

УДК 553.21

## МЕТАЛЛОГЕНИЯ ДОКЕМБРИЙСКОГО ЭТАПА ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ЗЕМЛИ

**С. И. Турченко**

*Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия*

Работа рассматривает формирование рудных месторождений и их глобальное размещение в докембрийских тектонических структурах Земли (металлогению). Рудоносные структуры развивались последовательно от плюм-тектонического палеоархей-палеопротерозойского (3,6–2,2 млрд лет) анорогенного типа в рифтогенных структурах до преимущественно плейт-тектонического синорогенного типа в аккреционных и коллизионных структурах палео-неопротерозоя (2,2–0,6 млрд лет). Показана смена генетических типов месторождений во времени. Объяснено различие в формировании месторождений на континентах гондванской и лавразийской групп, вызванное различием геодинамического развития северной и южной гемисфер Земли в неопротерозое. Работа представляет интерес для геологов – специалистов по рудным месторождениям, а также для студентов образовательных учреждений геологической направленности.

**Ключевые слова:** металлогения; рудообразование; архей; протерозой; рудоносные структуры.

### **S. I. Turchenko. METALLOGENY DURING THE PRECAMBRIAN STAGE IN GEOLOGICAL EVOLUTION OF THE EARTH**

The article explores the genesis of ore deposits and their global distribution in Precambrian tectonic structures of the Earth (metallogeology). Ore-bearing structures developed successively from the plume-tectonic Paleoproterozoic (3.6–2.2 Ga) anorogenic type in riftogenic structures to the mostly plate-tectonic synorogenic type in Paleoproterozoic (2.2–0.6 Ga) accretion and collision structures. Special attention is given to the difference in the genesis of deposits between the Northern and the Southern hemispheres due to geodynamic differences. The article is of interest for geologists specializing in ore deposits, and for geology students.

**Keywords:** metallogeny; ore genesis; Archean; Proterozoic; ore-bearing structures.

### **Введение**

Наиболее ранняя эра геологической жизни планеты Земля – эоархей (4,1–3,6 млрд лет по: [Gradstein et al., 2005]) представляла собой временное подразделение эпохи догеологического существования планеты от периода

планетной аккреции  $T_0 = 4,567$  до 3,8 млрд лет, куда входят этапы: стадии аккреции планеты, образования ее протоядра, примитивной мантии и первичной мафитовой протокоры, а также время тяжелой метеоритной бомбардировки, когда большая часть первичной протокоры была разрушена. Мантия образовалась

при дифференциации метеоритного вещества после его аккреции из Солнечной небулы. Доступные химические, изотопные и астрономические свидетельства подтверждают, что материалы, которые наблюдаются как метеориты, изначально являлись фрагментами астероидов, разместившихся на орбите между Юпитером и Марсом. Метеориты имеют максимально древний возраст –  $4567,1 \pm 0,16$  млн лет [Amelin et al., 2006] и Fe-Mg силикатный (хондритовый) и Fe-Ni металлический составы. Их распределение на поверхности Земли при аккреции было весьма неравномерно, что сказалось в последующем на формировании мантийных и коровых вещественных неоднородностей.

Палеоархейская эра (3,6–3,2 млрд лет), с которой, собственно, начался докембрийский этап геологического развития Земли, характеризуется набором рудных месторождений, более типичных для неархейско-палеопротерозойских эр. Некоторые типы месторождений в палеоархее отличаются структурно-тектоническим положением от молодых аналогов. Например, несмотря на сходство состава флюидов и механизмов рудообразования, палеоархейские жильные месторождения золота формируются в тектонических обстановках, отличных от обстановок орогенеза, характерных для молодых докембрийских золоторудных жильных месторождений. Протерозойские эры в целом также различаются по геодинамике и, соответственно, металлогении: ранняя стадия палеопротерозоя (2,5–2,2 млрд лет) отличается анорогенным стилем развития и формированием рифтогенных интрузивно-вулканогенных структур, несущих основные золоторудные и медно-цинк-колчеданные месторождения. Поздняя стадия (2,2–1,6 млрд лет) характеризуется развитием орогенных рудоносных структур с формированием Cu-Ni-PGE, Au и колчеданных Cu-Zn-Pb магмато-гидротермальных месторождений в пределах докембрийских кратонов. Для мезо-неопротерозойских эр (1,6–0,6 млрд лет) развития Северного и Южного полушарий Земли устанавливаются геодинамические и металлогенические различия, выраженные в образовании платформенных структур, не несущих активно-тектонического генетического типа рудных месторождений, и аккреционно-рифтогенных структур и месторождений в Южном полушарии.

## Материалы и обсуждение

В ряде работ показано, что существует мало геологических свидетельств о платформенном стиле развития земной континенталь-

ной коры в докембрийских кратонах в период от 3515 до 3240 млн лет [Smithies et al., 2003; Van Kranendonk et al., 2004, 2007]. Эти авторы пришли к заключению, что 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 геологических площадей, а не поясов, как геологических особенностей платформенной тектоники, начавших свое развитие в палеопротерозое. Кроме того, в результате действия последовательных плюмов происходило разрастание литосферы, что приводило к возможности формирования серии комплексов плюмовых куполов и разобщенных вулканических покровов, которые образовывали вулканические палеобассейны.

**Архейские рудоносные структуры и месторождения.** 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). Для таких пород палео- и мезоархейского возраста (3,6–2,8 млрд лет) установлены по Sm-Nd изотопным данным положительные и близкие к CHUR значения  $\epsilon Nd$ , отвечающие первичному деплетированному и хондритовому резервуарам. Среди них имеются также отрицательные значения  $\epsilon Nd$ , соответствующие веществу, контаминированному наиболее ранними вулканогенными отложениями. Однако из-за дефицита серы в таких древнейших отложениях сульфидные никелевые и платино-металльные месторождения неизвестны, выявлены лишь небольшие месторождения (Шангани) и рудопроявления в коматиитах с возрастом  $3526 \pm 48$  и  $\epsilon Nd +0,7$  из низов группы Онвервайт зеленокаменного пояса Барбертон в Каапвальском кратоне Южной Африки. Для мафит-ультрамафитовых пород мантийного происхождения мезо- и неархейского возраста (3,2–2,6 млрд лет) установлены по Sm-Nd изотопным данным положительные значения  $\epsilon Nd$ , свидетельствующие о мантийном резервуаре, служившем источником формирования вулканогенных и интрузивных пород зеленокаменных поясов. Неархейские крупные сульфидные Ni-PGE месторождения в коматиитах и телах коматиитовых перидотитов известны лишь в кратоне Йилгарн Западной Австралии

(рудные районы Камбалда и Фортескью), в других кратонах мира – только рудопоявления, и все они составляют ранний этап формирования Ni-PGE месторождений.

