

ГЕОДИНАМИКА, МЕТАЛЛОГЕНИЯ, КОСМОЛОГИЯ

УДК 551.2.03 / 551.24.01

ЭВОЛЮЦИЯ ЗЕМЛИ И ПРОЦЕССЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЕЕ ГЕОДИНАМИКУ, МАГМАТИЗМ И МЕТАЛЛОГЕНИЮ

М.И. Кузьмин¹, Н.А. Горячев^{1,2}

¹ Институт геохимии СО РАН, Иркутск, Россия

² Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт ДВО РАН, Магадан, Россия

Обсуждаются этапы развития Земли первой половины ее жизни. Показана закономерность смены ранних (хаотичный и гадейский эоны) космогенных факторов на эндогенные, связанные со становлением внутренних оболочек в ядре и мантии. Переходный период второй половины архея привел к смене ТТГ магматизма на кали-натровый и калиевый известково-щелочной и щелочной и запуску процессов эндогенного рудообразования на Земле. Максимум развития этих процессов обусловлен сочетанием тектоники плит с плюм-тектоникой, доминирующими в последние 2 млрд лет. Высказано предположение об изначально плюмовой природе Витватерсранда – крупнейшего месторождения золота Земли.

Ключевые слова: ранняя Земля, гадей, геохронология циркона, металлогения, плюм-тектоника, плейт-тектоника.

Введение

Земля – замечательная планета в бескрайней Вселенной. Развитие Солнечной системы – родительницы нашей Земли, и сама геологическая история обеспечили возникновение жизни и создание необходимых условий для появления человека. Ни одна другая планета Солнечной системы не может сравниться с Землей, а астрономы, которым известно более 600 звездных систем, не обнаружили пока ни одного ее аналога [Батыгин и др., 2016]. Первый человек появился всего около 5 млн лет тому назад, а Земле и Солнечной системе уже 4 565 млн лет, т.е. почти 4,5 млрд лет природа готовила возможность появления разумного, мыслящего существа. Несомненно, следует понять, как и при каких условиях происходил этот процесс, какие силы вызвали эволюцию Земли и развитие жизни, что ждет человечество в будущем? Нам кажется, что очень хорошо об этом сказал Р. Штерн: «Мы не сможем понять действующую систему Земли до тех пор, пока не поймем, когда действующий стиль тектоники плит начался и какая тектоника плит на Земле была до этого» [Stern, 2008]. В наших работах [Кузьмин, Ярмолюк, 2016а, 2016б, 2017] рассмотрены некоторые вопросы изменения характера тектонических процессов в геологической истории Земли. Однако также очевидно, что развитие человечества, его существование не могут происходить без использования минеральных богатств Земли. Еще в каменном веке человек использовал кремь, чтобы добыть огонь, в бронзовом и железном веках применял бронзу и железо для облегчения своего труда и создания ком-

форта. В настоящее время человеку нужны разнообразные химические элементы, чтобы обеспечить стабильность своего существования на Земле и в окружающем космосе. Таким образом, кроме основ мироздания, необходимы понимание и прогноз процессов, которые приводят к образованию минеральных богатств нашей планеты. В настоящей статье мы попытаемся рассмотреть особенности формирования внутреннего строения Земли, когда и как в прошлом происходили изменения тектонического стиля, а также закономерности образования горных пород и месторождения полезных ископаемых.

Образование ранней Земли

Как считают астрономы, вероятный взрыв сверхновой звезды в окрестностях будущей Солнечной системы обусловил образование газово-пылевой туманности, для состава которой было характерно множество различных химических элементов и их коротко- и долгоживущих изотопов. В результате начавшейся конденсации межзвездной материи эволюция туманности продолжала контролироваться, главным образом, процессами гравитации [Хаин, 2003]. Предположительно уже через 100 тыс. лет в центре туманности возникло Протосолнце в окружении широкого кольца газа и пыли, послуживших строительным материалом планет Солнечной системы [Лин, 2008]. Хаотичное движение твердых частиц вызывало их нагревание, испарение воды и других летучих. Так возникла естественная граница между будущими Юпитером и Марсом, названная границей льда. Она разделила Солнечную систему на внутреннюю (каменную) часть с преобла-

данием твердого материала и внешнюю оболочку, в которой в течение всего 2 млн лет сформировались планеты-гиганты в основном из газа и льда [Батыгин, Лафлин, Морбиделли, 2016]. Компьютерные модели [Masset, Snellgrove, 2001] показали возможное раннее образование планет-гигантов Сатурна и Юпитера в результате гравитационного взаимодействия как с внутренними планетами-эмбрионами, так и с внешним поясом комет и позволили осуществить «путешествие» по солнечному диску от его края к центру и обратно [Батыгин и др., 2016]. Считается, что в область между Солнцем и орбитой Марса было принесено большое количество углистых хондритов и газообразных веществ, послуживших строительным материалом для аккреции планет земной группы. Одновременно происходил сброс астероидно-метеоритного материала в пространство солнечной короны [Батыгин и др., 2016].

Этап зарождения Солнечной системы завершился около 4,1 млрд л. н., когда дальние планеты «обосновались» на своих орбитах за границей льда. Это ознаменовалось последней тяжелой бомбардировкой планет земной группы. К тому времени Земля пережила два эона: хаотичный и гадейский (гадей). Именно последний из них считается началом геологической истории. Хаотичный эон охватывал интервал 4 568–4 500 млн лет [Goldblatt et al., 2010]. Сейчас уже установлено, что состав Солнца и углистых хондритов соответствует первичной солнечной туманности [Wood, 2011; Кузьмин, 2014; Кузьмин, Ярмолюк, Котор, в печати] и происходившая в хаотичном эоне аккреция Земли началась практически сразу после зарождения Солнечной системы. По расчетам, примерно через 11 млн лет масса Земли составляла 63 % от ее современной массы, а через 30 млн лет достигла 93 % [Wood, 2011]. Почти одновременно с процессами аккреции начались дифференциация материала Земли, его разделение на железное ядро и силикатную мантию. С применением короткоживущей изотопной системы $^{182}\text{Hf} \rightarrow ^{182}\text{W}$, имеющей период полураспада 8,9 млн лет, было установлено, что через 20 млн лет большая часть ядра Земли уже сформировалась [Wood, Halliday, 2010], а через 34 ± 7 млн лет после начала аккреции ядро сформировалось практически полностью [Костицын, 2012].

Важным событием в хаотичном эоне было образование Луны около 30 млн лет после начала эволюции Солнечной системы. Это произошло в результате столкновения, со скоростью около 5 км/с, Земли и космического тела Теиа (Theia), имеющего массу около 1,4 % земной. Теиа сформировалась во внутренней части Солнечной системы, т.е. по составу была похожа на Землю. Как показало компьютерное моделирование, при столкновении железное ядро Теиа в виде отдельных блоков опустилось через холодную мантию Земли и увеличило ядро нашей

планеты. При этом силикатная часть Theia и большая часть земной мантии образовали облако, состоящее из расплавленных силикатов и атмосферных газов Протоземли [Condie, 2011; Кузьмин, Ярмолюк, Котор, в печати]. Из расплавной части на периферии облака стала кристаллизоваться Луна. Как показывает сравнительный геохимический анализ силикатной части Земли и Луны, лунные породы обогащены тугоплавкими оксидами Ca, Sc, Ti, Th, но деплетированы сидерофильными (Co, Ni) и литофильными (Na, K, Rb, Cs) элементами [Condie, 2011]. Такие отличия вполне объяснимы, если допустить, что (1) Луна кристаллизуется первая из силикатного расплава этого импактного облака; (2) литофильные элементы имеют более низкие температурные конденсации и обогащают земные породы; (3) сидерофильные элементы при аккреции и первонаачальной дифференциации концентрируются в ядрах планетных тел. Летучие компоненты Протоземли поступили в атмосферу Земли после ее остывания. Это подтверждается наличием кислорода в земной атмосфере в начале гадейского эона [Condie, 2011; Кузьмин, Ярмолюк, Котор, в печати]. Земля после удара и появления спутника приобрела наклон оси вращения $24,3^\circ$, что способствует устойчивой температуре в холодные и теплые климатические периоды и может оказывать заметное воздействие на жидкие оболочки Земли – гидросферу и внешнее ядро. Познание самой Луны позволяет лучше понимать раннюю геологическую историю.

Гадейский эон стали выделять начиная с 80-х гг. XX в., когда в Западной Австралии в метаморфизованных осадочных породах обнажения Джек Хиллс (Jack Hills) были найдены обломки кристаллов циркона возрастом 4 376 млн лет [Myers, 1988]. В дальнейшем возраст наиболее древних цирконов был уточнен до 4,4 млрд лет. Начало гадейского эона, а соответственно начало геологической истории Земли, датируется 4,5 млрд лет [Goldblatt et al., 2010]. Исследование содержаний редких элементов в цирконах гадея [Maas et al., 1992] показали, что минерал имеет содержания Hf – 0,86–1,30 мас. %; Zr/Hf – 30–57; фракционирование РЗЭ характеризуется высоким отношением ТРЗЭ/ЛРЗЭ, аномалиями: положительной для Ce и отрицательной для Eu. Эти же исследователи показали присутствие в цирконах включений калиевого полевого шпата, кварца, плагиоклаза, монацита и апатита. Эти данные позволили сделать заключение о гранитном составе источника цирконов гадея. Положительная аномалия Ce, а также изотопный состав кислорода в них свидетельствуют об окислительной обстановке минералообразования. Лунные импактные цирконы имеют более высокую температуру кристаллизации и формировались в восстановительной обстановке [Taylor McKeegan, Harrison, 2009; Nebel, Rapp, Yaxley, 2014; Кузьмин, 2014; Кузьмин, Ярмолюк, 2016б]. Послед-

няя тяжелая бомбардировка планет земной группы практически уничтожила гадейскую континентальную кору, которая сохранилась в виде небольшого фрагмента в Нуввуагитугском (Nuvvuagittuq) зеленокаменном поясе на северо-восточном побережье Гудзонского залива в Канаде [O'Neil et al., 2012]. Его центральная часть (серия Ujagaaluk) сложена основными и ультраосновными вулканическими и интрузивными породами, возраст которых $\sim 4,4$ млрд лет оценивался по соотношению продуктов распада короткоживущей ($^{146}\text{Sm} \rightarrow ^{142}\text{Nd}$; $T_{1/2} = 100$ млн лет) и долгоживущей ($^{147}\text{Sm} \rightarrow ^{143}\text{Nd}$; $T_{1/2} = 10,6$ млрд лет) изотопных систем. Возможно, это реликты древнейшей земной коры, которая сформировалась после уже упомянутого импактного события.

