

УДК 551.2

DOI: 10.24930/1681-9004-2018-18-5-653-671

РАННЯЯ ЭВОЛЮЦИЯ ЗЕМЛИ, НАЧАЛО ЕЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИСТОРИИ: КАК И КОГДА ПОЯВИЛИСЬ ГРАНИТОИДНЫЕ МАГМЫ

© 2018 г. М. И. Кузьмин¹, В. В. Ярмолюк², А. Б. Котов³¹Институт геохимии СО РАН (ИГХ СО РАН), 664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1А,
e-mail: mikuzmin@igc.irk.ru²Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ),
119017, г. Москва, Старомонетный пер., 35³Институт геологии и геохронологии докембрия РАН (ИГГД РАН),
199034, г. Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2

Поступила в редакцию 17.11.2017 г., принята к печати 11.01.2018 г.

Земля имеет ряд отличий от планет Солнечной системы и других звездно-планетных систем. Эти отличия она приобрела в процессе формирования и в течение своей геологической истории. В ранний хаотичный эон произошли аккреция Земли, разделение первичного вещества Земли на мантию и ядро, возник спутник Земли – Луна. Геологическая история Земли началась 4500 млн лет назад, в гадейский эон. В это время эндогенные процессы на Земле в существенной степени контролировались метеоритно-астероидными бомбардировками, вызывавшими масштабное плавление и дифференциацию верхних оболочек Земли. В магматических камерах протекала дифференциация вплоть до появления расплавов гранитоидного состава. Континентальная кора гадейского времени была почти вся уничтожена метеоритными бомбардировками, последняя тяжелая бомбардировка произошла в конце гадейского эона 4000–3900 млн лет назад. О геологической обстановке в гадейское время можно судить только по сохранившимся цирконам из пород той эпохи. В частности, их геохимические особенности свидетельствуют о наличии у Земли атмосферы. Гадейский эон сменился архейским, начиная с которого на Земле стали преобладать процессы самоорганизации. В это время формировалась кора, сложенная коматиит-базальтовыми и тоналит-трондьемит-гранодиоритовыми (ТТГ) сериями пород. В ее становлении ведущую роль играли процессы сагдукции – вертикального роста коры над поднимающимися мантийными плюмами. При этом низы базальтоидной коры погружались в мантию, эклогитизировались и плавилась, что приводило к появлению натриевых серий пород ТТГ. В конце архея (3.1–3.0 млрд лет назад) тектоника покрывки (LID tectonics), определявшая стиль строения и развития архейской коры, сменяется режимом тектоники малых плит, которая впоследствии постепенно сменилась современной тектоникой плит, совмещенной с тектоникой мантийных плюмов.

Ключевые слова: хаотичный и гадейский эоны, архейский период, LID-тектоника, тектоника плюмов, сагдукция, мантийная конвекция

THE EARLY EVOLUTION OF THE EARTH, THE BEGINNING OF ITS GEOLOGICAL HISTORY: HOW AND WHEN THE GRANITOID MAGMAS APPEARED

Mikhail I. Kuzmin¹, Vladimir V. Yarmolyuk², Alexander B. Kotov³¹Institute of Geochemistry SB RAS, 1A Favorsky st., Irkutsk, 664033 Russia, e-mail: mikuzmin@igc.irk.ru²Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry (IGEM RAS),
35 Staromonetny lane, Moscow, 119017 Russia³Institute of Geology and Geochronology of the Precambrian of the Russian Academy of Sciences (IGGD RAS),
2 quay Makarov, St. Petersburg, 199034 Russia

Received 17.11.2017, accepted 11.01.2018

The Earth has a number of differences from the planets of the Solar System and other star-planetary systems. These differences were acquired during its formation and geological history. In the early Chaotic eon occurred the accretion of the Earth, the separation of the primary substance of the Earth into a mantle and a nucleus, a satellite of the Earth – the Moon appeared. 4500 Ma ago in the Gadey aeon the geological history of the Earth began. At this time, the endogenous processes on the Earth were controlled to a great extent by meteorite-asteroid bombardments, which caused large-scale melting and differentiation of the upper shells of the Earth. In the magmatic chambers differentiation proceeded until the appearance of melts of granitoid composition. The continental crust of Gadey time was almost completely destroyed by meteoric

Для цитирования: Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В., Котов А.Б. (2018) Ранняя эволюция Земли, начало ее геологической истории: как и когда появились гранитоидные магмы. *Литосфера*, **18**(5), 653–671. DOI: 10.24930/1681-9004-2018-18-5-653-671

