

Металлогения протерозоя (2,5–0,65 млрд лет): геодинамика Земли (цикл суперконтинента) и рудообразование

Месторождения протерозоя – орогенические золоторудные, вулканогенные сульфидные, порфиновые Mo-Cu-Ag и осадочно-экспляционные Pb-Zn (Завар в штате Раджастан в Индии) – образовались при формировании протерозойского суперконтинента Пангея, называемого некоторыми исследователями Колумбией. События глобального масштаба, произошедшие около 1,9 млрд лет и выраженные во внедрении в континентальную кору мафит-ультрамафитовых расплавов, связанных с мантийным апвеллингом, сыграли значительную роль в образовании сульфидных Ni-Cu, Fe-Ti-V и платинометаллических (PGE) месторождений. С разрывами суперконтинента около 1,5–1,2 млрд лет связана деструкция континентальной коры, образование осадочных бассейнов и проявление интракратонного анорогенного магматизма. К этим фазам приурочено формирование гидротермально-магматогенных Fe-окисных-Cu-Au (типа Олимпик-Дэм), Pb-Zn и Cu-песчаниковых стратифицированных, Sn и U месторождений несогласий.

Ключевые слова: металлогения, протерозой, суперконтинентальный цикл, Пангея.

S. I. TURCHENKO (IPGG RAS)

Proterozoic Metallogeny (2.5–0.65 Ga): geodynamics of the Earth (supercontinent cycle) and ore forming processes

Proterozoic ore deposits, such as orogenic Au, volcanogenic sulfide, porphyry Mo-Cu-Ag and Pb-Zn sedimentary-exhalative deposits (Zavar, state of Rajasthan, India) were formed during the assembly of the Pangea Proterozoic supercontinent, which some researches also name as Columbia. The ~1.9 Ga global-scale events expressed in the introduction into the continental crust of mafic-ultramafic melts related to the mantle upwelling played a significant role in the formation of Ni-Cu sulfide, Fe-Ti-V, and PGE deposits. Destruction of the continental crust, formation of sedimentary basins and intracratonic anorogenic magmatism were caused by breakup phases of the supercontinent around 1.5–1.2 Ga. Formation of some major deposits, such as hydrothermal-magmatic iron oxide-copper-gold (e.g. Olympic-Dam), Pb-Zn and Cu-sandstone stratified, Sn and U unconformity-type deposits is confined to these phases.

Keywords: metallogeny, Proterozoic, supercontinental cycle, Pangea.

Для цитирования: Турченко С. И. Металлогения протерозоя (2,5–0,65 млрд лет): геодинамика Земли (цикл суперконтинента) и рудообразование // Региональная геология и металлогения. – 2020. – № 81. – С. 97–104.

Введение. Протерозойский суперконтинент формировался из ранее разделенных протоконтинентальных блоков, которые периодически объединялись в суперконтиненты в течение истории развития Земли. Они были представлены: Кенорлендом (период 2,7–2,5 млрд лет [12]), Колумбией, или Пангеей (1,9–1,85 млрд лет [36; 39]), Родинией (1,1 млрд лет [32]) и Гондваной (0,55 млрд лет [35]). Цифровыми значениями обозначено время максимального объединения блоков в единый суперконтинент, что вызывает многочисленные дискуссии и сомнения. При этом один из древних – Колумбия (Пангея) – считается наиболее перспективным для исследований суперконтинентом.

Этот протерозойский суперконтинент был объединен из отдельных блоков континентальной коры в период 1,90 и 1,85 млрд лет, считающийся временем максимального сочленения блоков [34; 37]. Возможный разрыв или растяжение коры

такого сочленения происходили около 1,70 [29] или 1,6 млрд лет [40], а окончательный распад протерозойского суперконтинента – около 1,3–1,2 млрд лет назад [26; 38]. Другая, альтернативная, точка зрения заключается в том, что этот суперконтинент оставался единым до 1,0 млрд лет и был преобразован в Родинию (рис. 1) [18]. Соответственно этому предложены разнообразные конфигурации протерозойского суперконтинента [18; 29; 40]. На приведенном рисунке показан возможный переход суперконтинента Пангеи в Родинию со складчатыми поясами Росс-Деламерийским (или Транс-Гудзонским) в континентальном блоке Лаврентии и Проторальско-Кадомским и Восточно-Гондванским в блоке Гондваны. Тут же показаны отделившиеся континентальные блоки Балтии (образовавшей докембрийский фундамент Восточно-Европейской платформы) и Сибири (фундамент Восточно-Сибирской платформы).



Рис. 1. Схема палеодинамических реконструкций для Родинии (1,3–1,0 млрд лет) в Южном полушарии единого суперконтинента периода протерозойской коллизии континентальных блоков Лаврентии, Балтии и Сибири [36]

1 – периферические блоки Гондваны, начавшие отделяться от нее в венде; 2 – континенты северного ряда; 3 – рифтогенные структуры; 4 – островодужно-аккреционные пояса; 5 – демаркационные разломы

Созидание и мантийный апвеллинг, сопровождающий плюмы, ассоциирующие с фрагментацией суперконтинента, привели к образованию крупных изверженных провинций и областей базальтовых покровов [38]. Такие изменения в термальной истории Земли также были благоприятны для формирования рудных месторождений и их сохранности [9; 30]. Временное распределение созидания и распада континентальной коры протерозойского суперконтинента контролировало изменения в составе атмосферы Земли и окислительно-восстановительных условий океанических вод, глобальных тепловых потоков, эпизодов мантийных плюмов, тектонический рециклинг, распространение мафит-ультрамафитового и фельзитового магматизма.

