

УДК 551.24/553.07

ОТ КЕНОРЛЭНДА ДО СОВРЕМЕННЫХ КОНТИНЕНТОВ: ТЕКТОНИКА И МЕТАЛЛОГЕНИЯ

© А.С. Якубчук

Геологический институт РАН, 119017, Москва, Пыжевский пер., д. 7
e-mail: slaurum@aol.com

Поступила в редакцию 18.04.2018 г.; после доработки 10.09.2018 г.; принята к публикации 27.11.2018 г.

В тектонической истории Земли выделено три этапа: (1) нуклеарный — от возникновения протократонов до их сбора в суперконтинент Кенорлэнд (2.7–2.5 млрд лет), (2) кратонизации — от распада Кенорлэнда (2.45 млрд лет) до сбора Колумбии (1.85 млрд лет) и ее преобразования в Родинию (1.0–0.72 млрд лет), тектоники плит современного типа — от распада Родинии 720 млн лет до настоящего времени. Анализ перегруппировки во времени архейских гранулит-гнейсовых террейнов, соответствующих континентальным литосферным киям, позволяет выделить пять групп протократонов (Нена, Ур, Конго-Сахара, НАзия и Атлантика), оставшихся близко расположенными на протяжении длительного времени. Континентальная кора испытала вращение против часовой стрелки после распада протократона Кенорлэнд. НАзия и Атлантика характеризуются наименьшими поворотами и дрейфом относительно Нены, которая была повернута на 180°, наибольшие повороты характерны для Конго-Сахара, Ур и Калахари. С процессами сбора и распада суперконтинентов четко коррелирует смена преобладающих типов месторождений цветных, благородных, черных металлов и алмазов.

Ключевые слова: тектоника, металлогения, протократоны, кратоны, палеоплиты, суперконтиненты, континентальный литосферный киль

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0016-853X201923-32>

ВВЕДЕНИЕ

Плитно-тектонические реконструкции для последних 1.1 млрд лет, т. е. со времени сбора суперконтинента Родиния [93], достаточно хорошо обоснованы палеомагнитными, тектоническими, литологическими и палеонтологическими данными [17, 50, 51, 92]. В то же время положение некоторых кратонов (Северо-Китайский, Таримский и Янцзы), а также докембрийских метаморфических террейнов Центральной Азии остается дискуссионным.

Серия реконструкций суперконтинентов, существовавших до Родинии, была предложена сначала на основе синхронности тектонических событий и литологических корреляций [76, 77, 98], затем дополненных и измененных в соответствии с накопленными палеомагнитными данными [69, 71]. Эти исследования показали, что для палеопротерозоя может быть реконструирован суперконтинент Колумбия (Нуна), а для неоархея — Кенорлэнд [5, 71, 77, 95, 98]. Конфигурации обоих суперконтинентов до сих пор вызывают дискуссии, несмотря на широкое распространение раннедокембрийской коры, составляющей от 50% до 70% в пределах современных континентов [47, 75]. При формировании суперконтинентов предполагается существование одного или нескольких центров

нуклеации, что может быть связано с недостатком палеомагнитных данных [5, 11, 12, 39, 69, 76].

Для анализа тектонической эволюции Земли автором была составлена карта возрастных провинций континентальной коры (рис. 1), соответствующих крупным циклам ее роста в пределах тектонических единиц первого порядка — реологически жестких кратонов и подвижных орогенных поясов (или коллажей).

Кратоны традиционно определяются как крупные древние и тектонически стабильные коровые провинции [33]. Под участками коры древнее 2.5 млрд лет (архей) находятся континентальные литосферные кили глубиной до 250 км и даже 400 км (рис. 2) [2, 4]. Кора возрастом от 2.5 до 1.8–1.6 млрд лет (палеопротерозой) соответствует меньшей мощности литосферы (см. рис. 1, см. рис. 2). В состав кратонов включаются архей-палеопротерозойская или только архейская кора [11, 42]. Участки коры возрастом >2.5 млрд лет, часто метаморфизованной в гранулитовой фации, относятся к протократонам и нуклеусам [47]. Палеопротерозойская кора между ними образует внутренние (коллизийные) и внешние (аккреционные) орогены.

В Лаврентии коллизийные орогены (Транс-гудзонский) были образованы около 1.8 млрд лет

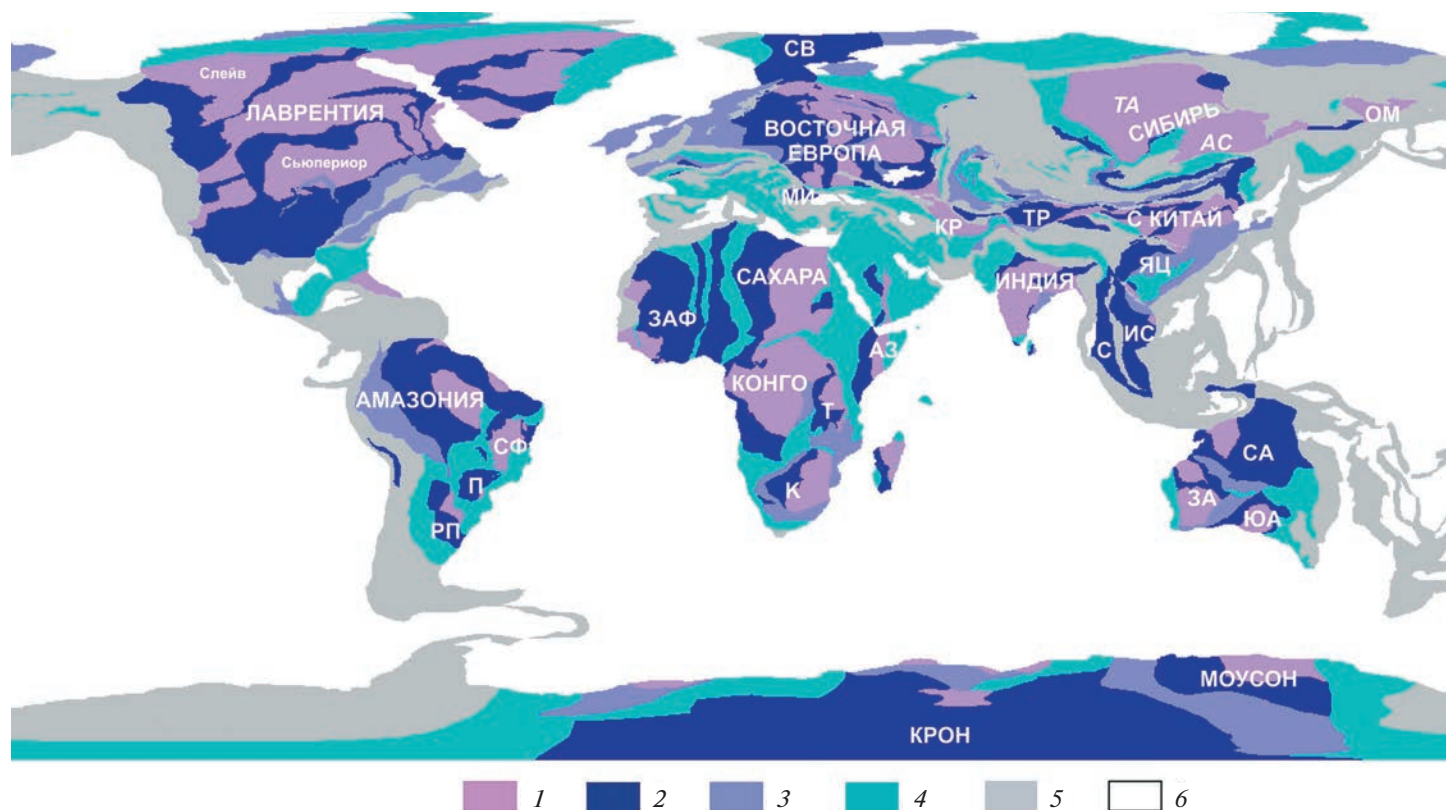


Рис. 1. Возрастные провинции континентальной коры (с использованием данных [2, 7, 20, 31, 38, 43, 53, 60, 61, 63, 66, 82, 96, 99, 100]).

Кратоны и кратонные террейны: АЗ — Азания, ЗА — Западная Австралия, ЗАФ — Западная Африка, ИС — Индокитай и Сунда, К — Калахари, КР — Каракум, МИ — Мизия, ОМ — Омолон, П — Парана, РП — Рио де ла Плата, С — Сибумасу, СА — Северная Австралия, СВ — Шпицберген, СФ — Сан-Франциско, Т — Танзания, ТР — Тарим, ЮА — Южная Австралия, ЯЦ — Янцзы.

Домены Сибирского кратона: АС — Алдан-Становой, ТА — Тунгуска-Анабар.

1 — >2.5 млрд лет; 2 — 2.5–1.4 млрд лет; 3 — 1.4–1.0 млрд лет; 4 — 1.0–0.75 млрд лет; 5 — <0.75 млрд лет; 6 — океаническая кора

назад, тогда как формирование внешних орогенных поясов (Явапай, Мазатзал, Гренвильский) продолжалось в течение позднего палеопротерозоя и мезопротерозоя. Амазонский и Западно-Африканский кратоны, в которых рост коры продолжался, соответственно, на протяжении архея-мезопротерозоя и архея-палеопротерозоя, являются примером ее продолжительного роста [45]. При этом в пределах обоих кратонов участки с архейской корой в настоящее время занимают относительно небольшие площади. В пределах Сибирского кратона и, возможно, кратона Конго, в отличие от большинства кратонов, отсутствуют палеопротерозойские коллизионные пояса возрастом 2.0–1.8 млрд лет, которые могут быть интерпретированы как следы закрывшихся океанов. Поэтому можно предполагать, что в этих кратонах архейская кора не подвергалась сильным трансформациям в палеопротерозое. Фрагменты архейско-палеопротерозойской коры Австралии, Конго-Танзании, а также Антарктиды и Индии (до раскрытия Индийского океана) спаяны мезопротерозойскими орогенами возрастом 1.0 млрд лет,

не характерными для остальных кратонов. Это указывает на коллизию и сбор части кратонов в конце мезопротерозоя. Таким образом, период кратонизации охватывает временной интервал от 2.7 до 1.0 млрд лет, а не приурочен только к раннему докембрию и определяется реологическими свойствами коры и литосферной мантии [3, 11, 42, 95].

Для коровых провинций возрастом >1.0 млрд лет характерна вертикальная мощность литосферы >125 км (см. рис. 2), которая не зависит от положения мезопротерозойских орогенов. Поэтому в данной работе под кратонами понимаются реологически жесткие образования, кора которых сформировалась до 1.0 млрд лет назад. Кратоны в таком понимании содержат фрагменты суперконтинентов Кенорлэнд, Колумбии и Родинии, а кратонизация считается длительным процессом формирования континентальной литосферы толщиной >125 км, который достиг своей кульминации при формировании суперконтинента Родиния.

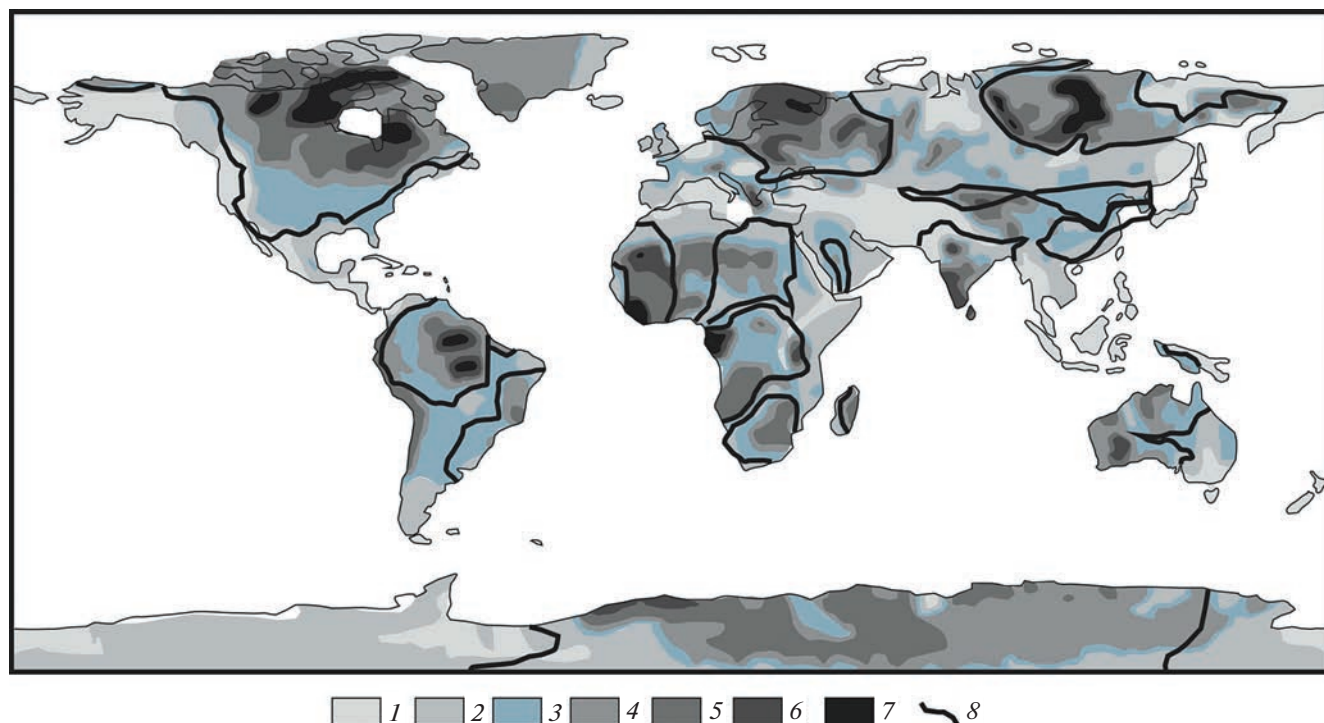


Рис. 2. Мощность литосферы на основе глобальной термальной модели с разрешением $1^\circ \times 1^\circ$ для континентальной литосферы (с использованием данных [4]).
 1 — 50–100 км; 2 — 100–125 км; 3 — 125–150 км; 4 — 150–175 км; 5 — 175–200 км; 6 — 200–250 км; 7 — >250 км; 8 — границы кратонов

Небольшие кратонные террейны также участвуют в строении орогенных коллажей неопротерозоя-фанерозоя [26].

Орогенные коллажи в отличие от кратонов имеют более тонкую литосферу мощностью 50–125 км (см. рис. 2). Однако области с литосферой толщиной > 150 км локально присутствуют в наиболее сжатых частях современных коллизионных (Тибет-Гималаи) и аккреционных (Анды) орогенов.

Большинство исследователей связывает металлогеническую эволюцию с циклами формирования и распада суперконтинентов [46]. В то же время каждый кратон, включая его субконтинентальную литосферную мантию, имеет свои собственные металлогенические характеристики [25]. Периодичность формирования рудных месторождений к настоящему времени хорошо изучена [36, 46, 52]. Однако до недавнего времени не представлялось возможным рассматривать ее в связи палеотектоническими реконструкциями суперконтинентальных циклов, а следовательно, видеть не только общие тренды, но и индивидуальные тектонические и металлогенические характеристики крупных коровых провинций во времени.

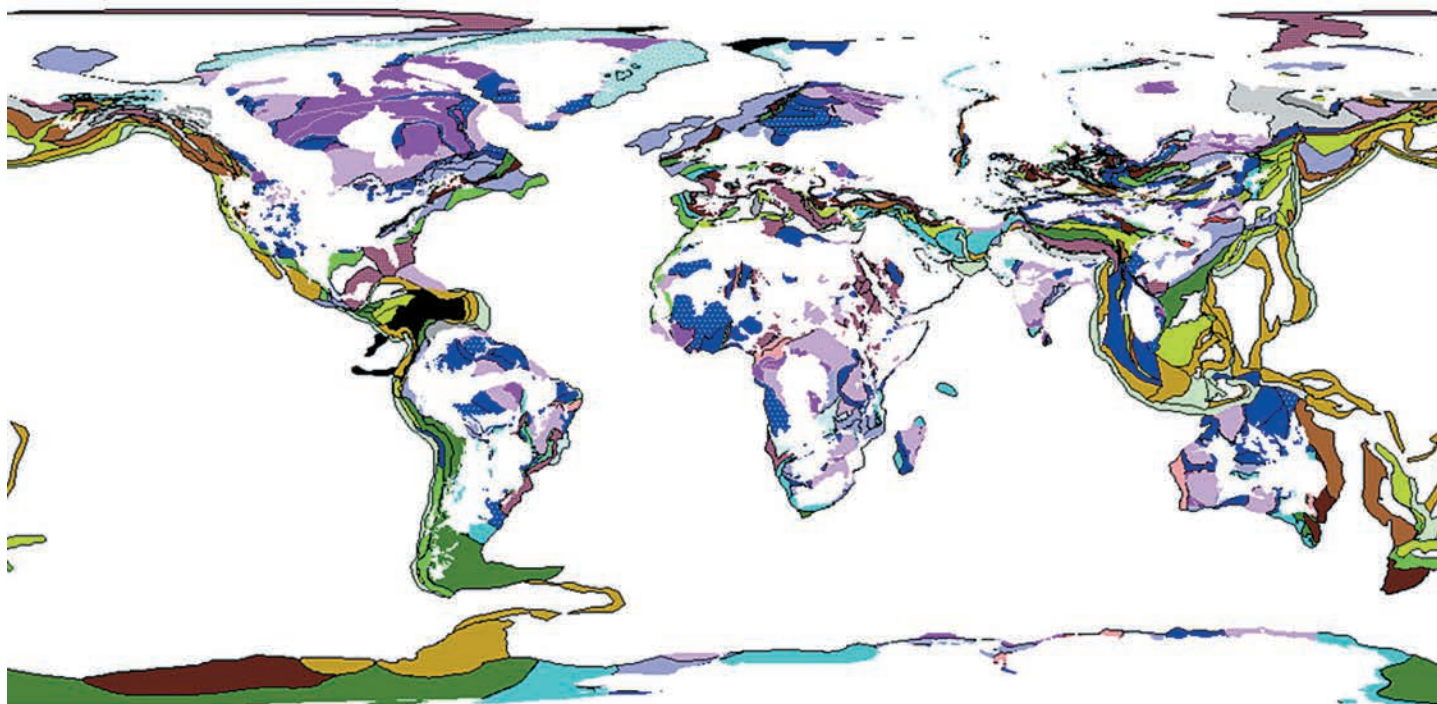
Целью данной работы и является исследование корреляций между тектоническими циклами и меняющимся стилем крупных скоплений главных месторождений металлов (железа, золота, полиметаллов, меди и никеля) и алмазов.