For citation: Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V., Kotov A.B. (2018) The early evolution of the Earth, the beginning of its geological history: how and when the granitoid magmas appeared. *Litosfera*, **18**(5), 653–671. DOI: 10.24930/1681-9004-2018-18-5-653-671

bombardments, the last heavy bombardment occurred at the end of the Gadey aeon 4000–3900 Ma ago. The geological situation of the Gadey time can be judged only from the preserved zircons from the rocks of that epoch. In particular, their geochemical features indicate that the Earth has an atmosphere. The Gadey eon was replaced by the Archean one, from which the processes of self-organization began to predominate on the Earth. At this time, a crust composed of komatiite-basalt and tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) series of rocks was formed. In its formation, the processes of sagduction (vertical growth of the crust) over the rising mantle plumes was played the leading role. At the same time the lower basaltic crust was buried in the mantle, eclogitized and melted, which led to the appearance of the sodium series of TTG rocks. At the end of the Archean 3.1–3.0 Ga tectonics of the cover (LID tectonics), which determined the style of the structure and development of the Archean crust, is replaced by the tectonics of small plates, which was later replaced by modern tectonics – the tectonics of plates combined with mantle plumes.

Key words: *Chaotic and Gadey eons, Archean period, LID tectonics, tectonics of plumes, sagduction, mantle convection*

ВВЕДЕНИЕ

Земля отличается от планет земной группы Солнечной системы, не найдено ей аналогов и среди планет 600 звездно-планетных систем, открытых в последние десятилетия в космосе. Не случайно авторы статьи “Рожденные из хаоса” [Батыгин и др., 2016] назвали нашу Землю “белой вороной”. Замечательный геолог К. Конди [Condie, 2011] в своей книге выделил ряд характеристик Земли, которые позволили ей стать колыбелью человечества. Характерные особенности нашей планеты, в том числе ее размер и масса, близкая к круговой орбита, наличие спутника – Луны, были сформированы в ходе зарождения Солнечной системы и затем в течение хаотичного эона [Goldblatt et al., 2010]. Другие важные ее характеристики, например разделение земных недр на ряд оболочек, в том числе континентальную кору со значительным объемом гранитоидов, а также атмосферу и гидросферу, Земля приобрела в ходе последующей своей истории. Первые граниты на Земле появились в гадейское время, а хорошо сохранившиеся до наших дней гранитоиды имели достаточно широкое распространение уже в архее. Особенности рождения и становления Земли как планеты, а также возможные механизмы формирования первых гранитоидных пород в гадее и архее будут рассмотрены в настоящей публикации.

Большое значение для расшифровки геологической истории нашей планеты имеет понимание того, когда появилась тектоника литосферных плит. Механизмы проявления эндогенных процессов, обусловленные этой теорией, хорошо изучены. Они описывают формирование основных геологических структур, таких как континенты, океаны, горно-складчатые сооружения. Не случайно в 2008 г. после соответствующей конференции был издан специальный выпуск Геологического научного общества Америки, в котором приведены статьи ряда крупнейших геологов, рассматривающих время начала тектоники плит на Земле. В своей статье, опубликованной в этом выпуске, К. Конди пишет: “Невероятно, чтобы тектоника плит на Земле как единое глобальное событие появи-

лось точно в определенное время ... более вероятно, что она началась локально, постепенно становясь широко распространенной от раннего к позднему архею”. К сожалению, даже в настоящее время известные японские геологи, такие как С. Маруяма [Maruyama, Ebisuzaki, 2017], предлагая новую модель происхождения Земли, названную ими ABEL, определяют точную дату появления тектоники плит 4.37–4.20 млрд лет. Близкое к этой дате время появления тектоники плит на Земле можно найти в работах и других геологов. Более осторожно и предусмотрительно о значении раннего стиля тектонических движений на Земле писал в том же выпуске “Геологического общества Америки” в 2008 г. Р. Штерн [Stern, 2008]: “... мы не сможем понять действующую систему Земли до тех пор, пока мы не поймем, когда действующий стиль тектоники плит начался, и какая тектоника на Земле была до этого”.

ВОЗНИКНОВЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ И РАННИЕ ЭТАПЫ ЕЕ ЭВОЛЮЦИИ

Солнечная система зародилась 4568 млн лет назад в недрах гигантского газово-пылевого облака. Важна причина образования такой протосолнечной туманности, в составе которой должно было находиться большое разнообразие химических элементов и различных коротко- и долгоживущих изотопов. Возможно, возникновению такого облака (туманности) способствовал взрыв сверхновой звезды в окрестностях будущей Солнечной системы. Такой взрыв массивной звезды за счет ядерных реакций обусловил синтез (нуклеосинтез) и, соответственно, появление разнообразных элементов, в частности радиоактивных изотопов. Этот взрыв мог стимулировать начало конденсации межзвездной материи в результате гравитационного сжатия. Короткоживущие изотопы и продукты их распада позволяют расшифровать ряд особенностей становления планетной Солнечной системы и, в частности, Земли.