В этой работе представлен синтез основных рудных месторождений, образованных во время цикла формирования и распада протерозойской континентальной коры в едином суперконтиненте в период от 2,5 до 0,65 (0,54 по международной шкале) млрд лет.

Суперконтинентальный цикл и металлогения.

Суперконтинентальный цикл вовлекает в свой состав периодическое сочленение и коллизию фрагментов континентальной коры и их последующий разрыв. Континентальные фрагменты в конечном счете вновь сочленяются, чтобы сформировать новый суперконтинент, и такой цикл начинается снова. Максимум слияния в суперконтинент в истории Земли подтверждается существованием временного измерения около 750 млн лет от сочленения до разрыва континентальной коры суперконтинента, которое

включает около 500 млн лет на временной интервал аккреции и около 250 млн лет на период разрыва континентальной коры (по мнению Дж. Роджерса и М. Сантош [37]). Распределение U-Pb возрастов по циркону в орогенических гранитоидах и детритовых цирконах соответствует суперконтинентальному циклу в истории Земли [11; 13]. Три фазы суперконтинентального цикла, т. е. аккреция (сочленение), коллизия и разрыв континентальной коры, генерировали различные объемы магм. Эти авторы отмечают, что во время фазы аккреции коры генерация объемов магм была значительной, а в фазы коллизии и разрыва коры – гораздо меньшей, но зато сохранность тектонических комплексов пород в эти фазы – больше, чем при сочленении коры.

Рассматривая последнее положение шире, можно отметить следующее: в протерозойских коровых структурах орогенические золоторудные и порфировые Mo-Cu-Ag месторождения тяготеют к бывшим субдукционным зонам [20], а вулканогенные сульфидные месторождения образовывались в зонах расслаивания и метаморфизма зеленосланцевой фации [3] на конвергентных границах сочленяющихся коровых блоков [27]. Железорудные формации с месторождениями железистых кварцитов также формировались в эту фазу коровой аккреции субконтинента [28]. Мафит-ультрамафитовые мантийно-производные интрузии с сульфидно-никелевым и платинометалльным оруденениями, гидротермально-магматогенные Fe-окисные-Cu-Au, осадочно-экзгальционные Pb-Zn, а также оловорудные месторождения ассоциируют с рифтингом и началом распада суперконтинента [20; 25].

Полный коровый разрыв и распад суперконтинента в завершающий цикл сопровождается формированием осадочных бассейнов со стратифицированными осадочными Pb-Zn, Cu-песчаниковыми и U месторождениями несогласий.

Металлогения фазы сочленения (аккреции) континентальных блоков. Орогенические золоторудные месторождения. Такие золоторудные месторождения отражают поздние этапы развития аккреционных поясов, сочленяющихся континентальных блоков при формировании суперконтинента [21]. Эти месторождения появлялись в истории развития Земли начиная с 3,4 млрд лет и затем в течение трех протерозойских периодов развития: 2,7–2,5; 2,1–1,8 и 0,7–0,6 млрд лет [19; 22]. Докембрийские месторождения по времени хорошо коррелируются с формированием суперконтинентов, отражая их преимущественную сохранность во время амальгамации суперконтинента. Два главных пика формирования орогенических месторождений золота приходятся на протерозой (1,9 и 1,8 млрд лет) и характерны для Транс-Гудзонского орогена Канадского щита, Амазонского и Западно-Австралийского кратонов [19], совпадающих с формированием Пангеи. В этом ряду может быть упомянут орогенический пояс Аравалли в Индии, золоторудная минерализация в котором отвечает периоду оформления коровых континентальных границ [6; 29] в протерозойском субконтиненте.

Железорудные формации и месторождения железа. Железорудные формации чувствительны к окислительно-восстановительным условиям, которые требуются при их образовании и формировании железорудных месторождений из богатых железом вод докембрийских океанов. Месторождения появлялись на пассивных границах континентов, и их размещение контролируется мантийно-плюмовыми событиями, которые происходили при быстром коровом росте [10]. В докембрии месторождения формировались

главным образом в периоды между 2,75–2,45 и 2,0–1,5 млрд лет. Эти два временных события генерации железорудных формаций соответствующим главным эпизодам мантийных плюмов [28] (рис. 2).

Слоистые железорудные формации (BIF) образовывались в основном между археем и палеопротерозоем перед ростом атмосферного кислорода, в то время как гранулярные железорудные формации (GIF) и месторождения железа типа Алгома были отложены в палеопротерозое после Великого окислительного события [8], что указывает на различные процессы, ответственные за генерацию двух типов железорудных формаций [10]. Пик образования железорудных формаций (GIF) и месторождения железа типа Алгома отвечает времени 1,9–1,85 млрд лет и проявлен в регионах п-ова Лабрадор в Северной Америке и на севере кратона Йилгарн в Австралии. Этот период совпадает с формированием суперконтинента Пангея и характеризуется развитием мантийного магматизма, реализующего большие объемы железа и восстановительных веществ. Эти вещества модифицировали восстановительное состояние вод океанов, что способствовало образованию богатых железом вод под поверхностной окисленной зоной, а это в свою очередь – генерации гранулярного типа железистых формаций (GIF) и месторождений Fe типа Алгома при аккреции протерозойского суперконтинента [30].

