

ПЛЮМЫ В ИСТОРИИ ЗЕМЛИ И ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПЛЮМОВОГО МАГМАТИЗМА

УДК 551.71:551.2

ТЕКТОНИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ЗЕМЛИ
НА РАННИХ ЭТАПАХ (4.56—3.4 (2.7?)) ЕЕ ЭВОЛЮЦИИ

М.И. Кузьмин¹, В.В. Ярмолюк², Р.Е. Эрнст^{3,4}

¹ Институт геохимии СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1А, Россия

² Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, 119017, Москва, Старомонетный пер., 35, Россия

³ Department of Earth Sciences, Carleton University, Ottawa, Ontario, K1S 5B6, Canada

⁴ Томский государственный университет, 634050, Томск, 36, Россия

Рассмотрена возможная модель древней (архей-гаденской) истории геодинамической эволюции Земли. Наиболее вероятно, по нашему мнению, наличие спокойной (стагнированной) поверхности Земли, существование общемантийной конвекции, охватывающей всю мантию от границы ядро—мантия до затвердевающей верхней покрывки. Спокойный режим поверхности Земли нарушался астероидно-метеоритными бомбардировками, разрушавшими поверхность Земли, на которой формировалась континентальная, частично гранитоидная кора. Разрушенная кора вместе с обогащенными остаточными мантийными резервуарами погружалась в глубь мантии. Кроме разрушения коры бомбардировки вызывали появление большого количества базальт-коматиитовых магм, что можно рассматривать в качестве мантийного переворота.

В Гаденский эон астероидно-метеоритные атаки носили массированный характер, что определяло полное разрушение первичной коры. В раннем архее продолжают близкие к гаденскому типу тектонических процессов, но бомбардировки менее масштабные, они охватывали ограниченные пространства, как представляется, единого субэкваториального суперконтинента. Эти бомбардировки вызывали сагдукцию архейской базальт-коматиитовой коры, которая погружалась в мантию, превращаясь в амфиболиты с гранатом и эклогиты, дающие начало тоналит-гранодиоритовым ассоциациям архейской континентальной коры. Излияния архейских мантийных магм и эволюция их расплавов отражена в трендах эволюции составов цирконов. Возраста таких трендов 4.5; 4.2—4.3; 3.8—3.9 и 3.3—3.4 млрд лет. Они, возможно, отмечают астероидные атаки в гаден-архейское время.

Субконтинентальная литосферная мантия (SCLM) начинает формироваться под кратонами примерно 3.3—3.5 млрд лет, и она существенно отличается от перидотитов офиолитовых комплексов. Появление перидотитов, отвечающих составу офиолитовых комплексов, может указывать на появление процессов, обусловленных тектоникой плит. Эта проблема частично рассматривается в статье, а также предлагаются возможные исследования, которые должны установить более точно это время. Переходный период между характером тектонических процессов древней (гаден-архейской) и современной тектоники Земли охватывает интервал (3.4) 2.7—2.0 млрд лет.

Мантийные перевороты, метеоритно-астероидные бомбардировки, мантийная конвекция, сагдукция.

TECTONIC ACTIVITY OF THE EARLY EARTH (4.56–3.4(2.7?) GA)

M.I. Kuzmin, V.V. Yarmolyuk, and R. E. Ernst

The paper discusses a possible model of the ancient (Hadean–Archean) Earth's geodynamic evolution. We believe that the early Earth was characterized by a stagnant lid regime and whole-mantle convection suggesting cells that convect through the whole mantle (from the core–mantle boundary to the lithosphere base). The lid tectonics was perturbed by asteroid–meteorite bombardments that destroyed the primary terrestrial partly granitoid crust. The destroyed crust together with the residual enriched mantle reservoirs sank into the lower mantle. In addition to the crust destruction, the bombardments led to emplacement of a huge proportion of basalt–komatiitic melts, which can be interpreted as mantle overturn events. In the Hadean, the Earth survived frequent large-scale asteroid–meteorite bombardments, which resulted in almost a complete destruction of the primary terrestrial crust. In the Early Archean, the Earth still experienced the same tectonic processes, as in the Hadean; however, meteorite impact was small-scale and the bombardments influenced only a limited area of

a common, as it seems to us, subequatorial supercontinent. Those bombardments led to the sagduction of the Archean basalt–komatiitic terrestrial crust, which sank into the mantle, transforming into amphibolite–eclogite rocks giving rise to a tonalite–trondhjemite–granodiorite suite. As preserved in the zircon record, the formation of the Archean mantle-derived magmas occurred as pulses at 4.5, 4.2–4.3, 3.8–3.9, and 3.3–3.4 Ga. These peaks, most likely, correspond to the Hadean–Archean meteorite bombardments. There is evidence of formation of the subcontinental lithospheric mantle (SCLM) beneath the cratons between 3.3 and 3.5 Ga. This SCLM was markedly different from peridotites of modern ophiolites. However, the existence of ophiolitic peridotites indicates that modern style plate tectonic processes were in operation at that time, as we will discuss below. The transition from the early Earth (Hadean–Archean) tectonic style to the recent tectonics occurred between 3.4 (2.7?) and 2.0 Ga.

Mantle overturns, meteorite–asteroid bombardments, mantle convection, sagduction

ВВЕДЕНИЕ

Чтобы понять геологические процессы, которые определяли и определяют строение и развитие Земли, необходимо знать ее историю и особенно ее ключевые моменты, начиная с момента зарождения. Это понимали крупнейшие геологи разных поколений. Например, выдающийся геолог XX столетия Лев Павлович Зоненшайн писал в 1991 г. одному из авторов этой статьи, перечисляя главные проблемы геологических наук, что одной из главных задач является «историческая геохимия и историческая геодинамика, начиная с аккреции Земли до сего дня» [Кузьмин, 2014a]. Виктор Ефимович Хаин, прекрасный знаток геологии нашей планеты, в своей статье, обращаясь к молодым поколениям геологов [Хаин, 2010] по поводу основных принципов глобальной модели динамики Земли, писал: «Глобальная модель динамики Земли должна иметь два аспекта: актуалистический и исторический... Исторический аспект должен включать ... анализ истории Земли со времен ее образования». Но чтобы познать начальные этапы нашей Земли, необходимо развитие смежных областей научных знаний, в первую очередь физики, химии, космологии, аналитики, анализа редких элементов и изотопов. В 2009 г. уже было известно, что наша Земля образовалась 4.568 млрд лет назад, но как писал В.Е. Хаин [2009], история планеты за первые 500—550 млн лет пока не расшифрована, так как до сих пор не обнаружены на Земле породы, древнее 4 млрд лет. Правда, он отмечал, что обломочные цирконы с возрастом, более древним чем 4.378 млн лет, могут стать показателями геологических условий на нашей планете в то далекое время. Именно такой возраст был установлен для цирконов, обнаруженных в докембрийских осадках Австралии в начале 1980-х годов. Однако в те годы многие геологи и даже геохимики считали, что это, конечно, интересно, но по этим цирконам вряд ли можно получить дополнительную информацию о ранних этапах существования нашей планеты.

С развитием аналитических методов исследования вещества стало возможным многое. В дальнейшем, на основе изучения этих цирконов удалось расшифровать условия, существовавшие на поверхности и в недрах нашей планеты в самом начале ее формирования. Были получены убедительные данные о том, что уже в интервале 4.0—4.4 млрд лет назад образовалась первая континентальная кора, полностью переработанная более поздними процессами, в том числе частыми бомбардировками Земли астероидами и кометами. Стало возможным оценить характер процессов, определявших изменения состава и строения важнейших оболочек Земли (ядра, различных слоев мантии и литосферы) и тренд их последующей эволюции.

Настоящая работа посвящена анализу начала геологической истории нашей планеты и выявлению тех внутренних механизмов, которые действовали в ее недрах с самого начала ее образования и определили ее последующее развитие вплоть до появления геодинамических механизмов, регулирующих ее современное состояние.

РАННИЕ ЭОНЫ В ИСТОРИИ ЗЕМЛИ: ФАКТЫ И ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Исследования последних десятилетий существенно обогатили геологическую науку знаниями о начальных стадиях становления Земли и позволили выделить в начале ее истории следующие зоны: Хаотический и Гаденский, которые предшествовали архейской эре. В обоснование выделения этих эонов легли не прямые геологические наблюдения, а данные астрономии, сравнительной планетологии, геохронологии и цирконометрии, изотопной геологии.

Хаотичный эон (4568—4500 млн лет назад), выделенный [Golabatt et al., 2010], охватывает время от начала формирования Солнечной системы (4568 млн лет) до начала образования важнейших оболочек Земли — ее ядра, мантии и первичной континентальной коры. Основные события Хаотического эона детально описаны в работах [Wood et al., 2006; Wood, Halliday, 2010; Wood, 2011; Laretta, 2011], а

также в статье [Кузьмин, 2014а], поэтому здесь остановимся только на общей характеристике событий того времени.

В Хаотичный эон началось формирование Солнца и планет Солнечной системы из протосолнечной туманности под влиянием гравитационного сжатия. В самом начале эволюции Солнечной системы, в первые 1.0—1.5 млн лет, большая часть летучих компонентов была удалена на ее периферию, где сформировался лед-материал для самых крупных, далеких от Земли планет Сатурна и Юпитера. Через 2 млн лет образовались малые тела — метеориты и астероиды, а затем планеты земной группы: 63 % массы Земли было образовано около 11 млн лет, а 93 % ее массы через 30 млн лет. Сравнение элементного состава углистых хондритов с составом Солнца [Wood, 2011; Кузьмин, 2014а]) показывает, что углистые хондриты, как и состав планет земной группы, отвечают составу Солнца, кроме обеднения летучими и отсутствия корреляции с литием, который уничтожается при ядерных реакциях в ядре Солнца.

Формирование Земли сопровождалось одновременной дифференциацией ее недр, приведшей к обособлению ядра, мантии и коры. Большая часть ядра планеты образовалась уже через 20 млн лет после ее рождения. Формированию ядра способствовало наличие магматического «океана» глубиной 400—600 км [Кузьмин, 2014, рис. 4]. Последний возник при разогреве недр планеты за счет прежде всего той энергии, которая высвободилась при аккреции протопланетных масс и продолжающейся бомбардировке планеты крупными астероидами. В частности, примерно через 30—40 млн лет после возникновения Земли произошло ее столкновение с крупным космическим телом, близким по массе с Марсом. В результате этого столкновения часть мантийной оболочки Земли была выбита из тела планеты и выброшена на расстояние в несколько радиусов Земли [Binder, 1982; Whipple, 1990; Жарков, 2000; Хейзен, 2015], где она оформилась в виде нашего спутника — Луны. В поддержку этой модели свидетельствуют данные: о возрасте пород Луны, который моложе возраста Земли на несколько десятков миллионов лет; об изотопном составе кислорода пород Луны, который подобен составу мантийных пород Земли и отличается от состава метеоритов и Марса; об отсутствии изотопа ^{182}W в лунных породах, что указывает на их сходство с мантией Земли по многим компонентам и изотопам; по низкому содержанию сидерофильных элементов, в том числе Pd, Pt, Re, Os, которые максимально концентрировались в ядре. Справедливости ради следует отметить, что существуют и иные представления о формировании планетарной пары Земля—Луна [Галимов и др., 2005], обсуждение которых выходит за рамки статьи.

