

УДК 553.062

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ МЕТАЛЛОГЕНИЯ АРХЕЙСКОГО И ПРОТЕРОЗОЙСКОГО ЭТАПОВ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ ЗЕМЛИ

**С. И. Турченко**

*Институт геологии и геохронологии докембрия РАН (наб. Макарова, 2,  
Санкт-Петербург, Россия, 199034)*

Рассматривается глобальная металлогения в период двух ранних этапов развития Земли как геологического тела – архейского и протерозойского, причем возрастное завершение последнего осуществлялось при существенном геодинамическом изменении ее поведения в Северном и Южном полушариях. Наиболее ранний возраст этап эволюции Земли – хадей представляет собой эпоху догеологической истории Земли от периода планетной аккреции  $T_0 = 4,5$  до 3,85 млрд лет и включает этапы: последней стадии аккреции Земли, образования протоядра, примитивной мантии и первичной мафитовой протокоры, а также время тяжелой метеоритной бомбардировки, когда большая часть первичной протокоры была разрушена. Распределение примитивной мантии и первичной мафитовой протокоры на поверхности Земли при ее аккреции было весьма неравномерным, что сказалось в последующем на формировании вещественных неоднородностей.

Ключевые слова: металлогения Земли; ранний и поздний докембрий; геодинамика

Для цитирования: Турченко С. И. Сравнительная металлогения архейского и протерозойского этапов геологической эволюции Земли // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 156–159. doi: 10.17076/geo1691

### **S. I. Turchenko. COMPARATIVE METALLOGENY OF THE ARCHEAN AND PROTEROZOIC STAGES IN THE GEOLOGICAL EVOLUTION OF THE EARTH**

*Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences  
(2 Nab. Makarova, 199034 St. Petersburg, Russia)*

The paper examines the global metallogeny during two early stages in the development of the Earth as a geological body – the Archean and the Proterozoic, the late phase of the latter happening during a significant geodynamic alteration of its behavior in the Northern and Southern hemispheres. The earliest stage in the Earth's evolution is the Hadean, which is a subdivision in the pre-geological epoch of the Earth's history starting from the period of planetary accretion  $T_0 = 4.5$  to 3.85 Ga, which included: last stages of accretion, formation of the protocore, primitive mantle and primary mafic protocrust, and the time of heavy meteorite bombardment, which destroyed a major part of the initial crust. The distribution of the primitive mantle and mafic protocrust on

the Earth's surface was rather uneven, resulting in subsequent formation of compositional inhomogeneities.

**Keywords:** metallogeny of the Earth; Early and Late Precambrian; geodynamics

For citation: Turchenko S. I. Comparative metallogeny of the Archean and Proterozoic stages in the geological evolution of the Earth. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:156–159. doi: 10.17076/geo1691

Палеоархейская эра, как ранняя часть архейской эры, с которой, собственно, и начался докембрийский этап геологического развития Земли [Snyder et al., 2000], характеризовалась набором полезных ископаемых, которые являются более типичными для неоархейско-палеопротерозойской эры. Некоторые типы месторождений в палеоархее отличаются структурно-тектоническим положением от более молодых аналогов. Например, несмотря на сходство состава флюидов и механизмов рудообразования, палеоархейские месторождения золота и колчеданных руд Cu, Zn, Pb формировались в тектонических обстановках, отличных от обстановок линейного орогенеза, характерных для более молодых докембрийских месторождений.

Ранний рост земной коры произошел в результате действия серии мантийных плюмов, вызывавших выплавление мафических базальтов, которые сформировали подобия океанических плато. Ранние плюмы инициировали коровый рост в виде изометричных структур, а не поясов, характерных для плит-тектоники. Периодическое развитие вулканических комплексов в палеобассейнах на мафит-ультрамафитовом плюмовом плато создавало идеальные условия для формирования поколения вулканогенных массивных сульфидных (колчеданных) месторождений. Такого рода объекты являлись материнским источником мафит-ультрамафитовых пород – носителей никелевого и платиноидного оруденения независимо от возраста (от палеоархей до протерозоя). Однако из-за дефицита серы в таких древнейших отложениях сульфидные никелевые и платинометалльные месторождения неизвестны, выявлены лишь небольшие месторождения (например, Шангани в Южной Африке) и рудопроявления в коматиитах с возрастом  $3526 \pm 48$  и  $\epsilon Nd +0,7$  из низов группы Онвервахт зеленокаменного пояса Барбертон в Каапваальском кратоне Южной Африки. Для мафит-ультрамафитовых пород мантийного происхождения мезо- и неоархейского возраста (3,4–2,6 млрд лет) установлены сульфидные Ni-PGE месторождения в коматиитах и телах коматиитовых перидотитов, известные

лишь в кратоне Йилгарн Западной Австралии (рудный район Камбалда), в других кратонах мира – только рудопроявления, и все они составляют ранний этап формирования Ni-PGE месторождений. Более поздними (около 2450 млн лет) Ni-PGE месторождениями являются палеопротерозойские рифтогенные месторождения Фенноскандинавского щита (Мончегорское и Федорово-Панских Тундр в России и Пенникат-Портимо в Финляндии).