Вулканогенные сульфидные месторождения. Такие месторождения (ВСМ или колчеданные) являются стратиформными накоплениями в сингенетических вулканитах или вблизи них сульфидных минералов железа и полиметаллов, произведенных из гидротермальных флюидов вулканогенных пород. Многие из ВСМ образуются вдоль конвергентных границ в условиях корового растяжения, особенно в заостроводужных бассейнах или рифтовых вулканических дугах и черных курильщиках океанического дна при смешении гидротермальных флюидов

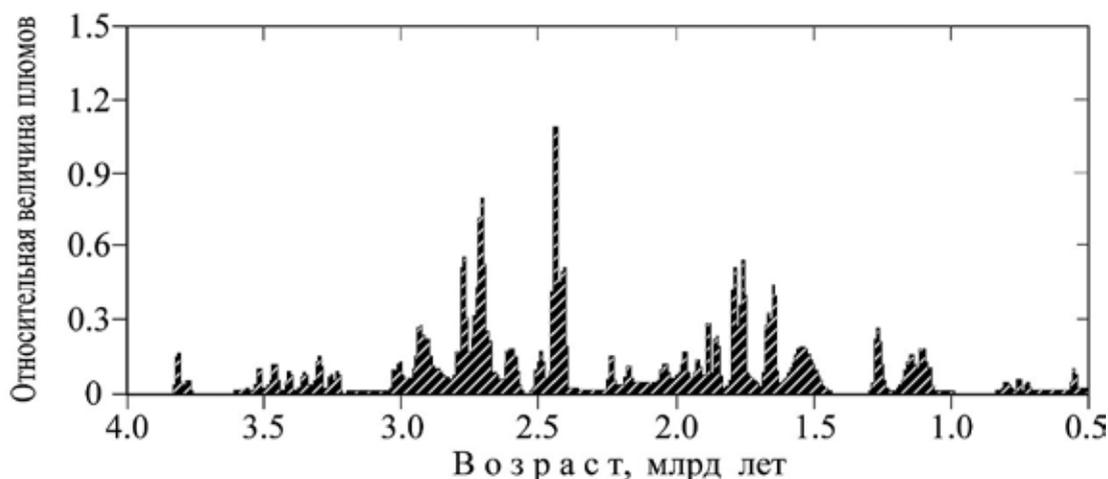


Рис. 2. Эпизоды мантийно-плюмовых событий по изверженным породам, наиболее активные из которых ассоциируют с генерацией железорудных формаций и месторождений [28]

с морской водой. В протерозое пик образования таких месторождений приходится на временной интервал 1,9–1,85 млрд лет при формировании суперконтинента Пангея. С докембрия до фанерозоя ВСМ показывают прогрессивное возрастание в них свинца, а также содержания в рудах барита и других сульфатов, что происходило благодаря оксигенации окружающей обстановки среды рудообразования [27]. Пик в 1,9–1,85 млрд лет образования ВСМ типичен для таких крупных месторождений, как Флин-Флон и Раттон провинции Манитоба, Канада и Крандон в штате Висконсин США. Менее крупные месторождения ВСМ относятся к периоду 1,8–1,72 млрд лет [10]. Месторождения ВСМ рудного района Бергслаген в Швеции также произошли при вулканизме и метаморфизме района [3] около 1,9 млрд лет вдоль континентальной границы протерозойских структур с архейским кратоном. Образование ВСМ было синхронно с мафитовым вулканизмом возраста около 1,9 млрд лет глобального масштаба, особенно активно проявленного на Фенноскандинавском щите [4]. Эта активность произошла при мантийном апвеллинге, который также привел к созданию крупных изверженных провинций [24] при образовании протерозойского суперконтинента.

Стратиформные Pb-Zn осадочно-эксгальационные месторождения в карбонатных породах. Для докембрия, особенно протерозоя, типичными являются стратиформные осадочно-эксгальационные колчеданно-полиметаллические (пирит-пирротиновые с Pb и Zn) месторождения в карбонатных породах, сопровождающих вулканы. Они приурочены к тектоническим структурам континентальных окраин, заостроводужных бассейнов, континентальных рифтов и интракратонных прогибов. Главный период формирования таких месторождений – 1,85–1,7 млрд лет. К ним относятся месторождения Виханти и Пюхясалми (Ладожско-Ботнический пояс Фенноскандинавского щита) [3; 4], Брокен-Хилл (интраконтинентальный прогиб кратона Гоулер в Австралии) и Завар (ороген Аравали, Индия) [6]. Этот период времени почти совпадает с максимальной консолидацией и началом распада протерозойского суперконтинента [16].

Металлогения, связанная с фазами разрыва протерозойского суперконтинента. Железоокисно-медь-золоторудные месторождения магматогидротермального генезиса приурочены к зонам тектонического растяжения и разрыва земной коры протерозойского суперконтинента. Они отражают временную и пространственную связь с метасоматизированными гранитами А-типа [1; 23; 30]. Одним из таких ранних месторождений в истории развития Земли было неоархейское (2,57 млрд лет) пограничное по времени с протерозоем месторождение Кайрас в Амазонском кратоне, Бразилия, а второе наиболее известное типовое – Олимпик-Дэм (1,59 млрд лет)

в Австралии [22; 30], образованное после аккреции протерозойского суперконтинента и, вероятно, относящееся по времени к ранней фазе распада этого суперконтинента [40]. Возможно, большинство немногочисленных месторождений этого генетического типа могут характеризовать именно эту фазу суперконтинентального цикла [1].