Это импактное событие сыграло важную роль в дифференциации недр Земли. Допускается, что в результате соударения возник магматический океан глубиной до 700 км. В нем происходило разделение железа и силикатов. Расплавленный металл стекал на его дно [Wood, 2011], формировал крупные линзообразные скопления, которые вследствие более высокой плотности проваливались в низы мантии, погружались до ядра и наращивали его. О времени возникновения ядра свидетельствуют данные изотопно-геохимических исследований короткоживущих изотопных систем, в которых родительские и дочерние изотопы фракционировали на протяжении аккреции Земли. Наиболее интересные результаты дала система ^{182}Hf — ^{182}W , поведение которой можно проанализировать в интервале первых 50 млн лет земной истории. Родительский изотоп ^{182}Hf имеет период полураспада около 9 млн лет. Он является литофильным элементом в отличие от дочернего сидерофильного изотопа ^{182}W . При дифференциации планеты на железное ядро и силикатную мантию ^{182}W поступает в ядро, а ^{182}Hf остается в мантии. Если бы ядро сформировалось сразу после аккреции, то дочерний изотоп остался бы вместе с родителем в мантии и таким образом определял бы аномальный состав вольфрама в мантии по сравнению с железными метеоритами. Такой аномалии нет. Поэтому на основании сопоставления изотопных составов мантийных ксенолитов и метеоритов был сделан вывод, что основное тело ядра было сформировано в первые 30—50 млн лет земной истории [Wood et al., 2006; Wood, 2011].

По существующим оценкам ядро Земли имеет состав: 85 % Fe, 5 % Ni, ~0.9 % Cr и ~0.25 % Co [Wood et al., 2006], около 8 % легких элементов: H, O, C, S, P и Si. Концентрация серы достигает 1.9 %, а кремнезема — 6—7 % [Allègre et al., 1995]. Наличие легких элементов в ядре имеет важное значение для формирования плюмов, особенно в постархейское время, когда на границе ядро—мантия уже сформировался слой D”.

Гаденский эон (4500—4000/3900 млн лет назад). После завершения планетной аккреции и образования пары Земля—Луна наступило время, с которого ее можно считать полностью сформировавшейся, несмотря на то, что она продолжала подвергаться бомбардировке крупными астероидами. Соответственно ее развитие в это время определялось двумя группами процессов, одна из которых была связана с механизмами самоорганизации недр Земли, а другая имела внешний космический характер и вносила изменения в процессы самоорганизации недр Земли.

От Гаденского эона на Земле сохранились только обломки цирконов с возрастом более 4.0 млрд лет, которые свидетельствуют о начале «геологической» истории нашей планеты. Эти находки дали основание полагать, что в это время уже была первая континентальная кора. Древние цирконы позволи-

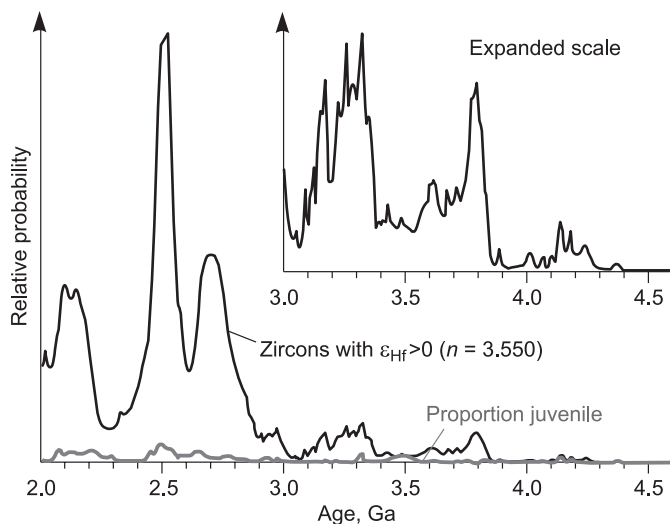
ли нам узнать об условиях природной среды на поверхности планеты, а также, как поверхностный слой взаимодействовал с более глубинными, мантийными оболочками Земли.

Всесторонние исследования древнейших цирконов Земли начались сразу после их обнаружения в обнажении Джек Хиллс (Jack Hills) в Западной Австралии [Nebel et al., 2014b]. Уже в 1986 г. были получены результаты изучения более 140 обломков цирконов из этого обнажения. В них сделаны порядка 100 000 анализов [Compston, Pidgeon, 1986]. Древние возрасты (> 4.0 до 4.3 млрд лет) установлены только в 17 случаях, причем наиболее древние возрасты свойственны самым центральным частям зерен цирконов. В дальнейшем были проанализированы все цирконы с возрастом более 2850 млн лет [Holden et al., 2009]. Количество анализов, отвечающих возрасту цирконов более 3800 лет составляет 7.3 %, а пик возрастов для этой серии цирконов имеет возраст 4.0—4.1 млрд лет (см. рис. 7 в статье [Кузьмин, 2014a]). В настоящее время считается, что возраст 4.1 млрд лет отвечает окончанию Гаденского зона [Nebel et al., 2014a], в то же время ряд исследователей относят его верхнюю границу к 4.0—3.9 млрд лет, т. е. к тому рубежу, когда завершилась регулярная бомбардировка Земли крупными астероидами [Griffin et al., 2014]. Максимальный возраст выборки цирконов с возрастом 4.1—4.5 млрд лет дает пик 4.25 млрд лет [Holden et al., 2009], что отвечает, скорее всего, возрасту максимального формирования гаденской континентальной коры.

На рис. 1 приведена кумулятивная кривая по [Griffin et al., 2014] для детритовых цирконов разных кратонов возрастом 4.5—2.0 млрд лет с $\epsilon_{\text{Hf}} > 0$. На верхней врезке рисунка, который показывает детальное распределение относительных пропорций цирконов с древними возрастными, завершение Гаденского зона соотносится с минимумом, соответствующим ~ 4.0 млрд лет. Локальный максимум 4.2—4.25 млрд лет внутри зона, по-видимому, фиксирует этап наиболее активного корообразования. Другие пики возрастов отмечаются уже в архее и соответствуют ~ 3.8 млрд лет и 3.3—3.4 млрд лет. На нижнем графике четко проявлены пики, отвечающие возрастам 2.75; 2.55 и 2.1 млрд лет. Обсуждение причин этих пиков мы рассмотрим ниже.

Интересные результаты дали геохимические исследования гаденских цирконов [Maas et al., 1992]. Было установлено, что последние содержат Hf в количестве 0.86—1.30 мас. %; в них отмечается фракционирование РЗЭ — высокое отношение HREE/LREE. В цирконах были выявлены включения калиевого полевого шпата, кварца, плагиоклаза, монацита и апатита. Все это позволило авторам сделать заключение о гранитном составе источника гаденских цирконов. Это подтверждается низкой температурой кристаллизации гаденских цирконов — в среднем 700 °C [Harrison et al., 2008]. Ряд исследователей [Rasmussen et al., 2011] считают, что включения гранитоидных минералов в цирконах могут быть связаны с поздними метаморфическими процессами, однако детальные петрографические исследования показали, что в основном включения кварца, калиевого полевого шпата в цирконах связано с их кристаллизацией из магматического расплава [Griffin et al., 2014].

Несомненно, важными явились результаты сопоставления лунных и гаденских цирконов. Они имеют одинаковый возраст, находящийся в интервале 4.0—4.35 млрд лет (см. ссылки в [Кузьмин, 2014a]). Лунные цирконы имеют характерные особенности, которые свидетельствуют об их импактном генезисе. В них встречены локальные участки перекристаллизации, локализованные аморфные участки, пластические деформации и разрывы, трещины, т. е. типичные следы импактных структур [Grande et al., 2013]. В отличие от гаденских, лунные цирконы образовались при температуре более 1000 °C. При общем сходстве графиков распределения нормированных содержаний редкоземельных элементов (преобладание тяжелых РЗЭ над легкими и наличие европиевого минимума) (рис. 2), гаденские цирконы отличаются цериевым максимумом (см. рис. 2, a), которого нет в лунных цирконах. Наличие цериевой положительной аномалии указывает на то, что на Земле при формировании гаденской континентальной



коры (рис. 2), гаденские цирконы отличаются цериевым максимумом (см. рис. 2, a), которого нет в лунных цирконах. Наличие цериевой положительной аномалии указывает на то, что на Земле при формировании гаденской континентальной

Рис. 1. Возможная кумулятивная кривая для всех проанализированных цирконов $\epsilon_{\text{Hf}} > 0$, по [Griffin et al., 2014].

Группа ювенильных цирконов (0.75 %), расположена вблизи линии ϵ_{Hf} деплетированной мантии, рассчитанной от 4.5 до 2 млрд лет, — нижняя кумулятивная кривая на графике. Верхняя врезка показывает детальный (в большем масштабе) график данных для наиболее древних цирконов.

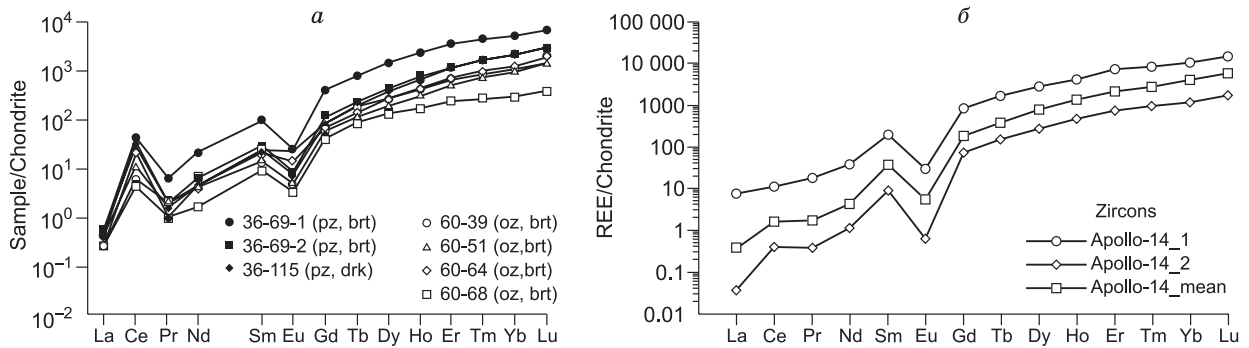


Рис. 2. Графики распределения нормированных по хондриту редкоземельных элементов (РЗЭ) в гаденских (а) и лунных (б) цирконах, по [Кузьмин, 2014] с использованием данных по гаденским цирконам [Maas et al., 1992] по лунным [Taylor et al., 2009].

коры были окислительные условия, так как Се в окислительных условиях приобретает валентность Se^{4+} и при этом легко входит в структуру цирконов. Лунные цирконы кристаллизованы в восстановительной среде.

Важные результаты были получены при изучении изотопного состава кислорода в гаденских цирконах. Он оказался более высоким ($\delta^{18}O \sim 7.5$) по сравнению с изотопным составом кислорода в породах мантии ($\delta^{18}O = 5.3 \pm 0.3$) [Valley et al., 2002; Nebel et al., 2014b]. При объяснении таких значений $\delta^{18}O$ принимается, что материнские для гаденских цирконов гранитные магмы должны были или взаимодействовать с водой, или иметь в источнике породы, которые сформировались при участии воды (типа глинистых сланцев).