КАРТА ТЕРРЕЙНОВ

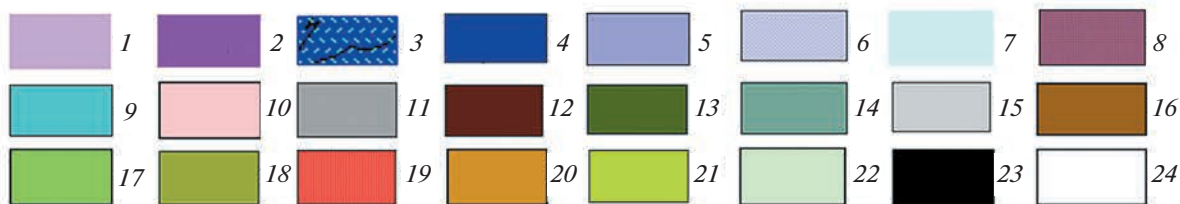
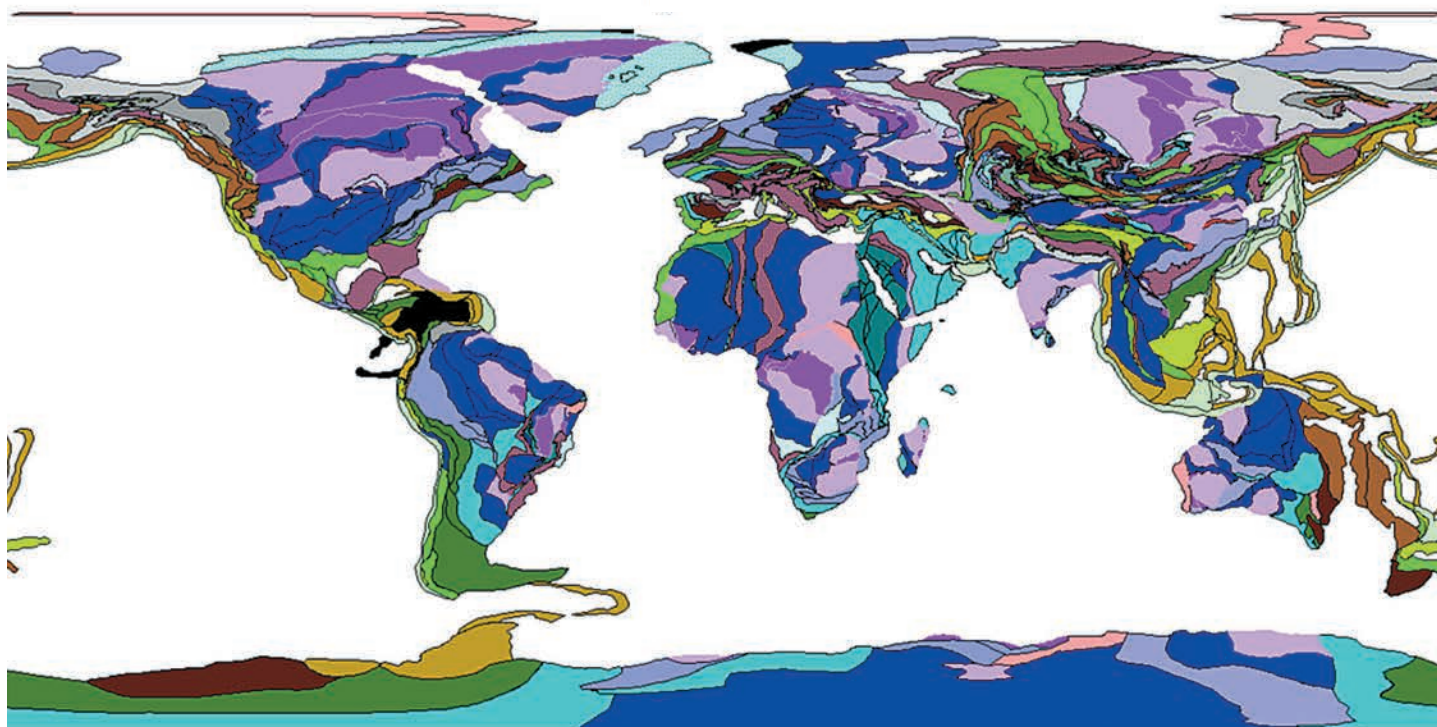
В основу данной работы положена глобальная карта распространения террейнов (рис. 3), которая составляется и обновляется автором в течение многих лет. Составление такой карты имеет естественные препятствия из-за наличия протерозойско-фанерозойских осадочных бассейнов и современных ледниковых щитов, которые в совокупности скрывают примерно 50% континентальной коры. Наиболее закрытые области приходятся на Сахару, Аравию, северную Евразию, Южную Америку, Гренландию и Антарктиду (см. рис. 3, А). Аэромагнитные данные и геологические экстраполяции позволяют частично преодолеть эти препятствия.

На приведенной карте террейнов, включающей все закрытые области (см. рис. 3, Б), представлено более тысячи террейнов, разделенных по возрасту (от архея до кайнозоя) и по составу, учитывающему их осадочную, магматическую или метаморфическую природу. В большинстве случаев дана более детальная характеристика террейнов, позволяющая судить о тектонических обстановках их формирования: гранулитовые или гранит-зеленокаменные (в случае метаморфических террейнов), или ранние островодужные, офиолитовые, океанических островов для магматических, а также аккреционных клиньев (турбидитовые) или пассивных окраин для осадочных террейнов. Пассив-

А



Б



ные окраины показаны в тех случаях, когда они занимают обширные площади и тип террейна в их фундаменте достоверно не может быть установлен на современном уровне знаний.

Террейны показаны как в пределах кратонов, так и в орогенных коллажах. После рубежа 720 млн лет общая конфигурация тектонического рисунка новых террейнов в пределах коллажей может быть кинематически увязана с кратонами. С этого момента предпринята попытка разделить их на литосферные палеоплиты и плиты.

Палеоплиты используются в данной работе для временного интервала от 720 до 180 млн лет (рис. 4), т. е. вплоть до момента полного сбора Пангеи. В палеоплитах происходило наращивание континентальной коры в основном в сторону океанов. Границы палеоплит определяются по сутурам, вблизи которых устанавливается прерывание направленного омолаживания террейнов. В качестве примеров можно привести Главный Уральский разлом, Бразильско-Транс-Сахарскую, Каледонскую, Рейнскую, Палеотетическую и Неотетическую сутуры, а также более сложные примеры типа Монголо-Охотской сутуры.

После распада Пангеи некоторые палеоплиты были реорганизованы и стали частью современных плит. Например, орогены Северной Пацифики теперь принадлежат разным литосферным плитам. В других палеоплитах рост коры был прерван, они были реорганизованы и сформировались новые плиты, типа Карибской. Некоторые палеоплиты, такие как Гондвана, просуществовали около 300 млн лет. В пределах Гондваны, в частности, установлены свидетельства нескольких реорганизаций, и сама она состоит из нескольких спаянных континентальных палеоплит, а новые орогенные коллажи, такие как Терра Аустралис в Южной Пацифике, стали расти вдоль новой активной окраины, объединяющей несколько кратонов. Гондвана затем сама оказалась разделенной между несколькими современными плитами (см. рис. 4).

Современные литосферные плиты, возникшие после распада Пангеи около 180 млн лет назад, определяются как крупные сегменты океанической и/или континентальной литосферы, находящиеся в относительном движении по отношению

к соседним плитам. Их границы традиционно определяются по поясам повышенной сейсмичности. Такие плиты тоже перегруппировывались во времени и не обязательно были жесткими.

ИЗМЕНЕНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ОБСТАНОВОК ФОРМИРОВАНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В ИСТОРИИ ЗЕМЛИ

Многие исследователи показали, что месторождения формировались в определенных тектонических обстановках как на границах плит, так и внутри них [36, 46, 79]. Конкретные типы месторождений, содержащих алмазы и металлы, включая медь, свинец, цинк, золото и никель, являются индикаторами тектонических обстановок [46, 79] и могут быть использованы как дополнительная характеристика при палеотектонических реконструкциях.

Алмазы открыты на всех кратонах, кроме Антарктиды (рис. 5). Только месторождения алмазов в магматических породах (и связанных с ними россыпях) являются экономически значимыми. Эти месторождения, будучи разными по возрасту, располагаются вблизи гранулит-гнейсовых террейнов (см. рис. 5), которые совпадают с наиболее толстыми (>250 км) и крупными континентальными литосферными киями (см. рис. 2), выявленными на всех современных континентах [4]. На примере протократона Каапвааль была предложена модель глубокой субдукции с формированием алмазов в субконтинентальной литосферной мантии [37]. Геохронологическое изучение минеральных включений в алмазах Южной Африки, Сибири, Северо-Западной Канады и Австралии показало, что сами алмазы формировались между 3.8 и 1.0 млрд лет и находятся в хорошей корреляции с возрастом континентальной коры в соответствующих кратонах [37]. В дальнейшем алмазы были доставлены на коровый уровень гораздо более молодыми кимберлитами или реже лампроитами [37]. Алмазы возрастом менее 720 млн лет обнаружены в метаморфических породах сверхвысоких давлений во многих частях Евразии. Их формирование также объясняется глубокой субдукцией континентальной коры [37].

Рис. 3. Карты литотектонических террейнов Земли.

Выступы фундамента в кратонах и орогенных коллажах: А — из-под осадочных бассейнов и ледниковых щитов, Б — со снятыми осадочными бассейнами и ледниковыми щитами.

1–2 — архейские террейны: 1 — гранит-зеленокаменные, 2 — гранулит-гнейсовые; 3–4 — палеопротерозойские террейны: 3 — магматические дуги, 4 — метаморфические; 5–6 — мезопротерозойские террейны: 5 — метаморфические, 6 — континентальные рифты; 7–10 — террейны тония и криогения: 7 — пассивные окраины, 8 — магматические дуги, 9 — аккреционные клинья, 10 — метаморфические; 11–14 — террейны эдиакария-раннего палеозоя: 11 — пассивные окраины (включая средний палеозой), 12 — магматические дуги, 13 — аккреционные клинья у внешних океанов, 14 — аккреционные клинья сутурированных задуговых бассейнов; 15–19 — средне- и позднепалеозойские террейны: 15 — пассивные окраины (включая мезозой), 16 — магматические дуги, 17 — аккреционные клинья у внешних океанов, 18 — аккреционные клинья сутурированных задуговых бассейнов, 19 — метаморфиты сверхвысоких давлений; 20–24 — мезозойские и кайнозойские террейны: 20 — магматические дуги, 21 — аккреционные клинья у внешних океанов (мезозойские), 22 — аккреционные клинья у внешних океанов (кайнозойские), 23 — океанические плато, 24 — осадочные бассейны на континентах и океаническая кора

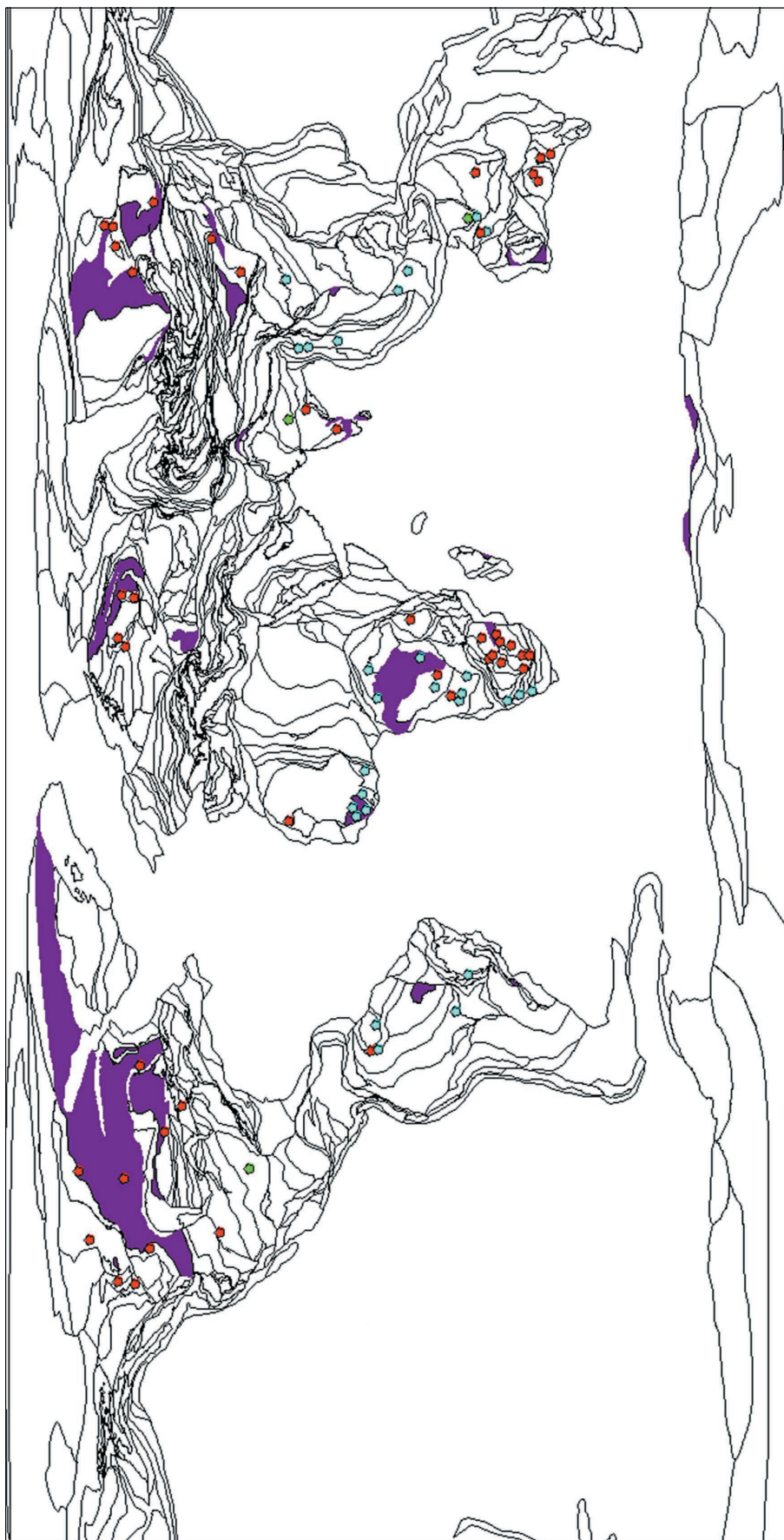


Рис. 5. Глобальное распространение месторождений и проявлений алмазов (с использованием данных [37]) по отношению к фрагментам континентального литосферного кила.

1 — фрагменты континентального литосферного кила; 2 — кимберлиты; 3 — лампрофиты; 4 — россыпи

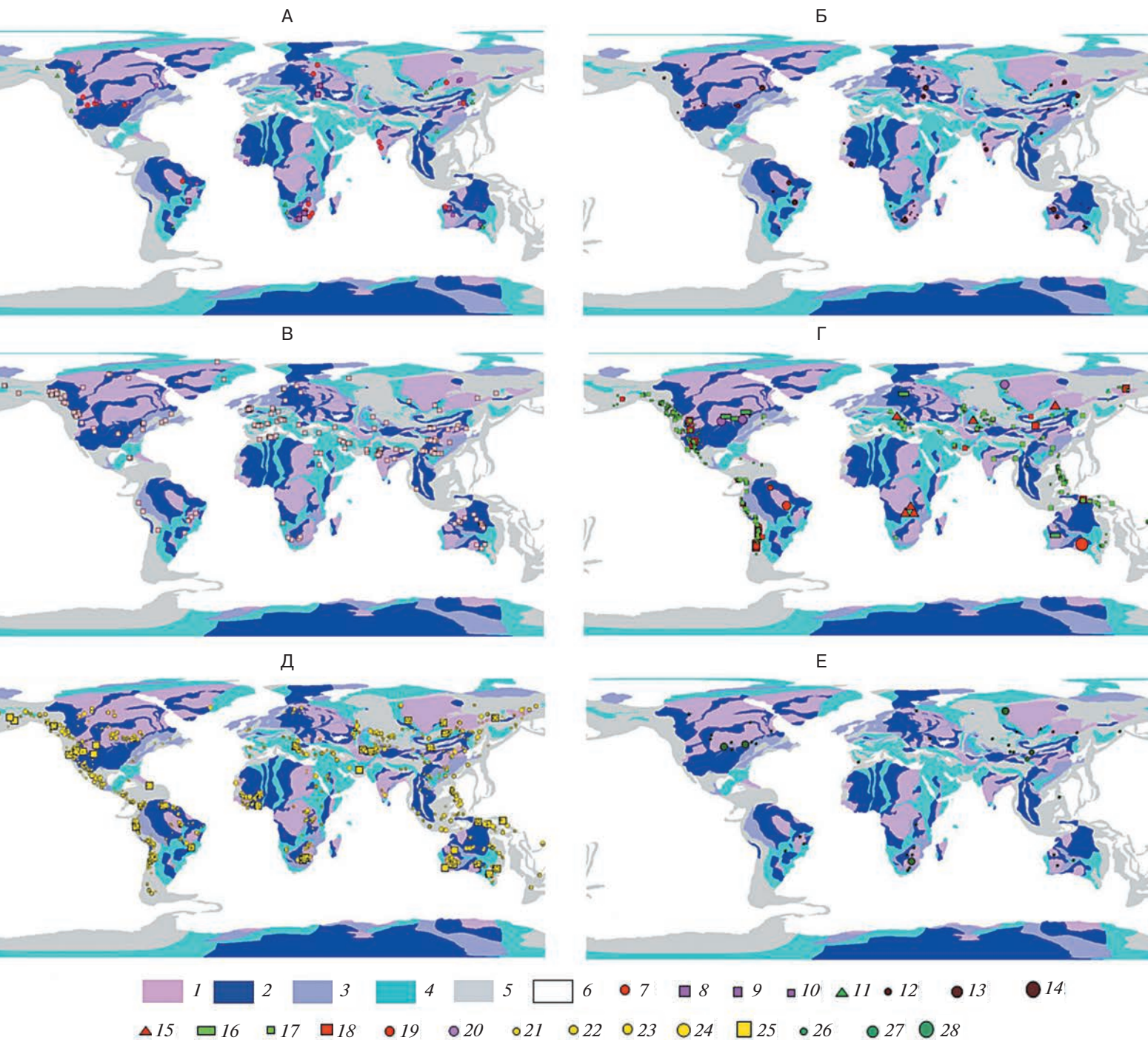


Рис. 6. Глобальное распространение главных месторождений металлов на фоне возрастных провинций континентальной коры.

А — Возраст железорудных месторождений (по данным [9], с изменениями и дополнениями); Б — Размер железорудных месторождений (по данным [9], с изменениями и дополнениями); В — Архейско-протерозойские седиментационно-эксталяционные месторождения свинца-цинка (по данным [49]); Г — Медь в различных типах месторождений (по данным [86], с изменениями и дополнениями) и коровых провинциях; Д — Месторождения золота всех типов с ресурсами более 30 т Au; Е — Сульфидно-никелевые месторождения мира (по данным [15], с изменениями и дополнениями).