Стратиформные месторождения меди, Pb-Zn в обломочных и карбонатных породах, а также месторождения урана типа несогласий. Такой тип месторождений меди отражает возможность прохождения медьсодержащих флюидов через обломочные осадочные породы и доломитовые илы в палеорифтовых прогибах и осадочных бассейнах, обладающих породами с восстанавливающими свойствами [23]. Такого рода месторождения меди образовывались в земной коре протерозоя после Окислительного события [8] и представлены крупными месторождениями меди в палеопротерозойском Кодаро-Удоканском бассейне Восточной Сибири, например Удокан [2]. В это же время сформировано крупное месторождение медисто-песчаникового типа Хаммаслахти в Ладожско-Ботническом поясе, Фенноскандинавский (Балтийский) щит [3]. Другое подобного типа неопротерозойское месторождение Реветт (~ 1,45 млрд лет) на северо-западе США [23] образовалось в период распада протерозойского суперконтинента, отражая тектонический цикл его существования.

Стратифицированные Pb-Zn месторождения, размещенные в карбонатных породах, более широко известны как месторождения типа долины Миссисипи. Они были образованы в платформенных тектонических условиях и располагались в карбонатных породах на пассивных окраинах платформ [31]. В ранней истории развития Земли появление таких месторождений отмечено около 2,0 млрд лет назад, например Буш Парк и Перинг в Южной Африке [17]. Но все же для докембрия такие месторождения редки и более типичны для фанерозойских карбонатных отложений.

Наиболее благоприятные промышленные урановые месторождения типа несогласий (УМНТ) не известны в архейских комплексах, поскольку в это время отсутствовало достаточное количество кислорода в атмосфере. Но урановое оруденение этого типа было широко распространено в неопротерозое после прохождения Великого окислительного события [8], которое способствовало окислению уранинита и превращению его в водорастворимые формы ионов уранила. Мировые ресурсы урана (> 33 %) связаны с неопротерозойскими месторождениями УМНТ, например бассейна Атабаска в Канаде и Макартур-Ривер, совместно с Pb-Zn-Ag месторождениями возраста 1,7–1,5 млрд лет в Австралии или принадлежат к брекчиевым Fe-окисным-Cu-Au с ураном месторождениям (типа Олимпик-Дэм в Австралии). Месторождения УМНТ наблюдаются в интракратонных бассейнах, а брекчиевые

магматогенные тяготеют к поздним фазам интраконтинентальных рифтов, причем оба типа соответствуют завершению суперконтинентального цикла [20; 30].

Другие рудные месторождения, связанные с суперконтинентальным циклом. Сульфидные медно-никелевые месторождения образовывались при взаимодействии медь-никеленосных мафит-ультрамафитовых магм с коровыми породами, обогащенными серой при внедрении мантийных плюмов в течение рифтогенеза [4]. Такие месторождения, как и месторождения элементов платиновой группы (PGE), были образованы около 1,9 млрд лет в провинции Сьюпириор, Канадский щит [24], и Карело-Кольском кратоне, Фенноскандинавский щит [7] при агрегации протерозойского суперконтинента. Но вот магматическое сульфидное Ni-Cu-Co месторождение Войсис Бэй в Канаде с возрастом 1,3 млрд лет уже свидетельствует о времени распада этого суперконтинента [30], подобно анортозитам с Fe-Ti-V оруденением (массив Восточный) в Котуйкан-Монхолинской шовной зоне Анабарского щита Восточной Сибири [5].

Вместе с тем, по мнению Н. Ли и соавторов [33], Mo-Ag оруденение в месторождении Лонгменди с возрастом 1,85 млрд лет в молибденоносном поясе Ксинлин, как и Mo-Cu порфирировое месторождение Жайва с возрастом 1,76 млрд лет в южной части Северо-Китайского кратона, связаны со временем максимального сочленения коры протерозойского суперконтинента Пангея (или Колумбия). А вот Pb-Cu месторождения района Саргипали в карбонатных породах Восточной Индии (бассейн Куддапах) с возрастом 1,66 млрд лет уже свидетельствуют об их формировании в условиях корового растяжения [39] протерозойского суперконтинента.

Крупные оловорудные месторождения, генетически связанные с гранитами А-типа [15] и субщелочными гранитами возраста 1,82 млрд лет в оловорудных провинциях Питинга и Рондония в Амазонском кратоне [2], вмещают и редкоземельное оруденение (Nd, Ta, U, Zr и Th) [14]. Оруденение этого типа, приуроченное к гранитоидам А-типа, формировалось в фазы корового растяжения и внутриконтинентального рифтинга периода распада протерозойского суперконтинента Пангея.