В целом данные изучения гаденских цирконов позволяют сделать выводы, что они образовались из гранитоидных расплавов кислого или среднего составов, которые могли быть остаточными дифференциатами основных магм или продуктами плавления эклогитового материала. Эти гранитоиды по составу, вероятно, соответствовали TTG (тоналит-трондьемит-гранодиоритовой) ассоциации, формирование которой, согласно экспериментальным данным [Rapp, Watson, 1995], происходит при парциальном плавлении амфиболитов или эклогитов в присутствии определенных количеств воды. Очевидно, что данные, полученные по гаденским цирконам, вполне соответствуют участию воды в процессах плавления в это время. Сопоставление с лунными цирконами говорит о том, что условия окружающей среды на обоих космических телах были различны.

Для понимания тектонических процессов на Земле в гаденское время важную информацию можно получить при анализе данных по Lu-Hf ($^{176}Lu \rightarrow ^{177}Hf$) изотопной системе, позволяющих оценить время отделения расплава от примитивной мантии [Nebel et al., 2014a]. При интерпретации изотопных данных весьма значима величина $\epsilon_{Hf}(T)$ (рис. 3), показывающая отклонение $^{176}Hf/^{177}Hf$ от значения в хондритах (в хондритовом однородном недифференцированном резервуаре, сопоставляемом с примитивной мантией), на момент T . Важно, чтобы определение изотопов Hf проводилось локальным методом; в противном случае при зональных цирконах мы будем иметь суммарное значение соотношения изотопов гафния, которые невозможно отнести к какому-то точному времени.

Как уже отмечалось, обломки цирконов из обнажения Джек Хиллс практически все являются зональными. Определения возраста из единичных кристаллов показывают, что гаденские цирконы служили основой для формирования цирконов более поздних генераций, в основном соответствующих возрасту серых гнейсов Западно-Австралийского кратона Илгарн. Если говорить о всем поколении цирконов в осадках из обнажения Джек Хиллс, то их можно назвать «популяцией» цирконов кратона Илгарн (Западная Австралия). Рассматривая эту популяцию по отношению $\epsilon_{Hf}(T)$ —возраст (рис. 4), можно отметить, что она занимает пространство с различными значениями $\epsilon_{Hf}(T)$. При этом наиболее древние возрасты илгарнской популяции отвечают гаденским цирконам с возрастом 4.2—4.3 млрд лет. В связи с этим интересно было определить положение цирконов на диаграмме $\epsilon_{Hf}(T)$ — T (возраст) по цирконам различных регионов. К настоящему времени уже получены данные, что цирконы, имеющие широкий диапазон значений возраста, отмечаются в пределах различных кратонов, а именно — в канадских гнейсах Акаста, в песках р. Миссисипи, в кратонных породах Гренландии, в архейских осадках Северного Китая [Nebel et al., 2014a]. Большинство обломочных цирконов (так как в основном они обнаружены в архейских осадочных разрезах) формировались при участии гаденских цирконов. Отсюда делаются важные выводы: во-первых, гаденская кора была широко распространена. Древние архейские кратоны (рис. 5) расположены в настоящее время на разных континентах. Поэтому трудно предположить, что для

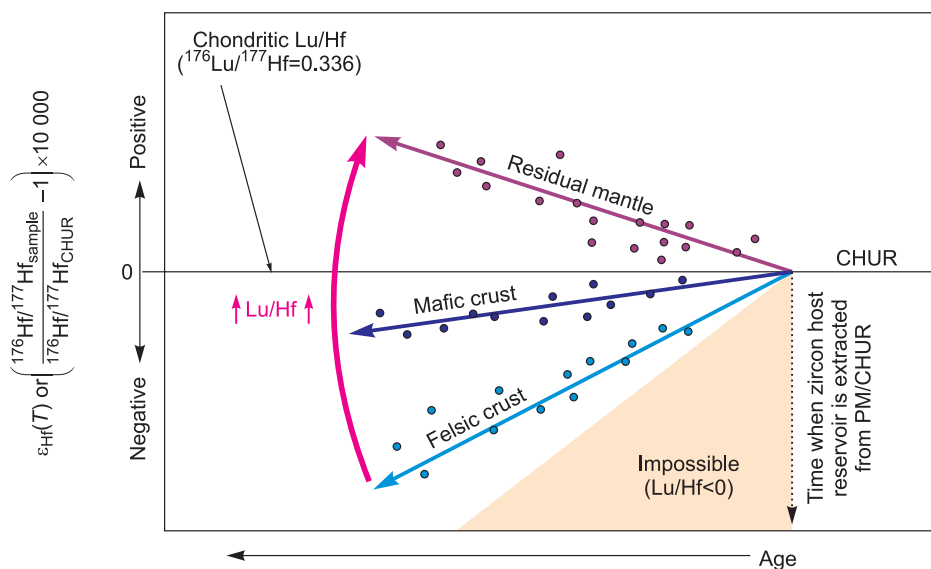


Рис. 3. Схематический график изотопов Hf (выраженный символом ϵ_{Hf}) к возрасту, по [Nebel et al., 2014b].

Отдельные точки иллюстрируют анализы цирконов из единой коровой области. Медиана через такую популяцию может использоваться, для того чтобы получить значение Lu/Hf, требуемое для эволюции изотопа, связанного с наклоном медианы. Lu/Hf может, в свою очередь, использоваться, чтобы оценить геохимическую природу коровой области. Высокие величины указывают на мафическую кору, тогда как низкие величины являются представительными для фельзитовой коры. Эти особенности определяются из относительного разделения Lu и Hf во время частичного плавления.

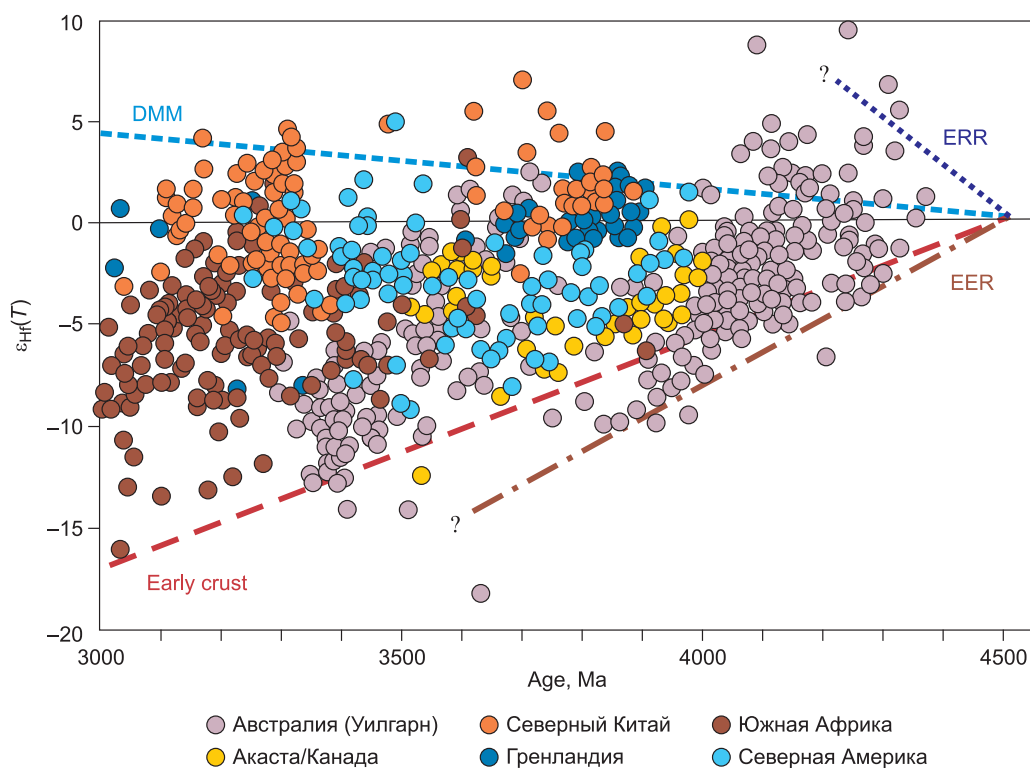


Рис. 4. Глобальные сравнения анализов обломков цирконов из докембрийских осадков различных кратонов (модернизированная диаграмма [Nebel-Jacobsen et al., 2010]).

Приведенные данные показывают, что гаденская кора, судя по реликтовым цирконам возраста 3.9—4.0 млрд лет и более, существовала на различных кратонах. Однако никакой магматической активности на этих территориях не отмечается. Очевидно, везде на Земле эта первичная кора постоянно разрушалась. ERR — ранний остаточный резервуар, EER — ранний обогащенный резервуар, DMM — деплетированная мантия срединно-океанических хребтов.

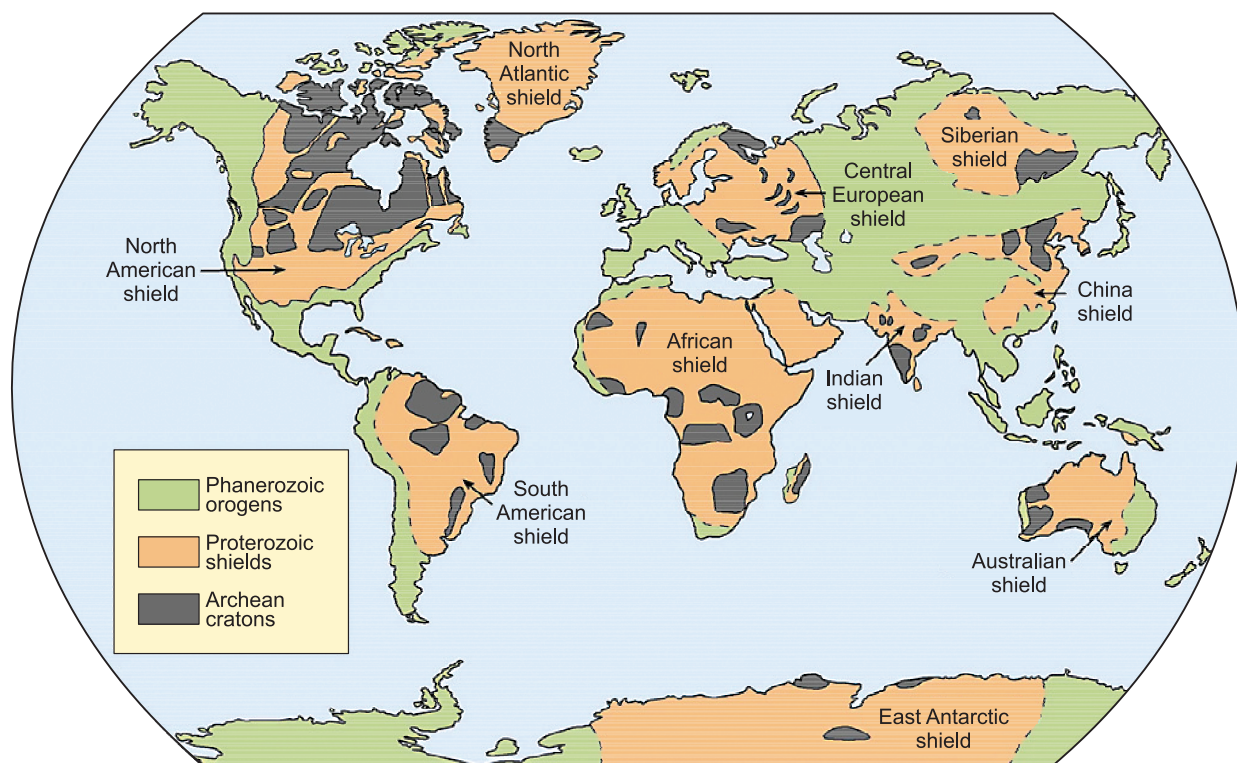


Рис. 5. Карта-схема распределения фанерозойских пород, протерозойских щитов и архейских кратонов на Земле, по [Furnes, 2015].