Возможно, самым значительным металлогеническим различием палеоархея от мезо-неоархея и протерозоя были обстановки, в которых развивались золоторудные месторождения. Жильные золоторудные месторождения на протяжении большей части геологического времени были связаны с линейными, масштаба земной коры, сдвиговыми зонами. В противоположность этому жильные золоторудные месторождения, сформированные до 3200 млн лет, связаны с крупными кольцевыми разломами, вдоль которых концентрируются гранитные комплексы, по крайней мере в случае месторождений Бамбу-Крик в кратоне Пилбара [Zegers et al., 2002] или месторождений Витватерсранд в кратоне Каапваал, образованными в обстановках корового растяжения.

**Протерозойские рудоносные структуры и месторождения.** Периодические переплавления литосферной мантии во время последовательных плюм-событий производили все более эволюционированные расплавы [Smithies et al., 2003], которые были перспективными для накопления крупноионных литофильных элементов, типичных для редкометалльных месторождений, например, Ta- и Sn-пегматитовые месторождения в кратоне Пилбара. Первые граниты А-типа появляются в неоархее (~2,8 млрд лет) и далее прослеживаются в геологической истории развития Земли. Однако расцвет этого магматизма в докембрии приходится в интервал времени ~ 2,0–1,0 млрд лет. С этого времени начинается новая стадия мантийной динамики, определившей начало нового суперплюм-суперконтинентного цикла. Типичным и наиболее распространенным представителем данного типа магматизма являются граниты рапакиви. С рапакиви-гранитными комплексами ассоциирует широкий круг месторождений различных генетических типов от типично магматогенных до месторождений, в которых связь с магматизмом может быть чрезвычайно сложной и неоднозначной. 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 и суперкрупных месторождений сформированы 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.

Австралийские рудоносные структуры протерозоя вмещают значительные минеральные ресурсы, некоторые из них принадлежат к числу крупнейших в мире. Они представлены: 1) слоистыми железистыми формациями с месторождениями Fe, 2) орогенными аккреционными структурами, 3) магматическими рудными системами, 4) флюидно-разломными стратиформными и стратобаундовыми осадочными Pb-Zn месторождениями и 5) урановыми месторождениями типа несогласий. Эти минеральные системы образовались во внутриплитных, плитно-краевых, задуговых рифтовых и коллизионных тектонических условиях. Так, например, бассейн Хамерсли, сформировавшийся в интервале 2630–2450 млн лет, обладает крупнейшими ресурсами Fe и коррелируется с низами разреза супергруппы Трансвааль (2640–2055 млн лет) – слоистой железистой формации (СЖФ) в Южной Африке. Происхождение СЖФ остается спорным по вопросам моделей подводных гидротермальных источников в океанических бассейнах или типа красноморских рассолов. Во всех случаях плотность кислородно-бескислородной стратифицированной системы необходима для обеспечения осаждения Fe<sup>3+</sup>. Орогенные интрузивные системы, связанные с оруденением, достаточно распространены в протерозойских породах Австралии, с такими примерами, как граниты Пайн-Крик в орогенах Танами и Арунта на севере австралийской платформы, а также в орогене Каприкорн в Западной Австралии. Эти отложения отражают коллизионные и аккреционные события между 1800–1790 млн лет. Орогенные Au-носные жильные тела, как правило, но не всегда связаны по времени с гранитами, а генетическая связь остается все же бесспорной. Магматогенные Ni-Cu-PGE и Fe-Ti-V рудные месторождения в мафит-ультрамафитовых системах присутствуют в орогене Холлс-Крик и комплексе Масгрейв с возрастом около 1080 млн лет. Минеральные системы, связанные с анорогенным магматизмом, охватывают широкий круг 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-Ba месторождения с Cu-Au-W (ороген Каприкорн) и мирового класса месторождение Тефлер (Au-Cu). Последнее было одним из крупнейших производителей золота в Австралии. В щелочных породах возраста 1100 и 800 млн лет, в том числе и алмазоносных карбонатитах и лампроитах, были установлены месторождения алмазов,

как в лампроитовых трубках Аргайл с возрастом 1180 млн лет, которое является крупнейшим производителем алмазов. Исследования в других местах показывают, что эти щелочные породы являются дистальным выражением событий мантийных плюмов. Среди осадочных горных пород залегают месторождения мирового класса Zn-Pb-Ag сульфидных руд с возрастом около 1700 и 1500 млн лет (МакАртур, Маунт-Айза и Брокен-Хилл). Эти месторождения размещены в метаморфизованных богатых органикой сланцах и связаны с терригенно-эвапоритовыми отложениями и бимодальной вулканической активностью. Концептуальные модели рудообразования предложены из ряда гидротермальных флюидов вдоль крупных разломов в бассейнах с недостатком кислорода и бактериальной сульфатредукцией и осаждением сульфидов. Необычные и большие несulfидные карбонатные Pb-Zn рудные месторождения группы Магеллан размещаются в обломочных породах с возрастом около

1800 млн лет. Отсутствие сульфидов заставляет предположить, что эти месторождения были связаны с процессами палеовыветривания, индуцирующими окисление и мобилизацию Pb и Zn в виде карбонатов. Урановорудные системы кроме U-содержащих Fe-окисно-Cu-Au месторождений включают также мирового класса месторождения несогласия Джабилука в бассейне Пайн-Крик. Вероятно, что несколько гигантских мирового класса рудных систем в позднем протерозое Австралии сформировались при внутриплитных тектоно-термальных событиях.