Заключение. В суперконтинентальном цикле тектонические ассоциации пород периода аккреции и начала корового растяжения суперконтинента имеют незначительный потенциал сохранности, но тектонические ассоциации комплексов пород разрыва коры часто сохраняются в большей степени. В соответствии с этим рудная минерализация месторождений протерозойской истории развития Земли отражает подобные черты сохранности для исследований суперконтинентального цикла. Рудные месторождения, как орогенические золоторудные,

стратиформные свинцово-цинковые, Mo-Cu-Ag и вулканогенные сульфидные, отражают период аккреции континентальной коры протерозойской Пангеи в интервале 2,0–1,85 млрд лет. Этот период совпадает с временем проявления около 1,9 млрд лет мантийного суперплюмового события, которое определяло формирование ювенильной коры, ярко выраженное в образовании крупных изверженных провинций и прибавлении количеств металлов в океанической и континентальной земных корах. Все это вело к возникновению гранулярных железистых формаций (GIF) и месторождений железа типа Алгома, вулканогенных сульфидных и мантийно-производных сульфидно-никелевых, PGE и месторождений золота (рис. 3). Эти месторождения были образованы в условиях объединения или начального растяжения континентальной коры предполагаемого единого протерозойского суперконтинента.

Большая часть породных тектонических комплексов, отвечающих фазе разрыва континентальной коры суперконтинента, соответствует времени сохранности некоторых рудных месторождений периода 1,5–1,2 млрд лет. Этому времени отвечает формирование осадочных эпикратонных бассейнов со стратифицированными свинцово-цинковыми месторождениями типа Макартур-Ривер в Австралии. К такому же тектоническому типу относятся медные месторождения типа Уайт-Пайн (США) в интракратонных рифтовых прогибах, а также гидротермально-магматогенные железо-окисные-медь-золоторудные – типа

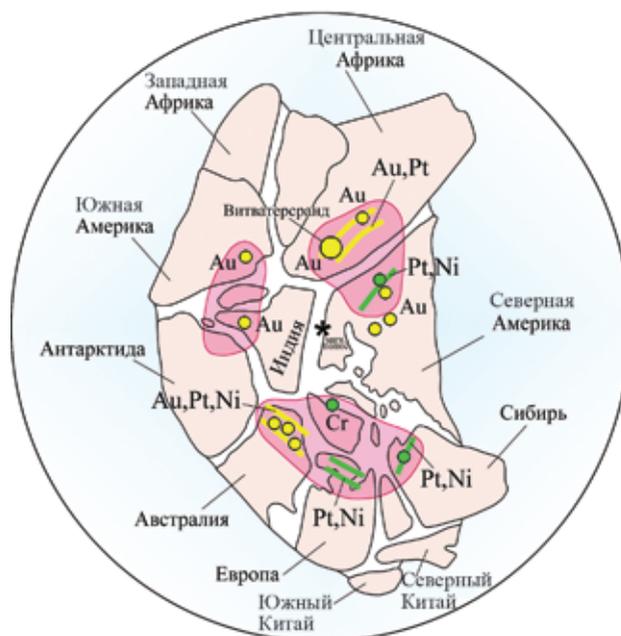


Рис. 3. Реконструкция протерозойского (2,5–0,65 млрд лет) суперконтинента Пангея в южнополярных координатах. Розовым обозначено возможное положение аккрецированных областей, несущих ранние концентрации платиноидов и золота, зеленым – крупнейших палеорифтов, которые вскрыли палеомантию и дали материал для мафит-ультрамафитовых интрузий с платиноидными месторождениями, а желтым – для месторождений золота

Олимпик-Дэм в Австралии и оловорудные, редкоземельные – провинции Питинга в Амазонском кратоне.

Работа выполнена в рамках темы НИР 0153–2019–0001 «Геологические, изотопно-геохимические и петрологические критерии выделения глобальных рубежей формирования и эволюции континентальной коры и литосферной мантии древних щитов фундамента Восточно-Европейской платформы и Восточной Сибири».

1. Ларин А. М. Граниты рапакиви и ассоциирующие породы. – СПб.: Наука, 2011. – 402 с.

2. Стратифицированные месторождения меди СССР / Ю. В. Богданов, Е. З. Бурьянов, Э. И. Кутырев и др. – Л.: Недра, 1973. – 312 с.

3. Турченко С. И. Металлогения метаморфогенных сульфидных месторождений Балтийского щита. – Л.: Наука, 1978. – 120 с.

4. Турченко С. И. Металлогения тектонических структур палеопротерозоя. – СПб.: Наука, 2007. – 175 с.

5. Турченко С. И., Розен О. М. Минерагенция Анабарского щита // Отечественная геология. – 2012. – № 3. – С. 8–16.

6. Турченко С. И., Вревский А. Б., Дагелайский В. Б. Металлогения докембрия Индии // Геология рудных месторождений. – 2009. – Т. 51, № 4. – С. 355–368.

7. Amelin Yu. A., Heaman L. M., Semenov V. S. U-Pb geochronology of layered mafic intrusions in the eastern Baltic Shield: implication for the timing and duration of Paleoproterozoic continental rifting // Precambrian Research. – 1995. – Vol. 75. – Pp. 31–46.

8. Anbar A. D., Duan Y., Lyons T. W. et al. A whiff of oxygen before the great oxidation event? // Science. – 2007. – Vol. 317. – Pp. 1903–1906.

9. Barley M. E., Groves D. I. Supercontinent cycles and the distribution of metal deposits through time // Geology. – 1992. – Vol. 20. – Pp. 291–294.