всех них был единый источник поступления гаденских цирконов. Логичнее думать, что в гаден-архейское время эти кратоны были составной частью единого континента или же условия их образования были единообразны в разных участках Земли. Ранее мы предположили [Глуховский и др., 1994], что этот древний континент располагался в экваториальной зоне Земли, чему способствовал мощный мантийный апвеллинг. Последний формировался под воздействием центробежных ротационных сил и приливной энергии Луны, особенно значимых для ранних стадий развития Земли, когда Луна находилась на близком (порядка трех радиусов) расстоянии от Земли [Глуховский, Кузьмин, 2015].

Косвенным указанием на экваториальное расположение такого суперконтинента на Земле служат данные о более высоком стоянии экваториальной поверхности на планетах земной группы Марсе и Венере [Глуховский и др., 1984; Wipple, 1990; Глуховский, Кузьмин, 2015], развитие которых завершилось на стадиях, соответствующих гаден-архейскому этапу развития нашей планеты. Как на Земле, так и на Венере к экваториальной зоне приурочены положительные аномалии геоида. Происхождение цирконов разных докембрийских кратонов из гаденской коры является подтверждением наличия единого докембрийского континента на Земле.

Архейская эра. Конец Гаденского эона соотносят с завершением регулярных бомбардировок Земли крупными астероидами, которые относятся к интервалу 3.9—4.0 млрд лет назад. Начиная с этого времени развитие Земли определялось процессами самоорганизации, контролируемые в первую очередь изменениями термического состояния ее недр. На протяжении следующего миллиарда лет эти процессы слабо менялись и, как считается, практически не отличались от тех механизмов внутренней дифференциации Земли, которые действовали в гаденское время. Законно поставить вопрос, какая же геодинамическая обстановка господствовала на Земле в гаден-архейское время? Практически все исследователи, изучающие древние образования Земли [Хаин, 2003, 2009, 2010; Griffin, O'Reilly, 2007; Debaille et al., 2013; Nebel et al., 2014a,b; Griffin et al., 2014; Глуховский, Кузьмин, 2015; и др.], считают, что тектонический стиль того времени отличался от настоящего. При этом большое значение придается тектонике плюмов, которая существенно отличалась от тектоники плюмов, свойственной современной Земле [Кузьмин, Ярмолюк, 2016], прежде всего, благодаря более горячей и менее вязкой мантии. Приходится также учитывать астероидно-метеоритные бомбардировки, которые оказывали заметное влияние на характер геологических процессов. Так, приходится признать, что гаденская кора была не только полностью разрушена такими бомбардировками, погружена в мантию и была расплавлена в процессах рециклинга.

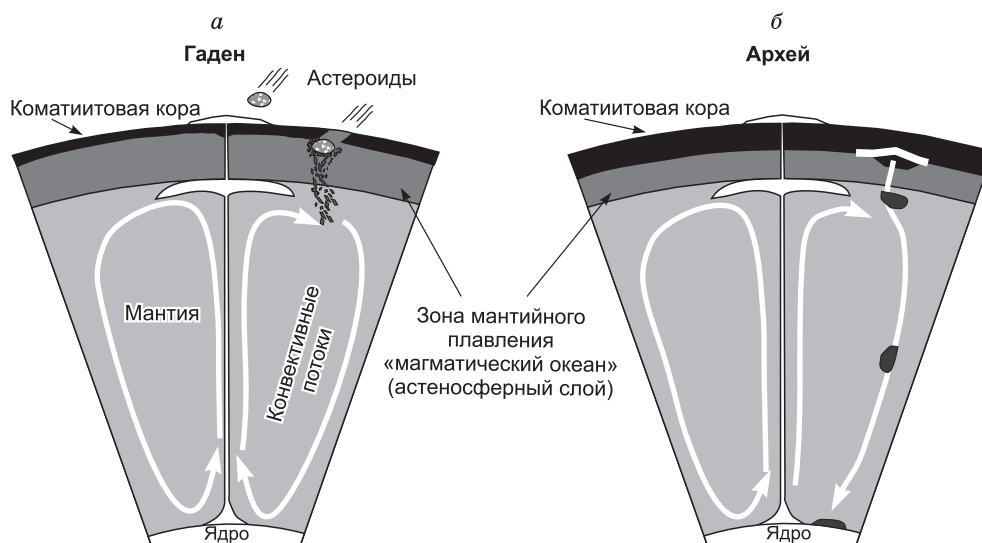


Рис. 6. Эволюция стилей геодинамического развития Земли в процессе ее эволюции в гаден-архейское время.

Гаден (*a*) — первичная кора наращивается за счет излияний, питаемых восходящими мантийными струями (плюмами), и разрушается в результате астероидных бомбардировок. Архей (*б*) — происходит рост коры за счет длительного периода платокоматиитовых излияний. По достижении большой мощности коры ее нижние горизонты подвергаются эклогитизации, формируются ассоциации серых гнейсов. С частью коры происходит деляминация с погружением (сагдукция) эклогитизированных блоков к границе ядра и мантии, где они закладывают основу для формирования слоя D'.

Следует также отметить, что в последние несколько лет большинство исследователей склоняются к мнению, что тектоника плит в гаден-архейское время до 3.4—2.7 млрд лет не играла существенного значения. В настоящее время выдвигается идея тектоники покрывки (LID-tectonics) [Debaillie et al., 2013; Griffin et al., 2014; Nebel et al., 2014a]. Возможная модель тектонической активности на Земле в гадене, архее и постархее приведена на рис. 6. Рассмотрение особенностей стиля тектоники в каждый временной этап эволюции Земли будет приведено в следующем разделе.

ПРЕДЛАГАЕМАЯ МОДЕЛЬ ТЕКТНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ГАДЕН-АРХЕЙСКОГО ВРЕМЕНИ

Рассмотрим, какие положения следует учесть при решении механизма тектонических движений в гаден-архейское время: 1) практическое отсутствие пород первичной гаденской континентальной коры; 2) имеются свидетельства ее рециклирования, зафиксированные строением цирконов с ядрами, возникшими в гаденское время, и отторочками, сформированными в других магматических камерах существенно позднее; 3) интенсивную бомбардировку поверхности планеты особенно в гадене астероидами и метеоритами; 4) возможность погружения коры в глубь мантии и последующее поступление ее вещества на поверхность, что могло быть связано с процессами конвекции; 5) данные изотопных исследований, отмечающие резкую смену в состоянии изотопных систем в конце архея начиная с 3.4 и особенно ~2.5—2.7 млрд лет назад.

Все эти изменения можно проиллюстрировать на графиках рис. 7, на которых четко фиксируется эта граница. На графике 7, *a* видно, что Hf модельные возрасты в детритовых цирконах образуют широкий максимум в интервале 3300—2700 млн лет, в соответствии с которыми следует говорить, что гаден-архейская эпоха характеризовалась наиболее интенсивным ростом коры. Именно в это время сформировалось до 50 % земной коры [Condie, 2011]. По окончанию эпохи с рубежа ~2.5—2.7 млрд лет стали формироваться суперконтиненты, реконструкция которых проводится уже по палеомагнитным данным. Очевидно, что с этого времени стали проявляться элементы тектоники плит (субдукции).

Окончание Архей-Гаденского зона зафиксировано и в смене других важных индикаторов состояния окружающей среды на Земле. Так, на графике 7, *б* рост величины $\delta^{18}\text{O}$ в постархейское время отразил быстрый рост и стабилизацию кратонов. Образование кратонов сопровождалось ростом поднятий, породы которых подвергались интенсивному химическому выветриванию. Продукты последнего характеризуются обогащением тяжелым изотопом кислорода. Эти измененные породы разрушались и рециклировались в форме осадков с высокими значениями $\delta^{18}\text{O}$ в источнике, в котором преобладали гранитоиды. Такой процесс стал основной причиной роста величины $\delta^{18}\text{O}$ в постархейских гранитоидах. В более

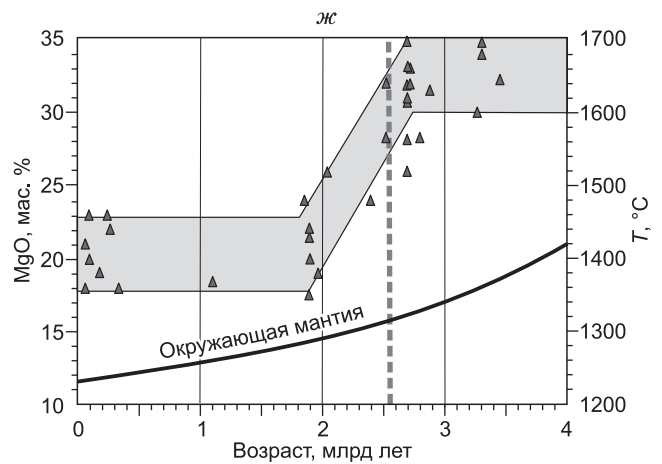
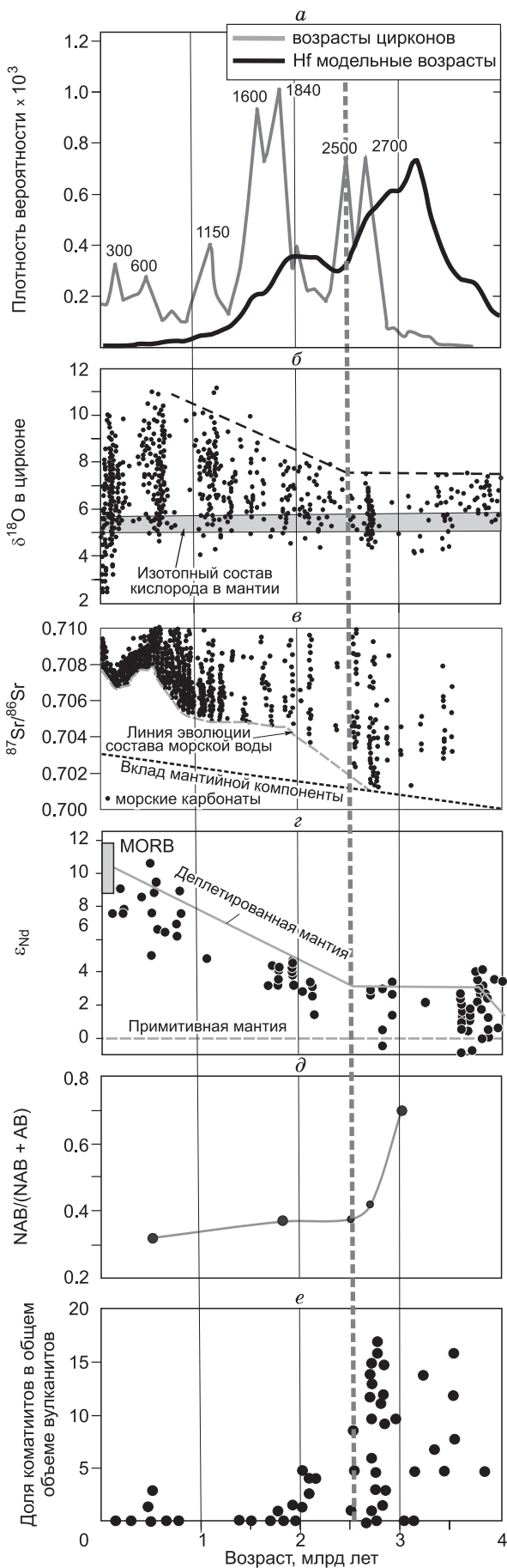


Рис. 7. Схема корреляций вещественных параметров, характеризующих эволюцию состояния Земли и ее мантийных слоев в процессе ее эволюции.

a — гистограммы распределения возрастов (млн лет) цирконов и соответствующих им Hf-изотопных модельных возрастов, по [Condie, Aster, 2010]; *б* — вариации изотопного состава кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) в цирконах (из гранитоидов) относительно их возраста, по [Valley et al., 2005]; *в* — вариации изотопного состава стронция ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) в морской воде в геологической истории, по [Veizer, Mackenzie, 2003; Condie, 2011]; *г* — вариации изотопного состава неодиима $\varepsilon_{\text{Nd}}(T)$ в породах (гнейсах) раннего архея, в зеленокаменных поясах и конвергентных границах плит, по [Condie, 2011]; *д* — соотношения океанических базальтов, не связанных с магматическими дугами (NAB) и связанных с ними (AB) в геологической истории, по [Condie, 2011]; *е* — изменение доли коматиитов в составе магматических поясов в геологическом времени, по [De Wit, Ashwal, 1995]; *ж* — вариации и максимальные содержания MgO в коматиитах и пикритах, связанных с остыванием окружающей мантии, по [Cambell, Griffiths, 2014].