Типы минеральных месторождений обладают различным по времени распределением с пиками в специфические периоды развития Земли. Месторождения различных металлов, чувствительные к окислительно-восстановительным условиям, показывают многоэтапный характер их формирования на протяжении истории образования суперконтинентов эволюционирующей Земли (рис. 1). Форми-

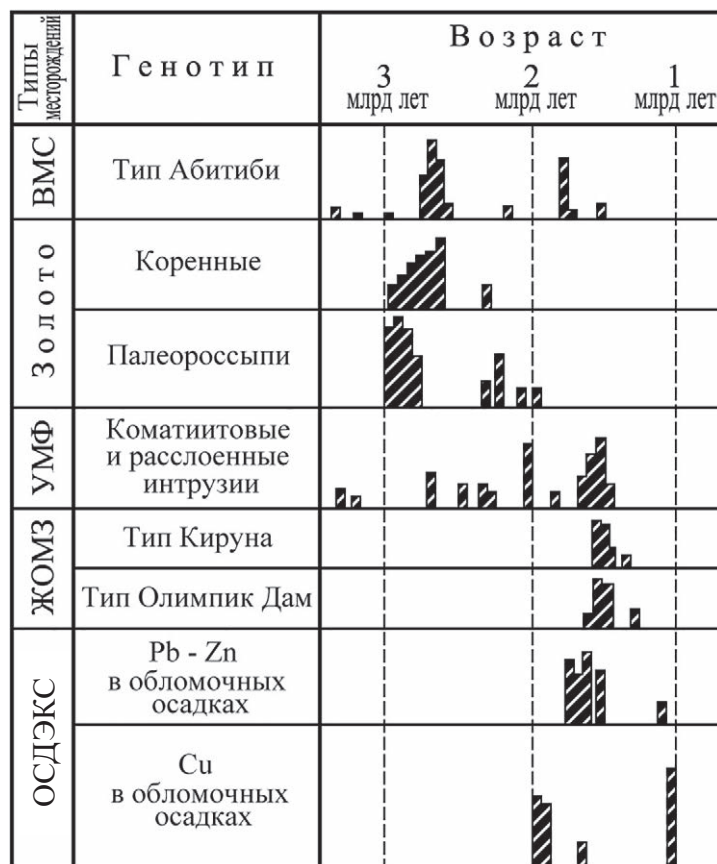


Рис. 1. Распределение во времени докембрийских генотипов месторождений. Месторождения: ВМС – вулканогенные массивные сульфидные (колчеданные), УМФ – Cu-Ni сульфидные и PGE в ультрамафит-мафитовых формациях, ЖОМЗ – Fe-окисные медно-золоторудные, ОСДЭКС – осадочно-эксгаляционные и стратиформные Pb-Zn и Cu

Fig. 1. Time distribution of the Precambrian genotypes in deposits. Deposits: BMC – volcanogenic massive sulfide (pyrite), УМФ – Cu-Ni sulfide and PGE in ultramafic-mafic formations, ЖОМЗ – Fe-oxide copper-gold ore, ОСДЭКС – sedimentary-exhalation and stratiform Pb-Zn and Cu

рование раннедокембрийских месторождений происходило в большинстве своем около 2,7 и 2,0–1,8 млрд лет и реже в период 1,7–0,6 млрд лет, от цикла к циклу континентального роста земной коры при изменениях в сторону современного стиля плейт-тектонических процессов.

Вулканогенные массивные сульфидные месторождения формировались на конвергентных границах континентов, на которых также образовывались орогенические золоторудные месторождения. Первое появление железокислых медно-золоторудных месторождений около 1,55 млрд лет тесно связано с раннедокембрийской метасоматизированной субконтинентальной литосферной мантией (СКЛМ) под ранними кратонами, являющимися центрами суперконтинентов. Примером может быть гигантское месторождение Олимпик-Дэм в кратоне Гоулер, Южная Австралия. Гигантские архейские (2985–2780 млн лет) палеороссыпные месторождения золота и урана, такие как Витватерсранд в Южной Африке, формировались под действием флювиальной сортировки тяжелых минералов в экстремальных климатических условиях, но сохранившихся благодаря низкой плотности или плавучести СКЛМ под вмещающими такие месторождения бассейнами. Такие же месторождения золота, связанные с фельзитовыми интрузиями, имеющие мантийно-коровые изотопные значения, образовывались на границах кратонов – ядер раннедокембрийских суперконтинентов. Постпалеопротерозойский подъем и эрозия, вероятно, в орогенических поясах с высокой плотностью литосферы привели к захоронению или уничтожению рассмотренных типов месторождений в неопротерозой-фанерозойских континентах.

Периодическое увеличение количества магматических комплексов, установленных по U-Pb возрасту циркона, вместе с вариациями изотопного состава Nd в кластогенных и Sr в хемогенных осадках совпадают с этапами роста континентальной коры начиная с 3,0 млрд лет с пиками около 2,7 и 1,9 млрд лет и перерывами между ними в период 2,4–2,2 млрд лет [Melezhik et al., 2013; Кузнецов и др., 2018]. Каждый такой пик вызван резким увеличением магматической активности и тектонической перестройкой земной коры. Позднеархейский пик связан с глобальным формированием основной массы зеленокаменных поясов с возрастом 2,75–2,60 млрд лет (например, в кратоне Йилгарн, провинциях Сьюпириор и Слейв в Канаде, кратонах Западной Африки, Индии, Сан-Франсиско в Бразилии, Карельском на Фенно-

скандинавском щите, Средне-Приднепровской провинции Украинского щита). Палеопротерозойский пик связан с новым этапом образования ювенильной коры около 1,9 млрд лет. Эти пики формирования континентальной коры и, соответственно, образования суперконтинентов являются также пиками глобального контроля металлогении. Один из последних этапов прироста коры периода 2,1–1,6 млрд лет отвечал росту и распаду суперконтинента Нуна. Последующий период 1,4–0,6 млрд лет связан с образованием суперконтинента Родиния, его распадом и формированием континентов Гондвана и Лавразия.

Неоднородность литосферы, существенно оформленная к конечному докембрийскому этапу геологического развития Земли, отражается в неоднородном характере распределения месторождений в этих позднедокембрийских континентах, составляющих их минерально-сырьевой потенциал (рис. 2). В качестве оценочного инструмента сравнения минерально-сырьевого потенциала Лавразии и Гондваны использована ценность минеральных ресурсов только для докембрийских месторождений, взятая из таблиц в: [Красный, 2000]. На рис. 2 показана неоднородность в распределении металлов в протоконтинентах Лавразия и Гондвана. Особенно заметна эта неоднородность по Au, PGE, Ni и Nb+Ta.

