In Russian)
- Monecke T., Kempe U., Gotze J. (2002) Genetic significance of the trace element content in metamorphic and hydrothermal quartz: a reconnaissance study. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, (202), 709-724.
- Novikov I.A. (2011) *Batskie kory vyvetrivaniya Moskovskoi oblasti* [Bathonian weathering crusts of the Moscow region]. Moscow, Real Taim Publ., 56 p. (In Russian)
- Ovchinnikov V.V., Ponomareva G.A. (2015) On the question of the Genesis Sadkinsky deposits of asphaltite. *Vestn. Orenburg St. Univ.*, **178**(3), 171-176. (In Russian)
- Pettijohn F.J., Potter P.E., Silver R. (1972) *Sand and Sandstone*. N. Y.: Springer, 618 p.
- Rajabpour S., Abedini A., Alipour S., Yon S. (2017) Geology and geochemistry of the sediment-hosted Cheshmeh-Konan redbed-type copper deposit, NW Iran. *Ore Geol. Rev.*, **86**, 154-171.
- Ramirez L.E., Palacios C., Townley B., Lehman B. (2006) The Mantos Blancos copper deposit: an upper Jurassic breccia-style hydrothermal system in the Coastal Range of Northern Chile. *Min. Depos.*, **41**, 246-258.
- Razumovsky N.K. (1929) The Stocks of copper in cuprous sandstones and prospects of their use. *Vestn. Geol. Komiteta*, **IV**(3), 3-10. (In Russian)
- Taylor C.D., Causey J.D., Denning P.D., Hammarstrom J.M., Hayes T.S., Horton J.D., Kirschbaum M.J., Parks H.L., Wilson A.B., Wintzer N.E., Zientek M.L. (2013) *Descriptive Models, Grade-Tonnage Relations, and Databases for the Assessment of Sediment-Hosted Copper Deposits – With Emphasis on Deposits in the Central African Copper belt, Democratic Republic of the Congo and Zambia*. Scientific Investigations Report 2010–5090–J. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 154 p.
- Taylor S.R., Mak-Lennan S.M. (1988) *Kontinental'naya kora: ee sostav i evolyutsiya* [Continental crust: Their composition and evolution]. Moscow, Mir Publ., 384 p. (In Russian)
- Tret'yakov H.A. (1928) To the question of the revival of the copper industry in the Perm district of the Perm copper sandstones. *Materialy po izucheniyu Kamskogo Priural'ya. Vyp. 1* [Materials for the study of the Kama Urals. Iss. 1]. Perm Poligrafrest Publ., 3-15. (In Russian)
- Vivallo W., Henríquez F. (1998) Génesis común de los depósitos estratoligados y vetiformes de cobre del Jurásico Medio a Superior en la Cordillera de la Costa, Región de Antofagasta, Chile. *Revista Geológica de Chile*, **25**, 199-228.
- Zharikov V.A., Gorbachev N.S., Latfutt P., Doherti B. (1999) Distribution of rare earth elements and yttrium between the fluid and basaltic melt at pressures of 1–12 kbar (by experimental data). *Dokl. Akad. Nauk*, **366**(2), 239-241. (In Russian)