раннее время кора, находившаяся ниже уровня моря, не взаимодействовала с атмосферой и практически не подвергалась выветриванию [Valley et al., 2005].

Близкие выводы о характере рельефа в архее и гадене следуют из данных о поведении стронциевой изотопной системы. В период до 2.5 млрд лет отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ лежит вблизи мантийных значений (~ 0.702), что соответствует буферированию состава вод мантийным вкладом и незначительной доле в этом составе континентальной коры, по крайней мере той, которая воздымалась над уровнем моря. После предположительно главного периода континентального роста 2.7 млрд лет и формирования суперкратонов отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ начинает расти.

Вариации изотопного состава неодаима $\varepsilon_{\text{Nd}}(T)$ в породах (гнейсах) раннего архея, в изверженных породах конвергентных границ и зеленокаменных поясов [Condie, 2011] отражены на рис. 7, *з*. В раннем архее плавление мантийного вещества способствовало относительному обогащению Nd континентальной коры [Bowring, Housh, 1995]. Слабое изменение состава Nd в продуктах плавления мантийного вещества в раннем архее свидетельствует об активном взаимодействии астеносферной мантии с породами основания коры, что препятствовало появлению в источнике плавления мантии с деплетированными характеристиками. Существенные изменения в поведении изотопной системы Nd в постархейских породах свидетельствуют о появлении больших объемов деплетированной мантии с этого рубежа.

Этот рубеж совпал также с изменениями типа магматизма (см. рис. 7, *д*), который приобрел более дифференцированный характер. Если в гаден-архейское время преобладали породы с плюмовыми характеристиками, то в более позднее время — породы с островодужными метками [Condie, 2011]. Следует отметить, что в заметном количестве породы с островодужными характеристиками появляются на Земле около 3.0 млрд лет назад.

С рубежа 2.7 млрд лет началось резкое сокращение доли коматиитов в составе магматических ассоциаций (см. рис. 7, *е*). [De Wit, Ashwal, 1995]. Оно продолжалось до рубежа 2.0 млрд лет, с которого ведущую роль стали играть базальты, контролируемые механизмами тектоники плит.

Наиболее четко изменение состава магматических пород, связанных с плюмами, видно на графике, на котором показаны содержания MgO (см. рис. 7, *ж*). В коматиитах, излившихся на поверхность Земли до 2.7 млрд лет, содержания MgO равно в среднем $32.5 \pm 2.5\%$, а в пикритах, моложе 2.0 млрд лет, — $21.3 \pm 3\%$. Такие содержания MgO во внутриплитных породах коматиит-базальтовой серии связано с температурой выплавления в мантии родоначальных магм [Arndt et al., 2008]. Температуры в области плавления коматиитовых магм в архее до 2.7 млрд лет были значительно выше, чем в более позднее время, что хорошо видно по линии, отвечающей изменению температур в окружающей мантии. Температура коматиитовых магм в интервале 3.5—2.7 млрд лет была постоянной, так как в это время отсутствовал слой D'', отделяющий ядро от мантии, и формировалось внутреннее железное ядро [Campbell, Griffiths, 2014]. В интервале 2.7—2.0 млрд лет температура коматиит-базальтоидных магм уменьшалась. В это время происходило окончательное образование слоя D'' за счет литосферного вещества, которое стало активно поставляться в мантию вследствие субдукционных процессов, постоянно усиливающихся начиная с 3 млрд лет. Слой D'' 2.0 млрд лет тому назад полностью сформировался, в нем, возможно, началась внутренняя конвекция [Campbell, Griffiths, 2014], он стал своеобразным термальным буфером, поэтому поднимающиеся от него базальтоидные магмы имеют более низкие температуры плавления и более низкие содержания MgO.

На наш взгляд, все эти положения в той или иной степени учтены в модели спокойной (стагнированной) покрывки, под которой происходит общемантийная конвекция [Nebel et al., 2014b]. Эта обстановка существовала до рубежа 2.7 млрд лет (см. рис. 6).

Представим основные положения предложенной модели. Кора имеет базальт-коматиитовый состав. Поверхность планеты Земля спокойная, никаких крупных движений на ней не происходит (так называемая LID-tectonics — тектоника покрывки). В мантии — общемантийная конвекция, обеспечивавшая перенос тепла и вещества к поверхности. Астероидные бомбардировки обеспечивали изливание мантийных магм и формирование на поверхности крупных лавовых плато большой мощности. В результате происходило постепенное наращивание общей мощности земной коры. Взаимодействие лав с водой Мирового океана способствовало образованию амфиболитов при последовательном погружении лавовых слоев в глубь Земли, где формировались амфиболиты и, возможно, эклогиты. Их плавление приводило к образованию в архее TTG комплексов, формировавших протоконтинентальную кору. Направленное развитие оболочек Земли, очевидно, нарушалась на ранних стадиях астероидно-метеоритными бомбардировками, которые разбивали поверхность Земли, инициируя дополнительные извержения базальт-коматиитовых магм [Griffin et al., 2014]. Процесс усиления мантийной активности, сопровождавшийся резким увеличением поступившего на поверхность глубинного вещества, предложено рассматривать в качестве мантийных переворотов [Griffin et al., 2014], которые были зафиксированы возрастными цирконов на рубежах 4.4, 3.8, 3.3—3.4 млрд лет. Эти вспышки активности были разделены этапами стагнированно-спокойного развития коры (тектоника покрывки).

Какие параметры состояния недр Земли и особенности состава изливающихся на поверхность Земли пород в гаден-архейское время позволяют говорить об особенности тектонической активности на ранних этапах эволюции нашей планеты? Температурные параметры древней Земли отличались от современной. Если на поверхности температура была относительно низкой, сопоставимой с современной, то температура у границы ядро—мантия была выше в 1.2 раза [Добрецов и др., 2001, 2010; Condie, 2011; Debaille et al., 2013]. Это определяло, очевидно, общемантийную конвекцию. Базальт-коматиитовая кора обладала положительной плавучестью относительно подстилающей более плотной мантии [Campbell, Griffiths, 1992; Davies, 1992]. Поднимающиеся вследствие конвекции мантийные струи (мантийные плюмы) изливались на стабильную коровую покрывку [Elkins-Tanton et al., 2005] и наращивали кору как сверху (излияния), так и снизу (вертикальная аккреция).

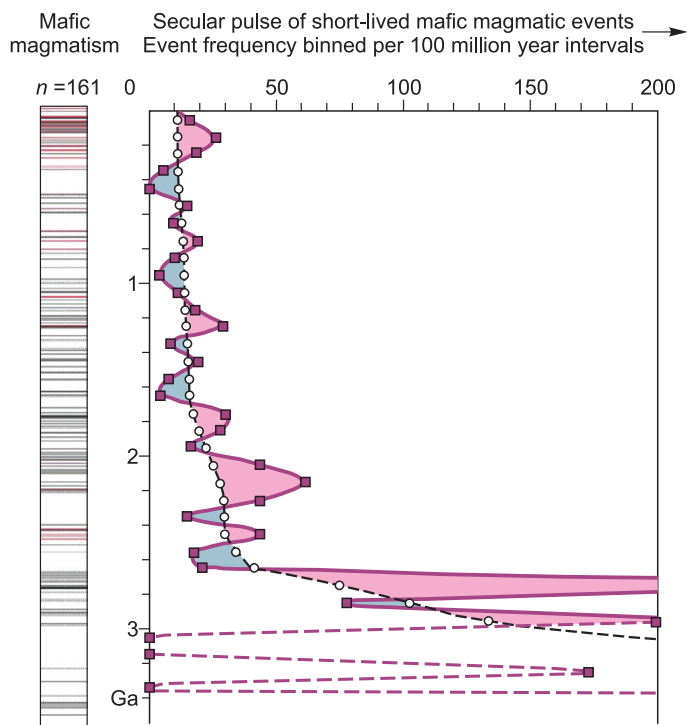
Опускающаяся «струя» конвекции представляла собой капли, которые можно сравнить с опускающимися в нижней мантии литосферными слэбами. Эти «холодные» капли несли материал от «холодного» граничного слоя в основании стабильной базальт-коматиитовой коры [Campbell, Griffiths, 1992] вниз к границе ядро—мантия. В конвективном цикле этот материал нагревался на термальной границе в слое выше ядра и позже возвращался в верхнюю мантию в составе плюмов. В настоящее время имеется ряд установленных фактов [Debaile et al., 2013], подтверждающих такую модель геодинамики Земли в гаден-архейское время (см. рис. 6).

Мы не знаем состава магм, которые поступали на поверхность Земли в гадене, кроме того, что наиболее типичные мантийные магмы, судя по температуре мантии, должны были быть коматиитовыми. Действительно, в архее количество мантийных магм, поступающих на поверхность Земли, были по составу такими ($MgO \geq 32\%$), и объем поступающего материала был во много раз больше, чем в более позднее время [Ernst, Bleeker, 2010; Campbell, Griffiths, 2014; Ernst, 2014]. На рис. 8 представлены вековые (в интервале 100 млн лет) изменения частоты активности мантийных плюмов в истории Земли, нормализованных к площади сохранившейся коры. Конечно, как отмечают авторы [Ernst, Bleeker, 2010; Campbell, Griffin, 2014], запись, древнее 3.0 млрд лет, сомнительная (неточная), что обусловлено ограничением площади сохранившейся коры, древнее этого возраста. Очевидно, происходит эффективное уменьшение плюмовой активности в архее, и имеется небольшая плюмовая активность между 2.6—2.3 млрд лет. Рост плюмовой активности отмечается между 2.3—2.0 млрд лет, но пик много меньше, чем пик 2.7 млрд лет, т. е. когда начался переход от тектоники покрывки к плейт-тектонике.