Структурно-тектоническое развитие докембрийского этапа геологической эволюции планеты Земля в раннедокембрийских кратонах образовавшегося протоконтинента Лавразия (фундаменты Восточно-Европейской, Восточно-Сибирской и Северо-Американской платформ) в период мезо- и неопротерозоя (1,6–0,54 млрд лет) происходило по платформенному сценарию. Активного действия докембрийских тектономагматических процессов при таком сценарии не происходило, поэтому не было и активного проявления металлогенических следствий, а отсюда и проявления разнообразных рудообразующих процессов. Завершение докембрийского этапа геологического развития оценивается сегодня в 0,54 млрд лет. В северной гемисфере для геологического периода 1,6–0,54 млрд лет, соответствующего мезо- и неопротерозою [Gradstein et al., 2005], были проведены многочисленные исследования, позволившие охарактеризовать стратиграфическое расчленение этих докембрийских отложений еще в XX веке [Соколов, 1952; Беккер, 1988], а в настоящее время детализировать по фаунистическим остаткам [Голубкова и др., 2010, 2018] и изотопно-геохронологическим данным [Семихатов и др., 2015], про-

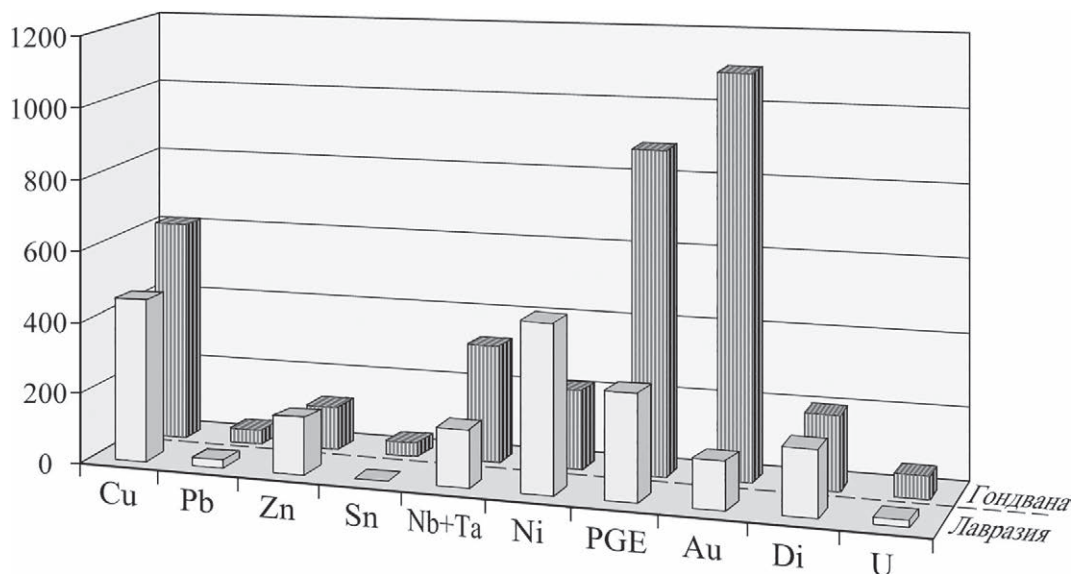


Рис. 2. Характер распределения докембрийских месторождений в протоконтинентах Гондвана и Лавразия по потенциальной ценности минеральных ресурсов площадей, взятых по: [Красный, 2000]. Преобладание ресурсов PGE в Гондване связано с гигантскими мало-сульфидными PGE-месторождениями плутона Бушвельд в ЮАР. Преобладание ресурсов Ni в Лавразии связано с докембрийскими месторождениями Садбери, Лак-дез-Иль, Томпсон в Канаде и Печенга на Кольском п-ове России

Fig. 2. Nature of the Precambrian deposits distribution in the proto-continents of Gondwana and Laurasia according to the potential value of mineral resources of the areas after [Krasnyi, 2000]. The predominance of PGE resources in Gondwana is associated with the giant low-sulfide PGE deposits of the Bushveld pluton in South Africa. The predominance of Ni resources in Laurasia is associated with the Precambrian deposits of Sudbury, Lac des Iles, Thompson in Canada and Pechenga on the Kola Peninsula of Russia

веденным российскими исследователями для Восточно-Европейской [Кузнецов и др., 2003; Kuznetsov et al., 2017; Зайцева и др., 2019] и Восточно-Сибирской [Зайцева и др., 2016, 2017] платформ.

В южной гемисфере Земли геологическое развитие происходило значительно сложнее, поскольку на материках Гондванской группы мезо-неопротерозойская эра не заканчивалась формированием платформенных структур. В протоматериках Гондванской группы продолжали развиваться неопротерозойские орогенические зоны (1600–600 млн лет) и пояса тектоно-термальной переработки древних структур, по сути, коллизионные пояса возраста около 1100 млн лет (рис. 3). Тектонофизическая причина этого явления в современной литературе пока не находит должного отражения. Однако по мнению автора, объяснение 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 данному 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 апвеллинговой природы орогенических структур позднего протерозоя в этой части Земли. На рис. 3 хорошо видно, где проявлены такие области, причем фанерозойские орогенические пояса, такие как Андийские, Западная Антарктида, Новая Зеландия и Внутренне-Гондванские (Сьерра в Аргентине, Кейптаунская в Южной Африке, Элсуэрт в Антарктиде и Тасманийский ороген в Восточной Австралии) обрамляют позднепротерозойские структуры. А сами позднепротерозойские орогенические пояса (Бразилиды в Южной Америке, Пан-Африканские, Росские в Антарктиде, Северо- и Центрально-Австралийские – Деламерийские) и зоны тектоно-термальной переработки (Рондония в Южной Америке, Кибара в Африке, Олбани-Фрезер и Масгрейв в Австралии) более древних структур располагались в центральных частях протоматерика Гондвана. Кроме того, здесь же показаны раннедокембрийские кратоны (щиты), наиболее крупный из которых, Восточно-Антарктический, плохо изучен из-за мощного ледового покрова, но изображен по геофизическим наблюдениям.