Как показывают расчеты астрономов и планетологов, менее чем за 100 тыс. лет в центре газопылевого скопления (туманности) под воздействием гравитации возникла звезда – протосолнце. Оно

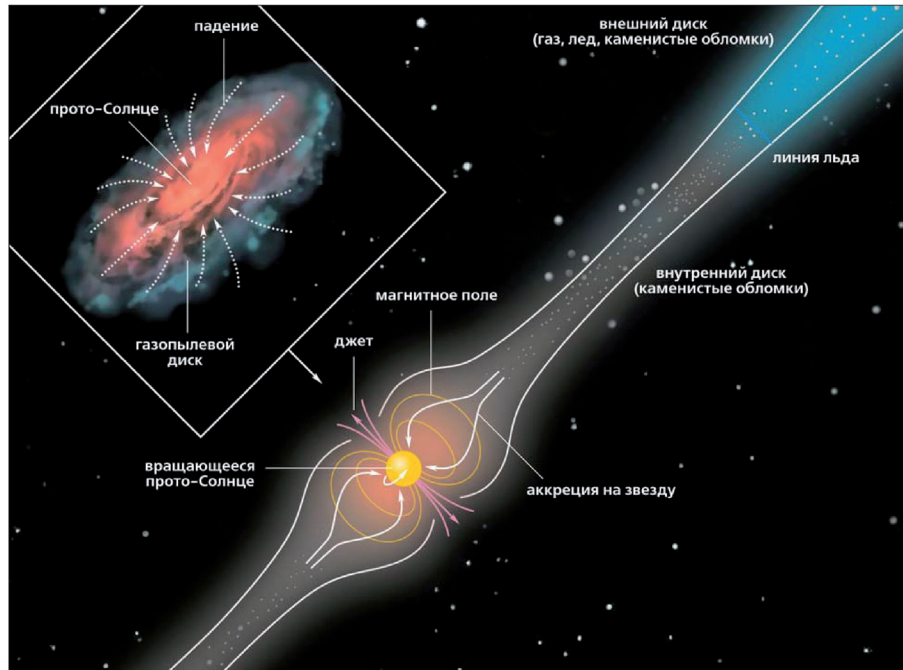


Рис. 1. Начальная стадия эволюции Солнечной системы 4568 млн лет назад [Батыгин и др., 2016].

Начало хаотичного эона Солнечной системы. Рождение Протосолнца. Образование внутренней области, состоящей из каменных обломков. Линия льда – внутренняя граница внешней газовой-ледяной области, в которой через 2 млн лет после рождения Солнечной системы сформировались планеты-гиганты Сатурн и Юпитер.

Fig. 1. The initial stage of the evolution of the solar system 4568 Ma ago [Batygin et al., 2016].

The beginning of the Chaotic Aeon of the Solar System. The birth of the Proto-Sun. Formation of an internal area consisting of stony fragments. Ice lines – internal border of external the gas-ice region, in which two million years after the birth of the solar system giant planets Saturn and Jupiter were formed.

было окружено широким кольцом из газа и пыли – протопланетным диском [Лин, 2008], который стал строительным материалом для планет Солнечной системы. При движении пылинок и газа они сталкивались, тормозились и по спирали многие из них падали на протозвезду. При столкновении твердые частицы нагревались, а вода и другие летучие с низкой температурой кипения испарялись – возникла естественная граница между областями протопланетного диска с преобладанием, с одной стороны, твердых частиц и, с другой, летучих. Она выделена как граница льда и располагается между орбитами Марса и Юпитера, разделяя Солнечную систему на внутреннюю область, где сформировались планеты земной группы, и внешнюю, где расположились газовые планеты-гиганты [Батыгин и др., 2016]. Такое разделение произошло примерно через 2 млн лет после начала формирования Солнечной системы (рис. 1).

Таким образом, первые 2 млн лет истории Солнечной системы стали временем формирования многочисленных планетных эмбрионов – планетозималей, а за линией льда – планет-гигантов Юпитера и Сатурна. Этим Солнечная система резко отличается от других планетных систем, где подоб-

ные гиганты расположены гораздо ближе к светилу. По образному выражению К. Батыгина с коллегами [2016], такие особенности Солнечной системы – “продукты ее молодости... включавшей больше драмы и хаоса”. Важным элементом первичного хаоса стало сложное взаимодействие гигантских периферийных планет. Впервые на это было обращено внимание в компьютерной модели Ф. Массе и М. Снэллгроува [Masset, Snellgrove, 2001], описавшей одновременно эволюцию в протопланетном диске орбит Сатурна и Юпитера. Эти исследователи показали, что в результате миграции к центру системы планеты-гиганты обрели определенную взаимную конфигурацию, благодаря которой они смогли воздействовать на протопланетный диск. Сложившийся баланс сил (гравитации, момента импульса, гравитационного влияния внешнего пояса комет и др.) изменил движение обеих планет.