Для понимания процессов, происходящих в мантии Земли в гаден-архейское время, важно оценить состояние мантии под корой, которое в настоящее время представлено субконтинентальной литосферной мантией (SCLM). Время формирования SCLM можно получить при изучении Re-Os изотопной системы по сульфидам или по Os-Ir сплавам. Обзор по этим исследованиям представлен в работе [Griffin et al., 2014]. Этими авторами были рассмотрены перидотитовые мантийные ксенолиты из Южной Африки, Сибири и кратона Слейв (Slave) Канады. Датирование по сульфидам сопоставлялось с возрастом цирконов из пород коры, содержащихся в этих образцах. Полученные данные позволяют говорить, что практически в первый миллиард геологической истории Земли какой-либо SCLM в мантии не было [Griffin et al., 2014]. Наиболее ранний значительный пик, отражающий формирова-

Рис. 8. Частота больших извержений плюмовой магмы в интервале от 3.5 до 0 млрд лет [Ernst, Bluker, 2010; Campbell, Griffiths, 2014].

Квадраты на графике показывают относительно оси X число событий извержений плюмовых магм за интервал 100 млн лет, нормализованный к площади сохранившейся коры того времени по отношению к современной коре. Коэффициент нормирования площади плюмовых магм соответствующего времени к площади современной коры. Для настоящего времени этот коэффициент 1, для более ранних периодов коэффициент меньше 1. Значения по оси X — число плюмовых событий, деленное на коэффициент нормирования. Кружки на графике — средние значения.



ние SCLM в мантии Земли по Re-Os изотопной системе, отмечается в интервале 3.4—3.2 млрд лет [Griffin et al., 2014]. Этот возрастной рубеж совпадает с пиком возрастов «ювенильных» цирконов, в которых изотопный состав Hf соответствует составу деплетированной мантии (см. рис. 1).

Следует помнить, что формирование гаденской континентальной коры сопровождалось фракционированием рассеянных элементов и обогащением коры несовместимыми элементами, в том числе легкими редкими землями. Это лучше всего видно по изотопной системе ^{146}Sm — ^{142}Nd [Debaille et al., 2013], которая фиксирует фракционирование Sm и Nd в геологических процессах этого времени. Период полураспада в системе ^{146}Sm — ^{142}Nd ($T_{1/2} = 68$ млн лет [Kinoshita et al., 2012]), что позволяет получить важную информацию для первых 350 млн лет истории Земли, когда ^{146}Sm еще сохранялся. Древние породы в соответствии с их обогащением легкими или тяжелыми РЗЭ должны иметь положительное или отрицательное значение величины $\mu^{142}\text{Nd}$, отражающей отклонение содержания ^{142}Nd от его значения в эталоне современной конвектирующей мантии [Debaille et al., 2013].

Породы с характеристиками гаденской дифференциации $0 > \mu^{142}\text{Nd} < 0$ вовлекались в общемантийную конвекцию, о чем свидетельствуют данные по позднеархейским коматиитам зеленокаменного пояса Абитибиде [Debaille et al., 2013], в которых были установлены значения $\mu^{142}\text{Nd} = 7 \pm 3$ ppm. Судя по величине аномалии, она могла быть создана в обогащенном мантийном резервуаре, возникшем при участии рециклированной гаденской коры. В дальнейшем этот обогащенный мантийный резервуар во время «мантийного переворота» попал в опускающийся конвективный поток, был погружен до границы ядро—мантия, после чего вновь был перемещен к поверхности, где участвовал в образовании позднеархейских коматиитов.

Таким образом, предложенная [Nebel et al., 2014, см. рис. 6] модель конвекции для гаден-архейского периода развития Земли показывает возможность погружения мантии, преобразованной в гаденское время, с «холодным» опускающимся конвективным потоком в глубину мантии, и в дальнейшем ее подъем к поверхности Земли. Соответственно, древняя изотопная мантийная аномалия может сохраниться в мантии порядка одного и более миллиардов лет. Очевидно, остатки такой древней (гаденской) обогащенной мантии можно найти в продуктах плюмового магматизма с возрастом 3.0—3.5 млрд лет.

Заканчивая обзор имеющихся фактов по доказательству возможных процессов в гаден-раннеархейской мантии, следует добавить, что в Гаденский эон Земля подвергалась практически с самого момента ее формирования интенсивной метеоритной бомбардировке [Wide et al., 2001]. Это обстоятельство вносит существенное дополнение к той модели, которая была предложена выше. Мы считаем совершенно необходимым акцентировать внимание на том, что гаденскую эпоху мы можем оценивать только в рамках той экзотической информации, которую нам предоставляют данные по циркону [Nebel et al., 2014b]. Все, что было сформировано в эту эпоху, было впоследствии уничтожено метеоритно-астероидными бомбардировками. Нам остались от этой эпохи только редкие следы — цирконы, дающие тем не менее очень важную информацию о том, что происходило на самом раннем этапе геологического развития Земли (см. рис. 6, а).

В отличие от Гаденского эона астероидно-метеоритные атаки в архее не были массированными. Поэтому первичная кора сохранилась существенно лучше коры более ранних этапов развития Земли. Ее формирование происходило в результате платоизлияний. Рост коры вел к погружению ее нижних горизонтов на большие глубины, условия которых (гранатовые амфиболиты) способствовали здесь образованию пород TTG серии по методу сагдукции, предложенной В.Е Хаиным [2003]. Этот механизм был обсужден выше и наши добавления к нему отражены на рис. 6, б.

Как полагают [Griffin et al., 2014], время бомбардировок можно оценить по данным начального изотопного отношения $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ в цирконах месторождения Джек Хиллс. Особенности этих цирконов воспроизведены на рис. 9, на котором приведены данные по архейским цирконам из продуктов разрушения ассоциаций серых гнейсов (TTG). На этих рисунках хорошо видно, что имеется ряд популяций цирконов, в которых не наблюдается существенной разницы в инициальных составах изотопа гафния. Это тренды, отвечающие событиям следующих возрастов 4.5; 4.2—4.3; 3.8—3.9 и 3.3—3.4 млрд лет, интерпретируются как следы ранней (ЕНВ) и поздней (ЛНВ) бомбардировок Земли [Griffin et al., 2014]. Бомбардировки способствовали перемещению цирконов, вернее, содержащих их блоков коры, соответствующего времени в глубины мантии на уровни, ставшие питающими для более молодых магм. Таким образом, они создали условия для появления более молодых цирконов с изотопными характеристиками, отвечающими моменту бомбардировок.

Таким бомбардировкам, возможно, соответствуют гигантские импактные события, отмеченные в зеленокаменных структурах Африки и Австралии, возраст которых 3.24—3.26 млрд лет [Глуховский, Кузьмин, 2015]. Очевидно, импактные события вызвали в архее появление на поверхности Земли больших объемов коматиитовых магм, дальнейшая эволюция которых, согласно сагдукции, привела к формированию ассоциации серых гнейсов с единым инициальным составом изотопов гафния в цирконах. Оценивая полученные результаты по выявлению единых трендов по изотопному составу цирконов

в диапазоне возрастов от 300 млн лет и более. В. Гриффин с коллегами [Griffin et al., 2014] считают, что такая картина связана с существованием стагнированной («спокойной» LID) поверхности Земли, на которую оказывают воздействие крупные метеоритные бомбардировки.

Такая «тектоническая» активность продолжалась до 3.4 млрд лет. В дальнейшем метеоритно-астероидные бомбардировки не играли существенной роли в формировании глубинных оболочек Зем-

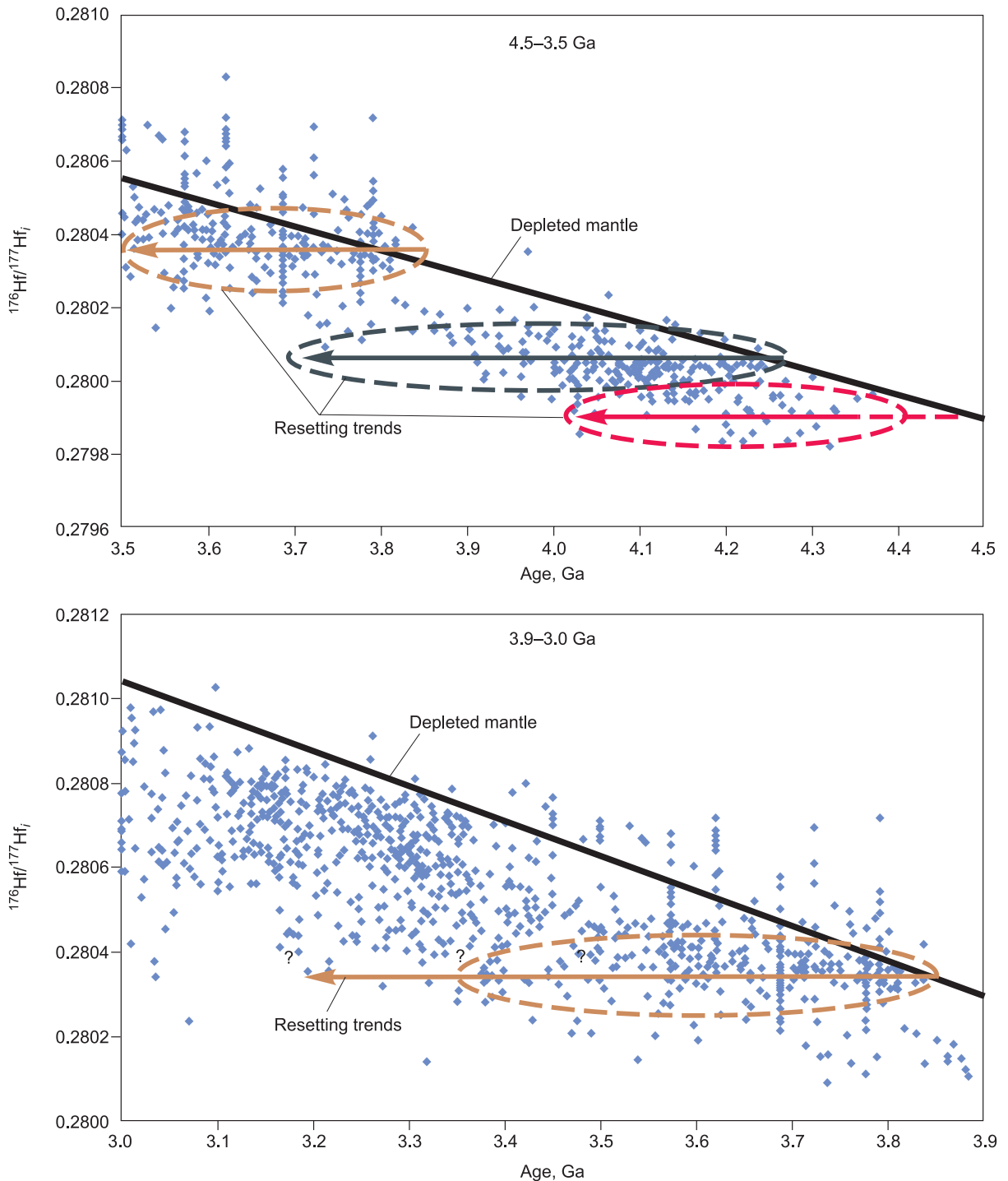


Рис. 9. Вариации отношения $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ в цирконах разного возраста, по [Beyer et al., 2012; Gribbin et al., 2014].

Овалы включают единую популяцию цирконов с одинаковыми Hf-изотопными отношениями, но с разным возрастом. Считается, что каждый такой тренд представляет единую по происхождению популяцию цирконов (~ 4.5; 4.2 и 2.8 млрд лет), для которой возрасты изменены благодаря поверхностным или метаморфическим процессам без изменения Hf-изотопного состава. Некоторые плитотектонические процессы начались, возможно, около 3.4 млрд лет.