10. Bekker A., Slack J. F., Planavsky N., Krapež B. et al. Iron formations: the sedimentary product of a complex interplay among mantle, tectonic, oceanic, and biosphere processes // Economic Geology. – 2010. – Vol. 105. – Pp. 467–508.

11. Belousova E. A., Kostitsyn Y. A., Griffin W. L. et al. The growth of the continental crust: constraints from zircon Hf-isotope data // Lithos. – 2010. – Vol. 119. – Pp. 457–466.

12. Bleeker W. The late Archean record: a puzzle in ca. 35 pieces // Lithos. – 2003. – Vol. 71. – Pp. 99–134.

13. Condie K. C., Aster R. C. Episodic zircon age spectra of orogenic granitoids: the supercontinent connection and continental growth // Precambrian Research. – 2010. – Vol. 180. – Pp. 227–236.

14. Costi H. T., Dall'Agnol R., Pychavant M. et al. The peralkaline mineralized Madeira cryolite albite-rich granite of Pitinga, Amazonian craton, Brazil: petrography, mineralogy and crystallisation processes // Canadian Mineralogist. – 2009. – Vol. 47. – Pp. 1301–1327.

15. Dall'Agnol R., Costi H. T., Leite A. A. et al. Rapakivi granites from Brazil and adjacent areas // Precambrian Research. – 1999. – Vol. 95. – Pp. 9–39.

16. Deb M., Thorpe R. I., Cumming G. L. et al. Age, source and stratigraphic implications of Pb isotope data for conformable, sediment-hosted, base metal deposits in the Proterozoic Aravalli-Delhi orogenic belt, northwestern India // Precambrian Research. – 1989. – Vol. 43. – Pp. 1–22.

17. Duane M. J., Kruger F. J., Turner A. M. et al. The timing and isotopic character of regional hydrothermal alteration and associated epigenetic mineralization in the western sector of the Kaapvaal craton (South Africa) // Journal of African Earth Sciences. – 2004. – Vol. 38. – Pp. 461–476.

18. Evans D. A. D., Mitchell R. N. Assembly and breakup of the core of Paleoproterozoic–Mesoproterozoic supercontinent Nuna // Geology. – 2011. – Vol. 39. – Pp. 443–446.

19. Goldfarb R. J., Groves D. I., Gardoll S. Orogenic gold and geologic time: a global synthesis // Ore Geology Review. – 2001. – Vol. 18. – Pp. 1–75.

20. Goldfarb R. J., Bradley D., Leach D.L. Secular variation in economic geology // Economic Geology. – 2010. – Vol. 105. – Pp. 459–465.

21. Groves D. I., Goldfarb R. J., Gebre-Mariam M. et al. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types // Ore Geology Review. – 1998. – Vol. 13. – Pp. 7–27.

22. Groves D. I., Condie K. C., Goldfarb R. J. et al. Secular changes in global tectonic processes and their influence on the temporal distribution of gold-bearing mineral deposits // Economic Geology. – 2005. – Vol. 100. – Pp. 203–224.

23. Groves D. I., Bierlein F. P., Meinert L. D. et al. Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits through Earth history: implications for origin, lithospheric setting, and distinction from other epigenetic iron oxide deposits // Economic Geology. – 2010. – Vol. 105. – Pp. 641–654.

24. Heaman L. M., Peck D., Toope K. Timing and geochemistry of 1.88 Ga Molson igneous events, Manitoba: insight into the formation of a craton-scale magmatic and metallogenic province // Precambrian Research. – 2009. – Vol. 172. – Pp. 143–162.

25. Hitzman M. W., Selley D., Bull S. Formation of sedimentary rock-hosted copper deposits through Earth history // Economic Geology. – 2010. – Vol. 105. – Pp. 627–639.

26. Hou G., Santosh M., Qian X. et al. Configuration of the Late Paleoproterozoic supercontinent Columbia: insights from radiating mafic dyke swarms // Gondwana Research. – 2008. – Pp. 14, 395–409.

27. Houston D. L., Pehrsson S., Eglinton B. M. et al. The geology and metallogeny of volcanic-hosted massive sulfide deposits: variations through geologic time and with tectonic setting // Economic Geology. – 2010. – Vol. 105. – Pp. 571–591.

28. Isley A. E., Abbott D. H. Plume-related mafic volcanism and the deposition of banded iron formations // Journal of Geophysical Research. – 1999. – Vol. 104. – Pp. 15461–15477.

29. Kaur P., Chaudhri N., Raczek I. et al. Zircon ages of late Palaeoproterozoic (ca. 1.72–1.70 Ga) extension-related granitoids in NE Rajasthan, India: regional and tectonic significance // Gondwana Research. – 2011. – Vol. 19. – Pp. 1040–1053.

30. Kerrich R., Goldfarb R. J., Richards J. P. Metallogenic provinces in an evolving geodynamic framework // Economic Geology. – 2005. – Vol. 100. – Pp. 1097–1136.

31. Leach D. L., Bradley D. C., Huston D. Sediment-hosted lead zinc deposits in Earth history // Economic Geology. – 2010. – Vol. 105. – Pp. 593–625.

32. Li Z. X., Bogdanova S. V., Collins A. S. et al. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: a synthesis // Precambrian Research. – 2008. – Vol. 160. – Pp. 179–210.