Развивая эти идеи, К. Батыгин с коллегами [2016] показали, что главным эффектом смены направления движения планет-гигантов (смена галса) стала атака Юпитера и Сатурна на “население” первичных внутренних планет Солнечной системы, т.е. планет земной группы. Еще, двигаясь к Солнцу, гиганты возмущали движение мелких тел,

которые сталкивались и дробились, образуя рои обломков. За сотни тысяч лет такие рои могли сбросить на Солнце массы, соизмеримые с любой суперземлей (планеты, превосходящей Землю по массе). По мере того как бывшие суперземли падали на Солнце, они должны были оставлять за собой пустынную область в протопланетной туманности. Допускается, что, прежде чем сменить галс, Юпитер мигрировал к Солнцу до расстояния нынешней орбиты Марса. При этом он увлек за собой во внутреннюю область Солнечной системы ледяные скопления, очевидно, совместно с твердым материалом, составлявшие более 10 масс Земли, обогатив ее водой и другими летучими веществами. Такой сброс протопланет во внутренние участки Солнечной системы изменил орбитальный момент не только Юпитера, но и Сатурна и вызвал смену их движения в сторону от Солнца. Привнесенный планетами-гигантами “строительный материал” обеспечил достаточно большую массу планет Земля и Венера.

Постепенно планеты-путешественники стабилизировали свои орбиты. Этому способствовало их взаимодействие с другими планетами-гигантами (Нептуном и Ураном) и внешним поясом “ледяных” астероидов (поясом Койпера). Предполагается, что побочным эффектом такого уравнивания стал еще один вброс во внутреннюю область Солнечной системы потока обломков, который вызвал мощную астероидную бомбардировку внутренних планет. Шрамы от нее видны в виде гигантских кратеров на поверхности Луны, Меркурия и Марса, а на Земле они привели к практически полному уничтожению пород гадейской континентальной коры – первой коры в геологической истории нашей планеты. Около 3.9 млрд лет назад планеты-гиганты успокоились. Структура Солнечной системы стабилизировалась в том виде, в котором сейчас и наблюдается [Батыгин и др., 2016].

Астрономы выделяют хаотичный период разветвления Солнечной системы от начала ее образования до 4.0–3.9 млрд лет. В геологической литературе это время для планеты Земля характеризуется двумя зонами – хаотичным (4568–4500 млн лет) и гадейским (4500–4000/3900 млн лет) [Goldblatt et al., 2010].

ПЕРВЫЕ РАННИЕ ЭПОХИ СТАНОВЛЕНИЯ И ЭВОЛЮЦИИ ЗЕМЛИ

Хаотичный зон (4568–4500 млн лет).

В это время произошла аккреция Земли. Уже через 11 млн лет после начала формирования масса Земли составила 63%, а через 30 млн лет – 93% от современной [Wood, 2011]. В этот отрезок произошла дифференциация аккрецированного вещества Земли с выделением жидкого железо-никелевого ядра и

силикатной мантии, а также образование спутника Земли – Луны, вследствие катастрофического удара по Протоземле крупного космического тела.

Большое значение для расчета состава различных оболочек Земли имеют данные по составу протосолнечной туманности, из которой сформировалось Солнце и планеты Солнечной системы. В настоящее время установлено, что состав Солнца коррелируется с составом космической туманности, из которой вся эта система образовалась [Кузьмин, 2014]. Этому составу соответствуют углистые хондриты. Они имеют такой же состав, как и Солнце, за исключением водорода и гелия. Это хорошо видно на диаграмме (рис. 2), на которой приведено сопоставление относительных содержаний элементов на поверхности Солнца и в углистых хондритах [Wood, 2011]. Углистые хондриты отличаются от состава Солнца содержанием Li, который на Солнце уничтожается в ходе термоядерных реакций. Кроме того, содержания трех летучих компонента N, C, O в метеоритах понижены. Это вполне понятно, так как эти газы в начальный период (первые 2 млн лет) формирования Солнечной системы отгонялись во внешнюю ее часть, где были использованы в том числе и на образование газовых планет-гигантов. Как видно на данной диаграмме, 95% массы Солнечной системы (кроме H и He), а соответственно, и планет земной группы составляют Fe, O, Mg, Si и Ni и еще 9 элементов – Cu, Al, S, Cr, Ni, Mn, P, Ti и Co – вместе с названными – 99 % [Lauretta, 2011].