1 — >2.5 млрд лет; 2 — 2.5–1.4 млрд лет; 3 — 1.4–1.0 млрд лет; 4 — 1.0–0.75 млрд лет; 5 — <0.75 млрд лет; 6 — океаническая кора; 7 — мезо- и неоархейские; 8 — неоархей-протерозойские; 9 — средне-позднепротерозойские; 10 — мезопротерозойские; 11 — неопротерозойские; 12 — средние; 13 — крупные; 14 — гигантские; 15 — медь в осадочных породах (медистые песчаники); 16 — медно-колчеданные; 17 — порфировые (<10 млн т меди); 18 — порфировые (>10 млн т меди); 19 — железо-оксидно-медно-золотые; 20 — сульфидно-никелевые; 21 — 30–50 т; 22 — 50–150 т; 23 — 150–300 т; 24 — 300–1000 т; 25 — >1000 т; 26 — средние; 27 — крупные; 28 — гигантские

Железистые кварциты являются глобально распространенным типом рудных месторождений возрастом от архея до палеопротерозоя [9]. Древнейшее месторождение такого типа имеет возраст 3.8 млрд лет и находится в комплексе Исуа в Гренландии [9]. Тектонически железистые кварциты приурочены к кратонам и лишь изредка известны в кратонных террейнах внутри орогенных коллажей (рис. 6, А). Существенных различий между ними не установлено [44]. Это указывает на принципиальное сходство тектонических обстановок в большинстве провинций во время их образования. Наиболее крупные месторождения сформировались в неорхее-раннем палеопротерозое (см. рис. 6, Б). Месторождения практически исчезают после рубежа 1.85 млрд лет, вновь появляясь в конце неопротерозоя [9].

Крупные протерозойские месторождения свинца и цинка (см. рис. 6, В) демонстрируют хорошую связь с кратонами. Эти месторождения располагаются преимущественно во внешних палеопротерозойских орогенах, которые формировались на периферии суперконтинента Колумбия. Крупные палеопротерозойские месторождения известны в Австралии, Индии, Калахари, Северной Америке и Восточной Европе, мезо- и неопротерозойские — в Сибири и Катазии [49]. Такие месторождения не известны в Амазонии и Западной Африке (см. рис. 6, В). Возможно, что они плохо разведаны в Конго-Сахаре, так как они известны на северо-востоке последнего, а также в пределах протократона Сан-Франциско.

Медные месторождения развиты повсеместно и во всех геологических эпохах. Медь известна в разных типах месторождений, сформированных в разных тектонических обстановках [86]: в порфириновых, в медистых песчаниках, колчеданных, сульфидно-никелевых и в связи с щелочным магматизмом (железооксидно-золото-медные месторождения). Месторождения с запасами более 10 млн т меди (гиганты) известны на всех современных континентах и относятся к разным типам [57] (см. рис. 6, Г). В архее-палеопротерозое гигантские скопления меди сформировались в железооксидно-золото-медных рудных системах, а в палеозое и особенно мезозое-кайнозое [86] связаны преимущественно с порфириновыми месторождениями. Месторождения медистых песчаников краткосрочно-периодически формировались с протерозоя по мезозой [41], в основном совпадая со сбором суперконтинентов.

При таком разнообразном пространственно-временном распределении разных типов месторождений меди наиболее интересной является их аномально высокая концентрация в Андах, имеющая кайнозойский возраст. Эта порфирировая провинция сформировалась в пределах активной окраины в условиях быстрого воздымания над выполаживающейся зоной субдукции с соответ-

ствующим отступлением в сторону континента омолаживающихся магматических дуг.

Глобальное распределение месторождений золота (см. рис. 6, Д) имеет наилучшую корреляцию с тектоническими провинциями во времени. Орогенные месторождения золота преобладают над другими типами в архее и протерозое, тогда как в мезозое-кайнозое большая часть золота стала накапливаться в порфириновых и эпитегрмальных месторождениях, связанных с субдукцией [36]. Такое различие частично объясняется худшей сохранностью древних эпитегрмальных месторождений [36].

Архейские орогенные месторождения золота расположены преимущественно в кратонах. Однако они пока не обнаружены на Сибирском кратоне, а в Восточно-Европейском известны лишь небольшие проявления (см. рис. 6, Д). Эти месторождения формировались почти синхронно в разных протократонах между 2.7 и 2.5 млрд лет, а пик их формирования совпадает со сбором суперконтинента Кенорлэнд [35].

Протерозойские месторождения орогенного золота образуют две возрастные группы: 2.2–2.0 млрд лет (Амазония и Западная Африка (см. рис. 6, Д), где они наиболее многочисленны и часто бывают крупными) и 1.85 млрд лет (Северная Америка, север Финляндии, Северная Австралия). В целом формирование золотых месторождений этого типа хорошо коррелируется с пиком сбора Колумбии. Золото также является важным компонентом ряда колчеданных и железооксидно-золото-медных месторождений.

Неопротерозойские и палеозойские месторождения орогенного золота известны в Австралии, Бразилии, Южной Сибири, Варисской Европе и немного в Аппалачах. Они наиболее многочисленны в Центрально-Азиатском суперколлаже, особенно на Тянь-Шане, маркируя сбор суперконтинента Пангея в связи с субдукционными процессами в Палеотетисе. Золотом обогащены многие палеозойские колчеданные и медно-порфириновые системы Центральной Азии [97], что делает их отработку рентабельной, несмотря на относительно невысокие содержания меди. Порфириновые месторождения сопровождаются эпитегрмальными системами мезозойско-кайнозойского возраста, особенно обильными в пределах Тихоокеанского кольца [46]. Крупные месторождения этого типа и возраста также известны в Альпийско-Гималайском поясе, где практически полностью отсутствуют значимые месторождения орогенного золота [74].

Сульфидно-никелевые (с медью и платинойдами) месторождения формировались в разные интервалы времени в связи с мафит-ультрамафитовым магматизмом на протяжении почти всей истории Земли [46]. Хотя они и присутствуют глобально (см. рис. 6, Е), они совсем не известны в пределах Амазонии, Западной Африки и, возможно, Сахарском кратоне. До некоторой степени

их распределение похоже на такое протерозойских свинцово-цинковых месторождений.

Особенности металлогенического контроля сульфидно-никелевых месторождений увязываются с плюмовым магматизмом, проявленном на разных кратонах в различные временные интервалы [15, 52]. Экономически значимые архейские месторождения в связи с коматиитами известны только в Западной Австралии, хотя похожие проявления известны в Южной Африке и Лаврентии. Протерозойские сульфидно-никелевые месторождения в ультрамафит-мафитовых интрузиях географически более обширны, преобладая в Восточной Европе и особенно в Лаврентии, где находится гигантское месторождение никеля Садбери. В отличие от большинства месторождений среднего размера его образование увязывают с метеоритным ударом в край протократона Сьюперииор около 2 млрд лет назад. Небольшие позднепалеозойские месторождения, часть из которых отрабатывается, известны в Центральной Азии и Варисской Европе. Крупнейшее в мире скопление никеля и сопутствующих металлов в Норильске сформировалось в связи с пермо-триасовыми траппами на северо-западном краю Сибирского кратона [97]. Небольшие мезозойские месторождения и проявления известны на севере Циркум—Тихоокеанского пояса.

ПАЛЕОТЕКТОНИЧЕСКИЕ РЕКОНСТРУКЦИИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Реконструкции для последних 750 млн лет можно считать достаточно надежными [50, 80], но некоторые крупные регионы (Центральная Азия) все еще требуют доработки [96]. Для реконструкций древнее 750 млн лет литотектонические корреляции между современными пространственно разделенными кратонами и протократонами часто остаются слабо обоснованными, а охарактеризованность палеомагнитными данными очень неравномерна [71]. Как отметили Писаревский и др. [71], даже для наиболее изученной Лаврентии все еще не удалось выстроить надежную траекторию кажущегося движения полюсов. Палеомагнитные данные по Индии, Северному Китаю и Сибири [56] в последнее время активно пополняются, но данные о палео- и мезопротерозойском положении полюсов для Южного Китая (Янцзы), Рио де ла Платы, Сан-Франциско и Западной Африки отсутствуют совсем, ограниченно характеризуя неопротерозой [71]. Наиболее системные протерозойские палеомагнитные данные имеются для 7 кратонов, характеризуя временные интервалы 1.88, 1.45, 1.27, 1.05 и 0.9 млрд лет назад [71]. Ключевые архейские палеомагнитные данные имеются для 5 протократонов [69].

Плитно-тектонические реконструкции в данном исследовании построены на основании опубликованных данных, но они были изменены с

применением стандартных методов для палеомагнитных [71] и литотектонических корреляций [91], дополненных металлогеническими данными.

Нуклеарный этап

Реконструкция Кенорлэнда возможна, в первую очередь, на основании литотектонических данных. Только в Сибирском кратоне и, возможно, в кратоне Конго сохранилась ненарушенная неархейская зональность с осевым положением гранулит-гнейсовых террейнов и симметричным относительно них положением гранит-зеленокаменных террейнов (см. рис. 3, Б). В Лаврентии, Восточной Европе, Северном Китае и, возможно, Калахари эта зональность присутствует, хотя она нарушена присутствием внутренних палеопротерозойских орогенов. Все другие кратоны и протократоны содержат асимметричные или очень небольшие фрагменты архейской коры.

На общее литотектоническое сходство между многочисленными протократонами было указано в работах [34, 47]. Задача восстановления возможной конфигурации архейского суперконтинента Кенорлэнд требует обнаружения литотектонических маркеров между более чем 35 архейскими протократонами и менее определенным числом террейнов в молодых орогенах [11].

Осознание существования Кенорлэнда основано на глобальном синхронизме тектонических событий возрастом 2.7–2.5 млрд лет [5]. Были высказаны предположения, что новая континентальная кора могла как образовываться, так и не образовываться единый суперконтинент, т. е. имелось несколько нуклеарных центров [46]. Роджерс [76] предположил, что первая континентальная кора образовалась в трех центрах (Ур, Нена и Атлантика), которые затем стали тектонически взаимодействовать между собой, но оставались удивительно стабильными на протяжении 3.0–2.5 млрд лет.

Ур и Нена были сгруппированы на основе сопоставления их террейнов [76], однако кратоны Атлантики были объединены на основе сходства протерозойских осадочных бассейнов в Амазонии и Конго [76], а не фундамента. В результате были проигнорированы и различия в строении их фундаментов (см. рис. 1), и роль Бразильско—Транс-Сахарского орогена между кратонами Амазония—Западная Африка, с одной стороны, и Конго—Сан-Франциско—Сахара, с другой стороны, хотя время коллизии указывает, что они были объединены только в неопротерозое-раннем палеозое [21]. Кроме того, Пайпер [70] указал, что мезопротерозойские орогены являются внутренними между архейскими протократонами в Конго, Танзании и Австралии и внешними в Южной Америке (см. рис. 1). Следовательно, Атлантика должна включать только кратоны с небольшими фрагментами архейской коры протократонов Каражас и Иматака в Амазонии и протократонов Ман и Регибат в Западной Африке.

Кратоны Конго-Сан-Франциско должны быть отнесены к другой группе, к которой можно добавить Танзанию и Сахару. Более того, архейско-протерозойский террейн Азания в Сомали и Саудовской Аравии, хотя и отделенный Восточно-Африканским орогеном, также, вероятно, являлся частью группы Конго-Сахара [31]. При этом более важный неопротерозойский раздел с Индией был предложен вдоль восточного Мадагаскара, а не Восточно-Африканского орогена.

Индия, Австралия, Калахари и Антарктида могут быть объединены в Ур из-за сходства их архейских гранит-зеленокаменных террейнов [76]. Возможно, к Уру следует отнести Индокитай и Сибумасу. Присутствие архейской коры в последнем обосновано наличием детритовых и ксеногенных цирконов [83], хотя ее истинные масштабы, очевидно, невозможно достоверно оценить.

Присутствие архейской коры доказано для Сибирского кратона, Северного Китая [48] и Тарима, также как и для некоторых метаморфических террейнов Монголии и косвенно в пределах Казахского мелкосопочника [26], где она была глубоко переработана в результате мезо- и неопротерозойских событий [26]. Несмотря на то, что требуются дополнительные работы по дальнейшему датированию всех этих образований, между ними уже установлено сходство, позволяющее объединить их под названием НАзия, которое будет использовано для обозначения палеоплиты после рубежа 750 млн лет.

Несмотря на все вышеупомянутые неопределенности, неоархейский суперконтинент Кенорлэнд все же может быть восстановлен посредством корреляции фрагментов конетинентальных литосферных килей [11]. Среди всех кратонов только литосферный киль Лаврентии стоит особняком из-за своих крупных размеров и Y-образной конфигурации. Кили всех остальных протократонов без исключения являются более или менее линейными, несмотря на очевидное смещение по разломам в Сибирском и Восточно-Европейском кратонах (см. рис. 3, Б). Сибирский кратон и Конго (?) обладают вторыми крупнейшими фрагментами — континентальными литосферными киями. Все другие литосферные кили имеют гораздо меньшие размеры и не всегда сохранились внутри кратонов в осевом положении, симметричном по отношению к гранит-зеленокаменным террейнам.

Ввиду трехлучевой формы и самого крупного размера литосферного кия Лаврентии можно поместить ее в ядро Кенорлэнда и попытаться отстроить остальные фрагменты за счет в первую очередь геологически сходной Восточной Европы [42], совместно называемые Неной [76]. Литосферные кили других протократонных групп (Ура, Конго-Сахары, НАзии и в меньшей степени Атлантики) следует помещать на продолжении трех соответствующих концов литосферного кия Лаврентии, используя комбинацию литологических и

малочисленных палеомагнитных данных для интервала 2.45 млрд лет.

Положение протократонов Сьюпериор и Карелия показано в низких широтах [69] на основе палеомагнитных данных (2.45 млрд лет), а литотектонические данные позволяют поместить Карелию вблизи Лабрадора (рис. 7, А). Небольшие архейские протократоны Атлантики, скорее всего, располагались у современной южной окраины Восточной Европы в основном из-за схожести литологии и тектонических событий около 2.1–2.0 млрд лет [45].

Надежные палеомагнитные данные по архейским террейнам НАзии отсутствуют. Однако палеомагнитные и литотектонические данные для протерозойских комплексов указывают на длительную связь между Сибирью и Лаврентией [27]. Тогда архейский континентальный литосферный киль в пределах Алданской части юга Сибири должен коррелировать с архейским килем около Гренландии с возможной связью между ними и в архее. Однако между Гренландией и Сибирью можно предположить и положение Северо-Китайского кратона. Это означает, что рядом с НАзией могли располагаться Западная Австралия и Индия, для которых имеются палеомагнитные данные, указывающие на их положение в высоких широтах [69], также как и для Зимбабве [71]. В случае их размещения в Северном полушарии все они образуют тектонически изолированную группу.

Для Конго-Сахарских протократонов, также не охарактеризованных палеомагнитными данными, остается только один вариант литологического сопоставления Касайского литосферного кия с современным окончанием лаврентийского кия у Кордильер.

Таким образом, Кенорлэнд может быть реконструирован как сложный суперконтинент трехлучевой конфигурации. При этом Нена располагается в ядре, а Атлантика, Конго-Сахара и НАзия+Ур образуют лучи (см. рис. 7, А). Похоже, что такая конфигурация Кенорлэнда разрешает противоречие, что неоархейский суперконтинент имел несколько нуклеарных центров, но при этом мог быть единым суперконтинентом [11].

Суперконтинент, вероятно, был окружен зонами субдукции со всех сторон, в которых могли образовываться алмазы [73]. Многие продатированные алмазы имеют архейские возрасты вплоть до 4.25 млрд лет. Архейский возраст алмазов был доказан для Западной Австралии, Калахари, Сьюпериор и Слейв, а также для Сибири [37]. Хотя алмазы возрастом 2.7–2.5 млрд лет и присутствуют, не представляется возможным определенно говорить на основе имеющихся данных о пике их формирования в связи со сбором Кенорлэнда из-за того, что разные протократоны обнаруживают разные максимумы возрастом 3.5–3.1 млрд лет в Слейве и Сибири, а также возрастом ~2.9 млрд лет

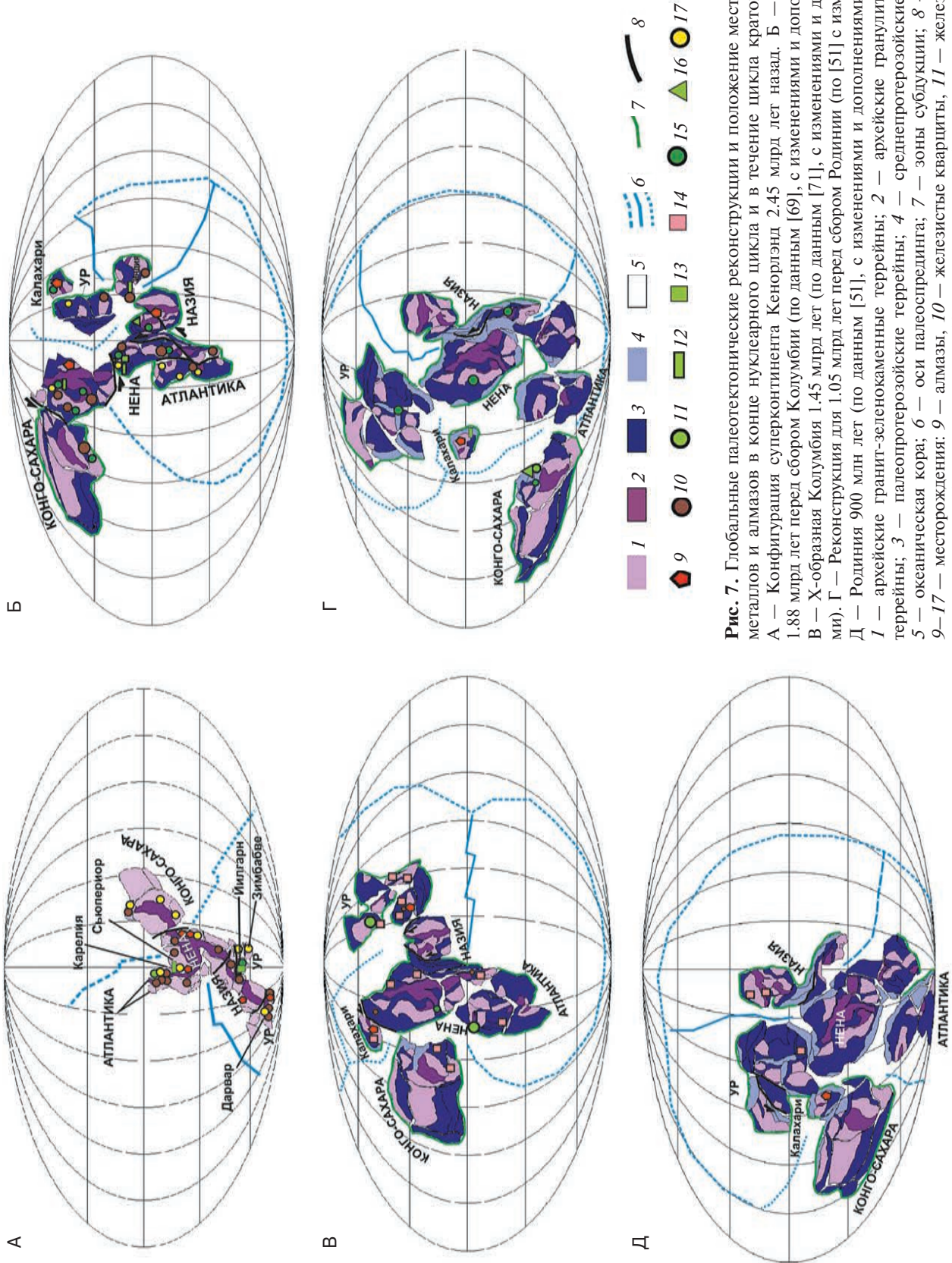


Рис. 7. Глобальные палеотектонические реконструкции и положение месторождений металлов и алмазов в конце нуклеарного цикла и в течение цикла кратонизации. А — Конфигурация суперконтинента Кенорланд 2,45 млрд лет назад. Б — На рубеже 1,88 млрд лет перед сбором Колумбии (по данным [69], с изменениями и дополнениями). В — X-образная Колумбия 1,45 млрд лет (по данным [71], с изменениями и дополнениями). Г — Родиния 900 млн лет (по данным [51], с изменениями и дополнениями). Д — Архейские гранит-зеленокаменные террейны; 2 — архейские гранулит-гнейсовые террейны; 3 — палеопротерозойские террейны; 4 — среднетерозойские террейны; 5 — океаническая кора; 6 — оси палеосрединга; 7 — зоны субдукции; 8 — разломы; 9–17 — месторождения: 9 — алмазы, 10 — железистые кварциты, 11 — железо-окисно-золото-медные, 12 — колчеданные, 13 — порфировые, 14 — полиметаллы в осадочных породах, 15 — Ni–Cu–MPP в связи с мафит-ультрамафитовыми интрузиями, 16 — медистые песчаники, 17 — золото