33. Li N., Chen Y. J., Santosh M. et al. The 1.85 Ga Mo mineralization in the Xiong'er Terrane, China: implications for metallogeny associated with assembly of the Columbia supercontinent // Precambrian Research. – 2011. – Vol. 186. – Pp. 220–232.

34. Meert J. G. What's in a name? The Columbia (Paleopangaea/Nuna) supercontinent // Gondwana Research. – 2012. – Vol. 21. – Pp. 987–993.

35. Meert J. G., Lieberman B. S. The Neoproterozoic assembly of Gondwana and its relationship to the Ediacaran-Cambrian Radiation // Gondwana Research. – 2008. – Vol. 14. – Pp. 5–21.

36. Pesonen L. J., Elming S. A., Mertanen S. Paleomagnetic configuration of continents during Proterozoic // Tectonophysics. – 2003. – Vol. 375. – Pp. 289–321.

37. Rogers J. J. W., Santosh M. Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic supercontinent // Gondwana Research. – 2002. – Vol. 5. – Pp. 5–22.

38. Santosh M., Maruyama S., Yamamoto S. The making and breaking of supercontinents: some speculations based on super plumes, super downwelling and the role of tectosphere // *Gondwana Research*. — 2009. — Vol. 15. — Pp. 324–341.
39. Vishwakarma R. K. 1.66-Ga-old metamorphosed Pb-Cu deposit in Sargipali (eastern India): Manifestations of tidal flat environment and sedex-type genesis // *Precambrian Research*. — 1996. — Vol. 77. — Pp. 117–130.
40. Zhao G., Sun M., Wilde S. A. et al. A Paleo-Meso-proterozoic supercontinent: assembly, growth and breakup // *Earth-Science Reviews*. — 2004. — Vol. 67. — Pp. 91–12.
-
1. Larin A. M. Granity rapakivi i assotsiruyushchie porody [Rapakivi granites and associated rocks]. St. Petersburg: Nauka. 2011. 402 p.
2. Bogdanov Yu. B., Bur'yanov Eu. Z., Kutyrev Ye. I. et al. Stratifitsirovannye mestorozhdeniya medi SSSR [Stratigraphic copper deposits of USSR]. Leningrad: Nedra. 1973. 312 p.
3. Turchenko S. I. Metallogeniya metamorfogennykh sul'fidnykh mestorozhdeniy Baltiyskogo shchita [Metallogeny of metamorphic sulphide deposits Baltic Shield]. Leningrad: Nauka. 1978. 120 p.
4. Turchenko S. I. Metallogeniya tektonicheskikh struktur paleoproterozoya [Metallogeny of tectonic structures Paleoproterozoic]. St. Petersburg: Nauka. 2007. 175 p.
5. Turchenko S. I., Rozen O. M. Minerageny of Anabar Shield. *Otechestvennaya geologiya*. 2012. No. 3. — Pp. 8–16. (In Russian).
6. Turchenko S. I., Vrevsky A. B., Dagelaysky V. B. Metallogeny of Precambrian India. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*. 009. Vol. 51. No. 4. Pp. 355–368. (In Russian).
7. Amelin, Yu. A., Heamen, L. M., Semenov, V. S. 1995: U-Pb geochronology of layered mafic intrusions in the eastern Baltic Shield: implication for the timing and duration of Paleoproterozoic continental rifting. *Precambrian Research*. 75. 31–46.
8. Anbar, A. D., Duan, Y., Lyons, T. W. et al. 2007: A whiff of oxygen before the great oxidation event? *Science*. 317. 1903–1906.
9. Barley, M. E., Groves, D. I. 1992: Supercontinent cycles and the distribution of metal deposits through time. *Geology*. 20. 291–294.
10. Bekker, A., Slack, J. F., Planavsky, N., Krapež, B. et al. 2010: Iron formations: the sedimentary product of a complex interplay among mantle, tectonic, oceanic, and biosphere processes. *Economic Geology*. 105. 467–508.
11. Belousova E. A., Kostitsyn, Y. A., Griffin, W. L. et al. 2010: The growth of the continental crust: constraints from zircon Hf-isotope data. *Lithos*. 119. 457–466.
12. Bleeker, W. 2003: The late Archean record: a puzzle in ca. 35 pieces. *Lithos*. 71. 99–134.
13. Condie, K. C., Aster, R. C. 2010: Episodic zircon age spectra of orogenic granitoids: the supercontinent connection and continental growth. *Precambrian Research*. 180. 227–236.
14. Costi, H. T., Dall'Agnol, R., Pychavant, M. et al. 2009: The peralkaline mineralized Madeira cryolite albite-rich granite of Pitinga, Amazonian craton, Brazil: petrography, mineralogy and crystallisation processes. *Canadian Mineralogy*. 47. 1301–1327.
15. Dall'Agnol, R., Costi, H. T., Leite, A. A. et al. 1999: Rapakivi granites from Brazil and adjacent areas. *Precambrian Research*. 95. 9–39.
16. Deb, M., Thorpe, R. I., Cumming, G. L. et al. 1989: Age, source and stratigraphic implications of Pb isotope data for conformable, sediment-hosted, base metal deposits in the Proterozoic Aravalli-Delhi orogenic belt, northwestern India. *Precambrian Research*. 43. 1–22.
17. Duane, M. J., Kruger, F. J., Turner, A. M. et al. 2004: The timing and isotopic character of regional hydrothermal alteration and associated epigenetic mineralization in the western sector of the Kaapvaal craton (South Africa). *Journal of African Earth Sciences*. 38. 461–476.