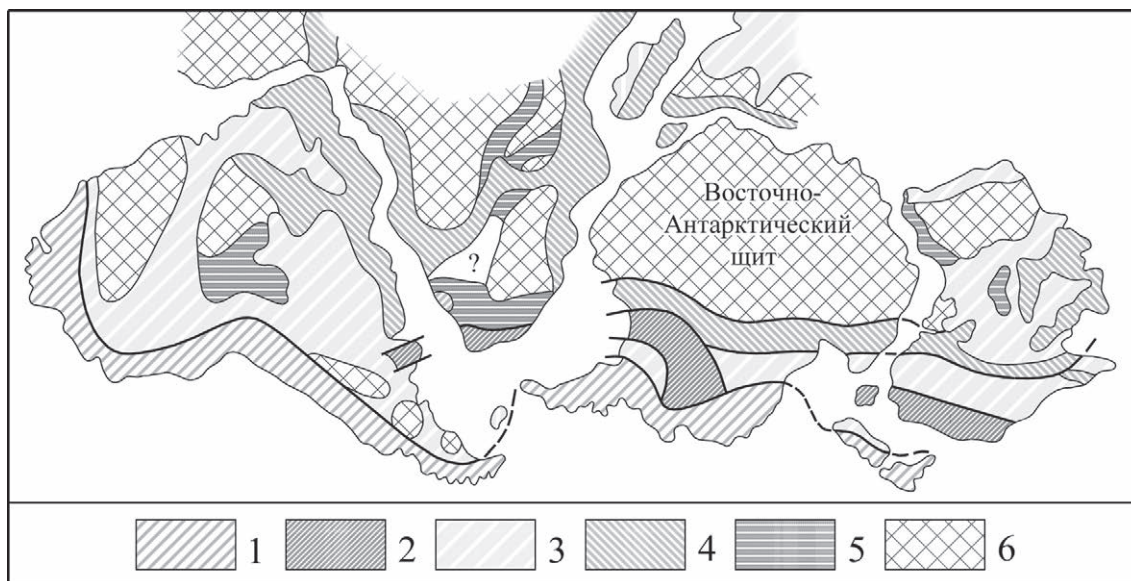


Рис. 3. Реконструкция протоматерика Гондвана с главными геологическими структурами.

Фанерозойские орогенические пояса: 1 – Андийские, Западно-Антарктические, Новой Зеландии, 2 – Внутренне-Гондванские (Сьерра в Аргентине, Кейптаун в Южной Африке, Элсуэрт в Антарктиде и Тасманийский в Восточной Австралии), 3 – фанерозойский кратонический покров на фанерозойских орогенических структурах, 4 – позднепротерозойские орогенические пояса (Бразилиды в Южной Америке, Панафриканские в Африке, Россские в Антарктиде и Деламерийские в Австралии), 5 – позднепротерозойские пояса и зоны тектоно-термальной переработки, 6 – раннедокембрийские кратоны

Fig. 3. Reconstruction of the Gondwana protocontinent with major geological structures.

Phanerozoic orogenic belts: 1 – Andean, West Antarctic, New Zealand, 2 – Inner Gondwana (Sierra in Argentina, Cape Town in South Africa, Ellsworth in Antarctica and Tasmanian in Eastern Australia), 3 – Phanerozoic cratonic cover on Phanerozoic orogenic structures, 4 – Late Proterozoic orogenic belts (Brazilids in South America, Pan-African in Africa, Ross in Antarctica and Delamerian in Australia), 5 – Late Proterozoic belts and zones of tectonic-thermal processing, 6 – Early Precambrian cratons

Вместе с этим надо отметить современный вклад российских исследователей в дело изучения металлоносности отдельных фрагментарных обнаженных выходов пород структурных комплексов Антарктиды (структурно-геологические с металлогенией исследования на Земле Эндерби и Земле Кемпа [Михальский и др., 2016]. В работе Е. В. Михальского с соавторами [2016] приведены данные по составлению сводных карт геологического содержания масштаба 1:1 000 000–1:5 000 000 центрального сектора Восточной Антарктиды, в том числе карты полезных ископаемых. По результатам экспедиций 1962–1971 годов в пределах изученной площади описано в отчетной документации или упомянуто в полевых материалах около 50 пунктов минерализации, относящихся к металлическим (благородные, цветные, черные, редкие металлы) и неметаллическим (поделочные и коллекционные камни, горный хрусталь, слюды) видам минерального сырья. Завершается описание кратким подведением итогов рассмотрения полезных ископаемых Земли Эндерби и Земли Кемпа, на основании

которого делается вывод, что изученный регион может рассматриваться как перспективный на железо, на цветные металлы (особенно на медь), драгоценные камни и поделочное сырье, а также алмазы.

Появление новых генетических типов (ЖОМЗ, ОСДЭК) (см. рис. 1) и в особенности свинцово-цинковых месторождений, рассмотренных выше для отдельных орогенических структур позднего протерозоя Северо- и Центрально-Австралийского пояса, было связано с изменением химизма рудообразующих процессов. В ходе осадконакопления в эпиконтинентальных орогенных бассейнах создавались условия, благоприятствующие отложению Pb-Zn руд, которые выразились в подтоке глубинного тепла и мантийного рудного вещества при вновь активизировавшемся апвеллинге из-за позднепротерозойских ядерно-мантийных перемещений в Южное полушарие Земли.

В поясах тектоно-термальной переработки, таких как Лимпопо или Намаква-Натал в Южной Африке, которые лишь кое-где содержали небольшие вкрапленные скопления руд, в ходе

протерозойских наложенных метаморфических и деформационных процессов происходило переотложение рассеянной минерализации в виде тел высококачественных руд [Hallich, 1978]. Тектонофизическое событие на Земле, о котором говорилось выше, по времени приблизительно совпадало с этапом эволюции мантии, установленным на основе изотопных данных. Изучая изотопные отношения Rb/Sr в толеитах океанических островов и срединно-океанических хребтов, С. Брукс и соавторы [Brooks et al., 1978] установили, что повсюду в Южном полушарии эти породы имеют возраст  $1600 \pm 200$  млн лет. Возможно, в указанное время произошел какой-то крупный сдвиг в эволюции мантии Земли, последовавший за изменением ее тектонофизического состояния. Именно с этого момента (около 1800 млн лет) в осадконакоплении произошла смена преимущественного отложения Ca-Mg (доломитовых) фаций на (во многих случаях) Ca (известковые)-карбонатные фации, что немедленно отразилось и на формировании рудоносных фаций (т. е. появлении заметной свинцовой минерализации в месторождениях цветных металлов). Стратиформные свинцовые месторождения в осадочных породах приобретают особое значение, поскольку этот металл является с указанного времени главным компонентом полиметаллических руд, не только в осадочных месторождениях, но и в вулканогенных колчеданных месторождениях. Примерами могут служить крупные полиметаллические месторождения Центрально-Австралийского орогенного пояса (Маунт-Айза, МакАртур, Брокен-Хилл) позднепротерозойского возраста, причем в последнем из рассматриваемых месторождений вмещающие породы имели также вулканогенное происхождение.