в Каапваале. На предлагаемой реконструкции Кенорлэнда (см. рис. 7, А) области, где достоверно присутствуют архейские алмазы, оказываются как в ядре, так и в лучах, при отсутствии таких данных для Конго-Сахары. Интересно, что пространственное распределение мезо- и неогархейских железистых кварцитов [9] коррелируется с алмазами (см. рис. 5 и 6, А).

Типы медной минерализации являются специфичными для конкретных протократонов, подчеркивая их индивидуальность. Гигантские скопления неогархейской меди обнаружены только в связи с железоокисно-золото-медными месторождениями возрастом 2.57 млрд лет в районе Караджас в Амазонии, но многие небольшие и средние медно-цинковые колчеданные месторождения возрастом около 2.7 млрд лет известны в провинции Абитиби протократона Сьюпериор [86]. В протократонах Западной Австралии присутствуют сульфидно-никелевые месторождения в связи с коматититами [58].

Металлогеническое сходство в разных частях Кенорлэнда проявляется только в неогархейских месторождениях орогенного золота, формировавшихся в интервале от 2.8–2.7 до 2.55 млрд лет в протократонах Индии, Слейва, Сьюпериора, Йилгарна, Зимбабве, Конго, Сан-Франциско, Танзании, Амазонии и Западной Африки, то есть глобально [36, 46]. На локальном уровне они обычно отсутствуют в гранулит-гнейсовых террейнах, но присутствуют в больших количествах вдоль коллизионных зон в гранит-зеленокаменных террейнах. Поэтому считается, что месторождения неогархейского орогенного золота маркируют сбор Кенорлэнда [36].

ЭТАП КРАТОНИЗАЦИИ

В 1976 г. Пайпер опубликовал реконструкцию палеопротерозойского суперконтинента Палеопангея, который напоминал мезозойскую Пангею [70]. Однако большинство реконструкций было предложено за последние 16 лет с момента почти одновременной публикации статей Роджерса и Сантуша [77] и Джао и др. [98], в которых были приведены первые реконструкции суперконтинента под названием Колумбия, собравшегося около 1.85 млрд лет назад и существовавшего до Родинии. В последующем было опубликовано несколько альтернативных вариантов конфигурации Колумбии [10, 48, 71, 78, 95]. Частично эти различия вызваны неясностями в конфигурации террейнов внутри протократонов, включая: неоднозначную интерпретацию внутренней архитектуры Сибири под осадочными бассейнами [2]; неоднозначную корреляцию между крупными кратонами (Северный Китай [70], Конго и Сибирь между 1500 и 1380 млн лет [71], Индия и Восточная Европа [71]); длительное одиночное положение некоторых протократонов (протерозойский Калахари);

природу континентальной коры на востоке Сахары [3]; потенциальное первичное положение метаморфических террейнов Центрально-Азиатского суперколлага [26, 96].

В палеотектонических построениях участвуют 19 образований, которые могут быть классифицированы как протократоны, входящие в состав Колумбии и Родинии, исходя из предложенных выше критериев. Нарастающее количество протерозойских палеомагнитных данных позволяет охарактеризовать напрямую только 9 из них на том или ином временном интервале, и максимум 7 протократонов, т. е. менее 50% общего числа, охарактеризованы такими данными с точностью +/-30 млн лет в интервале 1.88–1.45 млрд лет [69, 71].

Нена

Палеомагнитные данные показывают, что на реконструкции для 1.88 млрд лет (см. рис. 7, Б) Восточная Европа может быть помещена к востоку от современной Гренландии [69], т. е. она повернулась и сместилась относительно предложенной позиции на 2.45 млрд лет около Лабрадора (см. рис. 7, Б). Это коррелирует со временем сутурирования внутренних палеопротерозойских орогенов Лаврентии около 1.85–1.8 млрд лет и Восточной Европы около 1.95–1.8 млрд лет [42]. Более поздние деформации между 1.8 и 1.7 млрд лет вдоль Вольинско-Оршского и Среднерусского коллизионных поясов консолидировали Восточно-Европейский кратон в его современной внутренней архитектуре [13].

Аккреция на периферии Нены продолжалась в Явапай-Мазатзал-Свекофенском и затем Гренвильско-Свеконорвежском орогенах до 1.0 млрд лет [42]. В Нене отсутствуют внутренние орогены возрастом 1.0 млрд лет. Вместо них присутствуют рифты (авлакогены) с траппами возрастом 1.1 млрд лет [42, 65], которые указывают на неудачную попытку раскола.

К протерозойской Нене можно условно отнести континентальную кору Шпицбергена, Баренции и Кары, хотя ее возраст остается неясным [56]. Как было показано, фундамент значительной части шельфа евразийской Арктики является неогархейским [64]. Также частью Нены может считаться Мизийский террейн к юго-западу от Восточной Европы. Неясным остается первоначальная позиция плохо обнаженного Каракумского террейна, который мог быть частью Нены или Назии.

Назия

Северный Китай содержит усеченный фрагмент континентального литосферного кия в своей центральной части (Ордос), обрамленной палеопротерозойскими орогенами на западе (Хондалитовый пояс) и востоке (Центральный ороген

возрастом 1.85 млрд лет), а затем архейскими гранит-зеленокаменными террейнами на востоке и, возможно, западе [48], т. е. принципиально сходно с Лаврентией. К Северному Китаю предположительно можно добавить архейско-палеопротерозойскую кору Тарима, для которого в некоторых работах предлагается первичное положение рядом с Австралией. Как фрагменты Австралии (то есть Ура) рассматриваются также палео- и мезопротерозойские террейны, аккрецированные в раннем палеозое к южной окраине Таримского и Северо-Китайского кратонов в Куньлуне, Циляне и Цайдаме [33].

Первичная позиция Северо-Китайского кратона является дискуссионной. Например, были предложены геологические корреляции с современной северо-западной окраиной Восточно-Европейского кратона [94], с положением к югу от Восточной Европы с последующим длительным смещением в восточном направлении к современному положению с конца неопротерозоя до конца палеозоя [95]. Палео- и мезопротерозойские ТКДП для Северного Китая и Восточной Европы и их внутреннее строение выглядят сходными [51]. С другой стороны, предложены тектоностратиграфические корреляции между Северным Китаем и Сибирью с 1.8 до 0.6 млрд лет, а также долгосрочное положение Сибири вблизи Лаврентии [27]. Это позволяет помещать Северный Китай между Гренландией и Алданом. Для Сибири было показано литологическое сходство осадочного чехла ее северной окраины и западной окраины Лаврентии [81]. Однако это сопоставление противоречит палеомагнитным данным, согласно которым южная окраина Сибири могла иметь в палеопротерозое только одно положение около северной окраины Лаврентии [71].

Сибирский кратон состоит из двух доменов — Тунгус-Анабарского и Алдан-Станового [2]. Они смещены относительно друг друга на 800 км по Ленскому разлому. Этот разлом полностью погребен под неопротерозойско-мезозойским осадочным бассейном кратона, но он четко виден в смещении магнитных аномалий [2]. Именно вдоль этого разлома Розен и др. протрассировали внутренний палеопротерозойский ороген как продолжение внешнего Аkitканского орогена на западном побережье оз. Байкал [2]. Эта идея стала популярной и была многократно воспроизведена в различных публикациях [34]. Однако геологические доказательства существуют только для девонского плюмового магматизма. Аналоги Аkitканского орогена могут быть равнозначно предложены в Муйском и Становом террейнах Байкальской складчатой области, а также в архейско-палеопротерозойских террейнах среди палеозойских аккреционных клиньев Монголии, куда они могли быть отчленены от Алдан-Станового домена Сибирского кратона [96].

Тунгус-Анабарский домен содержит хорошо выраженный меридиональный континентальный

литосферный киль, обрамленный архейскими гранит-зеленокаменными террейнами с запада и востока при отсутствии внутренних палеопротерозойских орогенов [2]. Алдан-Становой домен также содержит меридиональный континентальный литосферный киль и симметрично расположенные архейские гранит-зеленокаменные террейны к западу и востоку [2]. Вдоль их границ располагаются небольшие деформированные палеопротерозойские осадочные бассейны. Однако разрыва архейской континентальной коры не произошло. Только на юге Алдан-Станового домена прослеживается серия крупных палеопротерозойских ультрамафит-мафитовых интрузий [2] и осадочных бассейнов (Кодаро-Удоканский [68]), указывающих на попытку раскола Сибирского кратона [27].

Важной отличительной характеристикой Сибирского кратона является отсутствие мезопротерозойских орогенов и внутри, и вокруг него [2]. Это может указывать на то, что они либо не формировались, либо могли быть тектонически отчленены от периферии кратона. Действительно, метаморфические террейны возрастом 0.9–1.1 млрд лет известны в Монголии и в Казахстане [2, 26], где они были деформированы и метаморфизованы в процессе исседонских тектонических событий [26]. На данный момент можно лишь предполагать, что они могли располагаться на южной периферии Сибири и Таримского кратона [26].

Атлантика

В Амазонском и Западно-Африканском кратонах большую часть коры слагают палеопротерозойские (биримийские) орогены, в каждом из которых известны многочисленные месторождения орогенного золота возрастом 2.1–2.0 млрд лет [34]. Внешние палеопротерозойские орогены Вентуари-Тапожос и Рио Негру-Хуруена занимают в Амазонском кратоне принципиально такое же положение, как и Свекофенский ороген на западе Восточно-Европейского кратона. Все они являются частями гигантского палеопротерозойского орогена, включающего также и южную окраину Лаврентии [45]. Месторождения орогенного золота возрастом 1.8 млрд лет известны во всех частях этого восстановленного внешнего орогена и во внутреннем Трансгудзонском орогене Лаврентии [34].

Мезопротерозойский ороген Рондония-Сунсас на западе Амазонии рассматривается как продолжение Свекофенского орогена, уходящего далее в Гренвильский ороген (модель SAMBA [45]). Вместе они образовывали изоклинальный ороген, сформировавшийся после сбора Родинии.

Ур

Три протократона Северной, Западной и Южной Австралии, а также плохо изученные протократоны Моусон и Крон в Антарктике спаяны

друг с другом мезопротерозойскими орогенами, такими как Албани-Фрэйзер и Масгрейв в Австралии, Восточные Гаты в Индии и их эквиваленты в Антарктике и вокруг Калахари (см. рис. 1) [14, 56]. В то же время считается, что австралийские протократоны находились вблизи друг друга уже около 1.8 млрд лет назад [51]. Принадлежность провинции Райнер и прилегающих областей Восточной Антарктиды под ледниковым щитом остается неясной [40].

Эти протократоны соответствуют Уру из-за сходства архейской коры [76]. Хотя его первичное положение остается неясным, к ним, вероятно, следует добавить кратон Рио де ла Плата, который вошел в косую коллизию с Калахари в процессе гарип-салданской орогении 480–580 млн лет назад [73]. В данной работе принимается реконструкция, которая поместила его в Родинию между кратонами Конго-Сан-Франциско, Лаврентией и Калахари [51, 93].

Кратон Калахари мог изначально быть частью Ура, но также было показано, что он выступал в роли одиночного континента в течение большей части протерозоя [71]. Ороген Лимпопо, разделяющий Зимбабве и Каапвааль, возможно, образовался в результате их поворота навстречу друг другу. Палеопротерозойская кора присутствует только вдоль западной окраины Калахари, а мезопротерозойская кора закартирована со всех сторон.

Конго-Сахара

Кратоны Конго-Сан-Франциско и Танзания отделены от Калахари неопротерозойским орогеном Дамара-Рибейра и, следовательно, могут считаться отдельной группой вплоть до неопротерозоя.

Кратоны Конго-Сан-Франциско отделены от Танзанийского кратона внутренним палеопротерозойским Убендийским орогеном и мезопротерозойскими Кибарским и Ирумидским орогенами. К этой же группе можно добавить плохо обнаженные и плохо понятые Сахарский метакратон и Транс-Сахарский ороген [3]. На северной границе кратона Конго присутствует также плохо понятый неопротерозойский ороген Убангид. Протерозойская кора Азии также отнесена к этой группе после того, как Восточно-Африканский ороген был проинтерпретирован как рифтогенный [31].

Реконструкция Колумбии и Родинии

2.45–1.88 млрд лет. События, которые произошли между 2.45 и 1.88 млрд лет, были важными как тектонически, так и металлогенически. Хотя реконструкции для рубежа 2.0 млрд лет и были предложены, имеющихся данных пока не достаточно для определения положения многочисленных протократонов после раскрытия внутренних океанов, существовавших между распадом Кенорлэнда и сбором Колумбии [69].

Во время рифтинга Кенорлэнда около 2.45 млрд лет формировались малосульфидные месторождения платиноидов с небольшим количеством никеля и меди в связи с ультрамафит-мафитовыми интрузиями в пределах Нены (Стилуотер в Лаврентии, Федорова Тундра на Кольском полуострове) и Калахари (Великая дайка Зимбабве) [36]. Железорудные месторождения формировались повсеместно между 2.6 и 1.85 млрд лет, встречаясь крайне редко после палеопротерозоя [9, 44]. Они образовывались преимущественно на пассивных окраинах и в рифтах, а источник металлов увязывается с активностью мантийных плюмов [44].

Месторождения золота возрастом 2.1–2.0 млрд лет во внешних аккреционных орогенах Западной Африки и Амазонии маркируют изменения в местных тектонических режимах [34]. Однако орогенные месторождения золота возрастом 1.8 млрд лет во внутренних орогенах Лаврентии, Австралии и севера Восточной Европы уже четко коррелируют с полным сбором Колумбии.

В интервале 1.95–1.85 млрд лет назад некоторые сульфидно-никелевые месторождения в связи с мафит-ультрамафитовыми интрузиями также формировались на рифтогенных окраинах внутренних океанов (Трансгудзонский ороген в Лаврентии, Кольский регион в Восточной Европе и Становой регион Сибири), хотя крупнейшее из них сформировалось в районе Садбери в результате метеоритного удара в краевую часть протократона Сьюпериор в пределах Нены [6, 15]. Бушвельдская интрузия возрастом 2.06 млрд лет с платиново-хромовым оруженением находится в центре архейского ядра Калахари и также сформировалась близко к этим событиям [16].

Субдукционный магматизм во внутренних океанах ответственен за образование многочисленных средних и малых колчеданных месторождений цветных металлов возрастом 2.0–1.9 млрд лет в Лаврентии, Восточной Европе и Западной Австралии [36, 46]. Палеопротерозойские медно- и молибден-порфиновые месторождения известны на севере Восточной Европы (Айтык, Лобаш), хотя они и не регистрируются как глобальный феномен.

1.88 млрд лет. Для времени формирования Колумбии представляется возможным построить достаточно достоверную реконструкцию. Она близка во времени к геохронологически задокументированному сутурированию внутренних орогенов Лаврентии и севера Восточной Европы, что интерпретируется как время сбора Колумбии. Предлагаемая конфигурация Колумбии (см. рис. 7, Б) основана на палеомагнитных характеристиках Лаврентии, нескольких террейнах Восточной Европы, Сибири, Западной и Северной Австралии, Калахари, Амазонии и Северного Китая [27, 69]. Лишь для протократонов Конго-

Сахарского рукава пока не получены ключевые палеомагнитные данные.

Лаврентия и Восточная Европа располагались близко друг к другу около 1.88 млрд лет назад, хотя их континентальный литосферный киль уже оказался разделен. Палеомагнитные данные по Амазонии ограничивают ее в приэкваториальном положении около современного южного края Восточной Европы. Эти данные и тектонические сопоставления были использованы для выстраивания модели SAMBA [45].

Сибирь характеризуется палеомагнитными данными, позволяющими поместить ее вблизи экватора около Лаврентии. Палеопротерозойские ТКДП для Лаврентии и Сибири похожи и позволяют лишь единственное положение южного края Алдан-Станового домена Сибири, обращенного к северной окраине Лаврентии [71]. Используя палеомагнитные данные, Северный Китай может быть помещен между югом Сибири и севером Лаврентии, что также удовлетворяет литотектонические корреляции [71].