ли. На основании анализа становления всех оболочек планеты (твердого железного ядра, слоя D'' с образованием в нем постперовскита, а также слоя деплетированной астеносферной мантии) мы считаем [Кузьмин, Ярмолюк, 2016], что современный стиль тектонических движений, при которых совмещаются процессы тектоники плит и тектоники плюмов наступил на Земле к рубежу 2.0 млрд лет. Его отличия от Гаден-Архейского зона связаны с окончательным образованием слоя D'', с преобладанием механизма двухъярусной мантийной конвекции: нижнемантийной, начинающейся от слоя D'' и доходящей до границы верхней мантии, и верхнемантийной, астеносферной, обеспечивающей движение литосферных плит, с изменением стиля магматизма и рудной металлогении [Кузьмин, Ярмолюк, 2016].

Большое значение для решения вопросов зарождения и проявления субдукционных процессов имеет изучение сублитосферной мантии, подстилающей древние архейские кратоны. Интересна в этом отношении работа [Griffin, O'Reilly, 2007], посвященная изучению геохимии кратонной литосферной мантии. Как мы уже упоминали, субконтинентальная литосферная мантия не существовала на Земле как минимум до 3.5 млрд лет. Данные по Re-Os изотопной систематики дают основание считать, что значительная часть SCLM сформировалась в интервале 3.3—2.7 млрд лет, так как именно с этим интервалом времени связано появление первых свидетельств зарождающейся новой тектоники. Имеющиеся данные по архейским SCLM показывают, что литосферная мантия под кратонами в сравнении с одноименными породами офиолитовых комплексов четко различается по содержанию железа относительно магния, а также значительно меньшими содержаниями Li и B (рис. 10) в них [Griffin, O'Reilly, 2007]. Высокие содержания Li и B в офиолитовых перидотитах связаны с накоплением в океанических ультраосновных породах этих элементов при серпентинизации [Griffin, O'Reilly, 2007]. Таким образом, четко проявлено различие древних SCLM и поздних, фанерозойских. Однако в ряде случаев отмечается, что в единых разрезах можно наблюдать чередование обоих типов перидотитов. На наш взгляд, это может происходить во время перехода древнего, архейского стиля тектоники в молодой современный.

Считаем необходимым кратко остановиться на металлогенических особенностях архейского периода Земли. Ряд вопросов по металлогении рассмотрены в книге «Mineral Deposits and Earth Evolution», изданной в 2005 г. Геологической службой Британии в Лондоне. Наиболее полный обзор дан в статье [Groves et al., 2005]. Авторы с использованием большого количества материалов из разных источников рассмотрели распределение различных рудных месторождений во времени. Один из важных выводов заключается в том, что большая часть руд разных генетических типов формировалась начиная с 2.7 млрд лет и в более молодое время. Крупнейшее Cu-Ni с Pt месторождение Садбери имеет возраст около 1.9 млрд лет, а крупнейшее Норильское — 250 млн лет. Первые значительные по масштабам месторождения имеют возраст порядка 2.7 млрд лет, крупные золотые и порфиновые медно-золотые месторождения также сформировались 2.7 млрд лет тому назад, а наибольшее количество таких месторождений образовались преимущественно в фанерозое. Аналогичные данные приведены авторами [Groves et al., 2005] по сульфидным месторождениям, связанным с вулканитами, по золотым орогеническим золото-рудным месторождениям, медно-золотым, полиметаллическим с золотом и серебром. Наиболее крупное золотое россыпное месторождение Видватерсрант также имеет возраст порядка 2.7 млрд лет. Проведенный обзор металлогении различного типа позволяет сделать важный вывод, что в раннем докембрии идет подготовка как кратонов, так и субконтинентальной литосферной мантии (SCLM) к формированию рудных месторождений в более поздние времена [Groves et al., 2005; Begg, et al., 2010;

Griffin, et al., 2013]. С этим выводом трудно не согласиться. В то же время надо учитывать, что с древними архейскими кратонами, расположенными в настоящее время на разных континентах, в протерозое и фанерозое ассоциируют различные типы полезных ископаемых. В связи с этим оценку металлогенической специализации, заключенную в кратоне и всех SCLM в докембрийское время, которое реализуется позднее, следует изучать при исследовании формирования архейских геологических структур.

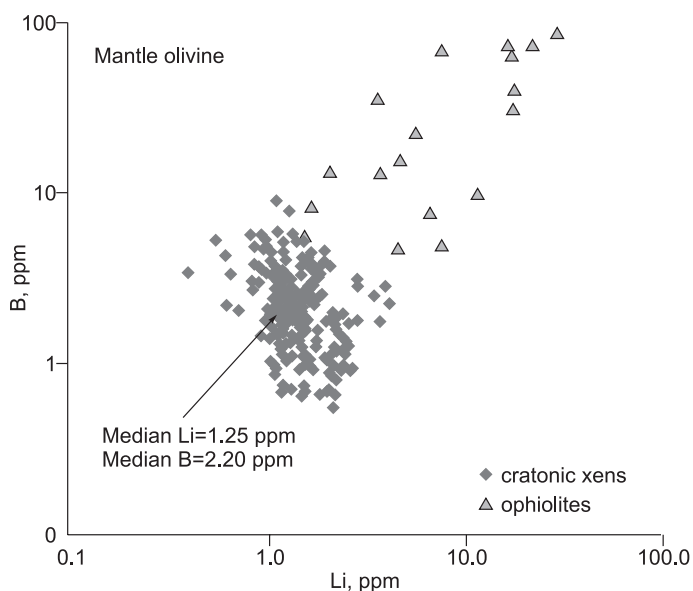


Рис. 10. График содержания Li и B в оливинах из перидотитовых ксенолитов, отобранных в Сибири и Южной Африке, и в оливинах из перидотитов офиолитовых разрезов Альп, по [Griffin, O'Reilly, 2007].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении кратко изложим намечаемую схему тектонической активности Земли в начальные периоды ее эволюции, пока не наступило время современной тектоники, которая подробно рассмотрена в работе [Кузьмин, Ярмолюк, 2016]. Мы прекрасно понимаем, что предлагаемая схема древнейшей тектонической активности Земли является в какой-то мере предварительной.

1. Начало формирования Солнечной системы из пылегазового диска (туманности) 4568 млн лет. Оно началось с формирования самого Солнца и окружающих его планет. Этот этап в истории нашей планеты выделяется как **Хаотичный** эон, который продолжался 50—100 млн лет. В этом интервале времени завершилось формирование тела планеты, прошла первичная дифференциация ее недр с образованием железного ядра, Земля приобрела своего спутника — Луну.

2. История геологии Земли начинается с **Гаденского** эона, т. е. примерно с 4500 млн лет назад. В этот эон формировалась первая континентальная кора, реликты которой сохранились в виде обломков кристаллов цирконов. Особенностью эона является то, что отвечающие ему комплексы, по-видимому, отсутствуют в структурах континентальной коры. Это связано с тем, что в соответствующий период времени Земля подвергалась интенсивной метеоритно-астероидной бомбардировке. В результате возникшая кора была раздроблена, погружена в мантию и переработана новыми формирующимися мантийными магмами.

Продолжительность Гаденского эона до 4.0 млрд лет, причем рост гаденской континентальной коры достиг пика около 4.25 млрд лет. Изотопные и редкоэлементные характеристики гаденских цирконов позволяют во многом определить характер и стиль тектонических процессов того времени. Зональность цирконов и отсутствие их материнских пород указывают на постоянные процессы рециклинга, первичная кора погружалась в мантию и ассимилировалась, только цирконы могли при этом сохраняться. В дальнейшем они возвращались на поверхность с новыми порциями мантийных магм, имеющих базальт-коматиитовый состав. Дифференциация этих мантийных магм могла обеспечивать небольшие объемы гранитоидных расплавов, из которых кристаллизовались цирконы. Поверхностные условия на Земле были «близки» к современным. В атмосфере, очевидно, присутствовал свободный кислород, способствовавший проявлению окислительных условий в среде образования цирконов. Гаденская кора, возможно, образовывала единую покрывку, подобную лунной поверхности.

Однако при формировании континентальной коры, обогащенной некогерентными элементами, возник также обогащенный мантийный резервуар (EER). Он формировался за счет взаимодействия мантийных магм с низами коры, что обеспечивало его относительную обогащенность несовместимыми элементами. Этот резервуар прилегал к коре и совместно с ней вовлекался в рециклирование. Гаденский EER был зафиксирован в коматиитах зеленокаменного пояса на северо-западе Канады. Возможно, следы подобной мантии можно будет найти в продуктах мантийных плюмов различного возраста.

3. Если в гаденское время были массивированные метеоритно-астероидные атаки, то после 4.0—3.9 млрд лет они стали не такие массивированные, но тем не менее еще долгое время разбивали спокойную (стагнированную) поверхность Земли, под которой продолжалась общемантийная конвекция. Рост толщины коры сопровождался погружением ее нижних горизонтов глубоко в мантию. Возникшие в ее строении амфиболиты, возможно, и эклогиты вовлекались в плавление и давали гранитоидные комплексы TTG типа. Через какое-то время начала формироваться субконтинентальная литосферная мантия, существенно отличающаяся от современной SCLM, возникшей в результате механизмов тектоники плит. Постепенное охлаждение Земли привело к тому, что в интервале времени 3.4 до 2.7 млрд лет назад произошло формирование внутреннего железного ядра, а с 2.7 до 2.0 млрд лет на границе ядро—мантия образовался слой D'' с постперовскитом — и начался современный стиль тектонических движений на Земле.

4. Таким образом, в настоящей работе предлагается возможная модель ранней эндогенной активности Земли, которая в последнее время выделяется как LID-tectonics (тектоника спокойной покрывки), она осложняется тектоникой мантийных переворотов, которые вызывались метеоритно-астероидными бомбардировками. В начальный период геологической эволюции Земли (Гаденский эон) такие бомбардировки были настолько интенсивные, что первичные породы коры, образованные в то время, не сохранились.

Важное положение о ранней тектонике Земли высказано в работе [Добрецов, Туркина, 2015]. Эти авторы отметили, что «наиболее ранний этап, по-видимому, характеризуется нестабильным тектоническим режимом». На примере офиолитов серии Исуа (Юго-Западная Гренландия) [Furnes et al., 2007], эти авторы отмечают, что наличие коматиитов, бонинитов и анортзитов определяет специфику некоторых комплексов древних офиолитов. Разрезы офиолитового типа в Гренландии и Южной Африке имеют возрастные уровни: 3.85—3.80; 3.50—3.54; 3—1 млрд лет, и они ассоциируются с комплексами TTG [Добрецов, Туркина, 2015]. По мнению этих авторов, геодинамические обстановки этого временного периода в какой-то степени можно сравнить с малыми океаническими бассейнами юго-западной части

Тихого океана. В работе [Nebel et al., 2014b], наряду с предложенной моделью общемантийной конвекции, имеющей место при тектонике спокойной покрывки и мантийных переворотов, авторы предполагают, что в архее данный стиль тектоники нарушается непродолжительными периодами субдукционных процессов, сопоставимых с геодинамическими обстановками тектоники плит. Представляется, что если гаденский стиль тектоники сменяется даже непродолжительно тектоникой типа тектоники плит, это требует перестройки процессов, связанных с мантией, т. е. перестройкой эндогенной геодинамики. Очевидно, данный вопрос требует детального исследования в будущем. Одним из методов решения этой проблемы может быть определение особенностей состава SCLM под архейскими кратонами, имеющими различный возраст.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (грант 13-05-12026 офи_м, 14-05-00887), а также интеграционного проекта СО РАН № 87 за 2011—2014 гг.