Знание состава “строительного материала” Земли – углистых хондритов – позволяет, учитывая геохимические свойства элементов, а также состав силикатной мантии Земли [Allègre et al., 1995; McDonough, Sun, 1995], оценить состав ядра Земли. В этом отношении имеет большое значение знание особенностей отдельных элементов по их сродству с железом, силикатными и летучими элементами [Allègre et al., 1995; Кузьмин, 2014]. Как показывает анализ, тугоплавкие литофильные элементы (Zr, Al, Sc, PЗЭ, Ti, Ca, Mg) находятся в силикатной Земле (т.е. в мантии) в том же количестве, что и в углистых хондритах. Содержания сидерофильных элементов в мантии понижены по отношению к хондриту, так как они накапливаются в ядре. Самые низкие содержания высокосидерофильных элементов (Pd, Pt, Re, Os и др.) в силикатной Земле. Они максимально концентрируются в ядре. Однако, судя по мантийным ксенолитам из кимберлитов, иногда отмечается некоторое увеличение этих элементов и в мантии, что может быть связано с “метеоритным дождем”, который захватил Землю после формирования большей части ядра [Wood, Halliday, 2010].

О времени формирования ядра позволяют судить данные о распределении в силикатной оболочке Земли продуктов изотопных систем с короткоживущими изотопами (рис. 3), в которых

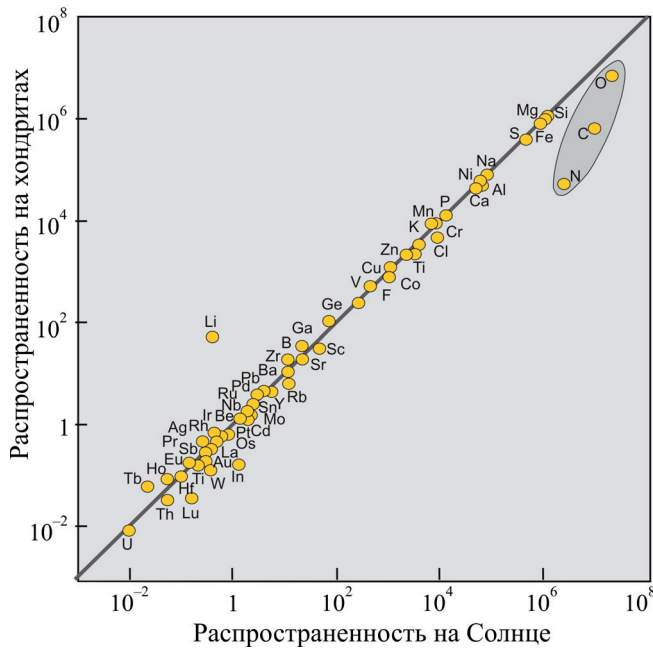


Рис. 2. Сопоставление распространенности элементов в углистых хондригах (CI) и на поверхности Солнца, по [Wood, 2011].

Содержание основной части петрогенных и редких элементов одинаково в Солнце и углистых метеоритах (CI). Исключение составляет Li, который на Солнце уничтожается при ядерных реакциях. Содержание летучих компонентов N, C, O в метеоритах меньше, чем в Солнце, так как в первые 1–2 млн лет большая часть этих летучих элементов была израсходована на образование газовых планет-гигантов во внешней зоне Солнечной системы.

Fig. 2. Comparison of the number of elements in carbonaceous chondrites (CI) and on the surface of the Sun, by [Wood, 2011].

The content of the main part of the petrogenic and rare elements is the same in the Sun and carbonaceous meteorites (CI). The exception is Li, which on the Sun is destroyed by nuclear reactions. The content of volatile components N, C, O in meteorites is less than in the Sun, since in the first 1–2 Ma most of these volatile elements were consumed to form gas giant planets in the outer zone of the solar system.