Отсутствие явных внутренних палеопротерозойских орогенов в Сибирском кратоне указывает на принципиальное отличие его палеопротерозойской геодинамической эволюции в сравнении с Северным Китаем, Восточной Европой и Лаврентией. Если принять, что 800-километровое левостороннее смещение по Ленскому разлому (см. рис. 7, Б) [2]) связано с палеопротерозойским дрейфом Сибирского кратона, то начало такого дрейфа можно кинематически увязать с раскрытием внутренних океанов Северного Китая-Лаврентии, а формирование коры современных палео- и мезопротерозойских метаморфических террейнов Центрально-Азиатского суперколлага могло происходить во время этого дрейфа у южной периферии Сибири и современной северной окраины Тарима и Северного Китая (см. рис. 7, Б).

Палеомагнитные данные для Западно-Австралийского кратона ограничивают его положение средними широтами, что помещает его вблизи Сибири. Писаревский и др. предложили сближенное положение Западной Австралии и других австралийских кратонов для этого времени [71]. Но архейские зеленокаменные террейны известны только в Западной Австралии, что отличает ее от остальных австралийских кратонов, где они отсутствуют. В то же время эти зеленокаменные террейны весьма схожи с литологически сходными террейнами Индии и Калахари [76]. Палеомагнитные данные по Западной Австралии и Индии позволяют помещать их рядом с Сибирью [71]. Все остальные протократоны Ура (Сибумасу, Сунда, Индокитай, Южная и Северная Австралия), в которых также присутствует архейская кора, но значительно переработанная в палеопротерозое [83], и палеомагнитно неохарактеризованный Южно-Австралийский протократон (включая Моусон в Антарктиде) также могут быть помещены вблизи

Западной Австралии, Индии и Сибири, пусть и с океаническим зиянием.

Для протократонов Конго-Сахара была предложена корреляция между кратонами Конго и всеми протократонами вблизи Сибири [71]. Этот вариант требует очень сложного дрейфа и поворотов Конго в течение неопротерозоя для того, чтобы обеспечить его позицию в пределах Гондваны. Я предлагаю поместить протократоны Конго-Сахары в Северном полушарии к западу от тогдашней Лаврентии для соблюдения литотектонических корреляций (см. рис. 7, Б). Геология Транс-Сахарских террейнов, а также палеопротерозойского террейна Икартия в Кадомо-Варисцидской Европе удовлетворяет положению в этой же группе.

Позиция Калахари охарактеризована палеомагнитными данными на момент 1.88 млрд лет [69]. Можно принять предложение, что Калахари был самостоятельным дрейфующим протократоном, который мог быть вычленен из Ура. Его внешний палеопротерозойский ороген на современном западном краю указывает, что аккреционное наращивание коры было возможно только с одной стороны (см. рис. 7, Б). Следовательно, по противоположному краю могла проходить, например, трансформная граница.

К рубежу 1.88 млрд лет все протократоны могли быть объединены в один континентальный блок (см. рис. 7, Б). Континентальный литосферный киль Кенорлэнда оказывается сильно фрагментированным после того, как Конго-Сахарский и НАзийский рукава прудрейфовали против часовой стрелки относительно ядра Нены. Как открытие, так и закрытие внутренних океанов можно кинематически объяснить за счет этого длительного дрейфа.

Месторождения орогенного золота возрастом 2.1–2.0 млрд лет формировались в Амазонии и Западной Африке до сбора Колумбии, в то время как образование аналогичных месторождений возрастом 1.85–1.8 млрд лет в Лаврентии, Фенноскандии, Северной Австралии и на западе Амазонии [34] совпадает с моментом полного сбора Колумбии. Затем такие месторождения не формировались вплоть до неопротерозоя [36]. В НАзии сбор Колумбии совпадает с формированием одного из крупнейших в мире месторождений меди в осадочных породах Кодар-Удоканского трога, но не с моментом накопления его раннепротерозойских осадочных толщ, а с моментом инверсии бассейна около 1.9 млрд лет [68].

1.45 млрд лет. В этот временной интервал Колумбия все еще представляла собой единый суперконтинент, но в измененной X-образной конфигурации (см. рис. 7, В). Положение Лаврентии, Восточной Европы, Сибири, Индии, Амазонии и Северного Китая хорошо обосновано литотектоническими и палеомагнитными данными [71]. В меньшей степени это относится к Северной Ав-

стралии. Сибирь остается около северной окраины Лаврентии, но смещенной по левому сдвигу на 4000 км относительно своего предыдущего положения. Это событие коррелируется с соответствующими деформациями и метаморфизмом в Становой области на юге Сибирского кратона. В этом же районе могли находиться докембрийские метаморфические террейны Монголии. Казахстанские метаморфические террейны предположительно могли располагаться около современной северной окраины Тарима и Северного Китая. Палеомагнитные данные позволяют помещать Северный Китай вблизи Гренландии.

Палеомагнитные данные для Северной Австралии позволяют размещать все протократоны группы Ур вблизи юго-западной окраины Сибири, отделенными от Лаврентии и повернутыми относительно нее против часовой стрелки [71]. Индия располагалась на тех же палеоширотах, что и Северная Австралия. Антарктические кратоны приходятся рядом на основе литотектонических корреляций (см. рис. 7, В).

Амазония оставалась рядом с юго-западной окраиной Восточной Европы. Положение Западной Африки ввиду отсутствия палеомагнитных данных реконструируется вблизи Восточной Европы согласно модели SAMBA [87]. Протократоны и террейны Конго-Сахары не охарактеризованы палеомагнитными данными. Предполагается, что их позиция оставалась почти неизменной относительно Лаврентии с рубежа 1.88 млрд лет.

1050–900 млн лет. В соответствии с палеомагнитными данными для рубежа 1.27 млрд лет изменений в положении континентальной коры внутри Колумбии не документировано [71]. Колумбия, возможно, распалась после 1.2 млрд лет назад, когда и Конго-Сахара, и Калахари отделились от Нены [69].

Для рубежа 1050 млн лет надежные палеомагнитные данные получены для Восточной Европы, Лаврентии, Сибири, Австралии, Индии, Амазонии и Калахари [71]. Континентальные массы перегруппировались в V-образную комбинацию (см. рис. 7, Г) с самостоятельным кратоном Калахари [51]. К рубежу 900 млн лет назад (см. рис. 7, Д) Родиния находилась в Южном полушарии после нескольких коллизий [51]. Такая конфигурация Родинии возникла в результате продолжающегося смещения НАзии и Ура относительно Нены против часовой стрелки. Началась коллизия Ура с Неной у современной окраины Кордильер около 1050 млн лет и закончилась к 900 млн лет формированием неопротерозойского орогена Катазии [51]. Альтернативные реконструкции предусматривают положение Катазии к западу от Индии около 750 млн лет [53]. Мезо- и неопротерозойские террейны Куньлуня и Цияня-Цайдама интерпретируются как часть Катазии, которые были позднее приращены к НАзии [33]. В НАзии Северный Китай остался связанным с

Сибирью через докембрийские метаморфические террейны Центрально-Азиатского суперколлажа (см. рис. 7, Д).

Калахари и Конго-Сахара, возможно, разделялись трансформным разломом и были окружены океанами, а коллизия Ура с ними произошла около 900 млн лет, создав Гондванскую конфигурацию. Присутствие неопротерозойских офиолитов и свидетельств субдукционного магматизма между Сахара-Конго-Танзанийской группой и Азией противоречиво интерпретируется либо как свидетельство островной дуги, либо рифтогенно-спрединговых процессов [31, 51]. Одновременно океаническая кора формировалась в океане Дамара-Рибейра между Конго и Калахари [70]. Поэтому представляется, что система океанических спрединговых центров образовалась вокруг Конго-Сахары после рубежа 1000 млн лет, напоминая современную Антарктиду.

Атлантика отделилась от Восточной Европы и повернулась по часовой стрелке к Лаврентии. Эти движения сопровождались смятием мезопротерозойских орогенов в узкий ороклад во время гренвильской орогении [51]. Отделение Атлантики освободило современную восточную и южную окраины Восточной Европы, вблизи которой стала формироваться Скифская активная окраина, у северного края Атлантики сформировалась будущая Авалония.

Таким образом, можно заключить, что Колумбия была преобразована в Родинию без существенного распада. Колумбия, распавшаяся в течение нескольких рифтовых эпизодов около 1180 млн лет, собралась в Родинию около 1100–1040 млн лет, т. е. всего через 80 млн лет [69]. Это свидетельствует о существовании протерозойских суперконтинентов в течение более 1100 млн лет.

Основным механизмом перегруппировки был дрейф против часовой стрелки протократонных групп вокруг Нены, которая была наиболее стабильной из-за своего мощного континентального литосферного кила, уходящего глубоко в мантию. Хотя палеомагнитные данные все еще являются фрагментарными, они позволяют заключить, что Ур двигался быстрее вокруг Нены, чем Конго-Сахара. Эти две группы протократонов вошли в коллизию друг с другом только после распада Родинии.

МЕТАЛЛОГЕНИЯ КОЛУМБИИ И РОДИНИИ

Долгоживущие протерозойские суперконтиненты характеризуются формированием относительно многочисленных сульфидно-никелевых месторождений в связи с мафит-ультрамафитовыми интрузиями и титановыми месторождениями в связи с анортозитами. Они известны в Лаврентии, Восточной Европе, Сан-Франциско, к востоку от Конго, в Калахари, Сибири и Северном Китае, а их возраст охватывает интервал

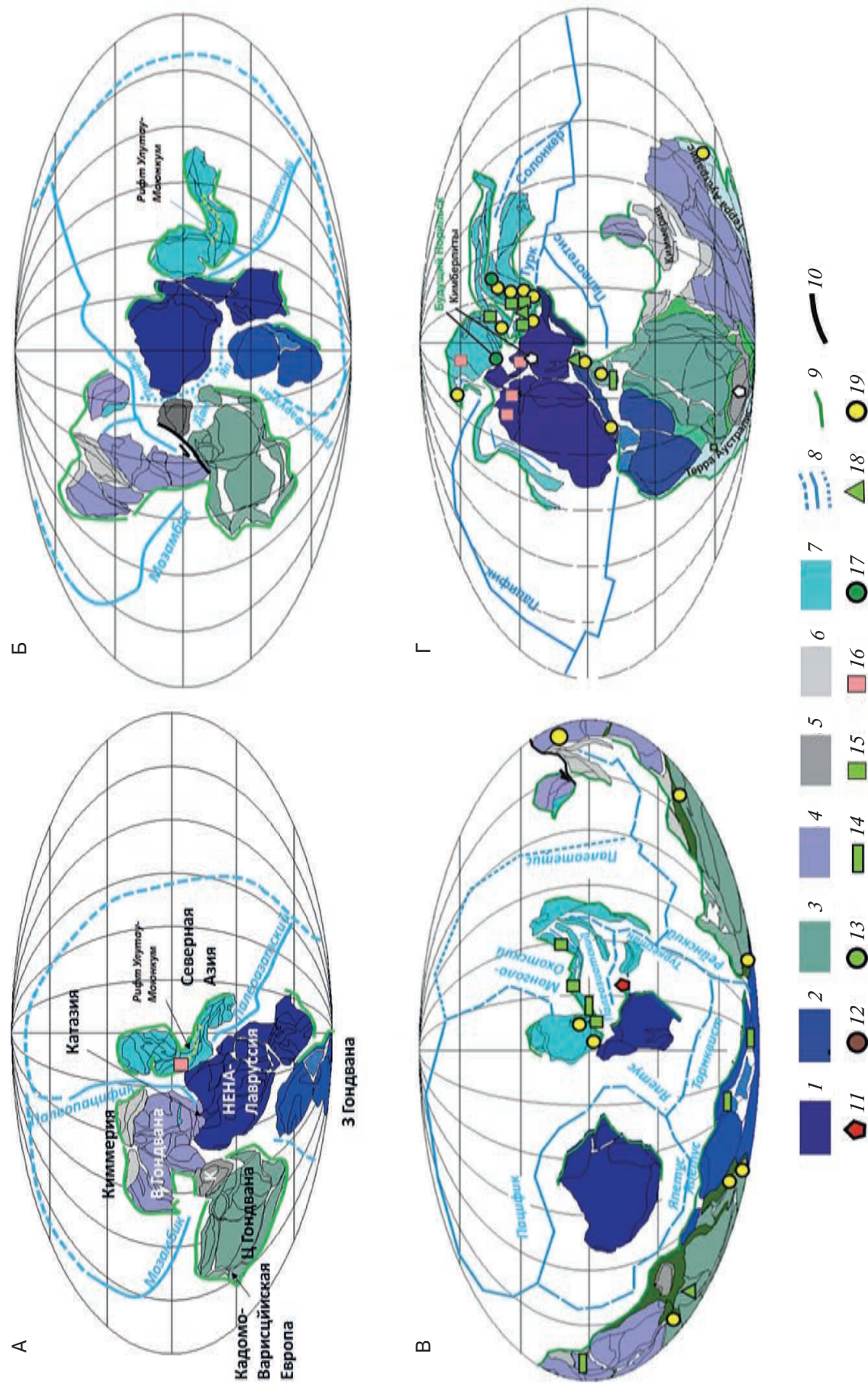


Рис. 8. Глобальные палеотектонические реконструкции цикла тектоники плит современного типа и положение месторождений металлов и алмазов. А — Палеоплиты на реконструкции Родинии для 900 млн лет назад. Обозначено: К — Калахари. Б — Распад Родинии на кратоны 750–720 млн лет. Спрединговые хребты: Яп — Япетус, Дам — Дамара. В — Сбор Гондваны и распад Нены 540 млн лет назад (по данным [50], с изменениями и дополнениями). Г — Ранняя Пангея 330 млн лет (по данным [50], с изменениями и дополнениями). 1–10 — палеоплиты: 1 — Лавруссия, 2 — Западная Гондвана, 3 — Центральная Гондвана, 4 — Восточная Гондвана и Катазия, 5 — Калахари, 6 — Киммерия, 7 — Северная Азия, 8 — оси палеоспрединга, 9 — зоны субдукции, 10 — различия; 11–19 — месторождения: 11 — алмазы, 12 — железистые кварциты, 13 — железо-окисидно-золото-медные, 14 — колчеданные, 15 — порфировые, 16 — полиметаллы в осадочных породах, 17 — Ni-Cr-Cu-MPP в связи с мафит-ультрамафитовыми интрузиями, 18 — медистые песчаники, 19 — золото.

2.0–1.1 млрд лет, что совпадает с проявлениями плюмового магматизма [36, 44].

Другие типы месторождений, характерные для этого этапа, включают седиментационно-эксталяционные месторождения свинца и цинка, месторождения урана в осадочных толщах, имеющие экономическое значение в Северной Австралии и Канаде [46, 49].

Приуроченными к субдукционным процессам можно считать железоокисно-медно-золотые месторождения в связи со щелочными комплексами. Однако отмечается их пульсационное проявление примерно каждые 500 млн лет в Амазонии (2.57 млрд лет), Калахари (2.05 млрд лет) и Южной Австралии (1.59 млрд лет), что не коррелируется с этапами роста континентальной коры в интервале 2.7–1.9 млрд лет [36]. Небольшие объекты с возрастом около 0.85 млрд лет известны в Индии и Замбии. Около 1.0 млрд лет после большого перерыва вновь стали формироваться небольшие колчеданные месторождения [36].

Датированные протерозойские алмазы неравномерно распределены в пространстве и времени. В Калахари их возрасты составляют 2.0, 1.7, 1.58, 1.5, 1.2, 1.1, 0.99 млрд лет, на северо-западе Лаврентии — 2.2–1.8 млрд лет, в Сибири — 2.0 млрд лет, а в Северной Австралии — 1.58 и 1.43 млрд лет [37]. Эти оценки возраста хорошо совпадают с местными орогеническими событиями, но не являются глобально синхронными, кроме рубежа около 2.0 млрд лет.

Таким образом, возрасты алмазов хорошо коррелируются с длительным существованием палеомезопротерозойского суперконтинента. Более широкий возрастной диапазон алмазов в Калахари может быть связан с небольшим размером протократона, его длительным одиночным положением и наращиванием коры, отражающим предрасположенность к длительному образованию алмазов в связи с субдукцией.

РАСПАД РОДИНИИ

Родиния существовала около 280 млн лет и была полностью разделена на современные кратоны около 750–720 млн лет [51]. Оси распада на палеоплиты в основном совпадали с только что сформированными мезопротерозойскими орогенами внутри Родинии, располагаясь на продолжении осей океанического спрединга (рис. 8, А). Значительно реорганизованные многие палеоплиты (см. рис. 8, А) включали те же протократоны, что ядро и периферические группы протократонов Колумбии.

750–720 млн лет. В течение этого временного интервала Родиния была расколота на множество палеоплит, каждая из которых имела свой кратон. Индуцированный плюмами рифтинг расколол Родинию у тройного сочленения между Лаврентией, Катазией и Антарктикой-Австралией

с последующим раскрытием Тихого океана [51]. Далее спрединг-овые центры развились между Калахари, Лаврентией и Атлантикой (см. рис. 8, Б) с раскрытием океана Япетус. Северо-Азиатская палеоплита была отделена от Лаврентии-Восточной Европы спрединг-овыми центрами Палеоазиатского океана.

С небольшими исключениями линии раскола суперконтинента прошли по сутурам между протократонными группами. Например, Ур образовал Восточную Гондвану, но без Калахари. Конго-Сахара стала Центральной Гондваной после приращения Калахари и Рио де ла Платы, Атлантика стала Западной Гондваной.

После раскрытия океана Япетус около 600 млн лет Лаврентия отделилась от Восточной Европы-Арктиды, а кратон Янцзы отделился от востока Северной Австралии и сформировал ядро новой Катазиатской палеоплиты, похожей на Калахари в предыдущем цикле [50]. Несколько небольших палеоплит, являющихся частями будущей Киммерии и Кадомо-Вариссийской Европы, были отколоты от Центральной и Восточной Гондваны. Скифский ороген и Авалония-Флорида сформировались у Т-образного края Восточной Европы и Западной Гондваны соответственно.

Вновь образованные палеоплиты неоднократно перегруппировывались. В частности, было предложено, что между 600 и 540 млн лет назад континентальная кора собралась в короткоживущий суперконтинент Паннотия, который вскоре распался. При этом ряд исследователей считает, что существование суперконтинента Паннотия слабо обосновано [62].

540 млн лет. К этому рубежу (см. рис. 8, В) континентальные палеоплиты, продолжая вращение против часовой стрелки относительно Лаврентии, были собраны в Гондвану после коллизии с формированием Бразилиано–Транс-Сахарского, Дамара–Рибейрийского и Восточно-Африканского орогенов.

Это сформировало единую и самую крупную Гондванскую континентальную палеоплиту с активными окраинами со всех сторон. Она существовала около 360 млн лет до своего распада около 180 млн лет назад, в какой-то степени выполняющая такую же роль, как современная Евразия. Другие континентальные массивы в течение этого времени имели меньшие размеры (см. рис. 8, В).