Наличие зональности в цирконах гадейского возраста, а также их обнаружение в тоналит-грандьемитовых гнейсах архея позволяют считать, что в это время при излияниях основных-ультраосновных магм на поверхность Земли происходила их дифференциация с образованием небольших объемов Zr-содержащих кислых (гранитоидных) магм. При метеоритных бомбардировках отдельные блоки гадейской континентальной коры погружались в мантию, где, расплавляясь, смешивались с ее материалом. Более тугоплавкие цирконы сохранялись и могли повторно попасть на земную поверхность с новыми порциями основных магм [Nebel, Rapp, Yaxley, 2014; Кузьмин, 2014; Кузьмин, Ярмолюк, 20166]. Считается, что на этом фоне происходили так называемые мантийные перевороты, в какой-то степени сопоставимые с мантийными плюмами средних и малых глубин [Debaille et al., 2013; Кузьмин, Ярмолюк, Котов, в печати].

Архейские ТТГ серии – реликты древнейшей континентальной коры Земли

В архейскую эпоху сформировалась континентальная кора тоналит-грандьемит-гранодиоритового (ТТГ) состава, породы которой слагают большую часть древних кратонов. Геохимические данные по редким элементам и изотопии свидетельствуют о том, что эти породы имеют мантийный генезис [Condie, 2011].

По химическому составу ТТГ-серии заметно отличаются от фанерозойских образований. На рис. 1 видно, что ТТГ – типичные натриевые породы, расположенные на диаграмме Na–K–Ca в ее «натриевом» углу. Вполне понятно, что исходным субстратом для пород ТТГ служила древняя мантия Земли, которая еще сохранила основную массу литофильных (некогерентных) элементов [Кузьмин, Ярмолюк, 2017]. Постархейские известково-щелочные породы, приуроченные обычно к зонам субдукции, существенно более калиевые, так как основой для их генезиса является литосфера с большим участием материала континентальной коры. Еще более контрастно горные

породы отличаются по содержанию редких элементов. Во-первых, ТТГ обогащены ЛРЗЭ, что связано со значительной глубиной частичного плавления архейской базальтовой коры при ее погружении в мантию. Последняя могла быть обогащена литофилами по сравнению с фанерозойскими MORB. Например, установленные нами древние основные породы, названные протоофиолитами [Глуховский, Моралев, Кузьмин, 1977], обогащены некогерентными элементами.

На диаграммах K–Na–Ca показано различие ТТГ, представленных натриевыми разностями гранитоидов, от известково-щелочных вулканитов и гранитов постархейского возраста по [Condie, 2011].

Состав ТТГ-серии дает основание полагать, что эти породы образуются при плавлении высокогидролизированных базальтов при достаточно высоких давлениях, в поле устойчивости граната, т.е. характерен эклогитовый парагенезис [Reimink et al., 2014]. При этом наличие в исходных базальтах повышенных количеств некогерентных элементов определяет состав ТТГ-серии, сходный с островодужными породами фанерозойского возраста. Однако никаких следов субдукционных обстановок при образовании ТТГ-серий не установлено. Можно полагать, что мантийные основные и ультраосновные магмы, связанные с архейскими плюмами, были ответственными за образование мощной базальтоидной коры. Образованные из таких магм базальтоиды обогащены литофильными элементами по сравнению с фанерозойскими MORB, а верхняя часть мантии насыщена флюидами. Под своей тяжестью мощная базальтоидная кора испытывала прогибание и происходило погружение отдельных блоков в мантию. Процесс получил название «сагдукция» (англ. *sag* – прогиб) и связывался с вертикальными движениями [Хаин, 2003].

Свидетельством участия коры Гадея при образовании архейских гранитоидных магм является находка ксенокриста циркона возрастом 4,2 млрд лет в центре более крупного зонального кристалла минерала, периферийная зона которого имеет возраст 3,89–3,9 млрд лет (рис. 2) [Iizuka et al., 2006]. Возраст гранитоидов акастакского гнейсового комплекса в Нуввуагитугском зеленокаменном поясе составляет 3 830 млн лет, и их выплавление происходило одновременно с амфиболитизацией пород Гадея возрастом 4290 млн лет [Roth et al., 2013].

В ряде работ отмечается, что по изотопному составу, в частности значению $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$, цирконы из кратонов Австралии, Канады, Гренландии, Китая и Южной Африки представляют единое семейство, родоначальником которого является циркон обнажения Jack Hills [O'Neil et al., 2014; Кузьмин, 2014]. Все это говорит о том, что кора Гадея была широко распространена под докембрийскими кратонами Земли и являлась важным фактором при генерации гранитоидных магм ТТГ-типа [Кузьмин, Ярмолюк, Котов, в печати].

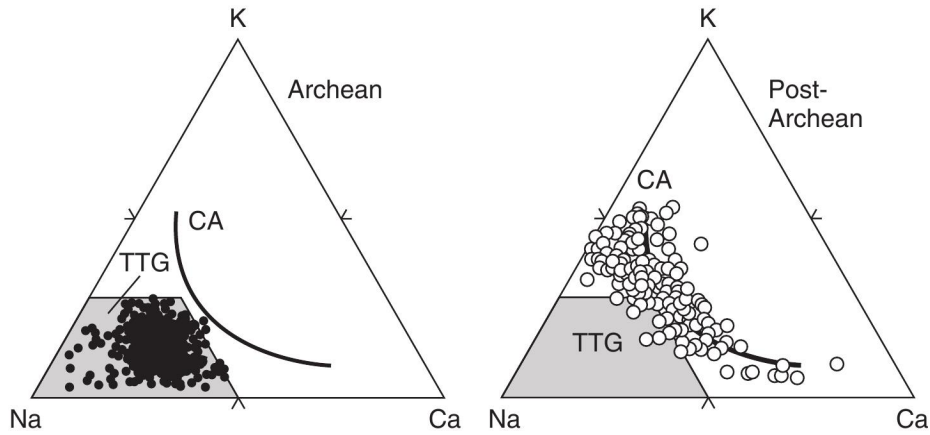


Рис. 1. Архейский период характеризуется формированием 3,9–4,1 млрд лет пород ТТГ-серии, которые слагают сохранившуюся континентальную кору древних кратонов

Fig. 1. The Archean period is characterized by the formation of 3.9–4.1 billion years of rocks of the TTG series, which form the preserved continental crust of ancient cratons

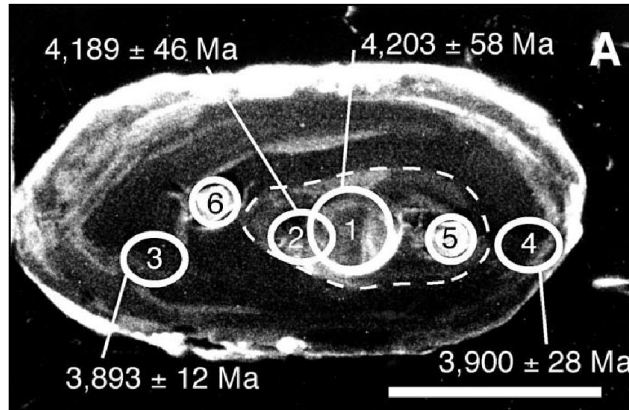


Рис. 2. Ксенокристалл гадейских цирконов возрастом 4,2 млрд лет в архейских породах серии ТТГ возрастом 3,8 млрд лет из Acasta гнейсового комплекса Канады по [Iizuka et al., 2012]

Fig. 2. Xenocrystal of Gadeic zircons of the age of 4.2 billion years in the Archean rocks of the TTG series with the age of 3.8 billion years from the Acasta gneiss complex of Canada by [Iizuka et al., 2012]

Однако необходимо отметить, что основным механизмом формирования пород ТТГ-серий является сагдукция. Модель этого механизма основана на детальном петролого-геохимическом изучении зелено-каменного пояса в провинции Сьюпериор (Superior), Канада, который состоит из вулканитов базальт-коматиитового состава и ассоциирующих ТТГ-пород [Bédard, 2006] (рис. 3).

Архейская кора повышенной мощности погружается (проваливается) в мантию до глубины, когда при частичном плавлении образуется гранат. Под влиянием высоких мантийных температур происходит выплавление из эклогитизированного архейского базальтоида пород серии ТТГ, которые интрузи-

руются в основную архейскую кору, образуя сохранившуюся первую континентальную кору. J.H. Bédard отметил, что таких стадий может быть 3–4.

Ее сущность состоит в том, что базальтоидная кора повышенной мощности интрузируется магмами плюмовой природы. В результате происходят частичное плавление вулканитов и опускание рести-та, а гранитоидные магмы поднимаются на верхний уровень коры. Процесс формирования ТТГ-серии является многостадийным. В предлагаемой модели он включает как минимум 3–4 стадии. В какой-то мере модель может применяться к формированию океанических плато, которые, как и архейские ТТГ-серии, образуются над мантийными плюмами.

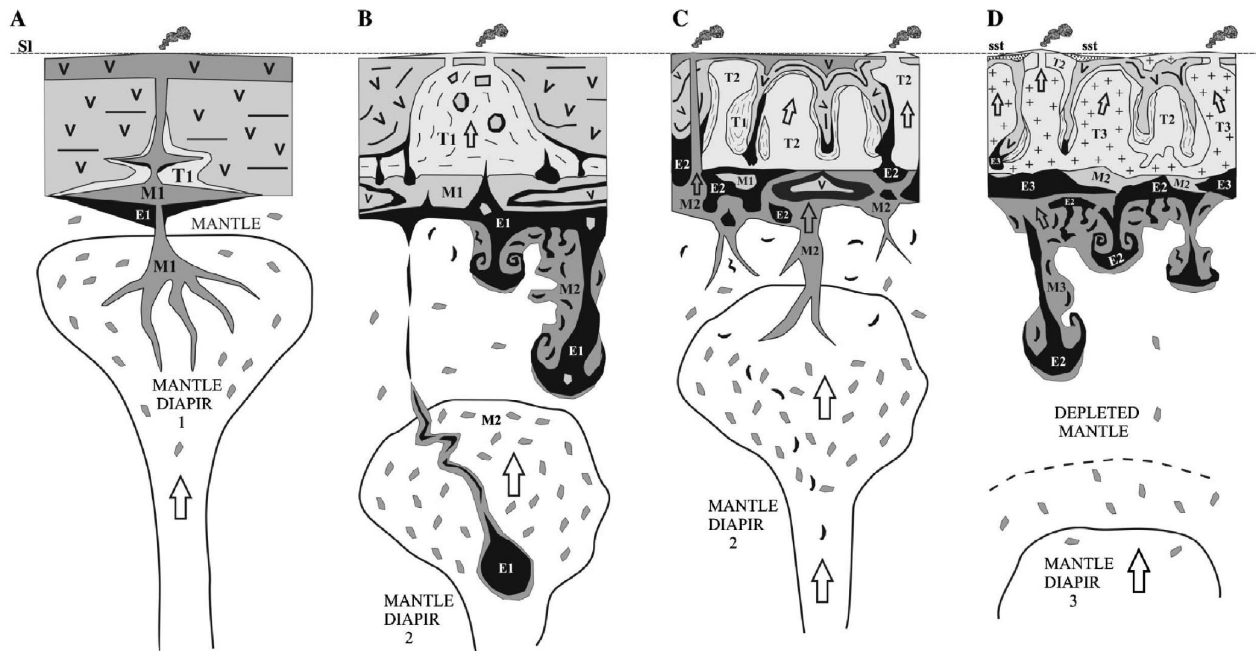


Рис. 3. Модель сагдукции, обеспечивающая формирование пород ТТГ возрастом 3,9–3,1 млрд лет, предложенная [Bédard, 2006]