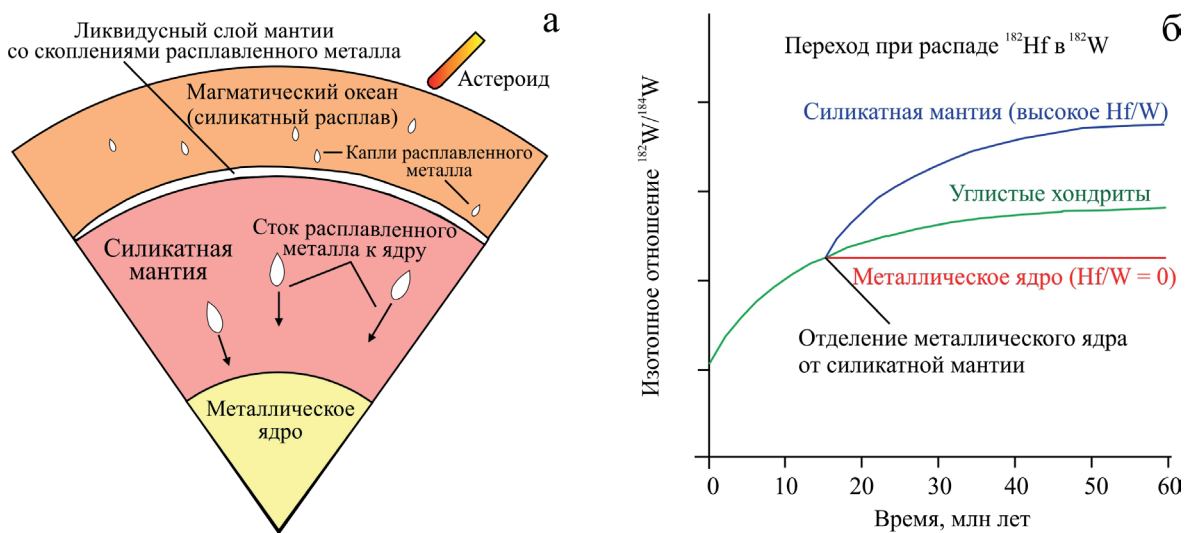


Рис. 3. Модель дифференциации Земли в процессе ее аккреции, по [Wood, 2011].

а. Формирование мантии и ядра на фоне бомбардировок Протоземли астероидно-метеоритными телами. Энергия соударения астероидов с Землей приводит к формированию больших магматических бассейнов глубиной до 400–700 км. Капли сидерофильных элементов образовывались при плавлении железокремнистого вещества астероидов (метеоритов) и погружались до дна магматического бассейна, где формировали скопления расплавленного металла, которые погружались через нижнюю мантию, наращивая ядро.

б. Время образования ядра на основе оценки возраста по $^{182}\text{Hf} \rightarrow ^{182}\text{W}$; $T_{1/2} = 8.9$ млн лет). На диаграмме в условных единицах приведены изменения отношения ($^{182}\text{W}/^{184}\text{W}$) в различных системах (железное ядро, углистые хондриты, силикатная мантия) во времени, по [Wood, 2011]. В соответствии с ними большая часть ядра сформировалась примерно через 20 млн лет, а через 50 млн лет – практически все ядро.

Fig. 3. Model of Earth differentiation in the process of its accretion, by [Wood, 2011].

а. Formation of mantle and nucleus against a background of bombardment of Proto-Earth by asteroid-meteorite bodies. The energy of asteroids' collision with the Earth led to the formation of large magmatic basins with a depth of 400–700 km. Drops of siderophilic elements formed during the melting of the iron-stone material of asteroids (meteorites) and were submerged to the bottom of the magmatic basin, where accumulations of molten metal, which plunged through the lower mantle, increasing the core.

б. The time of nucleation on the basis of an estimate of the age for $^{182}\text{Hf} \rightarrow ^{182}\text{W}$; $T_{1/2} = 8.9$. After about 20 Ma, most part of the nucleus was formed, after 50 Ma, almost all the nucleus was formed.

родительские и дочерние изотопы могли иметь разные геохимические свойства. В результате они по-разному вели себя в процессах дифференциации оболочек Земли. В этом отношении наиболее интересные результаты дала система $^{182}\text{Hf} \rightarrow ^{182}\text{W}$. В ней родительский изотоп ^{182}Hf с периодом полураспада около 9 млн лет практически исчез в течение первых 50 млн лет земной истории. В отличие от дочернего сидерофильного изотопа ^{182}W гафний – элемент литофильный. При дифференциации планеты на железное ядро и силикатную мантию ^{182}W стремился уйти в ядро, а ^{182}Hf оставался в мантии (см. рис. 3). Если бы ядро сформировалось сразу после аккреции, то дочерний изотоп остался бы вместе с родителем в мантии и соответствовал составу хондритов. Мантия, по сравнению с хондритом, обеднена вольфрамом ($\text{Hf}/\text{W} = 19$ и 1.1 соответственно), что указывает на формирование ядра в некотором интервале геологического времени, в течение которого вольфрам вместе с железом частично перераспределились в ядро. На основе изотопного состава вольфрама в земной мантии минимальное время, необходимое для образования ядра, оценивается в 34 ± 7 млн лет после начала аккреции Земли [Костицын, 2012].

Таким образом, дифференциация вещества Земли началась практически с момента ее образования. Столкновение формирующейся планеты с крупными астероидами, а также тепло радиоактивного распада (в первую очередь короткоживущих изотопов) вызывали плавление ее силикатной оболочки вплоть до образования магматических “океанов”. При высокой температуре и давлении 20–23 ГПа происходило разделение магмы на силикатный и железный расплавы [Wood, 2011]. Уже через первые 5–8 млн лет объем Земли был близок к половине его нынешнего размера. Удары крупных астероидов могли образовывать магматические бассейны глубиной до 400 км. Расплавы железа, как более тяжелые, накапливались на его дне, а затем “проваливались” вниз, наращивая ядро [Wood, 2011].