Например, Сибирь как часть Северо-Азиатской палеоплиты повернулась вместе с Восточной Европой относительно Лаврентии после раскрытия Япетуса и Монголо-Охотского океана в позднем эдиакарии [63, 96]. Тарим и Северо-Китайский кратоны оказались отколоты от остальной Северной Азии в полусамостоятельную палеоплиту после раскрытия Туркестанского океана, но некоторые Центрально-Азиатские метаморфические террейны, возможно, оставались в виде «моста»

между Сибирью и Северным Китаем, разделившись на узкие террейны после раскрытия ряда раннепалеозойских задуговых бассейнов [96, 97]. Палеоазиатские океанические оси спрединга оставались активными между Восточно-Европейской и Северо-Азиатской палеоплитами, на что указывает присутствие офиолитов этого возраста в Алтае-Саянской области и на Полярном Урале [1, 96].

Спрединговые центры Рейнского океана и океана Торнквиста образовались между Гондваной, с одной стороны, и Балтикой, с другой [63]. Они были частью мировой системы спрединговых хребтов, включая Монголо-Охотский и Тихоокеанский (см. рис. 8, В). В связи с этими событиями изменилась конфигурация субдукционных зон, что предопределило местоположение и возобновление формирования некоторых типов месторождений. В частности, в раннем палеозое стали более многочисленными колчеданные месторождения, а в Центрально-Азиатском суперколлаже и Тасманийском орогене начиная с 500 млн лет выявлено значительное количество медно-золото-порфировых месторождений [36].

Локальные коллизионные события разного масштаба совпадают с неопротерозойскими и раннепалеозойскими максимумами формирования месторождений орогенного золота на севере Западной Австралии, в Восточно-Африканском орогене, Восточной Австралии и особенно в южной Сибири и Центральной Азии [34, 96].

Алмазы возрастом менее 1.0 млрд лет известны как проявления в метаморфических породах сверхвысоких давлений преимущественно в Евразии [37]. В частности, в Северном Казахстане они сформировались в результате раннепалеозойской коллизии дуги с палеопротерозойскими террейнами Северо-Азиатской палеоплиты [26]. Эти проявления принципиально подтверждают концепцию субдукционного происхождения алмазов.

310 млн лет — настоящее время. Ко времени 330–310 млн лет (см. рис. 8, Г) два типа глобальных вращений Гондванской и Северо-Азиатской палеоплит относительно Лавруссии реализовались в новый сбор практически всей континентальной коры в суперконтинент Пангея [50, 88]. Гондвана и Лавразия были разделены океаном Палеотетис. Небольшой Солонкерский спрединговый центр позже образовался между Северо-Китайским кратоном и восточными террейнами Центрально-Азиатского суперколлажа. Океанические плиты Тихого океана продолжили расширяться с формированием задуговых бассейнов на западной окраине Северной Америки [63].

Гондвана почти не изменила свою конфигурацию, но испытала значительное смещение относительно Южного магнитного полюса по сравнению с рубежом 540 млн лет, что совпадает с миграцией Нены-Лавруссии и Северо-Азиатской

палеоплит из приэкваториальных в средние широты Северного полушария.

Рост Кадомо-Варисцийского орогена на северной периферии Гондваны был прерван после сбора Пангеи [88, 89]. Скифский ороген продолжил рост, в Кордильерах образовались задуговые бассейны на периферии Лавразии. В пределах последней, возможно, наиболее важным событием была коллизия Северо-Азиатской и Лаврусийской палеоплит с формированием Уральско-го орогена. Это прервало спрединг в Уральской части Палеоазиатского океана, но остаточный спрединговый центр между Скифией и Таримом, возможно, сохранился на самом юге у тройного сочленения со спрединговыми центрами Палеотетиса [96]. От северной окраины Гондваны откололись Киммерия и Янцзы (см. рис. 8, Г).

Таким образом, сбор Пангеи совпадает с несколькими пульсами формирования крупнейших палеозойских медно-золото-порфировых месторождений Центрально-Азиатского суперколлажа и Кордильер [63, 97], гигантских месторождений меди в осадочных толщах, седиментационно-эксгалационных месторождений свинца-цинка и месторождений орогенного золота на Тянь-Шане, в Иртыш-Зайсанской области и Кадомо-Варисцийской Европе с максимумом 290 млн лет. В этот временной интервал увеличивается плюмовая активность и формируются небольшие сульфидно-никелевые месторождения Кадомо-Варисцийской Европы, Центральной Азии и Южного Китая. Формирование крупнейших месторождений такого типа в Норильском районе связано с Сибирским пермо-трассовым суперплюмом. С плюмовой активностью также могут быть связаны проявления средне-палеозойского кимберлитового магматизма в Сибири и Восточной Европе, который обеспечил доставку алмазов в верхнюю кору [73].

Пангея постоянно перегруппировывалась и существовала как суперконтинент около 130 млн лет, расколовшись около 180 млн лет назад. Глобальная тектоническая конфигурация была преобразована. Индийский и Атлантический спрединговые центры разделили Гондвану и Лавразию, спрединговые центры Тетиса перестали быть активными почти полностью после коллизии отколовшихся частей Гондваны с Лавразией за счет раскрытия Индийского и Атлантического спрединговых центров, распространившихся со стороны Тихого океана.

В результате этих событий континентальные массы перегруппировались в более крупные континенты Евразии, Африки-Индии-Австралии и Северной Америки-Южной Америки-Антарктики (см. рис. 4). Евразия, являясь составным континентом, включающим несколько бывших палеоплит, в свою очередь, разделена на несколько современных плит [55]. Современная конфигурация континентов рассматривается как начало сбора

нового суперконтинента, получившего название Амазия [87].

Гималайский орогенный пояс стал главной областью нового формирования месторождений цветных металлов и золота после распада Пангеи [46]. Порфировые месторождения образовали сверхкрупные скопления меди и золота в Андах [36]. Месторождения орогенного золота образовались в нескольких провинциях на востоке Азии и в Северной Америке. На Колыме, в Монголо-Охотии и на Аляске они достигли гигантского и сверхгигантского размера, будучи крайне редки и малы в Кордильерах и Андах, а в Альпийско-Гималайском поясе отсутствуют совсем или еще не вскрыты эрозией.

Образование мезозойских трапповых провинций предшествовало распаду Гондваны. В связи с ними известны лишь небольшие сульфидно-никелевые месторождения. В связи с плюмовым магматизмом значительные скопления металлов платиновой группы были аккумулярованы в ультрамафитовых интрузиях в Лавразии (Скергаард в Гренландии), а несколько импульсов мезозойско-кайнозойского кимберлитового магматизма в Сибири, Северной Америки и Южной Африки вновь доставили древние алмазы на верхнекорový уровень [36].

КОНТИНЕНТАЛЬНЫЙ ДРЕЙФ И ЕГО ОТРАЖЕНИЕ В МЕТАЛЛОГЕНИИ

Палеотектонические реконструкции и анализ металлогенических данных указывают на корреляцию между сборами и распадами суперконтинентов и изменениями доминирующих типов рудных месторождений во времени [36, 46, 52]. Тектонические и металлогенические изменения могут быть объяснены в рамках модели охлаждающейся Земли и выражаются в снижении роли сульфидно-никелевых месторождений во времени [18, 36].

Сравнение конфигураций Кенорлэнда (2.45 млрд лет) и Колумбии (1.88 млрд лет) показывает (см. рис. 7, А, Б), что после палеопротерозойского распада Конго-Сахара, Ур и НАзия дрейфовали против часовой стрелки вокруг Нены, а Атлантика оставалась связанной с Неной. Такой дрейф можно рассматривать как принципиальную кинематическую причину раскрытия внутренних океанов в Нене, за которым последовало их сутурирование и сбор ранней Колумбии около 1.85 млрд лет. НАзия и Конго-Сахара также подверглись рифтингу, но не распались и внутренние океаны в них не сформировались. Этот рифтинг также может быть кинематически связан со сдвигами во время дрейфа. В результате чего неорархейский Y-образный континентальный литосферный киль утратил свою сплошность.

Хотя конфигурация Нены в Колумбии изменилась по сравнению с Кенорлэндом, Лаврентия и Восточная Европа остались вблизи друг друга.

В то же время НАзия-Ур и Конго-Сахара испытали значительное смещение против часовой стрелки вокруг Нены. Протократоны Ура были отделены от НАзии и разделены на несколько изомеричных фрагментов, но затем они были спаяны палеопротерозойскими орогенами.

Палеопротерозойские движения коррелируют с главными максимумами формирования биримийских месторождений орогенного золота (2.1–2.0 млрд лет) в Атлантике и трансгудзонско-свекофенских месторождений орогенного золота (1.8 млрд лет) в Нене, Атлантике и Северной Австралии. В Кодаро-Удоканском бассейне НАзии формирование месторождений меди в осадочных толщах произошло 1.9 млрд лет [68], что близко по времени со сбором Колумбии.

Колумбия просуществовала около 600 млн лет как единый, хотя и изменяющийся суперконтинент. Это хорошо коррелируется с длительным формированием похожих типов месторождений в разных частях суперконтинента (рис. 9), таких как седиментационно-эксталяционные месторождения полиметаллов возрастом 1.6–1.55 млрд лет [49] и месторождений урана в осадочных толщах [22, 46].

Со щелочными магматическими породами во время существования Колумбии связаны железоокисно-медно-золотые (с ураном и редкими землями) месторождения Южной и Северной Австралии [36].

Начиная с рубежа 1.2 млрд лет группы протократонов продолжили дрейф против часовой стрелки вокруг ядра Нены и к 1.05 млрд лет они перегруппировались в суперконтинент Родиния, который просуществовал до рубежа 750–720 млн лет. Несмотря на перегруппировку Кенорлэнда в Колумбию и затем Родинию, каждая из групп протократонов (Нена, Ур, Атлантика, НАзия и Конго-Сахара) сохраняла единство, с некоторым исключением для Калахари. Месторождения платиноидов, хрома и никеля в связи с ультрамафит-мафитовыми интрузиями и коматитами возрастом от 2.7 до 1.1 млрд лет оставались наиболее характерным типом месторождений в перегруппированной континентальной коре. Это же относится к железоокисно-медно-золотым системам, но они формировались пульсационно с большими временными разрывами между 2.57 и 0.7 млрд лет [36]. В период времени между 1.7 и 0.6 млрд лет не формировалось месторождений орогенного золота. Однако субдукционные процессы, несомненно, существовали, так как в этот период происходило формирование алмазов. С главными орогенными событиями в Родинии коррелирует образование гигантских месторождений меди в осадочных толщах, таких как медный пояс Конго-Замбии [86].

Родиния была расколота между 750–720 млн лет назад на многочисленные континентальные фрагменты, которые теперь известны как кратоны.

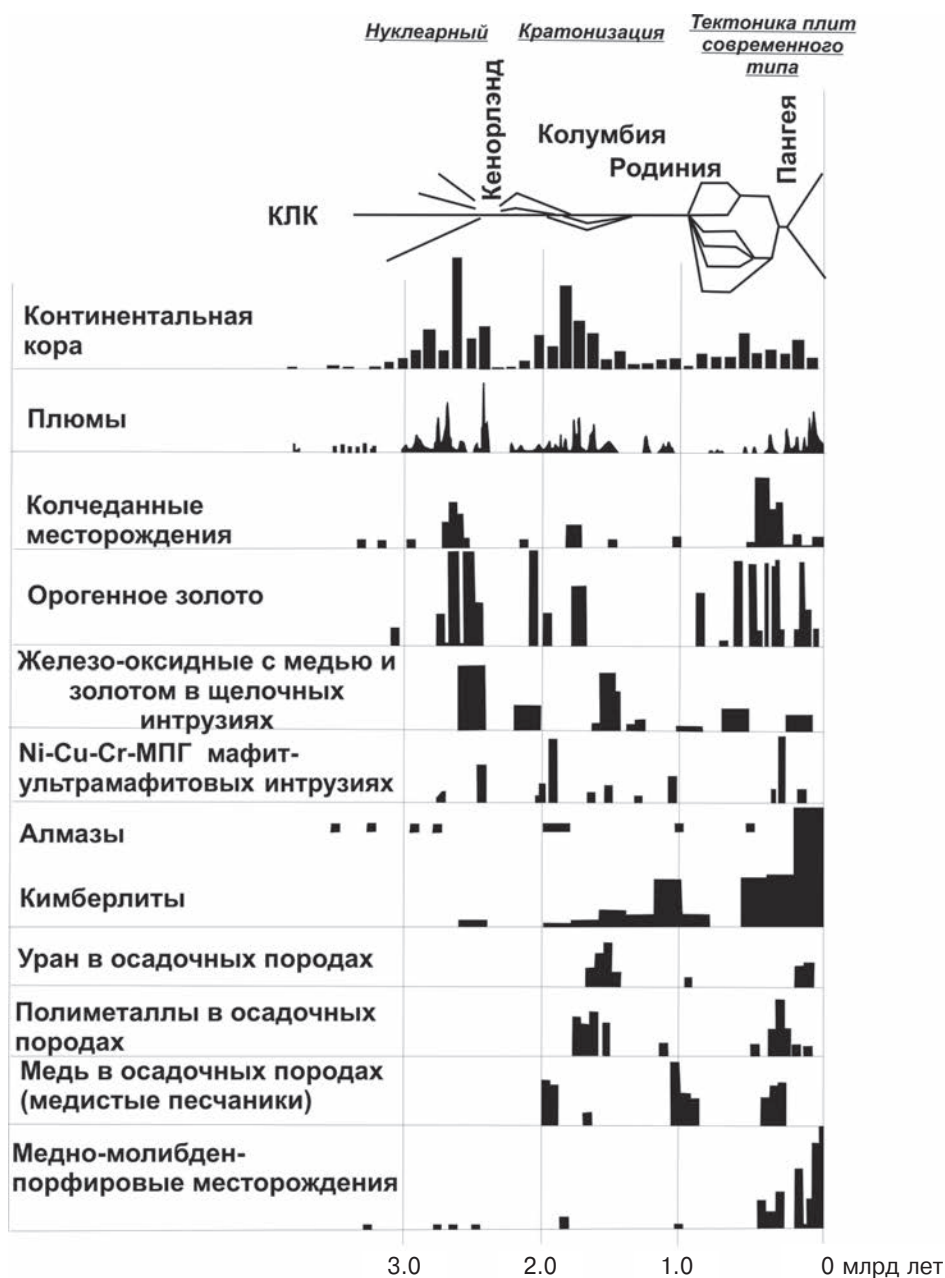


Рис. 9. Сбор и распад суперконтинентов и изменение типов рудных месторождений в геологическом времени (по данным [36]).

Интенсивность образования континентальной коры (по [18]) коррелирует с изменениями плюмовой активности (по [11]).

Почти каждый из них включает архейский континентальный литосферный киль (см. рис. 5). Это объясняет глобальное присутствие алмазов в кимберлитах, большая часть из которых сформировалась в результате глубокой субдукции в субконтинентальную мантийную литосферу под или вблизи континентального литосферного кия в архее-мезопротерозое. Появление алмазов в коре в основном обеспечивается за счет кимберлитов (и лампроитов) в связи с плюмовыми событиями, которые значительно моложе, чем сами алмазы [37].

Хотя тектоника плит уже работала в архее, распад Родинии на рубеже около 720 млн лет явно маркирует принципиальное изменение ее характера и установление нового преобладающего стиля тектоники Земли с многочисленными плитами, многие из которых включают или включали кратоны с фрагментами континентальных литосферных килей и наращиванием коры в орогенных коллажах вокруг таких кратонов [67, 90]. В отличие от этапа кратонизации с длительным существованием суперконтинента, последний цикл эволюции Земли характеризуется периодическим

сбором/распадом сравнительно короткоживущих суперконтинентов, вроде спорной Паннотии, четко выделяемой Пангеи и современных континентов. Пангея начала распадаться всего через 130 млн лет после ее сбора [50]. Современный глобальный рисунок очень похож на реконструкцию для 540 млн лет, когда больше континентальной коры было сосредоточено в одном полушарии.

Согласуется с проявлением нового тектонического стиля после 720 млн лет и возобновление формирования колчеданных, порфировых и орогенных месторождений, а сульфидно-никелевая минерализация формировалась только периодически во время сбора палеозойских суперконтинентов с крупнейшим скоплением никеля и попутных компонентов в Норильском районе в связи с Сибирским суперплюмом в центре Лавразии. Существенно меньшие максимумы формирования этих месторождений отмечаются в связи с мезозойским распадом Гондваны [46].

Крупные скопления цветных металлов преимущественно формировались сначала в колчеданных месторождениях, но к кайнозой они уступили лидерство медно-порфировым месторождениям.

Крупные максимумы формирования месторождений орогенного золота в Сибири, Средней Азии и Варисской Европе коррелируются и с локальными коллизиями и со сбором суперконтинентов [34]. Корреляция с коллизионными фазами сбора Пангеи отмечается и для гигантских месторождений меди в осадочных толщах в Средней Азии и Центральной Европе.

Пространственно-временные тенденции континентального дрейфа наилучшим образом могут быть отслежены по изменению положения континентальных литосферных килей (рис. 10). Между Кенорлэндом (2.45 млрд лет) и Родиной (0.9 млрд лет) континентальная кора испытала долгосрочный поворот против часовой стрелки относительно магнитных координат. После распада Родинии (720 млн лет) большая часть континентальных массивов продолжила такое вращение, за исключением Сибири и прилегающих кратонов Северного Китая, Тарима и докембрийских метаморфических террейнов Центральной Азии, которые дрейфовали с вращением по часовой стрелке [50, 80].

С рубежа 2.45 млрд лет до настоящего времени ядро Нены повернулось примерно на 180° против часовой стрелки (см. рис. 10), на что указывают лучше всего изученные траектории кажущихся движений полюсов Лаврентии и Восточной Европы [29]. Атлантика также повернулась примерно на 180° относительно Нены и испытала наименьшие перемещения относительно нее, в целом повторяя траекторию поворотов Нены. Конго-Сахара дрейфовала вокруг Нены и повернулась на 400° против часовой стрелки относительно магнитных координат, но с одним смещением относительно Нены с поворотом на 220° .

Ур был повернут на 540° против часовой стрелки относительно его положения 2.45 млрд лет и испытал самый длинный дрейф вокруг Нены. Его поворот относительно Нены составил 360° против часовой стрелки. Для Калахари палеомагнитные данные указывают на его одиночное положение в течение 1.0 млрд лет, в целом повторяя траекторию Ура. Калахари и Ур продолжили дрейф против часовой стрелки вокруг Нены и после раскрытия Тихого океана на рубеже около 720 млн лет.

НАзия испытывает вращение, сместившись на среднее расстояние с поворотом на 315° против часовой стрелки относительно палеомагнитных координат и только на 90° против часовой стрелки относительно современной Нены. Как и остальные группы протократонов, НАзия сначала дрейфовала против часовой стрелки относительно Нены, но раскрытие Тихого океана изменило эту тенденцию с преобразованием ее в Северо-Азиатскую палеоплиту и с сохранением вблизи Нены до настоящего времени. Атлантика, также как и НАзия, испытала наименьшие вращения и смещения относительно Нены.