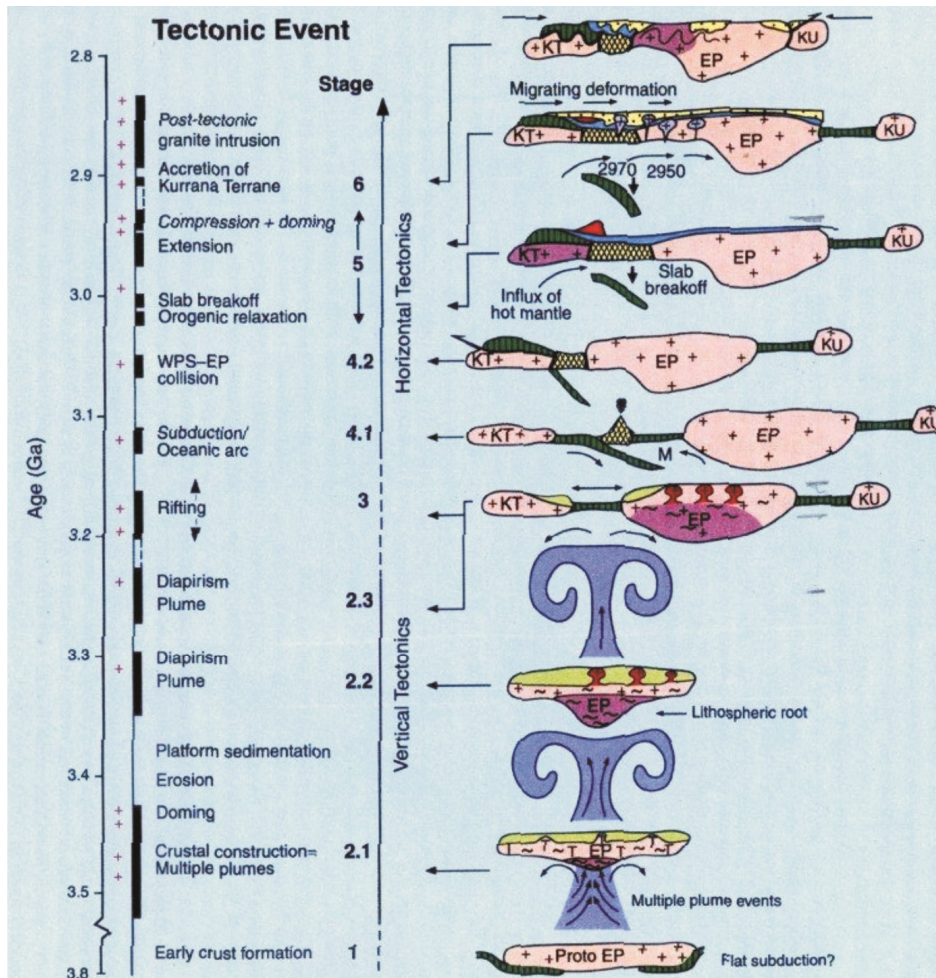
Fig. 3. The model of sagduction providing formation of TTG rocks of age 3.9–3.1 billion years, proposed [Bédard, 2006]

Таким образом, если в начальном этапе эволюции Земли эндогенные процессы были вызваны метеоритной бомбардировкой, то в архее планета стала уже самоорганизованной. В ней проявилась глобальная конвекция мантии, в которую под действием гравитации проваливались блоки коры протоконтинентов. В результате процессов метаморфизма и частичного плавления метаморфизованных основных пород формировались кислые магмы гранитоидного состава. Однако полного разделения внутренних земных оболочек еще не происходило, за исключением центральной части планеты с образованием внутреннего твердого и внешнего жидкого ядра.

Переходный период и становление внутренних геосфер

Начало выделения земных оболочек можно фиксировать временем 3,4 млрд лет. Вплоть до 2,7 млрд лет происходило выделение внутреннего железного ядра, являющегося главным источником восходящих флюидных потоков рудного вещества [Маракушев и др., 1997]. По существующим оценкам, в этот отрезок времени температура поднимающихся к поверхности плюмов была постоянной и составляла $1650 \pm 5^\circ\text{C}$ [Campbell, Griffiths, 2014]. Кристаллизация внутреннего ядра сопровождалась возрастанием флюидного дав-

ления и импульсной дегазацией [Маракушев и др., 1997]. При выполнении международной программы по изучению архейского магматизма Земли было установлено, что ТТГ-серии формировались в интервалах 3,9–3,6–3,4–3,1 млрд лет [Halla et al., 2017]. Гранитоидные массивы, в том числе батолиты, моложе 3,1 млрд лет сложены уже калиевыми известково-щелочными изверженными породами типа санукитоидов, монцогранитов, кварцевых монцонитов. Считается, что в это время произошло изменение динамики Земли [Halla et al., 2017]. При образовании К-гранитоидов возрастом 3,1–2,5 млрд лет некоторые докембрийские кратоны, которые ранее слагали единый Суперконтинент, были разбиты на серию более мелких, разделенных океаническими бассейнами. В это время преобладали два тектонических стиля – тектоника покрывки (LID tectonics) и тектоника мантийных переворотов с плюмами ультраосновного и основного состава. По нашему мнению, в интервале 3,1–2,7 млрд лет проявился период тектоники малых плит (переходный период 2,7–2,0 млрд лет от тектоники малых плит к современной глобальной тектонике). К этому времени сформировались все внутренние оболочки Земли [Кузьмин, Ярмолюк, 2016а, 2016б, 2017]. Смена тектонических движений и типов тектонических структур от начала архея до эволюции тектоники плит проиллюстрирована на рис. 4.



Переходный период к современной тектонике
Эпоха суперконтинентальных циклов

Тектоника малых плит
Архейские К-граниты, монцограниты, Санукитоиды

Проявление рифтовых структур
Тектоника покрывки (LID tectonics)
Тектоника мантийных плюмов
Ассоциация Тоналит, трондьемит, гранодиоритов

Рис. 4. Диаграмма тектоно-магматических событий формирования геологических структур и кратона Pilbara (Пилбара), Австралия, по [Pease et al., 2008] с добавлениями авторов

Fig. 4. Diagram of tectonic-magmatic events of the formation of geological structures and the craton Pilbara Australia by [Pease et al., 2008] with the additions of the authors

Данная диаграмма отражает тектоно-магматические события в развитии геологических структур кратона Пилбара (Pilbara) в Австралии [Pease et al., 2008]. Мы сочли целесообразным ее модернизировать [Кузьмин, Ярмолюк, Котов, в печати] с использованием данных, приведенных ниже, а также выделить более позднюю эпоху развития Земли – переход к тектонике плит с формированием суперконтинентов [Ernst, 2014; Кузьмин, Ярмолюк, 2016а, 2016б].

Переход, связанный с изменением стиля геотектонических движений, продолжался до 2 млрд л. н., причем в интервале 2,7–2,5 млрд лет произошли наиболее существенные изменения многих существенных параметров Земли [Condie, 2011; Кузьмин, Ярмолюк, 2016б, 2017; Кузьмин, Ярмолюк, Эрнст, 2016]. Именно этому времени отвечает первый глобальный орогенез, зафиксированный в датировках циркона [Condie, 2011]. В отмеченном

интервале происходило формирование слоя D'' [Campbell, Griffiths, 2014], что сопровождалось изменением плюмов по составу от коматиитовых ранее 2,7 млрд лет до толеитовых базальтов после 2 млрд лет. Около 2,5 млрд л. н. резко изменяется изотопный состав кислорода, что связано с увеличением поверхности суши [Condie, 2011]. Позднее 2,5 млрд лет увеличивается содержание ^{18}O , что связано с интенсивным химическим выветриванием. 2 млрд л. н. происходило обособление так называемой деплетированной мантии с увеличенным значением $\epsilon^{142}\text{Nd}$ [Condie, 2011] и более низким $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в ее продуктах – океанских базальтах. Возникают так называемые горячие поля мантии, или мантийные провинции, с низкими скоростями сейсмических волн [Зоненшайн, Кузьмин, 1983; Condie, 2011; Hofman, 1997]. Кроме того, проявляется магматизм повышенной щелочности, с кото-

рым связаны залежи редкометалльных руд, а также интрузии гранитов рапакиви, содержащих значительные количества некогерентных литофилов [Хайн, 2003].

Следует отметить, что переходный период характеризуется первым глобальным формированием месторождений металлических полезных ископаемых (табл. 1). Именно в последние примерно 2 млрд лет достигается наибольшее разнообразие металлогении на Земле, когда сформировались все ее оболочки и сочетание тектоники плит и тектоники плюмов обеспечило протекание современных эндогенных процессов и рудообразования.

Металлогения как индикатор эволюции геодинамических процессов

На начальном этапе геологической истории эндогенная активность Земли определялась, главным образом, астероидно-метеоритной бомбардировкой, которая в итоге практически уничтожила гадейскую кору. Ее остатки были погружены в неглубокую мантию и частично послужили материалом для более поздней архейской континентальной коры. При этом воздействием опускающихся блоков роль мантийной конвекции выполняли уже упоминавшиеся мантийные перевороты.