Важнейшим событием для Земли стало образование Луны (рис. 4), случившееся приблизительно через 30 млн лет после зарождения Солнечной системы. Предлагались разные сценарии ее формирования: отделение от протопланеты ее фрагмента, совместное образование двойной планеты, захват Землей самостоятельного космического тела. Имеющиеся факты наиболее согласуются с импактным происхождением Луны. Она возникла в результате столкновения Земли с космическим телом Тейя (Theia), масса которого (около 0.14% массы Земли) была близка к массе Марса, а скорость столкновения составляла около 5 км/с [Condie, 2011]. На Земле к этому времени практически сформировалось ядро, отделившееся от мантии, была атмосфера, подобная той, что на Венере (этот пример показывает, какой была бы ат-

мосфера Земли, если бы она не пережила столь крупного столкновения).

При обсуждении первых моделей образования Луны вследствие импакта были подняты вопросы [Cameron, 1986; Hartmann, 1986], которые затрудняли окончательно принять предлагаемую модель. Они касались прежде всего состава космического тела, с которым столкнулась Протоземля. В настоящее время, после определения состава лунного грунта, этот вопрос можно считать решенным. Породы Луны имеют такой же изотопный состав кислорода, как породы Земли, в них также отмечается дефицит сидерофильных элементов. Данный факт позволяет полагать, что космическое тело, названное Тейя формировалось во внутренней зоне Солнечной системы, вместе с другими планетами земной группы. Соответственно, как и у Протоземли, у Тейя уже были сформированы ядро и мантия. В 1989 г. было проведено компьютерное моделирование [Newsom, Taylor, 1989], которое показало, что вследствие удара силикатная (мантийная) часть этого космического тела вместе с мантией Земли перешли в расплавно-пылевой след импакта, а железное ядро этого космического тела соединилось с ядром протоземли. На рис. 4а показаны отдельные моменты, полученные при компьютерном моделировании столкновения Земли с Тейя. Как считают Н. Newsom и S. Taylor [1989], процесс формирования Луны завершился не более чем за первые сотни лет.

На рис. 4б показана схема столкновения и формирования Луны из расплавно-пылевого облака, образованного при импакте, связанного со столкновением протоземли с космическим телом Тейя. Это облако состояло из расплавленных силикатов мантии столкнувшихся тел, пылевых силикатных частиц, а также, возможно, из газов атмосферы протоземли. Скорее всего, это облако было вытянуто по направлению столкновения Земли с космическим телом. Ядро Тейя проникло к ядру Земли, наращивая его. На периферии облака из его расплавленной части стала аккретироваться Луна. Как показывает сравнительный геохимический анализ силикатной части Земли и Луны [Condie, 2011], тугоплавкие оксиды (по классификации К. Конди) (Ca, Sc, Ti, Th) обогатили лунные породы, летучие литофильные элементы (Na, K, Rb, Sr) и особенно сидерофильные (Co, Ni) в лунных породах, по сравнению с земными, деплетированы. Такие геохимические характеристики вполне объяснимы. Луна кристаллизовалась из внутренних участков расплавленного силикатного диска импактного облака, поэтому она несколько обогащена тугоплавкими элементами, литофильные (летучие, по [Condie, 2011]) элементы имеют более низкие температурные конденсации, они обогащают земные породы. Сидерофильные элементы при аккреции и начальной дифференциации сконцентрированы в ядрах двух планетных тел. Летучие компоненты – атмосфера Протоземли –