Возможно, самым значительным металлогеническим отличием палеоархей от мезо-неоархей и протерозоя были обстановки, в которых развивались золоторудные месторождения. Жильные золоторудные месторождения (Iode deposits) на протяжении мезоархей-палеопротерозоя (3200–1600 млн лет) были связаны с линейными, масштаба земной коры, сдвиговыми зонами. В противоположность этому жильные золоторудные месторождения, сформированные до 3200 млн лет, были связаны с крупными кольцевыми разломами, вдоль которых концентрировались гранитные комплексы, такие как месторождения Бамбу Крик в кратоне Пилбара или месторождения Витватерсранд в кратоне Каапваал, образованные в обстановках корового растяжения.

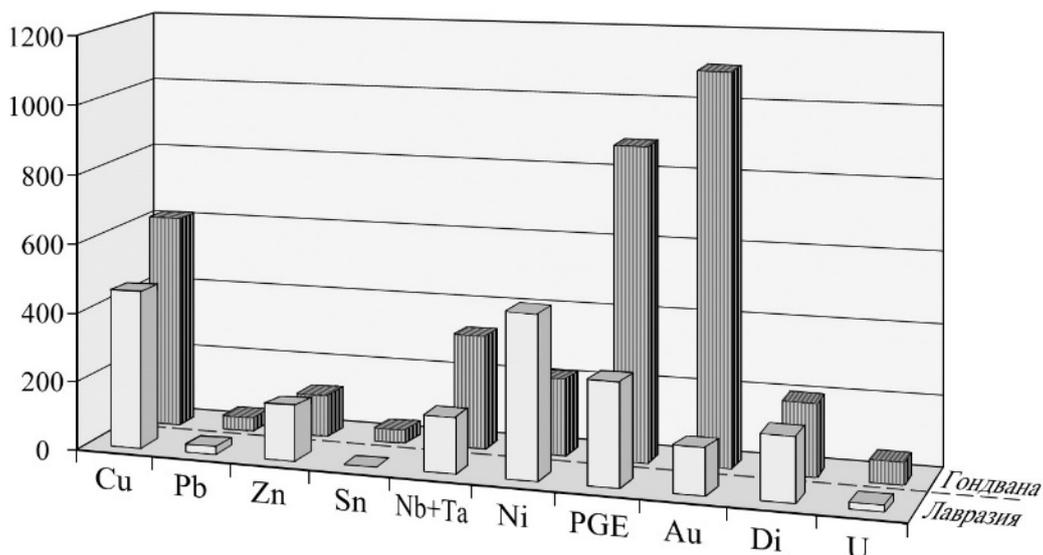
Периодические плавления литосферной мантии во время последовательных плюм-событий производили все более эволюционированные расплавы [Smithies et al., 2005], которые были перспективными для накопления литофильных элементов, типичных для редкометалльных месторождений, например, Ta- и Sn-пегматитовые месторождения в кратоне Пилбара. Первые граниты А-типа, с которыми связаны подобные месторождения, появляются лишь в неоархее (~2,8 млрд лет), и далее они прослеживаются на протяжении всей геологической истории развития Земли. Однако расцвет этого магматизма в докембрии приходится на интервал времени ~ 2,0–1,0 млрд лет. С этого времени начинается новая стадия мантийной динамики, определившей начало нового плюм-суперконтинентального цикла. Главными типами месторождений, среди которых встречаются крупные и уникальные объекты,

являются редкометалльные и Sn-редкометалльные, Cu-U-Au-REE, Fe-Ti-апатитовые и U месторождения типа «несогласий». Установлено, что большая часть крупных месторождений такого рода сформировались в два основных эпизода – 1,85–1,70 и 1,30–1,00 млрд лет, и практически все они были связаны с активностью мантийных плюмов. Эти минеральные системы образовались во внутриплитных или дуговых рифтовых тектонических условиях. К таким условиям принадлежит также формирование железорудных месторождений железистой формации в Южной Африке группы Трансвааль и бассейна Хамерсли в Австралии, а также, возможно, месторождения Кривого Рога на Украине и Костомукши, Оленегорска в Карело-Кольском регионе Фенноскандинавского щита.

Минеральные системы, связанные с анорогеном магматизмом палеопротерозоя, охватывают широкий круг магмато-гидротермальных месторождений, из которых экономически наиболее важными являются Fe-окисные-Cu-Au месторождения, такие как мирового класса месторождение Олимпик Дэм в Южной Австралии. В этой же группе находятся Pb-Zn-Ag месторождения (МакАртур, Маунт-Айза и Брокен-Хилл) с возрастом около 1700 и 1500 млн лет и Cu-Au-W месторождения (ороген Каприкорн). В щелочно-ультраосновных породах возраста 1100 и 800 млн лет, в том числе и карбонатитах

и лампроитах, были установлены месторождения алмазов, как в лампроитовых трубках Аргайл, с возрастом 1180 млн лет.