Таблица 1

Распределение главнейших месторождений металлов во времени и по разным древним структурам

Table 1

Distribution of the most important deposits of metals in time and in different ancient structures

| Время | Северная Америка (Канада) | Австралия | Африка | Южная Америка (Бразилия) | Европа | Азия | | |
|-------------|---|--|--|---|---|------------------------------|---|--|
| | | | | | | Китай | Индия | Сибирь |
| 4,0–3,3 | BIF | BIF | | BIF | | | BIF (IOG-Fe), Mn | |
| 3,3–2,9 | | Au, VMS, Porph-Mo, BIF | Au, Sb | Cu-Au, Cr, Ni, Au, | | | BIF (IOG-Fe), Ti-V-Fe, Au, Cu, Cr+PGE | |
| 2,9–2,6 | Au, VMS, Cu-Ni, Porph | VMS, Au, Cu-Ni, BIF | Au, Diamond, MVT | Cu, Au, Fe-Ti-V-Pt, Cu-Ni-PGE, Ni, Ag-Pb-Zn | BIF, Au, Ni-Cu | BIF, Cr, BIF, VMS | Au, Mn, BIF (IOG-Fe), Cu, Diamond, VMS, Porph-Cu-Mo | Fe, Au |
| 2,5–2,0 | Ag, U | BIF, Cu-Ni, Sn, Li, | PGE, Cr, V, Cu-Ni, Sn, Cu-Co, U | Ni, Au, Cr, U, Fe, Cu, Mn | Cr, V-Ti-Fe, PGE Ni-Cu, Ni-Zn-Co-Cu | | Sn, U, VMS, Mn | |
| 2,0–1,8 | VMS, Cu-Ni, | Cu, Ni, VMS | Au | Au, Cu, Porph-Cu-Mo-Au, Ni-PGE | Au, Cu-Ni, VMS, Sn-W, porph Cu, Ti | Fe-Ti-P, Mo | VMS, Cu, Fe-P | Au, Fe, Cu |
| 1,8–0,8 | VMS, Cu-Ni, SEDEX, U | Au, U, Fe, Ti, Cu, VMS, Diamond SEDEX | Fe, Ni, Cu-Ag, Pb-Zn Porph Cu | VMS, Sn, Au, U, Diamond | | BIF, SEDEX, VMS, MVT | VMS, Au, Cu, U, Cu-Zn, Mn, | V-Cu-Fe |
| 0,8–0,5 | SEDEX, MVT | Au | Au, VMS, Sn, U, W, Cu-Co, Cu-Pb-Zn (Ga-Ge), IOCG | Au, Cu, Cu-Ni SEDEX, W | | | Sn-W | Au, Sb |
| 0,5–Соврем. | VMS, Au, Porph, Cu-Ni, SEDEX, MVT, U, W | VMS, Porph Cu, Mo SEDEX, Au, Cu, Sn, W, | Fe, MVT | U, Fe, SEDEX Diamond, | Sn, Li, U, Sn-W, Au | Au-carlin Au, Cu-Mo porph, W | | Pb-Zn, Cu, Au, U, Cu-Ni-PGE, Ag-Hg, Porph-Cu diamond Sn, W, Li, Porph-Mo, Cu, Ag-Pb, Zn, Sb, Hg-Sb |
| Источники | Lydon, 2007 | Solomon, Groves, 2000; Huston, Blewett, Chamrion, 2012 | Frost-Killian et al., 2016 | Dardenne, Schobbenhaus, 2003 | Nurmi, Sorjonen-Ward, 1993; Luukonen, 1994; Eilu, 1999; Korkiakoski, 1992; Lahtinen, 2013 | Pirajno, 2013 | Deb, 2014; Turchenko, Vresky, Dage-laisky, 2009 | Тектоника..., 2001; Геодинамика..., 2006; Nokleberg et al., 2005 |

С уменьшением температуры мантии в архее началась эпоха общемантийной конвекции, которая посредством коматиитовых плюмов способствовала самоорганизации эндогенных процессов. Нередко происходили увеличение мощности приповерхностного слоя Земли и формирование сохранившейся континентальной коры ТТГ-типа. До тех пор, пока континентальная кора была относительно тонкой, мантийная конвекция не вызывала никаких вторичных эффектов. Ведущий процесс заключался в наращивании континентальной коры за счет поступающего глубинного материала, в том числе и остатков гадейской коры.

Существование утолщенной коры в сочетании с конвекцией могло инициировать процессы субдукции, которая, в свою очередь, приводила к циклическому развитию континентов. Естественно, древняя кора была неоднородной и, вероятнее всего, различной по площади распространения. Возможно, это вызвало первичную неоднородность в распределении золота, выразившегося в формировании в архее–палеопротерозое крупных месторождений металла на территории современных Африки, Австралии, Канадском и Бразильском щитах Америки и Индостане, при отсутствии их в Европе, Сибири и Китае [Горячев и др., 2005; Phillips, Powell, 2011]. Возможно, этот процесс происходил в конце архея, когда произошел переход от LID tectonics к тектонике малых плит и появились магматические породы известково-щелочного состава.

О причинах отсутствия месторождений полезных ископаемых в первый миллиард лет существования Земли можно только предполагать. Современные сводки по эпохам рудообразования в геологической истории [Хаин, 2000; Groves et al., 2005; Sawood, Hawkesworth, 2015] обходят этот вопрос молчанием. По-видимому, причина кроется именно в отсутствии на ранней внутриземной дифференциации, а спусковым механизмом металлогенической эволюции послужили процессы зарождения жидкого планетного ядра.

Анализ металлогении древних щитов разных континентов показал, что самыми ранними (от 4,0 до 1,0 млрд лет, при максимуме > 3 млрд лет) месторождениями полезных ископаемых являются железистые кварциты (или полноценные железные руды) [Хаин, 2000], реже марганцевые кварциты (см. табл. 1). Эта вполне закономерно, учитывая, что железо – наиболее характерный элемент древних мафитовых магм и его накопление контролировалось существовавшей атмосферой или гидросферой Земли. Кроме того, подобные железистые руды имеют первонаачально осадочный генезис и формируются, главным образом в морских бассейнах, а поверхность Земли в раннем архее как раз представляла собой океаническое пространство [Condie, 2011].

Как следствие тектоники малых плит, 3,3–3,0 млрд лет назад появились первые маломасштаб-

ные месторождения различных металлов, включая золото-кварцевое, Cu-Fe колчеданное, Cu-Ni, Cu-Mo-порфирированное оруденение (табл. 1). Наиболее крупные месторождения благородных металлов, меди, никеля в ассоциации с алмазонасными кимберлитами сформировались в интервале 3,0–2,6 млрд лет. В целом отметим, что ранний этап металлогенического развития характеризуется явно выраженными сидерофильностью и фемичностью, т.е. несет в себе все признаки мантийного влияния. Процессы формирования земного ядра в это время привели к концентрации металлов в сульфидной и самородной форме и, прежде всего, ЭПГ и Au [Маракушев и др., 1997]. Таким образом, определяются мантийные свойства золота, ряда сидерофилов и халькофилов [Горячев, 2014]. Подобные ассоциации более типичны для ранних металлогенических эпох, хотя и отмечаются и позднее (табл. 1).

Еще раз подчеркнем, что золото обособилось самым первым из металлов в виде, например, древнейших кварцево-жильных месторождений провинции Барбертон Каапваальского кратона и уникального месторождения Витватерсранд (Ранд). При этом на Каапваальском кратоне отчетливо проявлена пространственная ассоциация золота с более поздним оруденением медно-никелевого и хромитового состава с платиноидами, железом и алмазами (см. рис. 5). Аналогичная ситуация характерна для архейских комплексов Западной Австралии (табл. 1).

Архейское суперкрупное месторождение золота Витватерсранд в Южной Африке содержит около 70 тыс. т металла [Сафонов, 2003; Сафонов, Прокофьев, 2006; Phillips et al., 1988; Phillips, Powell, 2011]. Это месторождение представляет собой серию слоев – рифов конгломератоподобных кварцевых тел (около 20), в которых кварцевая «галька» цементируется кварцем и рассекается кварцевыми жилами. Эти тела в виде цепочки полей сконцентрированы в верхней части данной толщи и прослежены (7–10 тел) по простиранию около 300 км вдоль границы бассейна Витватерсранд, сложенного рудовмещающими осадочными отложениями одноименной формационной супергруппы (~2,9 млрд лет) общей мощностью около 7 км [Phillips, Powell, 2011]. Они залегают на гранитах и зеленых сланцах группы Доминион (~3,1 млрд лет) и перекрываются толщей вулканитов группы Вентерсдорф (~2,7 млрд лет) мощностью 1 км [Phillips, Powell, 2011]. Рудные тела имеют мощность от 0,1 до 5 м, реже более, и сопровождаются мощными протяженными ореолами окolorудных изменений (~300 × 50 км). В составе рифов преобладает кварц в ассоциации с пиритом, другими сульфидами, уранинитом, минералами ЭПГ, битумоидами и пр. [Сафонов, Прокофьев, 2006]. Частицы высокопробного (900‰) самородного Au достигают 5–100 мкм, реже крупнее, преимущественно в пирите.

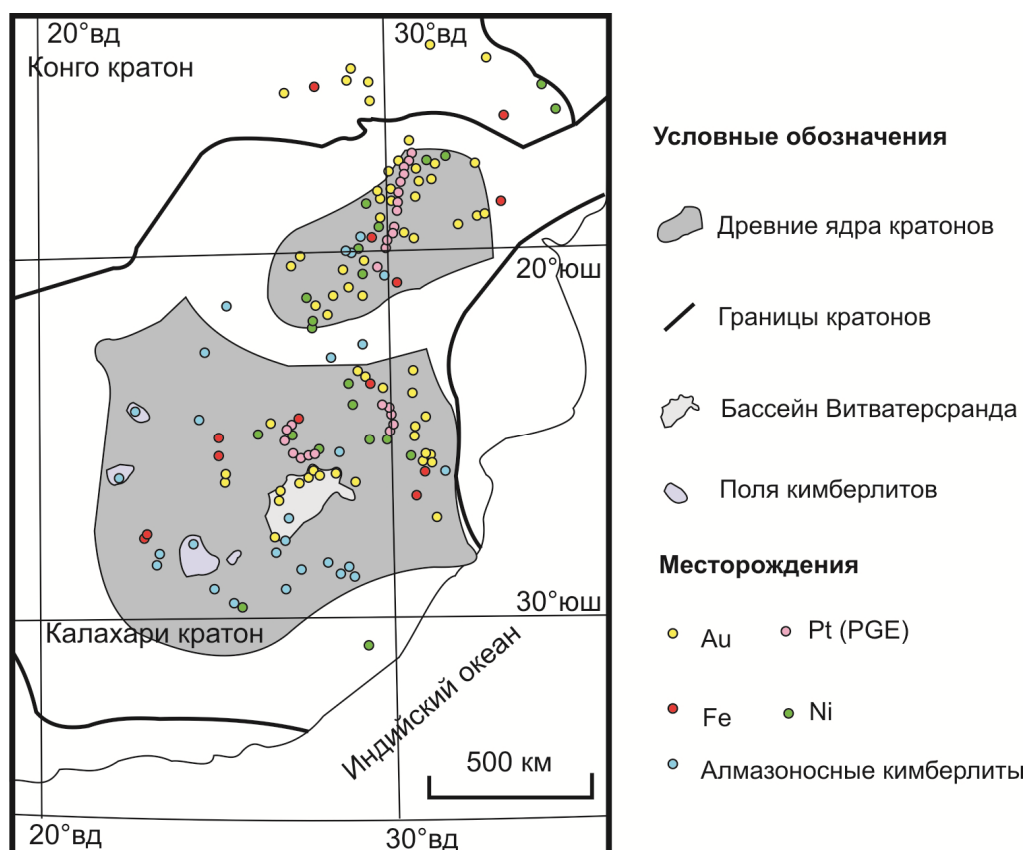


Рис. 5. Ассоциация месторождений Au, PGE-Cr, Cu-Ni, C в древних ядрах кратона Калахари: основа по [Frost-Killian et al., 2016] с упрощениями и изменениями авторов