18. Evans, D. A. D., Mitchell, R. N. 2011: Assembly and breakup of the core of Paleoproterozoic-Mesoproterozoic supercontinent Nuna. *Geology*. 39. 443–446.
19. Goldfarb, R. J., Groves, D. I., Gardoll, S. 2001. Orogenic gold and geologic time: a global synthesis. *Ore Geology Review*. 18. 1–75.
20. Goldfarb, R. J., Bradley, D., Leach, D. L. 2010: Secular variation in economic geology. *Economic Geology*. 105. 459–465.
21. Groves D. I., Goldfarb, R. J., Gebre-Mariam, M. et al. 1998: Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geology Review*. 13. 7–27.
22. Groves, D. I., Condie, K. C., Goldfarb, R. J. et al. 2005: Secular changes in global tectonic processes and their influence on the temporal distribution of gold-bearing mineral deposits. *Economic Geology*. 100. 203–224.
23. Groves, D. I., Bierlein, F. P., Meinert, L. D. et al. 2010: Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits through Earth history: implications for origin, lithospheric setting, and distinction from other epigenetic iron oxide deposits. *Economic Geology*. 105. 641–654.
24. Heaman, L. M., Peck, D., Toope, K. 2009: Timing and geochemistry of 1.88 Ga Molson igneous events, Manitoba: insight into the formation of a craton-scale magmatic and metallogenic province. *Precambrian Research*. 172. 143–162.
25. Hitzman, M. W., Selley, D., Bull, S. 2010: Formation of sedimentary rock-hosted copper deposits through Earth history. *Economic Geology*. 105. 627–639.
26. Hou, G., Santosh, M., Qian, X. et al. 2008: Configuration of the Late Paleoproterozoic supercontinent Columbia: insights from radiating mafic dyke swarms. *Gondwana Research*. 14. 395–409.
27. Houston, D. L., Pehrsson, S., Eglington, B. M. et al. 2010: The geology and metallogeny of volcanic-hosted massive sulfide deposits: variations through geologic time and with tectonic setting. *Economic Geology*. 105. 571–591.
28. Isley, A. E., Abbott, D. H. 1999: Plume-related mafic volcanism and the deposition of banded iron formations. *Journal of Geophysical Research*. 104. 15461–15477.
29. Kaur, P., Chaudhri, N., Raczek, I. et al. 2011: Zircon ages of late Palaeoproterozoic (ca. 1.72–1.70 Ga) extension-related granitoids in NE Rajasthan, India: regional and tectonic significance. *Gondwana Research*. 19. 1040–1053.
30. Kerrich, R., Goldfarb R. J., Richards J. P. 2005: Metallogenic provinces in an evolving geodynamic framework. *Economic Geology*. 100. 1097–1136.
31. Leach, D. L., Bradley, D. C., Huston, D. 2010: Sediment-hosted lead zinc deposits in Earth history. *Economic Geology*. 105. 593–625.
32. Li, Z. X., Bogdanova, S. V., Collins, A. S. et al. 2008: Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: a synthesis. *Precambrian Research*. 160. 179–210.
33. Li, N., Chen, Y. J., Santosh, M. et al. 2011: The 1.85 Ga Mo mineralization in the Xiong'er Terrane, China: implications for metallogeny associated with assembly of the Columbia supercontinent. *Precambrian Research*. 186. 220–232.
34. Meert, J. G. 2012: What's in a name? The Columbia (Paleopangaea/Nuna) supercontinent. *Gondwana Research*. 21. 987–993.
35. Meert, J. G., Lieberman, B. S. 2008: The Neoproterozoic assembly of Gondwana and its relationship to the Ediacaran-Cambrian Radiation. *Gondwana Research*. 14. 5–21.
36. Pesonen, L. J., Elming, S. A., Mertanen, S. 2003: Paleomagnetic configuration of continents during Proterozoic. *Tectonophysics*. 375. 289–321.
37. Rogers, J. J. W., Santosh, M. 2002: Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic supercontinent. *Gondwana Research*. 5. 5–22.
38. Santosh, M., Maruyama, S., Yamamoto, S. 2009: The making and breaking of supercontinents: some speculations based on super plumes, super down welling and the role of tectosphere. *Gondwana Research*. 15. 324–341.

39. Vishwakarma, R. K. 1996: 1.66-Ga-old metamorphosed Pb-Cu deposit in Sargipali (eastern India): Manifestations of tidal flat environment and sedex-type genesis. *Precambrian Research*. 77. 117–130.

40. Zhao, G., Sun, M., Wilde, S. A. et al. 2004: A Paleoproterozoic supercontinent: assembly, growth and breakup. *Earth-Science Reviews*. 67. 91–12.

Турченко Станислав Иванович – доктор геол.-минерал. наук, гл. науч. сотрудник, Институт геологии и геохронологии докембрия Российской академии наук (ИГГД РАН). Наб. Макарова, 2, Санкт-Петербург, 199034, Россия. <turchsi@mail.ru>

Turchenko Stanislav Ivanovich – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Chief Researcher. RAS Institute of the Precambrian Geology and Geochronology (IPGG RAS). 2 Naberezhnaya Makarova, St. Petersburg, 199034, Russia. <turchsi@mail.ru>