В более глобальном плане большая часть континентальной коры в интервале между 2.45 до 1.45 млрд лет переместилась из Южного в Северное полушарие (рис. 10). Около 1.05 млрд лет назад она была распределена симметрично относительно экватора, затем переместившись снова в Южное полушарие к рубежу 900 млн лет. Около 750 млн лет она вновь оказалась вблизи экватора (см. рис. 10), а после распада Родинии большая часть континентальной коры опять оказалась в Южном полушарии. Пангея симметрично распределилась между полушариями, а после ее распада большая часть континентальной коры вновь собралась в Северном полушарии.

Несмотря на значительные движения и коллизии, за длительные интервалы времени континентальные массы перемещались не хаотически и могут четко распознаваться даже после распада Пангеи, сутурирования Палеотетиса и Неотетиса, раскрытия Индийского и Атлантического океанов. Эту стабильность можно объяснить значительным, длительным во времени и направленным смещением не столько отдельных фрагментов континентальной коры, сколько всех твердых оболочек Земли относительно магнитного поля, генерируемого жидким ядром Земли. Механизмом такого смещения может быть юлообразное поведение вращающейся планеты [28, 29].

Изменения в тектоническом режиме на фоне сбора и распада суперконтинентов и изменяющейся активности плюмов хорошо коррелируются с изменениям в преобладании определенных типов месторождений (см. рис. 9). Крупные скопления золота и меди на протяжении истории Земли концентрировались в разных типах месторождений, преимущественно связанных с субдукцией,

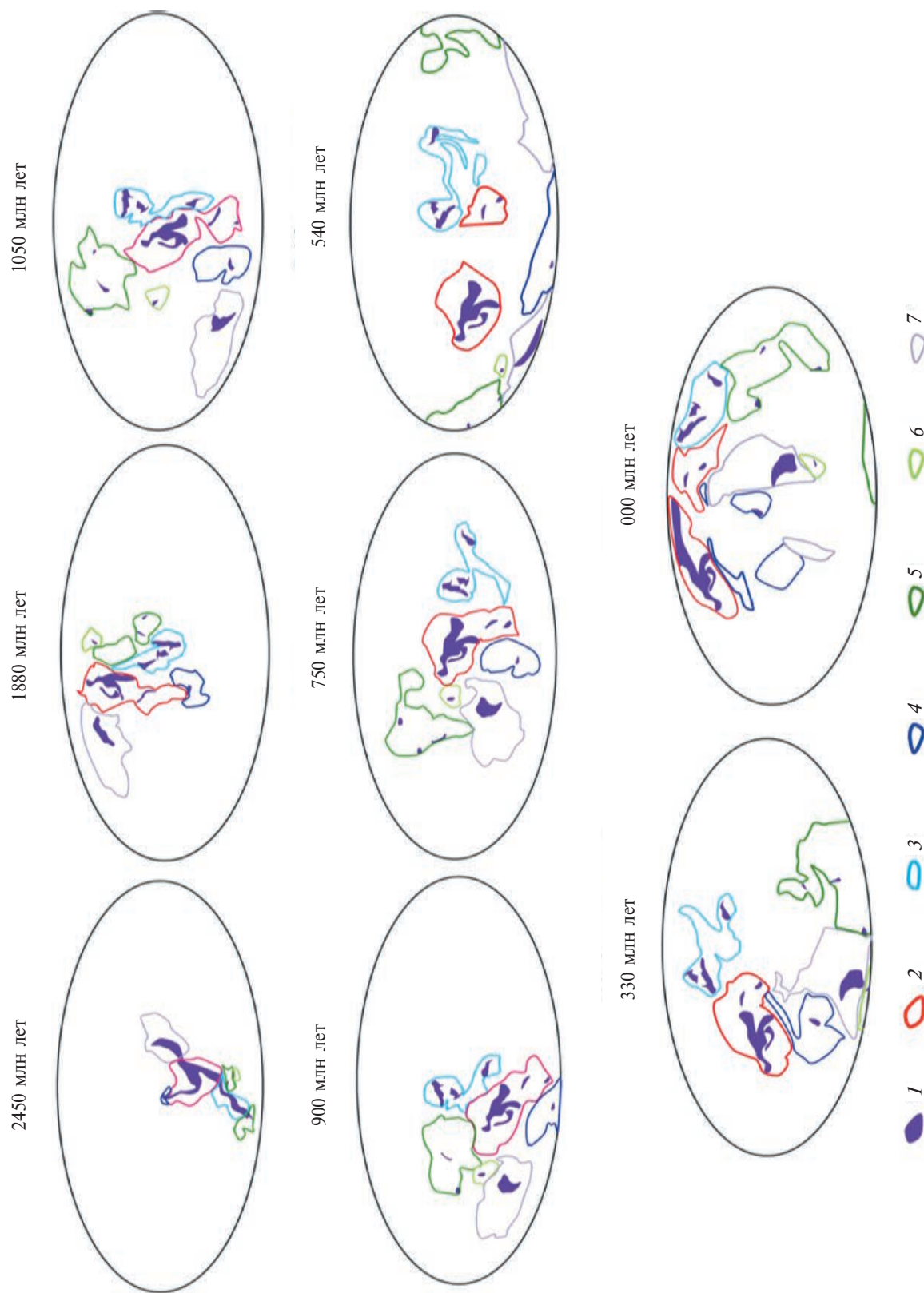


Рис. 10. Прогрессирующая фрагментация неоархейского континентального литосферного кила с 2450 млн лет назад до настоящего времени. 1 — архейский континентальный литосферный киль; 2 — Нена-Лавруссия; 3 — НАзия-Северная Азия; 4 — Атлантика-Западная Гондвана; 5 — Ур-Восточная Гондвана; 6 — Калахари; 7 — Конго-Сахара-Центральная Гондвана

но их число увеличивается с ростом плюмовой активности, связанной со скоростями спрединга и субдукции плит. Крупные месторождения меди и никеля также имеют тенденцию коррелироваться с активностью плюмов. Плюмы также были важны для формирования кимберлитов, которые доставляли древние алмазы на верхнекоровые уровни.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенный анализ тектонической эволюции Земли, сопровождающейся сменой доминирующих типов месторождений и набора металлов во времени, показывает, что широко известная периодичность сбора-распада суперконтинентов в истории Земли в 700–800 млн лет с формированием суперконтинентов Кенорлэнд (2.6 млрд лет), Колумбия (1.8 млрд лет), Родиния (1.1 млрд лет) и Пангея (0.31 млрд лет), возможно, является слишком упрощенной. Традиционно принимаемое большое значение суперконтинента Пангея ввиду краткосрочности его существования и принципиального сходства геотектонических стилей и характера металлогении до и после ее распада может быть преувеличенным. Суперконтиненты действительно имеют тенденцию собираться, распадаться и вновь собираться, но они всегда приобретают новую конфигурацию. Поэтому в тектонической эволюции Земли и связанных с ней особенностях металлогении могут быть выделены три этапа.

Нуклеарный этап — от возникновения протократонов до их сбора в суперконтинент Кенорлэнд 2.7–2.5 млрд лет назад — маркирует краткосрочное, синхронное формирование континентальной литосферы в Y-конфигурации. Весь последующий этап от распада Кенорлэнда около 2.45 млрд лет назад до сбора и длительного существования суперконтинента Колумбия с 1.85 млрд лет назад, затем преобразованного в суперконтинент Родиния 1.0–0.72 млрд лет назад, можно считать этапом кратонизации. Этап тектоники плит современного типа начался с распада Родинии на многочисленные кратоны около 720 млн лет назад и продолжается до настоящего времени с периодическим сбором короткоживущих суперконтинентов, например Пангеи.

Пространственно-временное перемещение фрагментов континентальной коры в течение трех этапов можно лучше всего понять, прослеживая архейские гранулит-гнейсовые террейны, которые участвуют в строении многих современных кратонов. Они соответствуют континентальным литосферным киям толщиной > 200 км.

По признаку существования континентальных литосферных килей могут быть выделены пять групп протократонов: Нена, Ур, Конго-Сахара, НАзия и Атлантика, которые оставались внутренне почти цельными на протяжении длительных

временных интервалов. Эти группы рассматриваются либо как независимо, но синхронно существовавшие протоконтиненты, либо как единый суперконтинент неясной конфигурации именно ввиду синхронности тектонических процессов в пространственно разобщенных фрагментах. Лаврентия обладает наиболее глубоким и крупным литосферным килем Y-конфигурации, для остальных протократонов характерна линейная ориентировка килей.

Лаврентия вместе с Восточной Европой составляют Нену, которая может быть реконструирована в центре (ядре) Кенорлэнда. Назия с Уром, Конго-Сахара и Атлантика образовывали три соответствующих продолжения Лаврентии. Палеомагнитные данные показывают, что после распада Кенорлэнда 2.45 млрд лет вся континентальная кора испытала значительное вращение в основном против часовой стрелки, что сопровождалось сбором и распадом суперконтинентов. Однако Нена, оставаясь в ядре из-за большой толщины своего литосферного кия, повернулась на 180° относительно магнитных координат. НАзия и Атлантика испытали наименьший поворот и дрейф относительно Нены, тогда как Конго-Сахара, Ур и Калахари повернулись и дрейфовали наиболее значительно.

Сбор и распад суперконтинентов и управлял металлогенической цикличностью, при этом месторождения алмазов обнаруживают наиболее сложную связь с тектонической цикличностью. Пространственная связь месторождений алмазов с континентальными литосферными киями и прямые оценки возраста минералов по включениям в них указывают на преимущественно докембрийское время их формирования. Литосферные кили рассматриваются как резервуары алмазов в субконтинентальной литосфере, а их перераспределение в пространстве в процессе тектонической эволюции обеспечило присутствие алмазов практически во всех фрагментах континентальной коры Земли, где присутствуют континентальные литосферные кили. Наличие древних алмазов в молодых внутриплитных кимберлитах позволяет рассматривать внутриплитный магматизм только, как механизм перемещения алмазов в верхнюю часть коры.

Смена преобладающих типов месторождений цветных, благородных и черных металлов во времени четко коррелируется с рассмотренной тектонической цикличностью. Так, наиболее крупные месторождения меди на нуклеарном этапе формировались в связи с железооксидно-золото-медными системами. На этапе кратонизации они возникали в железооксидно-золото-медных системах, в связи с внутриплитными мафит-ультрамафитовыми интрузиями, а также в медистых песчаниках. Для современной тектоники плит характерна приуроченность меди преимущественно к порфировым месторождениям, связанным с субдукционными процессами. С кратковременно

существовавшим суперконтинентом Пангея совпадает краткосрочное формирование гигантских месторождений меди, связанных с накоплением медистых песчаников и с внутриплитным магматизмом.

Месторождения золота и меди обнаруживают большое разнообразие типов на протяжении трех предлагаемых этапов роста континентальной коры. Для них характерно почти полное исчезновение в цикле кратонизации. Именно с длительным существованием суперконтинентов Колумбия и Родиния коррелирует формирование крупных месторождений урана, железа и никеля с металлами платиновой группы, приуроченных к железисто-окисно-золото-медным системам, ультрамафит-мафитовым интрузиям и осадочным бассейнам.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность Дж. Хеденквисту (Ottava, Canada), Р. Гольдфарбу (Colorado School of Mines, Denver, USA), К.Е. Дегтяреву (ГИН РАН, Москва, Россия), М.Н. Шуплецову (ГИН РАН, Москва, Россия) и коллегам за ценные советы, которые позволили улучшить статью. Исследования проводилось в соответствии с планами научно-исследовательской работы ГИН РАН (тема № 0135-2016-0009).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пучков В.Н. Геология Урала и Предуралья (актуальные проблемы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.
2. Розен О.М., Манаков А.В., Зинчук Н.Н. Сибирский кратон: формирование, алмазоносность. М.: Научный Мир, 2006. 212 с.
3. Abdelsalam M.G., Liegeois J.-P., Stern R.J. The Saharan metacraton // *J. of African Earth Sciences*. 2002. Vol. 34. P. 119–136.
4. Artemieva I.M. Global $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ thermal model TC1 for the continental lithosphere: implications for lithosphere secular evolution // *Tectonophysics*. 2006. Vol. 416. P. 245–277.
5. Aspler L.B., Chiarenzelli J.R. Two Neoproterozoic supercontinents? Evidence from the Paleoproterozoic // *Sedimentary Geology*. 1998. Vol. 120. P. 75–104.
6. Barnes S.-J., Lightfoot P.C. Formation of magmatic nickel sulfide ore deposits and processes affecting their copper and platinum group elements contents // *Economic Geology 100th Anniversary Volume* / J.W. Hedenquist, J.F.H. Thompson, R.J. Goldfarb, J.P. Richards (eds). Littleton: Society of Economic Geologists, 2005. P. 179–214.
7. Barreiro J.G., Catalán J.R.M., Arenas R., Castiñeiras P., Abati J., García F.D., Wijbrans J.R. Tectonic evolution of the upper allochthon of the Órdenes complex (northwestern Iberian Massif): Structural constraints to a polyorogenic peri-Gondwanan terrane // *GSA Special Papers*, 2007. Vol. 423. P. 315–332.
8. Barrie C.T., Hunnington M.D. Classification of volcanic-associated massive sulfide deposits based on host rock composition // *Volcanic-associated massive sulphide deposits: progresses and examples in modern and ancient settings* / C.T. Barrie, M.D. Hunnington (eds). Society of Economic Geologists. Littleton: Reviews in Economic Geology 1999. Vol. 8. P. 8–12.
9. Bekker A., Slack J.F., Planavsky N., Krapež B., Hofmann A., Konhauser K.O., Rouxel O.J. Iron Formation: The Sedimentary product of a complex interplay among mantle, tectonic, oceanic, and biospheric processes // *Economic Geology*. 2010. Vol. 105. P. 467–508.
10. Betts P.G., Giles D., Aitken A. Palaeoproterozoic accretion processes of Australia and comparisons with Laurentia // *International Geology Review*. 2011. Vol. 53. P. 1357–1376.
11. Bleeker W. The late Archean record: a puzzle in ca. 35 pieces // *Lithos*. 2003. Vol. 71. P. 99–134.
12. Bleeker W., Ernst R. Short-lived mantle-generated magmatic events and their dyke swarms: the key unlocking Earth's paleogeographic record back to 2.6 Ga // *Dyke swarms — time markers of crustal evolution* / E. Hanski, S. Mertanen, T. Ramo, J. Vuollo (eds). London: Taylor and Francis, 2006. P. 3–26.
13. Bogdanova S.V., Bingen B., Gorbatshev R., Kheraskova T.N., Kozlov V.I., Puchkov V.N., Volozh Yu.A. The East European Craton (Baltica) before and during the assembly of Rodinia // *Precambrian Research*. 2008. Vol. 160. P. 23–45.
14. Boger S.D. Antarctica — before and after Gondwana // *Gondwana Research*. 2011. Vol. 19. P. 335–371.
15. Burrows D.R., Lesher C.M. Copper-Rich Magmatic Ni-Cu-PGE Deposits // *Geology and genesis of major copper deposits and districts* / J.W. Hedenquist, M. Harris, F. Camus (eds). Littleton: Society of Economic Geologists, 2012. P. 515–552.
16. Cawthorn R.G., Barnes S.J., Ballhaus C., Maitch K. Platinum group element, chromium, and vanadium deposits in mafic and ultramafic rocks // *Economic Geology 100th Anniversary Volume* / J.W. Hedenquist, J.F.H. Thompson, R.J. Goldfarb, J.P. Richards (eds). Littleton: Society of Economic Geologists, 2005. P. 215–250.
17. Cocks L.R.M., Torsvik T.H. Earth geography from 500 to 400 million years ago: a faunal and palaeomagnetic review // *J. of the Geological Society London*. 2002. Vol. 159. P. 631–644.
18. Condie K. Supercontinent and superplume events: Distinguishing signals in the geologic record // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2004. Vol. 146. P. 319–322.
19. Coney P.J., Jones D.L., Monger J.W.H. Cordilleran suspect terranes // *Nature*. 1980. Vol. 288. P. 329–333.
20. Coney P.J., Edwards A., Hine R., Morrison F., Windrim D. The regional tectonics of the Tasman orogenic system, eastern Australia // *J. of Structural Geology*. 1990. Vol. 13 (5–6). P. 519–543.
21. Cordani U.G., Pimentel M.M., de Araújo C.E.G., Fuck R.A. The significance of the Transbrasiliano-Kandi tectonic corridor for the amalgamation of West Gondwana // *Brazilian J. of Geology*. 2013. Vol. 43. No 3. P. 583–597.