Fig. 5. Association of Au, PGE-Cr, Cu-Ni, and C deposits in the ancient nuclei of the Kalahari Craton: the basis of [Frost-Killian et al., 2016] with the simplifications and changes of the authors

Обычно для происхождения Ранда рассматривается несколько точек зрения: от гигантской палеороссыпи до гидротермального метаморфизма или подводного рудообразования на бактериальных матах [Сафонов, Прокофьев, 2006]. Однако все исследователи обходят молчанием вопрос о причинах возникновения этой гигантской золотой аномалии Земли. Каковы были источники вещества и механизмы ее возникновения? Почему в рудах вместе с кварцем сконцентрированы пирит, золото, урановая минерализация, тяжелые платиноиды и углеродистобитумоидное вещество? Гидротермальная природа руд убедительно показана в работах Н. Филиппса [Phillips et al., 1988; Phillips, Powell, 2011 и др.] и Ю.Г. Сафонова [Сафонов, 1997; Сафонов, Прокофьев, 2006]. По нашему мнению, учитывая древний возраст этого самого крупного золотого месторождения в мире, его формирование свидетельствует уже о ранней дифференциации вещества Земли, произошло оно в заключительный этап кристаллизации внутреннего твердого ядра с плотностью большей, чем у внешнего жидкого ядра [Добрецов, 2011;

Литасов, Шацкий, 2016]. В работе [Gilat, Vol, 2012] высказана гипотеза, что при аккреции Земли водород и гелий были «захвачены и складированы» в ядре в виде твердых соединений или растворов. При высоких температурах и давлениях могут образоваться устойчивые соединения He-H, He-O, He-C и He-металлы. В процессе кристаллизации внутреннего ядра эти соединения будут, очевидно, концентрироваться в его жидкой оболочке. При распаде соединений гелия и водорода будет выделяться огромное количество энергии, что вызовет появление расплавных участков мантийного вещества на границе с ядром с высокими содержаниями благородных металлов, и в первую очередь золота. В настоящее время установлено [Garnero, McNamara, 2008], что в пограничном слое D'' отмечаются участки с низкими скоростями сейсмических волн, которые можно интерпретировать в качестве внутримантийных магматических камер [Кузьмин, Ярмолюк, Котов, в печати]. Эти мантийные камеры, вполне возможно, были родоначальниками наиболее горячих мантийных плюмов (Гадейского, Исландского), которые харак-

теризуются высокими значениями отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$. Похожие условия могли реализоваться и при образовании месторождения Витватерсранд. Возможно, такой прорыв глубинного вещества продолжался еще в течение почти 500 млн лет и способствовал появлению сопредельных крупных магматических залежей хромитового и медно-никелевого с платиноидами оруденения Бушвельда, урановой минерализации, а также алмазонасных кимберлитов (см. рис. 5). Если принять во внимание Великую дайку Зимбабве, расположенную севернее и окруженную золоторудными объектами (рис. 5), то наблюдаемый парагенезис золота с платиноидами и ультрамафитами явно не случаен. По-видимому, древняя кора здесь была более мощной и структурированной расколами, что привело к формированию рассеянного жильного золотого оруденения в отличие от Ранда. Похожее образования есть в Индии (Колар) и Западной Австралии (Калгурли), но интенсивность процесса рудообразования в этих районах была заметно ниже [Золоторудное..., 1988].

Ассоциация золота не только с элементами мантийных руд (Cu, Ni, ЭПГ), а с чистым кремнеземом / кварцем указывает на процессы локальной минеральной геохимической дифференциации вещества и косвенно подтверждает насыщенность верхних горизонтов ядра и мантии того времени летучими [Маракушев и др., 1997]. Количественно объем кремнезема оценить трудно, но очевидно, что его доля может оцениваться в десятки процентов в составе таких крупных жильных поясов, как Абитибби в Канаде, Калгурли в Австралии или Ранд в Южной Африке. Известная «любовь» золота к кремнезему, подмеченная еще В.И. Вернадским в начале прошлого века [Вернадский, 1959], обусловила накопление металла в подвижной высококремнеземистой

полимерной фазе во главе флюидно-магматической плюмовой системы [Горячев, 1992]. В такой форме допустим ее вероятный выход на дно существовавшего тогда водного бассейна (см. рис. 5). В этом отношении наши представления о происхождении Ранда совпадают с воззрениями Ю.Г. Сафонова [Сафонов, Прокофьев, 2006], который обосновал модель конседиментационного гидротермального образования рифов в результате распада коллоидно-дисперсных растворов, поступающих с глубинными рудоносными флюидами.

Рассматривая дальнейшую металлогеническую эволюцию Земли, отметим, что начиная с рубежа ~ 2,5 млрд л. н. спектр оруденения заметно усложняется и после 2,0 млрд лет (см. табл. 1) становится наиболее разнообразным с появлением не только месторождений золота, железа, меди и никеля, но также серебра, олова, лития, кобальта, вольфрама и редких металлов, ртути и сурьмы. Как видно, их происхождение определяется геодинамическими обстановками плюм-тектоники и плитной тектоники в фанерозое (табл. 2).

Именно с этого времени проявляется зависимость формирования рудных ассоциаций от континентальных циклов, так характерная для золота и других металлов [Solomon, Groves, 2000; Goldfarb, Groves, Gardoll, 2001; Groves et al., 2005]. Вместе с тем сохраняется характерная металлогения мантийной специализации (Cu-Ni-Au и ЭПГ), что в сочетании с коровым рудогенезом (Ag-Sb-Hg-As) типично для областей активизации региональных плюмов (Сибирского, Эмейшаньского) с базитовым магматизмом. Рудоформирующие системы месторождений олова, редких и редкоземельных металлов более характерны для плюмов с щелочно-гранитоидным типом магматизма.

Таблица 2
Геодинамические обстановки формирования месторождений разных металлов в последние 2 млрд лет, т.е. при современном стиле тектонических процессов

Table 2
Geodynamic conditions for the formation of deposits of different metals in the last 2 billion years, i.e. with a modern style of tectonic processes

| Обстановки | Главные | Второстепенные | Редкие |
|---|-----------------------------------|----------------|---------|
| Орогенные коллизионно-аккреционные складчатые пояса | Au, Sn, W, Co | Pb, Zn | Sb |
| Активных окраин континентов – аккреционные складчатые пояса | Au-Ag, Sn, Li, Cu, Co, Sb, Hg, Mo | Pb, Zn, Fe, U | Fe |
| Островных дуг | Cu, Au, Pb, Zn | Ag, Sb | Mo |
| Пассивных окраин континентов, миогеоклинальные складчатые пояса | Pb, Zn, Fe, U | Ag, Cu | W |
| Стабильных кратонов | Cu, Ni, PGE, Fe, Au, U | | |
| Рифтогенез континентальный | Li, U | Hg | Au |
| Дна океанов и СОХ | Fe, Mn | Cu, Pb, Zn | Au, PGE |
| Плюмовые ареалы | Cu-Ni-PGE, Au-Sb-Hg | Li, Sn-Nb-Ta | |

Заключение

Таким образом, приведенные данные по эволюции магматизма и металлогении Земли позволяют выделить несколько этапов с различной геодинамикой. На ранних этапах геологической истории существенную роль играл космический фактор (хаотичный и гадейский эоны), хотя в гадее уже формировалась ранняя протокора, полностью переработанная впоследствии, в частности, в раннем архее. В это время на Земле не существовало условий для формирования эндогенного оруденения. Мантийные процессы были направлены на формирование континентальной коры, состав которой определялся существенно натриевой ТТГ-серией пород сагдукционного типа. Континентальная кора формировалась из вещества мантии, которое доставлялось к поверхности Земли мантийными плюмами и модифицировалось процессами метаморфизма. В среднем архее с разделения земного ядра на внутреннюю твердую и внешнюю жидкую оболочку начался

процесс расслоения Земли. Увеличение мощности коры с участием мантийных плюмов привело к появлению малых плит и зон субдукции, циклическому развитию континентов и, соответственно, началу разделения верхней и нижней мантии. Благодаря этому произошла смена тектонических и геодинамических стилей от примитивной тектоники покрывки (LID tectonics) и тектоники мантийных переворотов к современному плюму- и плейттектонике, связанных с интенсивным ростом и сиализацией коры. Глобальность этого события подчеркивается сменой натриевой ТТГ-серии на продукты калиево-натриевого и калиевого известково-щелочного и щелочного магматизма, а также последовательностью мантийных и коровых процессов рудогенеза, обусловивших все современное разнообразие металлогении. Импульсом к их развитию во многом послужили суперплюмы – крупные потоки вещества из ядерной части Земли, которые в ходе консолидации и сиализации коры включили механизмы тектоники плит и тектоники современных плюмов.