ЛИТЕРАТУРА

Галимов Э.М., Кривцов А.М., Забродин А.В., Легкоступов М.С., Энеев Т.М., Сидоров Ю.И. Динамическая модель образования системы Земля—Луна // *Геохимия*, 2005, № 11, с. 1139—1150.

Глуховский М.З., Кузьмин М.И. Внеземные факторы и их роль в тектонической эволюции Земли в раннем докембрии // *Геология и геофизика*, 2015, т. 56 (7), с. 1225—1249.

Глуховский М.З., Моралёв В.М., Кузьмин М.И. Горячий пояс ранней Земли и его эволюция // *Геотектоника*, 1994, № 5, с. 3—18.

Добрецов Н.Л., Туркина О.М. Раннедокембрийская история Земли: роль плейт- и плюм-тектоники и космического фактора // *Геология и геофизика*, 2015, т. 56 (7), с. 1250—1274.

Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А. Глубинная геодинамика. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2001, 409 с.

Добрецов Н.Л., Борисенко А.С., Изох А.Э., Жмодик С.М. Термохимическая модель пермотриасовых мантийных плюмов Евразии как основа для выявления закономерностей формирования и прогноза медно-никелевых, благородно- и редкометалльных месторождений // *Геология и геофизика*, 2010, т. 51 (9), с. 1159—1187.

Жарков В.Н. Об истории лунной орбиты // *Астрон. вестник*, 2000, т. 34, № 1, с. 3—14.

Кузьмин М.И. Докембрийская история зарождения и эволюции Солнечной системы и Земли. Статья I // *Geodynamics & Tectonophysics*, 2014a, v. 5, № 3, p. 625—640.

Кузьмин М.И. К новой парадигме геологии // *Природа*, 2014b, № 7, с. 49—58.

Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В. Тектоника плит и мантийные плюмы — основа эндогенной тектонической активности Земли последние 2 млрд лет // *Геология и геофизика*, 2016, т. 57 (1), с. 11—30.

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

Хаин В.Е. О главных направлениях в современных науках о Земле // *Вестник РАН*, 2009, т. 79, № 1, с. 50—56.

Хаин В.Е. Об основных принципах построения подлинно глобальной модели динамики Земли // *Геология и геофизика*, 2010, т. 51 (6), с. 753—760.

Хейзен Р. История Земли от звездной пыли — к живой планете. М., Династия, 2015 (пер. с англ.).

Allegre C.J., Poirier J.P., Humler E., Hofmann A.W. The chemical composition of the Earth // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1995, v. 134 (3—4), p. 515—526. [http://dx.doi.org/10.1016/0012-821X\(95\)00123-T](http://dx.doi.org/10.1016/0012-821X(95)00123-T).

Arndt N.T., Leshar C.M., Barnes S.J. Komatiite. Cambridge, Cambridge University Press, 2008, 467 p.

Begg G.C., Hronsky J.A.M., Arndt N.T., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Hayward N. Lithospheric, cratonic, and geodynamic Setting of Ni-Cu-PGE sulfide deposits // *Econ. Geol.*, 2010, v. 105, p. 1057—1070.

Beyer E.E., Brueckner H.K., Griffin W.L., O'Reilly S.Y. Laurentian provenance of Archean mantle fragments in Proterozoic Baltic crust of the Norwegian Caledonides // *J. Petrol.* v. 53, p. 1357—1383.

Binder A.B. The Moon: Its figure and orbital evolution. *Geophys. Res. Lett.*, 1982, v. 9(1), p. 33—36. <http://dx.doi.org/10.1029/GL009i001p00033>.

Bottke W.F., Vokrouhlicky D., Minton D., Nesvorný D., Morbidelli A., Brasser R., Simonson B., Levison H.F. An Archean heavy bombardment from a destabilized extension of the asteroid belt // *Nature*, 2012, v. 485, p. 78—81.

Bouvier A., Vervoort J.D., Patchett P.J. The Lu-Hf and Sm-Nd isotopic composition of CHUR: constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets / *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2008, v. 273, p. 48—57.

Bowring S.A., Housh T. The Earth's early evolution // *Science*, 1995, v. 269, p. 1535—1540.

Campbell I.H., Griffiths R.W. The changing nature of mantle hotspots through time—implications for the chemical evolution of the mantle // *J. Geol.*, 1992, v. 100(5), p. 497—523.

- Campbell I., Griffiths R.** Did the formation of D' cause the Archaean—Proterozoic transition? // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2014, v. 388, p. 1—8.
- Compston W., Pidgeon R.T.** Jack Hills, evidence of more very old detrital zircons in Western Australia // *Nature*, 1986, v. 321, p. 766—769. <http://dx.doi.org/10.1038/321766a0>
- Condie K.C.** Earth as an evolving planetary system. Elsevier, 2011, 574 p.
- Condie K.C., Aster R.C.** Episodic zircon age spectra of orogenic granitoids: the supercontinent connection and continental growth // *Precamb. Res.*, 2010, v. 180, p. 27—236.
- Davies G.F.** On the emerge of plate tectonics // *Geology*, 1992, v. 20 (11), p. 963—966.
- De Wit M.J., Ashwal J.D.** Greenstone belts: what are they? // *South African J. Geol.*, 1995, v. 98, p. 505—520.
- Debaille V., O'Neill C., Brandon A.D., Haenecour P., Yin Q.-Z., Mattielli N., Treiman A.H.** Stagnant-tid tectonics in early Earth revealed by ^{142}Nd variations in late Archean rocks // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2013, v. 373, p. 83—92.
- Elkins-Tanton L.T., Zaranek S.E., Parmentier E.M., Hess P.C.** Early magnetic field and magmatic activity on Mars from magma ocean cumulate overturn // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2005, v. 236 (1—2), p. 1—12.
- Ernst R.E.** Large Igneous Provinces. Cambridge, Cambridge University Press, 2014, 651 p.
- Ernst R., Bleeker W.** Large igneous provinces (LIPs), giant dyke swarms and mantle plume: significance for break-up events within Canada and adjacent region from 25 Ga to the present // *Can. J. Earth Sci.*, 2010, v. 47, p. 695—739.
- Furnes H., Dilek Y., De Wit M.J.** Precambrian greenstone sequences represent different ophiolite types // *Gondwana Res.*, 2015, v. 27, p. 649—685.
- 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>
- Grange M.L., Pidgeon R.T., Nemchin A.A., Timms N.E., Meyer C.** Interpreting the U-Pb data from primary and secondary features in lunar zircon // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2013, v. 101, p. 112—132. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2012.10.013>
- Griffin W.L., O'Reilly S.Y.** Cratonic lithospheric mantle: Is anything subducted? // *Episodes*, 2007, v. 30, № 1, p. 43—53.
- Griffin W.L., Begg G.A., O'Reilly E.Y.** Continental control on genesis of magmatic ore deposits // *Nature, Geoscience*, 2013, v. 6, p. 905—910.
- Griffin W.L., Belousova E.A., O'Neill C., O'Reilly S.Y., Malkovets V., Pearson N.J., Spetsius S., Wilde S.A.** The world turns over: Hadean—Archean crust—mantle evolution // *Lithos*, 2014, v. 189, p. 2—15.
- Groves D.I., Vielreicher R.M., Goldfarb R.J., Condie K.C.** Controls on the heterogeneous distribution of mineral deposits through time // *Geol. Soc. London, Special Publications*, 2005, v. 248, p. 71—101.
- Harrison T.M., Schmitt A.K., McCulloch M.T., Lovera O.M.** Early (≥ 4.5 Ga) formation of terrestrial crust: Lu—Hf, $\delta^{18}\text{O}$, and Ti thermometry results for Hadean zircons // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2008, v. 268, p. 476—486. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2008.02.011>
- Holden P., Lanc P., Ireland T.R., Harrison T.M., Foster J.J., Bruce Z.** Mass-spectrometric mining of Hadean zircons by automated SHRIMP multi-collector and single-collector U/Pb zircon age dating: The first 100,000 grains // *Int. J. Mass Spectrom.*, 2009, 286, 53—63. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijms.2009.06.007>
- Kinoshita N., Paul M., Kashiv Y., Collon P., Deibel C.M., Diglovine B., Greene J.P., Henderson D.J., Jiang C.L., Marley S.T., Nakanishi T., Pardo R.C., Rehm K.E., Robertson D., Scott R., Schmitt C., Tang X.D., Vondrasek R., Yokogama A.** A shorter ^{146}Sm half-life measured and implications for ^{146}Sm — ^{142}Nd chronology in the solar system // *Science*, 2012, v. 335, p. 1614—1617.
- Komiya T., Maruyama S., Masuda T., Nohda S., Hayashi M., Okamoto K.** Plate tectonics at 3.8—3.7 Ga: field evidence from the Isua accretionary complex, South-West Greenland // *J. Geol.*, 1999, v. 107, p. 515—554.
- Lauretta D.S.** A cosmochemical view of the Solar System // *Elements*, 2011, v. 7, p. 11—16. <http://dx.doi.org/10.2113/gselements.7.1.11>.
- 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 // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1992, v. 56, 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)
- Myers J.S.** Early Archean Narryer gneiss complex, Yilgarn Craton, Western Australia // *Precamb. Res.*, 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., Campbell I.H., Sossi P.A., Van Kranendonk M.J.** Hafnium and iron isotopes in early Archean komatiites record a plume-driven convection cycle in the Hadean Earth // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2014a, v. 397 (1), p. 111—120. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2014.04.028>

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

O'Neil J., Carlson R.W., Paquette J-L., Fransis D. Formation age and metamorphic history of the Nuvvuagittuq Greenstone Belt // *Precamb. Res.*, 2012, v. 220—221, p. 23—24.

Rasmussen B., Fletcher I.R., Muhling J.R., Gregory C.J., Wilde S.A. Metamorphic replacement of mineral inclusions in detrital zircon from Jack Hills: Implications for the Hadean Earth // *Geology*, 2011, v. 37, p. 1143—1146.

Taylor D.J., McKeegan K.D., Harrison T.M. Lu-Hf zircon evidence for rapid lunar differentiation // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2009, v. 279, p. 157—164. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2008.12.030>.

Valley J.W., Peck W.H., King E.M., Wide S.A. A cool early Earth // *Geology*, 2002, v. 30, № 3, p. 351—354.

Valley J.W., Jackey J.S., Cavosie A.J., Clechenko C.C., Spicuzza J.J., Basei M.A. 4.4 billion years of crustal maturation: oxygen isotope ratios in magmatic zircon // *Contrib. Miner. Petrol.*, 2005, v. 150, p. 561—580.

Veizer J., Mackenzie F.T. Evolution of sedimentary rocks // *Treatise on geochemistry*, Chap. 7.15. Amsterdam, Elsevier, 2003, p. 364—407.

Whipple F.L. *Orbiting the Sun. Planets and satellites of the Solar System.* Harvard Univ. Press, 1990, 344 p.

Wilde S.A., Valley J.W., Peck W.H., Graham C.M. Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago // *Nature*, 2001, v. 409, p. 175—178.

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, p. 767—771. <http://dx.doi.org/10.1038/nature09072>

Wood B.J., Walter M.J., Wade J. Accretion of the Earth and segregation of its core // *Nature*, 2006, v. 441(15), p. 825—833. <http://dx.doi.org/10.1038/nature04763>

*Поступила в редакцию
23 ноября 2015 г.*