Из таких примеров следует предположение, что все-таки в позднем протерозое (1600–600 млн лет) Южного полушария процессы рифтогенеза играли существенную роль в формировании оруденения. На это еще в прошлом веке обратил внимание Ф. Соукинс [Sawkins, 1976], отметив, что многие рудные месторождения образуются при рифтогенезе и появлении внутриконтинентальных горячих точек, достигавших максимального развития 1200–1000 млн лет назад. Это может подтверждать тот факт, что месторождения Медного пояса тектоно-термальных Пан-Африканских структур Центральной Африки также контролировались рифтовыми зонами. Действительно, образование сульфидных медных руд в песчаниках и сланцах, которые были отложены в мелководных бассейнах, возможно, приу-

роченных к рифтовым бассейнам, как Удокан в Восточной Сибири, началось около 1900 млн лет назад. Но большинство остальных месторождений этого типа, особенно в Южном полушарии Земли, возникло 1000 млн лет назад, когда в Африке и Австралии в неопротерозое процессы рифтогенеза особенно активизировались, на что первым обратил внимание Н. Роуландс [Rowlands, 1974].

## Заключение

Ранний период формирования рудоносных структур и месторождений Земли (архей-палеопротерозойский 3,6–2,3 млрд лет) характеризовался образованием площадных анорогенных (гранит-зеленокаменных и рифтогенных интрузивно-вулканогенных) структур, несущих основные золоторудные и медно-цинк-колчеданные месторождения мира. Для более позднего этапа палеопротерозоя (2,2–1,6 млрд лет) типовым было формирование линейных орогенно-аккреционных и коллизионных структур, с которыми связано формирование поясов медь-никель-платино-металльных, золоторудных и колчеданно-полиметаллических магмато-гидротермальных месторождений в раннедокембрийских щитах. Мезо-неопротерозойские эры развития Земли были для Северного полушария периодом интенсивного развития платформенных структур (авлакогенно-плитных покровов), не несущих активно-тектонических генетических типов рудных месторождений.

Период от 900 до 600 млн лет в Южном полушарии Земли оказался, так же как и в Северном, не очень продуктивным на появление рудных месторождений, поскольку заключительный этап докембрийского геологического развития Земли связан с расколом суперконтинента Родиния, активизацией рифтинга, дезинтеграцией Родинии на несколько фрагментов, которые перегруппировались с образованием двух крупных континентов – Гондваны и Лавразии. Указанные процессы сопровождались погружением континентальных блоков и одновременным воздыманием океанических хребтов, то есть началом нового этапа геологической жизни Земли.

Этот новый этап (фанерозойский) выразился в активном перемещении тектонических плит, созидании орогенических циклов и разнообразии рудообразующих процессов, достигнувших беспрецедентно высокого уровня.