ЛИТЕРАТУРА

- Батыгин К., Лафлин Г., Морбиделли А.** Рожденные из хаоса // В мире науки. 2016. № 7. С. 16–27.
- Вернадский В.И.** История минералов земной коры // Избранные сочинения. Т. IV, кн. 1. М.: Изд-во АН СССР, 1959. Т. 1. С. 301–624 (519–524).
- Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России:** в 2 кн. / под ред. А.И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 1. С. 1–572.
- Глуховский М.З., Моралев В.М., Кузьмин М.И.** Тектоника и петрогенезис катархейского комплекса Алданского щита в связи с проблемой протофиолитов // Геотектоника. 1977. № 6. С. 103–117.
- Горячев Н.А.** Жильный кварц золоторудных месторождений Яно-Кольмского пояса. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1992. 136 с.
- Горячев Н.А.** Благороднометалльный рудогенез и корово-мантийное взаимодействие // Геология и геофизика. 2014. № 2. С. 323–332.
- Горячев Н.А., Гамянин Г.Н., Шпикерман В.И., Бялбжеский С.Г.** Основные принципы металлогенического анализа складчатых поясов (на примере Северо-Востока России). Магадан: Кордис, 2005. 107 с.
- Добрецов Н.Л.** Основы тектоники и геодинамики: учеб. пособие. Новосибирск: НГУ, 2011. 492 с.
- Золоторудное поле Колар (Индия)** / отв. ред. Ф.В. Чухров. М.: Наука, 1988. 232 с.
- Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И.** Внутриплитовый вулканизм и его значение для понимания процессов в мантии Земли // Геотектоника. 1983. № 1. С. 28–45.
- Костицын Ю.А.** Возраст земного ядра по изотопным данным: согласование Hf–W и U–Pb систем // Геохимия. 2012. № 6. С. 531–554.
- Кузьмин М.И.** Докембрийская история зарождения и эволюции Солнечной системы и Земли. Статья I // Geodynamics & Tectonophysics. 2014. V. 5, № 3. P. 625–640.
- Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В.** Биография Земли: основные этапы геологической истории // Природа. 2017. № 6. С. 12–25.
- Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В.** Изменение стиля тектонических движений в процессе эволюции Земли // Доклады Академии наук. 2016а. Т. 469, № 6. С. 706–710.
- Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В.** Тектоника плит и мантийные плюмы – основа эндогенной тектонической активности Земли последние 2 млрд лет // Геология и геофизика. 2016б. Т. 57, № 1. С. 11–30.
- Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В., Котов А.Б.** Ранняя эволюция Земли, начало ее геологической истории, как и когда появились гранитоидные магмы // Литосфера. В печати
- Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В., Эрнст Р.Е.** Тектоническая активность Земли на ранних этапах (4,56–3,4(2,7?)) ее эволюции // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 5. С. 815–832.
- Лин Д.** Происхождение планет // В мире науки. 2008. № 8. С. 22–31.
- Литасов К.Д., Шацкий А.Ф.** Состав и строение ядра земли = Composition and constitution of the earth's core / Ин-т геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 299 с.
- Маракушев А.А., Русинов В.Л., Зотов И.А., Панеях Н.А., Перцев Н.Н.** Глобальные аспекты эндогенного рудообразования // Геология рудных месторождений. 1997. Т. 39, № 6. С. 483–501.
- Сафонов Ю.Г.** Гидротермальные золоторудные месторождения: распространенность – геолого-генетические типы – продуктивность рудообразующих систем // Геология рудных месторождений. 1997. Т. 39, № 1. С. 25–40.
- Сафонов Ю.Г.** Золоторудные и золотосодержащие месторождения мира – генезис и металлогенический потенциал // Геология рудных месторождений. 2003. Т. 45, № 4. С. 305–320.
- Сафонов Ю.Г., Прокофьев В.Ю.** Модель конседиментационного гидротермального образования золотоносных рифов бассейна Витватерсранд // Геология рудных месторождений. 2006. Т. 48, № 6. С. 475–511.

Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / ред. Л.М. Парфенов, М.И. Кузьмин. М. : Наука/Интерпериодика, 2001. 571 с.

Хаин В.Е. Основные этапы тектонического развития Земли и их отражение в минерагенезе // Геология рудных месторождений. 2000. Т. 42, № 5. С. 403–408.

Хаин В.Е. Основные проблемы современной геологии. М. : Научный мир, 2003. 348 с.

Bédard J.H. A catalytic delamination driven model for coupled genesis of Archaean crust and sub-continental lithospheric mantle // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2006. V. 79. P. 1188–1214.

Campbell I.A., Griffiths R.W. Did the formation of D' cause the Archean-Proterozoic transition? // *Earth and Planetary Science Letters*. 2014. V. 388. P. 1–8.

Cawood P.A., Hawkesworth Ch.J. Temporal relations between mineral deposits and global tectonic cycles // Jenkin G.R.T., Lusty P.A.J., McDonald I., Smith M.P., Boyce A.J., Wilkinson J.J. (eds.) *Ore Deposits in Evolving Earth*, Geological Society. London : Special Publications, 2015. P. 9–21.

Condie K.C. *Earth as an evolving Planetary System*. Elsevier, 2011. 578 p.

Dardenne M.A., Schobbenhaus C. Depósitos Minerais no Tempo Geológico e Épocas Metalogénicas, Capítulo VII // *Mineral Deposits of Brazil: Distribution in Time, Provinces and Metallogenic Epochs*, P. 365–448 *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil* L. A. Bizzi, C. Schobbenhaus, R.M. Vidotti e J.H. Gonçalves (eds.) CPRM, Brasília, 2003. Parte III – Recursos Minerais e Associações Metalogénicas.

Deb M. Precambrian geodynamics and metallogeny of the Indian shield // *Ore Geology Reviews*. 2014. № 57. P. 1–28.

Debaille V., O'Neill C., Brandon A.D., Haenecour P., Yin Q.-Z., Mattielli N., Treiman A.H. Stagnant-lid tectonics in early Earth revealed by ¹⁴²Nd variations in late Archean rocks // *Earth and Planetary Science Letters*. 2013. V. 373. P. 83–92.

Eilu P. FINGOLD – a public database on gold deposits in Finland. Geological Survey of Finland Report of Investigation, 1999. 224 p.

Ernst R.E. *Large Igneous provinces*. Cambridge University Press, 2014. 651 p.

Frost-Killian S., Master Sh., Viljoen R.P., Wilson M.G.C. The great Mineral Fields of Africa. Introduction // *Episodes*. 2016. V. 39, № 2. P. 85–103.

Garnero E.J., McNamara A.K. Structure and Dynamics of Earth's Lower Mantle // *Science*. 2008. V. 320. P. 626–628.

Gilat A., Vol A. Degassing of primordial hydrogen and helium as the major energy source for internal terrestrial processes. *Geoscience Frontiers*. 2012. P. 1–11. doi: 10.1016/j.gsf.2012.03.009.

Goldblatt C., Zahnle K.J., Sleep N.H., Nisbet E.G. The eons of chaos and hades // *Solid Earth*. 2010. V. 1. P. 1–3. (<http://dx.doi.org/10.5194/se-1-1-2010>).

Goldfarb R.J., Groves D.I., Gardoll S. Orogenic gold and geologic time: a synthesis // *Ore Geology Reviews*. 2001. № 18. P. 1–75.

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*. Geological Society / I. McDonald, A.J. Boyce, I.B. Butler, R.J. Herrington, D.A. Polya (eds). London, Special Publications. 248. 2005. P. 71–101.

Halla J., Whitehouse M.J., Ahmad T., Bagai Z. Archaean granitoids: an overview and significance from a tectonic perspective. 2017. URL: <http://sp.lyellcollection.org/bu> guest on February 3.

Hofmann A.W. Mantle geochemistry the message from oceanic volcanism // *Nature*. 1997. V. 385. P. 219–229.

Iizuka T., Horie K., Komiya T., Maruyama S., Hirata T., Hidaka H., Windley B.F. 4.2 Ga zircon xenocryst in an Acasta gneiss from northwestern Canada: Evidence for early continental crust // *Geology*. 2006. V. 34, № 4. P. 245–248.

Korkiakoski E.A. Geology and geochemistry of the komatiite-hosted Pahtavaara gold deposit in Sodankyla, northern Finland, with emphasis on hydrothermal alteration // *Geological Survey of Finland*. 1992. Bull. 360. 114 p.

Lahtinen R. Precambrian tectonic evolution and metallogeny of the Fennoscandian shield // *Gold of the Fennoscandian shield*, Proceeding of International Conference. 2013. Petrozavodsk, Russia. P. 120–121.

Luukonen A. Main geological features, metallogeny and hydrothermal alteration phenomena of certain gold and gold-tin-tungsten prospects in southern Finland // *Geological Survey of Finland*. 1994. Bull. 377. 177 p.

Lydon J.W. An Overview of the Economic and Geological Contexts of Canada's Major Mineral Deposit Types // *Mineral Deposits of Canada. A Synthesis of Major Deposit Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces and Exploration Methods*. Geological Association of Canada Mineral Deposits Division Special Publication. 2007. № 5. P. 3–48.

Maas R., Kinny P.D., Williams I.S., Froude D.O., Compston W. The Earth's oldest known crust—a geochronological and geochemical study of 3900–4200 Ma old detrital zircons from Mt. Narryer and Jack Hills, Western Australia // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1992. V. 56 (3). P. 1281–1300. [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037\(92\)90062-N](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037(92)90062-N).

Masset F., Snellgrove M. Reversing type II migration: resonance trapping of a lighter giant protoplanet // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2001. V. 320, № 4. L55–L59.

Myers J.S. Early Archean Narryer gneiss complex, Yilgarn Craton, Western-Australia // *Precambrian Research*. 1988. V. 38 (4). P. 297–307. [http://dx.doi.org/10.1016/0301-9268\(88\)90029-0](http://dx.doi.org/10.1016/0301-9268(88)90029-0).

Nebel O., Rapp R.P., Yaxley G.M. The role of detrital zircons in Hadean crustal research // *Lithos*. 2014. V. 190–191. P. 313–327.

Nokleberg W.J., Bundtzen T.K., Eremin R.A., Ratkin V.V., Dawson K.M., Shpikerman V.I., Goryachev N.A., Byalobzhesky S.G., Frolov Y.F., Khanchuk A.I., Koch R.D., Monger J.W.H., Pozdeev A.I., Rozenblum I.S., Rodionov S.M., Parfenov L.M., Scotese C.R., Sidorov A.A. Metallogenesis and tectonics of the Russian Far East, Alaska, and the Canadian Cordillera: U.S. Geological Survey Professional Paper 1697. 2005. 429 p.

Nurmi P.A., Sorjonen-Ward P. (eds.) Geological development, Gold Mineralization and Exploration Methods in the Late Archean Hattu Schist Belt, Ilomantsi, Eastern Finland // *Geological Survey of Finland*. 1993. Special Paper 17. 386 p.

O'Neil J., Carlsons R.W., Paquette J.L., Francisc D. Formation age and metamorphic history of the Nuvvuagittuq Greenstone Belt // *Precambrian Research*. 2012. V. 220–221. P. 23–44.