22. *Cuney M.* Evolution of uranium fractionation processes through time: driving the secular variation of uranium deposit types // *Economic Geology*. 2010. Vol. 105. P. 553–569.
23. *Davies G.F.* On the emergence of plate tectonics // *Geology*. 1992. Vol. 20. P. 963–966.
24. *de Witt M.J.* On Archean granites, greenstones, cratons and tectonics; does the evidence demand a verdict? // *Precambrian Research*. 1998. Vol. 91. P. 181–226.
25. *de Witt M.J., Thiart C.* Metallogenic scents of Archean cratons: changing patterns of mineralization during earth evolution // *Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy*. 2003. Vol. 112. B114–116.
26. *Degtyarev K., Yakubchuk A., Tretyakov A., Kovtsov A., Kovach V.* Precambrian geology of the Kazakh Uplands and Tien Shan: an overview // *Gondwana Research*. 2017. Vol. 47. P. 44–75.
27. *Ernst R.E., Hamilton M.A., Soderlund U., Hanes J.A., Gladkochub D.P., Okrugin A.V., Kolotilina T., Mekhonoshin A.S., Bleeker W., LeCheminant A.N., Buchan K.L., Chamberlain K.R., Didenko A.N.* Long-lived connection between southern Siberia and northern Laurentia in the Proterozoic // *Nature Geoscience*. 2016. Vol. 9. P. 464–469.
28. *Evans D.A.D.* True polar wander and supercontinents // *Tectonophysics*. 2003. Vol. 362. P. 303–320.
29. *Evans D.A.D., Pisarevsky D.* Plate tectonics on early Earth? Weighing the paleomagnetic evidence // *When Did Plate Tectonics Begin on Planet Earth?* / K.C. Condie, V. Pease (eds). Geological Society of America Special Paper. 2008. Vol. 440. P. 249–263.
30. *Franklin J.M., Gibson H.L., Jonasson I.R., Galley A.G.* Volcanogenic massive sulfide deposits // *Economic Geology 100th Anniversary Volume* / J.W. Hedenquist, J.F.H. Thompson, R.J. Goldfarb, J.P. Richards (eds). Littleton: Society of Economic Geologists, 2005. P. 523–560.
31. *Fritz H., Abdelsalam M., Ali K.A., Bingen B., Collins A.S., Fowler A.R., Ghebreab W., Hauzenberger C.A., Johnson P.R., Kusky T.M., Macey P., Muhongo S., Stern R.J., Viola G.* Orogen styles in the East African Orogen: A review of the Neoproterozoic to Cambrian tectonic evolution // *J. of African Earth Sciences*. 2013. Vol. 86. P. 65–106.
32. *Furnes H., de Wit M., Dilek Y.* Four billion years of ophiolites reveal secular trends in oceanic crust formation // *Geoscience Frontiers*. 2014. Vol. 5. P. 571–603.
33. *Gehrels G.E., Yin A., Wang X.-F.* Detrital-zircon geochronology of the northeastern Tibetan plateau // *Geological Society of America Bulletin*. 2003. Vol. 115 (7). P. 881–896.
34. *Goldfarb R.J., Baker T., Dube B., Groves D.I., Hart C.J.R., Gosselin P.* Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic terranes // *Economic Geology 100th Anniversary Volume* / J.W. Hedenquist, J.F.H. Thompson, R.J. Goldfarb, J.P. Richards (eds). Littleton: Society of Economic Geologists, 2005. P. 407–450.
35. *Goldfarb R.J., Bradley D., Leach D.L.* Secular variation in economic geology // *Economic Geology*. 2010. Vol. 105. P. 459–465.
36. *Groves D.I., Vielreicher R.M., Goldfarb R.J., Condie K.C.* Controls on the heterogeneous distribution of mineral deposits through time // *Mineral deposits and earth evolution* / I. McDonald, A.J. Boyce, I.B. Butler, R.J. Herrington, D.A. Polya (eds). Geol. Soc. London Special Publication. 2005. Vol. 248. P. 71–101.
37. *Gurney J.J., Helmstaedt H.H., Richardson S.H., Shirey S.B.* Diamonds through time // *Economic Geology*. 2010. Vol. 105. P. 689–712.
38. *Hall R.* Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, model and animations // *J. of Asian Earth Sciences*. 2002. Vol. 20. P. 353–434.
39. *Halls H.C., Kumar A., Srinivasan R., Hamilton M.A.* Paleomagnetism and U-Pb geochronology of easterly trending dykes in the Dharwar craton, India: feldspar clouding, radiating dyke swarms and the position of India at 2.37 Ga // *Precambrian Research*. 2007. Vol. 155. P. 47–68.
40. *Harley S.L., Fitzsimmons I.C.W., Zhao Y.* Antarctica and supercontinent evolution: historical perspectives, recent advances and unresolved issues // *Antarctica and supercontinent evolution* / S.L. Harley, I.C.W. Fitzsimmons, Y. Zhao (eds). Geol. Soc. London Special Publication. 2013. Vol. 383. P. 1–34.
41. *Hitzman M.W., Selley D., Bull S.* Formation of sedimentary rock-hosted stratiform copper deposits through Earth history // *Economic Geology*. 2010. Vol. 105. P. 627–639.
42. *Hoffman P.F.* United Plates of America, the birth of a craton // *Annual Reviews of Earth Planetary Science*. 1988. Vol. 16. P. 543–604.
43. *Huang B., Xu B., Zhang C., Li Y., Zhu R.* Paleomagnetism of the Baiyisi volcanic rocks (ca. 740 Ma) of Tarim, Northwest China: A continental fragment of Neoproterozoic Western Australia? // *Precambrian Research*. 2005. Vol. 142. P. 83–92.
44. *Isley A.E., Abbott D.H.* Plume-related mafic volcanism and the deposition of banded iron formation // *J. of Geophysical Research*. 1999. Vol. 104. P. 15461–15477.
45. *Johansson Å.* From Rodinia to Gondwana with the ‘SAMBA’ model — A distant view from Baltica towards Amazonia and beyond // *Precambrian Research*. 2014. Vol. 244. P. 226–235.
46. *Kerrich R., Goldfarb R., Richards J.P.* Metallogenic provinces in an evolving geodynamic framework // *Economic Geology 100th Anniversary Volume* / J.W. Hedenquist, J.F.H. Thompson, R.J. Goldfarb, J.P. Richards (eds). Littleton: Society of Economic Geologists, 2005. P. 1097–1136.
47. *Kröner A.* Evolution of the Archean continental crust // *Annual Review Earth Planetary Sciences*. 1985. Vol. 13. P. 49–74.
48. *Kusky T.M.* Geophysical and geological tests of tectonic models of the North China Craton // *Gondwana Research*. 2011. Vol. 20. P. 26–35.
49. *Large R.R., Bull S.W., McGoldrick P.J., Derrick G., Carr G., Walters S.* Stratiform and strata-bound Zn-Pb-Ag deposits of the Proterozoic sedimentary basins of northern Australia // *Economic Geology 100th Anniversary*

- Volume / J.W. Hedenquist, J.F.H. Thompson, R.J. Goldfarb, J.P. Richards (eds). Littleton: Society of Economic Geologists, 2005. P. 931–963.
50. *Lawver L.A., Dalziel I.W.D., Norton I.O., Gahagan L.M.* The PLATES 2009 Atlas of Plate Reconstructions (750 Ma to Present Day), PLATES Progress Report No 325–0509, University of Texas Technical Report No 196, 2009. 156 p. <http://www.ig.utexas.edu/research/projects/plates/recons.htm>
51. *Li Z.X., Bogdanova S.V., Collins A., Davidson A., De Waele B., Ernst R.E., Fitzsimons I., Fuck R., Gladkochub D., Jacobs J., Karlstrom K., Lu S., Milesi J.-P., Myers J., Natapov L., Pandit M., Pease V., Pisarevsky S.A., Thrane K., Vernikovsky V.* Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: a synthesis // *Precambrian Research*. 2008. Vol. 160. P. 179–210.
52. *Maier W.D., Groves D.I.* Temporal and spatial controls on the formation of magmatic PGE and Ni–Cu deposits // *Mineralium Deposita*. 2011. Vol. 46 (8). P. 841–857. DOI: 10.1007/s00126-011-0339-6
53. *Malone S.J.* Tectonic evolution of northern Ellesmere Island: insights from the Pearya Terrane, Ellesmerian Clastic Wedge and Sverdrup Basin // PhD (Doctor of Philosophy) thesis, University of Iowa, 2012. 296 p. <http://ir.uiowa.edu/etd/3496>
54. *McMenamin M.A.S., McMenamin D.L.S.* The emergence of animals: the Cambrian breakthrough. New York: Columbia University Press, 1990. 217 p.
55. *Metcalfe I.* Gondwana dispersion and Asian accretion: Tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys // *J. of Asian Earth Sciences*. 2013. Vol. 66. P. 1–33.
56. *Metelkin D.V., Vernikovsky V.A., Matushkin N. Yu.* Arctida between Rodinia and Pangea // *Precambrian Research*. 2015. Vol. 259. P. 114–129.
57. *Mpodozis C., Cornejo P.* Cenozoic tectonics and porphyry copper systems of the Chilean Andes. // *Geology and genesis of major copper deposits and districts* / J.W. Hedenquist, M. Harris, F. Camus (eds). Littleton: Society of Economic Geologists, 2012. P. 329–360.
58. *Mudd G.M., Jowitt S.M.* A detailed assessment of global nickel resource trends and endowments // *Economic Geology*. 2014. Vol. 109. P. 1813–1841.
59. *Murphy J.B., Nance R.D.* Supercontinents and the origin of mountain belts // *Scientific American*. 1992. Vol. 266 (4). P. 873–876.
60. *Nakano N., Osanai Y., Owada M., Nam T.N., Charusiri P., Khamphavong K.* Tectonic evolution of high-grade metamorphic terranes in central Vietnam: Constraints from large-scale monazite geochronology // *J. of Asian Earth Sciences*. 2013. Vol. 73. P. 520–539.
61. *Nam T.N., Toriumu M., Sano Y., Terada K., Thang T.T.* 2.9, 2.36, and 1.96 Ga zircons in orthogneiss south of the Red River shear zone in Viet Nam: evidence from SHRIMP U–Pb dating and tectonothermal implications // *J. of Asian Earth Sciences*. 2003. Vol. 21. P. 743–753.
62. *Nance R.D., Gutierrez-Alonso G., Keppie J.D., Linnemann U., Murphy J.B., Quesada C., Strachan R.A., Woodcock N.H.* A brief history of the Rheic Ocean // *Geoscience Frontiers*. 2012. Vol. 3 (2). P. 125–135.
63. *Nelson J.L., Colpron M., Israel S.* The Cordillera of British Columbia, Yukon, and Alaska: Tectonics and Metallogeny // *Tectonics, metallogeny and discovery: the North American Cordillera and similar accretionary settings* / M. Colpron, T. Bissig, B.G. Rusk, J.F.H. Thompson (eds). Society of Economic Geologists, 2013. P. 53–109.
64. *Nikishin A.M., Malyshev N.A., Petrov E.I.* Geological structure and history of the Arctic Ocean. EAGE Publication. 2014. 122 p.
65. *Nikishin A.M., Ziegler P.A., Stephenson R.A., Cloutingh S.A.P.L., Furne A.V., Fokin P.A., Ershov A.V., Bolotov S.N., Korotaev M.V., Alekseev A.S., Gorbachev V.I., Shipilov E.V., Lankrejer A., Bembinova E. Yu., Shalimov I.V.* Late Precambrian to Triassic history of the East European craton: dynamics of sedimentary basin evolution // *Tectonophysics*. 1996. Vol. 268. P. 23–63.
67. *Pease V., Percival J., Smithies H., Stevens G., van Kranendonk M.* When did plate tectonics begin? Evidence from the orogenic record // *Geological Society of America Special Papers*. 2008. Vol. 440. P. 199–228.
68. *Perello J., Sillitoe R.H., Yakubchuk A.S., Valencia V.A., Cornejo P.* Age and tectonic setting of the Udokan sediment-hosted copper-silver deposit, Transbaikalia, Russia // *Ore Geology Reviews*. 2016. Vol. 86. P. 856–866.
69. *Pesonen L.J., Mertanen S., Veikkolainen T.* Paleo-Mesoproterozoic supercontinents — a paleomagnetic view // *Geophysica*. 2012. Vol. 48 (1–2). P. 5–47.
70. *Piper J.D.A.* The Neoproterozoic supercontinent: Rodinia or Paleopangaea? // *Earth and Planetary Science Letters*. 2000. Vol. 176. P. 131–146.
71. *Pisarevsky S.A., Elming S.-Å., Pesonen L.J., Li Z.-X.* Mesoproterozoic paleogeography: Supercontinent and beyond // *Precambrian Research*. 2014. Vol. 244. P. 207–225.
72. *Pollack H.N.* Thermal characteristics of the Archaean // *Greenstone belts* / M.J. de Witt, L.D. Ashwal (eds) Oxford: Clarendon Press, 1997. P. 223–232.
73. *Rapela C.W., Fanning C.M., Casquet C., Pankhurst R.J., Spalletti L., Poire D., Baldo E.G.* The Rio de la Plata craton and the adjoining Pan-African/Brasiliano terranes: their origins and incorporation into south-west Gondwana // *Gondwana Research*. 2011. Vol. 20. P. 674–690.
74. *Richards J.* Tectonic, magmatic, and metallogenic evolution of the Tethyan orogen: from subduction to collision // *Ore Geology Reviews*. 2015. Vol. 70. P. 323–345.
75. *Roberts N.M.W., Spencer C.J.* The zircon archive of continent formation through time // *Continent formation through time* / N.M.W. Roberts, M. van Kranendonk, S. Parman, S. Shirey, R.D. Clift (eds). Geological Society London Special Publication 389, 2014. <http://dx.doi.org/10.1144/SP389.14>
76. *Rogers J.J.W.* A history of continents in the past three billion years // *J. of Geology*. 1996. Vol. 104. P. 91–107.
77. *Rogers J.J.W., Santosh M.* Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic supercontinent // *Gondwana Research*. 2002. Vol. 5. P. 5–22.
78. *Santosh M., Maruyama S., Yamamoto S.* The making and breaking of supercontinents: Some speculations based

on superplumes, super downwelling and the role of tectosphere // *Gondwana Research*. 2009. Vol. 15. P. 324–341.

79. *Sawkins F.J.* Metal deposits in relation to plate tectonics. Berlin: Springer Verlag, 1984. 282 p.

80. *Scotese C.* Paleomap project 2003. Available at www.scotese.com

81. *Sears J.W., Price R.A.* New look at the Siberian connection: No SWEAT // *Geology*. 2000. Vol. 28. P. 423–426.

82. *Sengor A.M.C., Natal'in B.A.* Paleotectonics of Asia — fragments of a synthesis // *The tectonic evolution of Asia* / A. Yin, T.M. Harrison (eds). Cambridge: Cambridge University Press, 1996. P. 486–640.

83. *Sevastjanova I., Clements B., Hall R., Belousova E.A., Griffin W.L., Pearson N.* Granitic magmatism, basement ages, and provenance indicators in the Malay Peninsula: Insights from detrital zircon U–Pb and Hf-isotope data // *Gondwana Research*. 2011. Vol. 19. P. 1024–1039.

84. *Singer D.A.* World class base and precious metal deposits a quantitative analysis // *Economic Geology*. 1995. Vol. 90. P. 88–104.

85. *Singer D.A., Berger V.I., Moring B.C.* Porphyry copper deposits of the world: Database and grade and tonnage models. U.S. Geological Survey Open-File Report 2008–1155. <http://pubs.usgs.gov/of/2008/1155>

86. *Sillitoe R.H.* Copper Provinces // *Geology and Genesis of Major Copper Deposits and Districts of the World: A Tribute to Richard H. Sillitoe*. / J.W. Hedenquist, M. Harris, F. Camus (eds). Littleton: Society of Economic Geologists, 2012. P. 1–18.

87. *Smith K.* Supercontinent Amasia to take North Pole Position // *Nature*. 2012. Vol. 9. No 4. DOI:10.1038/nature.2012.9996

88. *Stampfli G.M., Hochard C., Vérard C., Wilhem C., von Raumer J.* The formation of Pangea // *Tectonophysics*. 2013. Vol. 593. P. 1–19.

89. *Stampfli G.M., von Raumer J., Wilhem C.* The distribution of Gondwana-derived terranes in the early Paleozoic // *Ordovician of the World* / J.C. Gutiérrez-Marco, I. Rábano, D. García-Bellido (eds). Madrid: Cuadernos del Museo Geominero, Instituto Geológico y Minero de España, 2011. P. 567–574.

90. *Stern R.J.* Evidence from ophiolites, blueschists, and ultrahigh-pressure metamorphic terranes that the modern episode of subduction tectonics began in Neoproterozoic time // *Geology*. 2005. Vol. 33 (7). P. 557–560.

91. *Teixeira W., Sabate P., Barbosa J., Noce C.M., Carneiro M.A.* Archean and Paleoproterozoic tectonic evolution of the São Francisco craton, Brazil // *Tectonic evolution of South America* / U.G. Cordiani, E.J. Milani, A. Thomaz Filho, D.A. Campos (eds). Rio de Janeiro: 31st International Geological Congress, 2000. P. 101–137.

92. *Torsvik T.H., Cocks L.R.M.* Earth geography from 400 to 250 Ma: a palaeomagnetic, faunal and facies review // *J. of the Geological Society London*. 2004. Vol. 161. P. 555–572.

93. *Weil A.B., Van der Voo R., MacNiocall C., Meert J.G.* The Proterozoic supercontinent Rodinia: paleomagnetically derived reconstructions for 1100 to 800 Ma // *Earth and Planetary Science Letters*. 1998. Vol. 154. P. 13–24.

94. *Wilde S.A., Zhao G., Sun M.* Development of the North China craton during the Late Archean and its final amalgamation at 1.8 Ga: some speculations on its position within a global palaeoproterozoic supercontinent // *Gondwana Research*. 2002. Vol. 5. P. 85–94.

95. *Yakubchuk A.* Restoring the supercontinent Columbia and tracing its fragments after its breakup: A new configuration and a Super-Horde hypothesis // *J. of Geodynamics*. 2010. Vol. 50. P. 166–175.

96. *Yakubchuk A.* Evolution of the Central Asian orogenic supercollage since Late Neoproterozoic revised again // *Gondwana Research*. 2017. Vol. 47. P. 372–398.

97. *Yakubchuk A., Degtyarev K., Maslennikov V., Wurst A., Stekhin A., Lobanov K.* Tectonomagmatic settings, architecture, and metallogeny of the Central Asian copper province // *Geology and genesis of major copper deposits and districts of the world* / J.W. Hedenquist, M. Harris, F. Camus, (eds). Littleton: Society of Economic Geologists, 2012. P. 403–432.

98. *Zhao G., Cawood P.A., Wilde S.A., Sun M.* Review of global 2.1–1.8 Ga collisional orogens and accreted cratons: a pre-Rodinia supercontinent? // *Earth-Science Reviews*. 2002. Vol. 59. P. 125–162.

99. *Ziegler P.* Evolution of Laurussia: a study in late Paleozoic tectonics. Dordrecht/Boston: Kluwer Academic Publishers, 1989. 100 p.

100. *Zonenshain L.P., Kuzmin M.I., Natapov L.M.* Geology of the USSR: A plate tectonic synthesis // *American Geophysical Union Geodynamics Series Monograph*. 1990. Vol. 21. 242 p.

From Kenorland to Modern Continents: Tectonics and Metallogeny

A.S. Yakubchuk

*Geological Institute, Russian Academy of Sciences,
7 Pyzhevskiy per., Moscow, 119017 Russia
e-mail: slaurum@aol.com*

Received April 18, 2018; Revised September 10, 2018; Accepted November 27, 2018

Abstract — There are three stages in tectonic evolution of the Earth: (1) nucleation — from origin of protocratons to their assembly into Supercontinent Kenorland (2.7–2.5 Ga); (2) cratonization — from breakup of Kenorland (2.45 Ga) to the assembly of Columbia (1.85 Ga) and its reorganization into Rodinia (1.0–0.72 Ga); (3) modern plate tectonics — from breakup of Rodinia at 720 Ma until present. Analysis of time-space reorganizations of Archean granulite-gneiss terranes, which correspond to continental lithospheric keels, reveals five groups of protocratons (Nena, Ur, Congo-Sahara, NAsia and Atlantica) that remained almost intact during long time intervals.

After the breakup of Kenorland, the continental crust rotated counter-clockwise. NAsia and Atlantica the least rotated and drifted relative to Nena, however the latter was rotated by 180°. Congo-Sahara, Ur and Kalahari were the most rotated. The assembly and breakup of the supercontinents clearly correlates with secular changes in dominant types of base, precious and ferrous metal deposits, as well as formation and emplacement of diamonds.

Key words: tectonics, metallogeny, protocratons, cratons, paleoplates, supercontinents, continental lithospheric keel