*Работа выполнена при финансовой поддержке темы НИР ИГГД РАН 0153-2019-0001.*



## Литература

- Беккер Ю. Р. Молассы докембрия. Л.: Недра, 1988. 288 с.
- Голубкова Е. Ю., Раевская Е. Ю., Кузнецов А. Б. Нижневендские комплексы микрофоссилий Восточной Сибири в решении стратиграфических проблем региона // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2010. Т. 18, № 4. С. 3–27.
- Голубкова Е. Ю., Кушим Е. А., Кузнецов А. Б., Яновский А. С., Маслов А. В., Шведов С. Д., Плоткина Ю. В. Редкинская биота макроскопических ископаемых организмов северо-запада Восточно-Европейской платформы (Южное Приладожье) // ДАН. 2018. Т. 479, № 2. С. 163–167.
- Зайцева Т. С., Семихатов М. А., Горохов И. М., Сергеев В. Н., Кузнецов А. Б., Ивановская Т. А., Мельников Н. Н., Константинова Г. В. Изотопная геохронология и биостратиграфия рифейских отложений Анабарского массива, Северная Сибирь // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2016. Т. 24, № 6. С. 3–29.
- Зайцева Т. С., Горохов И. М., Семихатов М. А., Ивановская Т. А., Кузнецов А. Б., Доржиева О. В. Rb-Sr и K-Ar возраст глобулярных слоистых силикатов и биостратиграфия рифейских отложений Оленекского поднятия, Северная Сибирь // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2017. Т. 25, № 6. С. 3–29.
- Зайцева Т. С., Кузнецов А. Б., Горожанин В. М., Горохов И. М., Ивановская Т. А., Константинова Г. В. Основание венда на Южном Урале: Rb-Sr возраст глауконитов бакеевской свиты // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2019. Т. 27, № 5. С. 82–86.
- Красный Л. И. (ред.). Геолого-минералогическая карта мира. Объяснительная записка. Ч. 2. Минерально-сырьевые ресурсы континентов и активных транзиталей. СПб.: ВСЕГЕИ, 2000. 34 с.
- Кузнецов А. Б., Семихатов М. А., Горохов И. М., Мельников Н. Н., Константинова Г. В., Кутявин Э. П. Изотопный состав Sr в карбонатных породах каратавской серии Южного Урала и стандартная кривая вариаций отношения  $87\text{Sr}/86\text{Sr}$  в позднерифейском океане // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2003. Т. 11, № 5. С. 3–39.
- Кузнецов А. Б., Семихатов М. А., Горохов И. М. Стронциевая изотопная хемотратиграфия: основы метода и его современное состояние // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2018. Т. 26, № 4. С. 3–23.
- Михальский Е. В., Алешкова Н. Д., Афанасьева В. К. и др. Составление сводных карт геологического содержания масштаба 1:1 000 000–1:5 000 000 центрального сектора Восточной Антарктиды (Земля Эндерби и Земля Кемпа) / ГК № 38/07/12-3. Отчет ВНИИОкеангеология. СПб., 2016.
- Семихатов М. А., Кузнецов А. Б., Чумаков Н. М. Изотопный возраст границ общих стратиграфических подразделений верхнего протерозоя (рифей и венда) России: эволюция взглядов и современная оценка // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2015. Т. 23, № 6. С. 16–27.
- Соколов Б. С. О возрасте древнейшего осадочного покрова Русской платформы // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1952. № 5. С. 21–31.
- Amelin Y., Wadhwa M., Lugmair G. W. Pb-isotopic dating of meteorites using  $202\text{Pb}$ - $205\text{Pb}$  double-spike: comparison with other high-resolution chronometers // Lunar and Planetary Sci. XXXVII. 2006. Abstract 1970.
- Brooks C., James D. E., Hart S. R., Hodman A. W. Rb-Sr mantle isochrones // Rept. Director, Carnegie Institution Washington. 1978. P. 176–207.
- Gradstein F. M., Ogg J. G., Smith A. G. A Geologic Time Scale 2004. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2005. 611 p. doi: 10.1017/CBO9780511536045
- Hallich I. W. Minor structures in gneiss and the origin of steep structures in the Okiep cooper district // Mineralization in metamorphic terranes. Geol. Soc. South Africa Spec. Pub. 1978. Vol. 4. P. 207–322.
- Kuznetsov A. B., Bekker A., Ovchinnikova G. V., Gorokhov I. M., Vasilyeva I. M. Unradiogenic strontium and moderate-amplitude carbon isotope variations in early Tonian seawater after the assembly of Rodinia and before the Bitter Springs Excursion // Precambrian Res. 2017. Vol. 298. P. 157–173.
- Melezhik V. A., Kump L. R., Hanski E. J., Fallick A. E., Prave A. R. Tectonic evolution and major global Earth-surface palaeoenvironmental events in the Palaeoproterozoic // Reading the Archive of Earth's Oxygenation. Vol. 1 / V. A. Melezhik, L. R. Kump, A. E. Fallick, H. Strauss, E. J. Hanski, A. R. Prave, A. Lepland (eds.). Springer, Heidelberg, 2013. P. 3–21.
- Rowlands N. J. The lithology of some Adelaidian stratiform copper occurrences // Gisements stratiformes et provinces cupriferes / P. Bartholomé (ed.). Liège, 1974. P. 419–427.
- Sawkins F. J. Metal deposits related to intracontinental hotspot and rifting environments // J. Geol. 1976. Vol. 84. P. 653–671.
- Smithies R. H., Champion D. C., Cassidy K. F. Formation of Earth's early Archaean continental crust // Precambrian Res. 2003. Vol. 127. P. 89–101.
- Van Kranendonk M. J., Collins W. J., Hickman A. H., Pawley M. J. Critical tests of vertical vs horizontal tectonic models for the Archaean East Pilbara Granite-Greenstone Terrane, Pilbara Craton, Western Australia // Precambrian Res. 2004. Vol. 131. P. 173–211.
- Van Kranendonk M. J., Huston D. L., Hickman A. H. From plumes to accretion: Changing mineralization styles through 800 million years of crustal evolution in the Pilbara Craton, Western Australia // Western Australia Geol. Survey, Record 2007/2. P. 23–25.
- Zegers T. E., Barley M. E., Groves D. I., McNaughton N. J., White S. H. Oldest gold: deformation and hydrothermal alteration in the early Archaean shear-zone hosted Bamboo Creek Deposit, Pilbara, Western Australia // Econ. Geol. 2002. Vol. 97. P. 757–773.