Pease V., Percival J., Smitbies J., Stevens G., Kranendank M. When did plate tectonics begin? Evidence from the orogenic record // *The Geol. Soc. America. Special Paper*. 2008. V. 440. P. 199–228.

Phillips G.N., Powell R. Origin of Witwatersrand gold: a metamorphic devolatilisation – hydrothermal replacement model // *Applied Earth Science (Trans. Inst. Min. Metall. B)*. 2011. V. 120, № 3. P. 112–129.

Phillips G.N., Myers R.E., Law J.D.M., Bailey A.C., Cadle A.B., Beneke S.D., Giusti L. The Witwatersrand Gold Fields: Part I. Postdepositional History, Synsedimentary Processes, and Gold Distribution // *The Geology of Gold Deposits: The Perspective in 1988*. Economic Geology Monograph 6. 1989. P. 585–597.

Pirajno F. *The Geology and Tectonic Settings of China's Mineral Deposits*. London ; New York : Springer Dordrecht Heidelberg, 2013. 679 p.

Reimink J.R., Chacko T., Stern R.A., Heaman L.M. Earth's earliest evolved crust generated in an Iceland-like setting // *Nature Geoscience*. 2014. V. 7. P. 529–533.

Roth A.S.G., Bourdon B., Mojzsis S.J., Touboul M., Sprung P., Guitreau M., Blichert-Toft J. Inherited ¹⁴²Nd anomalies in Eoarchean protoliths // *Earth and Planetary Science Letters*. 2013. V. 361. P. 50–57.

Solomon M., Groves D.I. *The Geology and Origin of Australia's Mineral Deposits*. 2000. 1002 p.

Stern R.J. Modern-style plate tectonics began in Neoproterozoic time: An alternative interpretation of Earth's tectonic history // *The Geological Society of America Special Paper*. 2008. V. 440. P. 265–280.

Taylor D.J., McKeegan K.D., Harrison T.M. Lu–Hf zircon evidence for rapid lunar differentiation // *Earth and Planetary Science Letters*. 2009. V. 279 (3–4). P. 157–164. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2008.12.030>.

Turchenko S.I., Vrevsky A.B., Dagelaisky V.B. The Precambrian Metallogeny of India // *Geology of Ore Deposits*. 2009. V. 51, № 4. P. 317–329.

Wood B. The formation and differentiation of Earth // *Physics Today*. 2011. V. 64, № 12. P. 40–45. <http://dx.doi.org/10.1063/PT.3.1362>.

Wood B.J., Halliday A.N. The lead isotopic age of the Earth can be explained by core formation alone // *Nature*. 2010. V. 465, № 7299. P. 767–771. <http://dx.doi.org/10.1038/nature09072>.

Авторы:

Кузьмин Михаил Иванович, академик РАН, Институт геохимии СО РАН, Иркутск, Россия. E-mail: mikuzmin@igc.irk.ru

Горячев Николай Анатольевич, член-корреспондент РАН, Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН, Магадан, Россия.

Geosphere Research, 2017, 4, 36–50. DOI: 10.17223/25421379/5/3

M.I. Kuzmin¹, N.A. Goryachev^{1,2}

¹ A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia

² N.A. Shilo North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute FEB RAS, Magadan, Russia

EVOLUTION OF THE EARTH AND THE PROCESSES RESPONSIBLE FOR ITS GEODYNAMICS, MAGMATISM AND METALLOGENY

The paper reports the changes in style of endogenous activity of the Earth from the initial stages of its formation through transitional period to the recent one. The authors made an attempt to uncover a regular change of cosmogeneous factor responsible for emplacement of the Earth in the Chaotic and Hadean zones, its history to the internal endogenous activity of the Earth, which results in formation of the internal and external cores, layer D on the core-mantle boundary, upper and lower mantle, as well as continental and oceanic crust. They interact through formation of the Earth internal shells. Besides, the nature of tectonic processes changes from plate tectonics (LID tectonics) accompanied by mantle turnover through tectonics of ultrabasic plumes and subduction to plate tectonics coupled with plume tectonics. The process of changing style of tectonic processes is followed by the replacement of sodium magmatism represented by sodium tonalite-trondjemite-granodiorite (TTG) association of rocks by calc-alkaline volcanic and granitoid complexes, alkaline and carbonatite magmatic formations. The change of igneous rocks causes change of metallogeny of primarily Precambrian iron-manganese quartzites accompanied by siderophyle mineralization to more diverse types of metallogeny of essentially lithophyle composition. It is noteworthy, that the basic mass of ore deposits formed for the past two Ga, and it was triggered by the mechanism of plate and plume tectonics. A supposition was put forward as to the plume origin of Witwatersrand deposit – the largest gold deposit on the Earth.

Keywords: Early Earth, Hadean, geochronology of zircon, metallogeny, plume tectonics, plate tectonics.

References

Batygin K., Laflin G., Morbidelli A. *Rozhdennye iz khaosa* [Born out of chaos] // *V mire nauki / Scientific American*. 2016. № 7. pp. 16–27. In Russian

Vernadskiy V.I. *Istoriya mineralov zemnoy kory* [History of the minerals of the earth's crust] T.1 // *Izbrannye sochineniya*. T. IV, 1. Moscow : Izd-vo AN SSSR, 1959. pp. 301–624 (519–524). In Russian

Geodinamika, magmatizm i metallogeniya Vostoka Rossii [Geodynamics, magmatism and metallogeny of the Russian East]: in 2 books / ed. by A.I. Khanchuk. Vladivostok: Dalnauka, 2006. Book 1. pp. 1–572. In Russian

Glukhovskii M.Z., Moralev V.M., Kuz'min M.I. *Tektonika i petrogenesis katarkeynskogo kompleksa Aldanskogo shchita v svyazi s problemoy protofilitov* [Tectonics and petrogenesis of the Katarchean complex of the Aldan Shield in connection with the problem of protophyllites] // *Geotectonics*. 1977. № 6. pp. 103–117. In Russian

Goryachev N.A. *Zhil'nyy kvarts zolotorudnykh mestorozhdeniy Yano-Kolym'skogo poyasa* [Quartz vein gold deposits in the Yana-Kolyma belt.]. Magadan: SVKNII DVO RAN, 1992. 136 p. In Russian

Goryachev N.A. Noble-metal ore genesis and mantle–crust interaction // *Russian Geology and Geophysics*. 2014. № 2. pp. 252–258.

- Goryachev N.A., Gamyaniy G.N., Shpikerman V.I., Byalobzheskiy S.G. *Osnovnyye printsipy metallogenicheskogo analiza skladchatykh poyasov (na primere Severo-Vostoka Rossii)* [Basic principles of metallogenetic analysis of folded belts (on the example of the North-East of Russia)]. Magadan: Kordis, 2005. 107 p. In Russian
- Dobretsov N.L. *Osnovy tektoniki i geodinamiki: uchebnoe posobie* [Fundamentals of tectonics and geodynamics: a textbook. Novosibirsk]. Novosibirsk : NGU, 2011. 492 p. In Russian
- Zolotorudnoe pole Kolar (Indiya) [Kolar gold field (India)] otv. Red. F.V.Chukhrov. Moscow : Nauka, 1988. 232 p. In Russian
- Zonenshayn L.P., Kuzmin M.I. *Vnutriplitovyy vulkanizm i ego znachenie dlya ponimaniya protsessov v mantii Zemli* [In-plate volcanism and its importance for understanding the processes in the Earth's mantle] // Geotectonics. 1983. № 1. pp. 28–45. In Russian
- Kontar E.S. *Mestorozhdeniya medi v geologicheskoy istorii Zemli* [Copper deposits in the geological history of the Earth] // Regional Geology and Metallogeny. 2015. № 61. pp. 77–91. In Russian
- Kostitsyn Yu.A. Isotopic constraints on the age of the Earth's core: mutual consistency of the HF-W and U-PB systems // *Geochemistry International*. 2012. № 6. pp. 481–501.
- Kuzmin M.I. The Precambrian history of the origin and evolution of the Solar system and Earth. Part 1 I // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2014. V. 5. № 3. pp. 625–640. In Russian
- Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V. Changes in the manner of tectonic movements under the Earth's evolution // *Doklady Earth Sciences*. 2016a. T. 469. № 6. pp. 802–806.
- Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V. Plate tectonics and mantle plumes as a basis of deep-seated Earth's tectonic activity for the last 2 Ga // *Russian Geology and Geophysics*. 2016b. T. 57, №1. pp. 8-21
- Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V. *Biografiya Zemli: osnovnye etapy geologicheskoy istorii* [Biography of the Earth: the main stages of geological history] // *Priroda*. 2017. № 6. pp. 12–25. In Russian
- Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V., Kotov A.B. *Rannyya evolyutsiya Zemli, nachalo ee geologicheskoy istorii, kak i kogda poyavilis' granitoidnye magmy* [The early evolution of the Earth, the beginning of its geological history, as well as when the granitoid magmas appeared] // *Lithosphere. In print*. In Russian
- Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V., Ernst R.E. Tectonic activity of the early Earth (4.56–3.4(2.7?) Ga) // *Russian Geology and Geophysics*. 2016. T. 57, № 5. pp.815-832.
- Lin D. *Proiskhozhdenie planet* [Origin of the planets] // *V mire nauki / Scientific American*. 2008. №8. pp. 22–31. In Russian
- Litasov K.D., Shatskiy A.F. *Sostav i stroenie yadra zemli* [Composition and constitution of the earth's core / In-t geologii i mineralogii im. V.S. Soboleva SO RAN. Novosibirsk : Izdatel'stvo Sibirskogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk, 2016. 299 p. In Russian
- Marakushev A.A., Rusinov V.L., Zotov I.A., Paneyakh N.A., Pertsev N.N. Global aspects of endogenous ore formation // *Geology of Ore Deposits*. 1997. T. 39, № 6. pp. 417–433.
- Safonov Yu.G. Hydrothermal gold deposits: distribution, geological-genetic types, and productivity of ore-forming systems // *Geology of Ore Deposits*. 1997. T. 39, № 1. pp. 20–32.
- Safonov Yu.G. Gold and gold-bearing deposits of the world: genesis and metallogenetic potential // *Geology of Ore Deposits*. 2003. T. 45, № 4. pp. 265–278.
- Tektonika, geodinamika i metallogeniya territorii Respubliki Sakha (Yakutiya)* [Tectonics, geodynamics and metallogeny of the Republic of Sakha (Yakutia)] / Red. L.M. Parfenov, M.I. Kuz'min. Moscow : Nauka/Interperiodika, 2001, 571 p. In Russian
- Safonov Yu.G., Prokofev V.Yu. Gold-bearing reefs of the Witwatersrand basin: a model of synsedimentation hydrothermal formation // *Geology of Ore Deposits*. 2006. T. 48, № 6. pp. 415–447.
- Khain V.E. Main stages of the tectonic development of the Earth and their reflection in minerogenesis // *Geology of Ore Deposits*. 2000. T. 42, № 5. pp. 363–368.
- Khain V.E. *Osnovnye problemy sovremennoy geologii* [The main problems of modern geology]. Moscow : Nauchnyy mir, 2003. 348 p. In Russian
- Bédard J.H. A catalytic delamination driven model for coupled genesis of Archaean crust and sub-continental lithospheric mantle // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2006. V. 79. pp. 1188–1214.
- Campbell I.A., Griffiths R.W. Did the formation of D" cause the Archean-Proterozoic transition? // *Earth and Planetary Science Letters*. 2014. V. 388. pp. 1–8.
- Cawood P.A., Hawkesworth Ch.J., Temporal relations between mineral deposits and global tectonic cycles // Jenkin G.R.T., Lusty P.A.J., McDonald I., Smith M.P., Boyce A.J., Wilkinson J.J. (eds) *Ore Deposits in Evolving Earth*, Geological Society, 2015. London, Special Publications. 393. pp. 9–21.
- Condie K.C. *Earth as an evolving Planetary System*. Elsevier, 2011. 578 p.
- Dardenne M.A., Schobbenhaus C. Depósitos Minerais no Tempo Geológico e Épocas Metalogenéticas, Capítulo VII // *Mineral Deposits of Brazil: Distribution in Time, Provinces and Metallogenetic Epochs*, pp. 365–448 *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil* L. A. Bizzi, C. Schobbenhaus, R. M. Vidotti e J. H. Gonçalves (eds.) CPRM, Brasília, 2003. Parte III – Recursos Minerais e Associações Metalogenéticas
- Deb M. Precambrian geodynamics and metallogeny of the Indian shield // *Ore Geology Reviews*. 2014. 57. pp. 1–28.
- Debaille V., O'Neill C., Brandon A.D., Haenecour P., Yin Q.-Z., Mattielli N., Treiman A.H. Stagnant-lid tectonics in early Earth revealed by ¹⁴²Nd variations in late Archean rocks // *Earth and Planetary Science Letters*. 2013. V. 373. pp. 83–92.
- Eilu P. FINGOLD – a public database on gold deposits in Finland. Geological Survey of Finland Report of Investigation, 2009. 146. 224 p.
- Ernst R.E. *Large Igneous provinces*. Cambridge University Press, 2014, 651 p.
- Frost-Killian S., Master Sh., Viljoen R.P., Wilson M.G.C. The great Mineral Fields of Africa. Introduction // *Episodes*. 2016. V. 39, № 2. pp. 85–103.
- Garnero E.J., McNamara A.K. Structure and Dynamics of Earth's Lower Mantle // *Science*. 2008. V. 320. pp. 626–628.
- Gilat A., Vol A. Degassing of primordial hydrogen and helium as the major energy source for internal terrestrial processes. *Geoscience Frontiers*. 2012. pp. 1–11. doi: 10.1016/j.gsf.2012.03.009.
- Goldblatt C., Zahnle K.J., Sleep N.H., Nisbet E.G. The eons of chaos and hades // *Solid Earth*. 2010. V. 1. pp. 1–3. <http://dx.doi.org/10.5194/se-1-1-2010>.