U-Pb изотопные возрасты по циркону, вместе с Nd изотопными данными, показывают значительный рост континентальной коры начиная с 1,9 млрд лет. С этим ростом коры был связан этап образования ювенильной коры в палеопротерозое. Этот пик формирования континентальной коры и, соответственно, образования континентов являлся также пиком глобального проявления металлогении. Один из последних этапов прироста коры периода 2,1–1,6 млрд лет отвечал росту суперконтинента Родиния и дальнейшему в период 1,4–0,6 млрд лет его распаду и росту протоматериков Гондвана и Лавразия. Неоднородность литосферы, существенно оформленная к конечному докембрийскому этапу геологического развития Земли, отражалась в неоднородном характере распределения месторождений в этих позднедокембрийских континентах, составляющих их минерально-сырьевой потенциал (рис.). Структурно-тектоническое развитие докембрийского протоматерика Лавразия (состоящего из фундаментов Восточно-Европейской, Восточно-Сибирской и Северо-Американской платформ) происходило по платформенному сценарию, поэтому не было и активного проявления металлогенических следствий, а отсюда и проявления разнообразных рудообразующих процессов.



Сравнительная диаграмма потенциальной ценности минеральных ресурсов протоматериков Лавразии и Гондваны [Красный, 2000; Турченко, 2022].

Di – алмазы

Comparative diagram of the potential value of the mineral resources in the Lavrasia and Gondvana proto-mainlands [Krasny, 2000; Turchenko, 2022].

Di – diamonds

В южной гемисфере Земли дело обстояло сложнее, поскольку мезо-неопротерозойская эра не заканчивалась на протоматериках Гондванской группы формированием платформенных структур, а в них продолжали развиваться позднепротерозойские орогенические зоны (1600–900 млн лет) и пояса тектоно-термальной переработки древних структур возраста около 1100 млн лет. Тектонофизическое объяснение этому различию лежит в глобально-планетарном явлении – устойчивом проявлении 23,4-градусного наклона оси вращения Земли и ее периодической прецессии на 1–1,5 градуса, возникших именно к этому периоду жизни Земли. Из-за этого более тяжелые ядерно-мантийные массы оболочек Земли сместились в сторону Южного полушария, проявив тем самым продолжение тектонофизической активности плюмовой и астеносферной природы орогенических структур позднего протерозоя в этой части планеты.

Период от 900 до 600 млн лет в Южном полушарии Земли оказался, так же как и в Северном, не очень продуктивным на проявление рудных месторождений, так как заключительный этап докембрийского геологического развития Земли и здесь от активных тектонических процессов сменился погружением континентов, которое было связано, возможно, с воздыманием океанических хребтов, т. е. началом нового этапа жизни Земли. Этот этап (фанерозойский) выразился в активном перемещении тектонических плит (активном проявлении

плейт-тектоники), созидании частых орогенических циклов и в формировании разнообразия рудообразующих процессов, достигнувших беспрецедентно высокого уровня.

## Литература

*Красный Л. И.* (ред.) Геолого-минерогеническая карта мира. Объяснительная записка. Ч. 2. Минерально-сырьевые ресурсы континентов и активных транзиталей. СПб.: ВСЕГЕИ, 2000. 34 с.

*Турченко С. И.* Металлогения и тектоническая эволюция протоматериков Лавразия и Гондвана в докембрии // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 2. С. 5–32. doi: 10.17076/geo1522

*Snyder G. A., Borg L. E., Nyquist L. E., Taylor L. A.* Chronology and isotopic constrains on Lunar evolution // *The origin of the Earth and Moon*. Univ. of Ariz. Press, 2000. P. 361–395.

## References

*Krasnyi L. I. (ed.)*. Geologic-mineragenic World map. Explanatory letters. Pt. 2. Mineral resources of continents and active transitailes. St. Petersburg: VSEGEI; 2000. 34 p. (In Russ.)

*Snyder G. A., Borg L. E., Nyquist L. E., Taylor L. A.* Chronology and isotopic constrains on Lunar evolution. *The origin of the Earth and Moon*. Univ. of Ariz. Press; 2000. P. 361–395.

*Turchenko S. I.* Precambrian metallogeny and tectonic development of the Earth's protocontinents Laurasia and Gondwana. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;2:5–32. doi: 10.17076/geo1522 (In Russ.)

*Поступила в редакцию / received: 22.08.2022; принята к публикации / accepted: 24.08.2022.  
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.*

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

**Турченко Станислав Иванович**

д-р геол.-мин. наук, член-корр. РАН, главный научный сотрудник

*e-mail: turchsi@mail.ru*

## CONTRIBUTOR:

**Turchenko, Stanislav**

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Russian Academy of Natural Sciences  
Corr. Academician, Chief Researcher