Поступила в редакцию 06.01.2021

## References

- Bekker Yu. R. Molassy dokembriya [Precambrian molasses]. Leningrad: Nedra, 1988. 288 p.
- Golubkova E. Yu., Raevskaya E. Yu., Kuznetsov A. B. Nizhnevendskie komplekxy mikrofossilii Vostochnoi Sibiri v reshenii stratigraficheskikh problem regiona [Lower Vendian complexes of microfossils in Eastern Siberia in stratigraphic problems of the region]. *Stratigrafiya. Geol. korrelyatsiya* [Stratigr. Geol. Correl.]. 2010. Vol. 18, no. 4. P. 3–27.
- Golubkova E. Yu., Kushim E. A., Kuznetsov A. B., Yanovskii A. S., Maslov A. V., Shvedov S. D., Plotkina Yu. V. Redkinskaya biota makroskopicheskikh iskopayemykh organizmov severo-zapada Vostochno-Evropейskoi platformy (Yuzhnoe Priladozh'e) [Redkino biota of macroscopic fossils of north-west East-European platform (Southern Ladoga zone)]. *DAN* [Dokl. AS]. 2018. Vol. 479, no. 2. P. 163–167.
- Krasnyi L. I. (ed.). Geologo-mineragenicheskaya karta mira. Ob'yasnitel'naya zapiska. Ch. 2. Mineral'no-syr'evye resursy kontinentov i aktivnykh tranzitaley [Geologic-mineralogic maps of the World. An explanatory note. Pt. 2. Mineral raw material resources continents and active transities]. St. Petersburg: VSEGEI, 2000. 34 p.
- Kuznetsov A. B., Semikhatov M. A., Gorokhov I. M., Mel'nikov N. N., Konstantinova G. V., Kutuyavin E. P. Izo-topnyi sostav Sr v karbonatnykh porodakh karatavskoi serii Yuzhnogo Urala i standartnaya krivaya variatsii ot-noshenie  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  v pozdnerifeiskom okeane [Sr isotope composition in carbonates of the Karatau Group, Southern Urals, and standard curve of  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  variations in the Late Riphean Ocean]. *Stratigrafiya. Geol. korrelyatsiya* [Stratigr. Geol. Correl.]. 2003. Vol. 11, no. 5. P. 415–449.
- Kuznetsov A. B., Semikhatov M. A., Gorokhov I. M. Strontium Isotope Stratigraphy: principles and state of art. *Stratigr. Geol. Correl.* 2018. Vol. 26, no. 4. P. 367–386.
- Mikhail'skii E. V., Aleshkova N. D., Afanas'eva V. K. et al. Sostavlenie svodnykh kart geologicheskogo sodержaniya masshtaba 1:1 000 000–1:5 000 000 tse-ntral'nogo sektora Vostochnoi Antarktity (Zemlya Enderbi i Zemlya Kempa). GK № 38/07/12-3. Otchet VNIIO-keangeologiya [Composition of summery geological maps 1:1 000 000–1:5 000 000 scale for central sector of the Eastern Antarctica (Enderby and Kemp Lands). State Contract № 38/07/12-3. Report VNIIOcean-geologiya]. St. Petersburg, 2016.
- Semikhatov M. A., Kuznetsov A. B., Chumakov N. M. Isotope age of boundaries between the General Stratigraphic Subdivisions of the Upper Proterozoic (Riphean and Vendian) in Russia: The evolution of opinions and the current estimate. *Stratigr. Geol. Correl.* 2015. Vol. 23, no. 6. P. 568–579.
- Sokolov B. S. O vozraste drevneishego osadochnogo pokrova Russkoi platformy [On the age of the oldest sedimentary cover of the Russian platform]. *Izv. AN SSSR. Ser. geol.* [Proceed. AS USSR. Ser. Geol.]. 1952. No. 5. P. 21–31.
- Zaitseva T. S., Semikhatov M. A., Gorokhov I. M., Sergeev V. N., Kuznetsov A. B., Ivanovskaya T. A., Mel'nikov N. N., Konstantinova G. V. Isotopic geochronology and biostratigraphy of the Riphean deposits of the Anabar Massif, North Siberia. *Stratigr. Geol. Correl.* 2016. Vol. 24, no. 6. P. 549–574.
- Zaitseva T. S., Gorokhov I. M., Semikhatov M. A., Ivanovskaya T. A., Kuznetsov A. B., Dorzhieva O. V. Rb-Sr and K-Ar ages of globular phyllosilicates and biostratigraphy of the Riphean deposits of Olenek Massif, North Siberia. *Stratigr. Geol. Correl.* 2017. Vol. 25, no. 6. P. 581–606.
- Zaitseva T. S., Kuznetsov A. B., Gorozhanin V. M., Gorokhov I. M., Ivanovskaya T. A., Konstantinova G. V. Osnovanie Venda na Yuzhnom Urale: Rb-Sr vozrast glaukonitov Bakeevskoi svity [The Lower boundary of the Vendian in the Southern Urals as evidenced by the Rb-Sr Age of glauconites of the Bakeevo Formation]. *Stratigrafiya. Geol. korrelyatsiya* [Stratigr. Geol. Correl.]. 2019. Vol. 27, no. 5. P. 573–587. doi: 10.1134/S0869593819050083
- Amelin Y., Wadhwa M., Lugmair G. W. Pb-isotopic dating of meteorites using  $^{202}\text{Pb}$ - $^{205}\text{Pb}$  double-spike: comparison with other high-resolution chronometers. *Lunar and Planetary Sci. XXXVII*. 2006. Abstract 1970.
- Brooks C., James D. E., Hart S. R., Hodman A. W. Rb-Sr mantle isochrones. *Rept. Director, Carnegie Institution Washington*. 1978. P. 176–207.
- Gradstein F. M., Ogg J. G., Smith A. G. A Geologic Time Scale 2004. Cambridge: Cambridge Univer. Press, 2005. 611 p. doi: 10.1017/CBO9780511536045
- Hallich I. W. Minor structures in gneiss and the origin of steep structures in the Okiep cooper district. *Mineralization in metamorphic terranes. Geol. Soc. South Africa Spec. Pub.* 1978. Vol. 4. P. 207–322.
- Kuznetsov A. B., Bekker A., Ovchinnikova G. V., Gorokhov I. M., Vasilyeva I. M. Unradiogenic strontium and moderate-amplitude carbon isotope variations in early Tonian seawater after the assembly of Rodinia and before the Bitter Springs Excursion. *Precambrian Res.* 2017. Vol. 298. P. 157–173.
- Melezhik V. A., Kump L. R., Hanski E. J., Fallick A. E., Prave A. R. Tectonic evolution and major global Earth-surface palaeoenvironmental events in the Palaeoproterozoic. *Reading the Archive of Earth's Oxygenation*. Vol. 1. V. A. Melezhik, L. R. Kump, A. E. Fallick, H. Strauss, E. J. Hanski, A. R. Prave, A. Lepland (eds.). Springer, Heidelberg, 2013. P. 3–21.
- Rowlands N. J. The lithology of some Adelaidian stratiform copper occurrences. *Gisements stratiforms et provinces cupriferes*. P. Bartholomé (ed.). Liège, 1974. P. 419–427.
- Sawkins F. J. Metal deposits related to intracontinental hotspot and rifting environments. *J. Geol.* 1976. Vol. 84. P. 653–671.
- Smithies R. H., Champion D. C., Cassidy K. F. Formation of Earth's early Archaean continental crust. *Precambrian Res.* 2003. Vol. 127. P. 89–101.
- Van Kranendonk M. J., Collins W. J., Hickman A. H., Pawley M. J. Critical tests of vertical vs horizontal tectonic models for the Archaean East Pilbara Granite-Greenstone Terrane, Pilbara Craton, Western Australia. *Precambrian Res.* 2004. Vol. 131. P. 173–211.
- Van Kranendonk M. J., Huston D. L., Hickman A. H. From plumes to accretion: Changing mineralization

styles through ~800 million years of crustal evolution in the Pilbara Craton, Western Australia. *Western Australia Geological Survey. Record* 2007/2. P. 23–25.

Zegers T. E., Barley M. E., Groves D. I., McNaughton N. J., White S. H. Oldest gold: deformation and hy-

drothermal alteration in the early Archean shear-zone hosted Bamboo Creek Deposit, Pilbara, Western Australia. *Econ. Geol.* 2002. Vol. 97. P. 757–773.

*Received January 06, 2021*

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:**

**Турченко Станислав Иванович**

заведующий лаб. металлогении и рудообразования,  
чл.-корр. РАН, д. г.-м. н.  
Институт геологии и геохронологии докембрия РАН  
наб. Макарова, 2, Санкт-Петербург, Россия, 199034  
эл. почта: turchsi@mail.ru  
тел.: +79062267331

#### **CONTRIBUTOR:**

**Turchenko, Stanislav**

Institute of Precambrian Geology and Geochronology,  
Russian Academy of Sciences  
2 Nab. Makarova, 199034 St. Petersburg, Russia  
e-mail: turchsi@mail.ru  
tel.: +79062267331