- Goldfarb R.J., Groves D.I., Gardoll S. Orogenic gold and geologic time: a synthesis. *Ore Geology Reviews*. 2001. 18. pp. 1–75.
- 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*. Geological Society / I. McDonald, A.J. Boyce, I.B. Butler, R.J. Herrington, D.A. Polya (eds). London, Special Publications, 248. 2005. pp. 71–101.
- Halla J., Whitehouse M.J., Ahmad T., Bagai Z. Archaean granitoids: an overview and significance from a tectonic perspective // <http://sp.lyellcollection.org/bu/guest> on February 3. 2017.
- Hofmann A.W. Mantle geochemistry the message from oceanic volcanism // *Nature*. 1997. V. 385. pp. 219–229.
- Iizuka T., Horie K., Komiya T., Maruyama S., Hirata T., Hidaka H., Windley B.F. 4.2 Ga zircon xenocryst in an Acasta gneiss from northwestern Canada: Evidence for early continental crust // *Geology*. 2006. V. 34, № 4. pp. 245–248.
- Korkiakoski E.A. Geology and geochemistry of the komatiite-hosted Pahtavaara gold deposit in Sodankyla, northern Finland, with emphasis on hydrothermal alteration/ Geological Survey of Finland, 1992. Bull. 360, 114 p.
- Lahtinen R. Precambrian tectonic evolution and metallogeny of the Fennoscandian shield // *Gold of the Fennoscandian shield*, Proceeding of International Conference. 2013. Petrozavodsk, Russia, pp. 120–121.
- Luukonen, A. Main geological features, metallogeny and hydrothermal alteration phenomena of certain gold and gold-tin-tungsten prospects in southern Finland. Geological Survey of Finland. 1994. Bull. 377. 177 p.
- Lydon J.W. An Overview of the Economic and Geological Contexts of Canada's Major Mineral Deposit Types / *Mineral Deposits of Canada. A Synthesis of Major Deposit Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces and Exploration Methods*. Geological Association of Canada Mineral Deposits Division Special Publication. 2007. № 5. pp. 3–48.
- Maas R., Kinny P.D., Williams I.S., Froude D.O., Compston W. The Earth's oldest known crust—a geochronological and geochemical study of 3900–4200 Ma old detrital zircons from Mt. Narryer and Jack Hills, Western Australia // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1992. V. 56 (3). pp. 1281–1300. [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037\(92\)90062-N](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037(92)90062-N).
- Masset F., Snellgrove M. Reversing type II migration: resonance trapping of a lighter giant protoplanet // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2001. V.320. № 4. L55–L59.
- Myers J.S. Early Archean Narryer gneiss complex, Yilgarn Craton, Western-Australia // *Precambrian Research*, 1988, V. 38 (4), pp. 297–307. [http://dx.doi.org/10.1016/0301-9268\(88\)90029-0](http://dx.doi.org/10.1016/0301-9268(88)90029-0).
- Nebel O., Rapp R.P., Yaxley G.M. The role of detrital zircons in Hadean crustal research // *Lithos*. 2014. V. 190–191. pp. 313–327.
- Nokleberg W.J., Bundtzen T.K., Eremin R.A., Ratkin V.V., Dawson K.M., Shpikerman V.I., Goryachev N.A., Byalobzhesky S.G., Frolov Y.F., Khanchuk A.I., Koch R.D., Monger J.W.H., Pozdeev A.I., Rozenblum I.S., Rodionov S.M., Parfenov L.M., Scotese C.R., Sidorov A.A. Metallogenesis and tectonics of the Russian Far East, Alaska, and the Canadian Cordillera: U.S. Geological Survey Professional Paper 1697. 2005. 429 p.
- Nurmi P.A. and Sorjonen-Ward P. (Eds.) Geological development, Gold Mineralization and Exploration Methods in the Late Archean Hattu Schist Belt, Ilomantsi, Eastern Finland // Geological Survey of Finland, 1993. Special Paper 17. 386 p.
- O'Neil J., Carlsons R.W., Paquette J.L., Francisc D. Formation age and metamorphic history of the Nuvvuagittuq Greenstone Belt // *Precambrian Research*. 2012. V. 220–221. pp. 23–44.
- Pease V., Percival J., Smithies J., Stevens G., Kranendank M. When did plate tectonics begin? Evidence from the orogenic record // *The Geol. Soc. America. Special Paper*. 2008. V. 440. pp. 199–228.
- Phillips G.N., and Powell R. Origin of Witwatersrand gold: a metamorphic devolatilisation – hydrothermal replacement model // *Applied Earth Science (Trans. Inst. Min. Metall. B)*. 2011. V. 120. № 3. pp. 112–129.
- Phillips G.N., Myers R.E., Law J.D.M., Bailey A.C., Cadle A.B., Beneke S.D., Giusti L. The Witwatersrand Gold Fields: Part I. Postdepositional History, Syndimentary Processes, and Gold Distribution // *The Geology of Gold Deposits: The Perspective in 1988*. Economic Geology Monograph 6. 1989. pp. 585–597.
- Pirajno F. *The Geology and Tectonic Settings of China's Mineral Deposits*, Springer Dordrecht Heidelberg London New York. 2013. 679 p.
- Reimink J.R., Chacko T., Stern R.A., Heaman L.M. Earth's earliest evolved crust generated in an Iceland-like setting // *Nature Geoscience*. 2014. V. 7. pp. 529–533.
- Roth A.S.G., Bourdon B., Mojzsis S.J., Touboul M., Sprung P., Guitreau M., Blichert-Toft J. Inherited ¹⁴²Nd anomalies in Eoarchean protoliths // *Earth and Planetary Science Letters*. 2013. V. 361. pp. 50–57.
- Solomon M., Groves D.I. *The Geology and Origin of Australia's Mineral Deposits*. 2000. 1002 p.
- Stern R.J. Modern-style plate tectonics began in Neoproterozoic time: An alternative interpretation of Earth's tectonic history // *The Geological Society of America Special Paper*. 2008. V. 440. pp. 265–280.
- Taylor D.J., McKeegan K.D., Harrison T.M. Lu–Hf zircon evidence for rapid lunar differentiation // *Earth and Planetary Science Letters*. 2009. V. 279 (3–4). P. 157–164. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2008.12.030>.
- Turchenko S.I., Vrevsky A.B., Dagelaisky V.B. The Precambrian Metallogeny of India // *Geology of Ore Deposits*. 2009. V. 51, № 4. pp. 317–329.
- Wood B. The formation and differentiation of Earth // *Physics Today*. 2011. V. 64, № 12. pp. 40–45. <http://dx.doi.org/10.1063/PT.3.1362>.
- Wood B.J., Halliday A.N. The lead isotopic age of the Earth can be explained by core formation alone // *Nature*. 2010. V. 465, № 7299, pp. 767–771. <http://dx.doi.org/10.1038/nature09072>.

Author's:

Kuzmin Mikhail Iv., Academician of RAS, A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia. E-mail: mikuzmin@igc.irk.ru

Goryachev Nikolai An., Corresponding Member of RAS, N.A. Shilo North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute FEB RAS, Magadan, Russia.