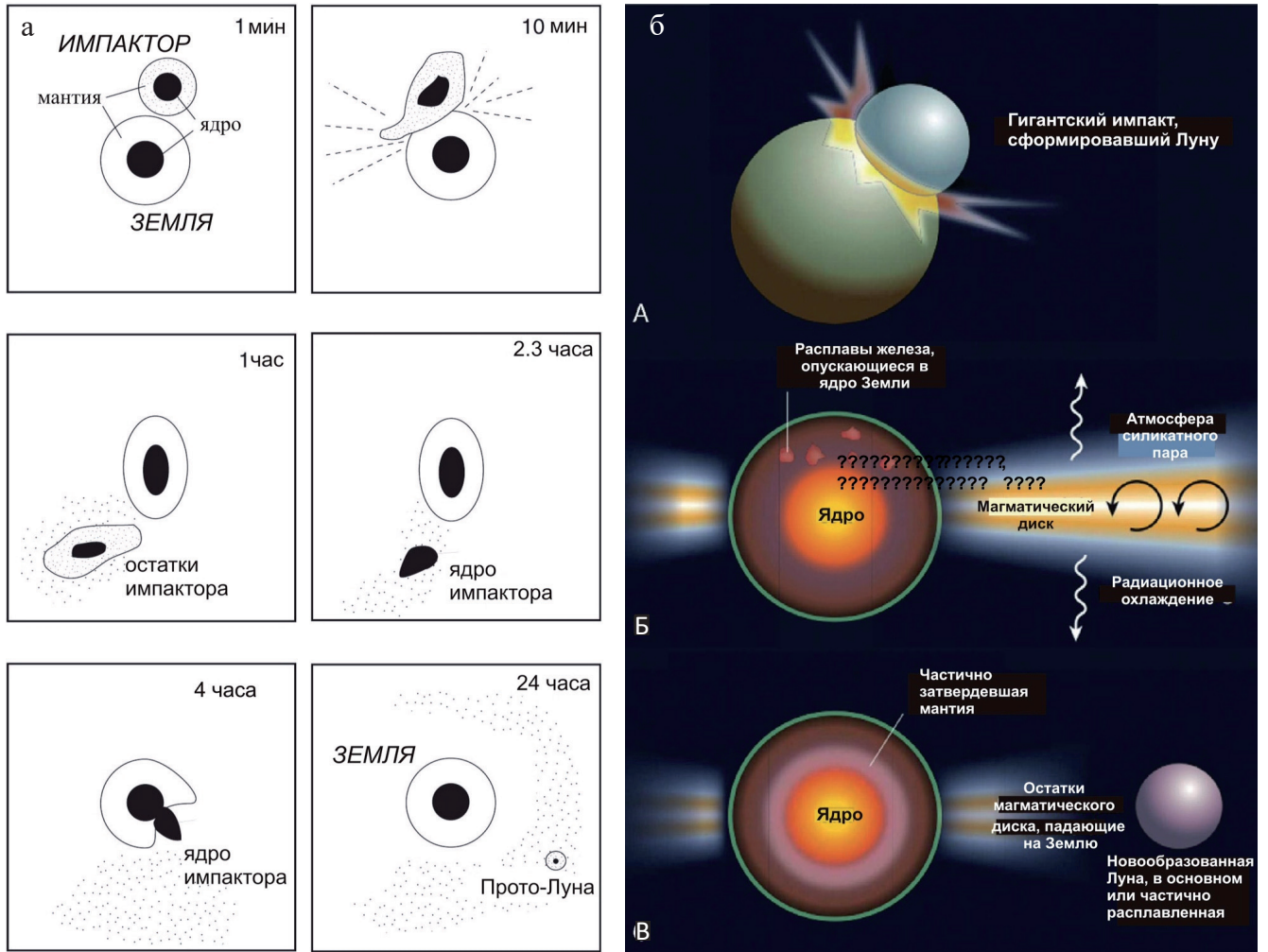


Рис. 4. Образование Луны в результате столкновения Земли с космическим телом Тейя.

4а. Компьютерное моделирование столкновения Земли и Тейя и образования Луны, по [Newsom, Taylor, 1989].

Время процесса зарождения Луны по модели 24 ч. По мнению авторов модели, завершение образования Луны после столкновения заняло не более сотен лет.

4б. Модель образования Луны [Condie, 2011].

А. Планетный эмбрион (Тейя) столкнулся с почти сформированной Землей.

Б. После столкновения сформировался расплавно-пылевой диск, вытянутый в направлении места образования Луны.

В. На периферии диска сформировалась Луна; около ядра Земли закристаллизовалась мантия.

Fig. 4. The formation of the Moon as a result of a collision of the Earth with the cosmic body of Theia.

4a – Computer simulation of the collision of the Earth and Theia and the formation of the Moon, by [Newsom, Taylor, 1989].

The time of the process of the birth of the moon is 24 h. According to the authors of the model, the completion of the formation of the Moon after the collision took no more than hundreds of years.

4b – Model of the formation of the Moon [Condie, 2011].

A. The planetary embryo (Theia) collided with the almost formed Earth.

Б. After the collision, a melt-dust disk formed in the direction of the location of the formation of the Moon.

В. The Moon formed on the periphery of the disk; the mantle crystallized around the core of the Earth.

поступили в атмосферу Земли после ее остывания. Это подтверждается наличием кислорода в земной атмосфере в начале гадейского эона.

Все эти события, учитывая кристаллизацию Лунного и Земного магматического океана, который на Земле имел мощность порядка 700 км, а может быть и более, закончились к рубежу 4520–4505 млн лет, так как уже 4500 млн лет назад Луна и Земля были

твердыми, что зафиксировано следами метеоритных бомбардировок на поверхности Луны.

Гадейский эон

Выделение гадейского эона произошло в 80-х гг. XX в., когда в Западной Австралии в обнажениях Джек Хиллс (Jack Hills) в осадочных метаморфозо-

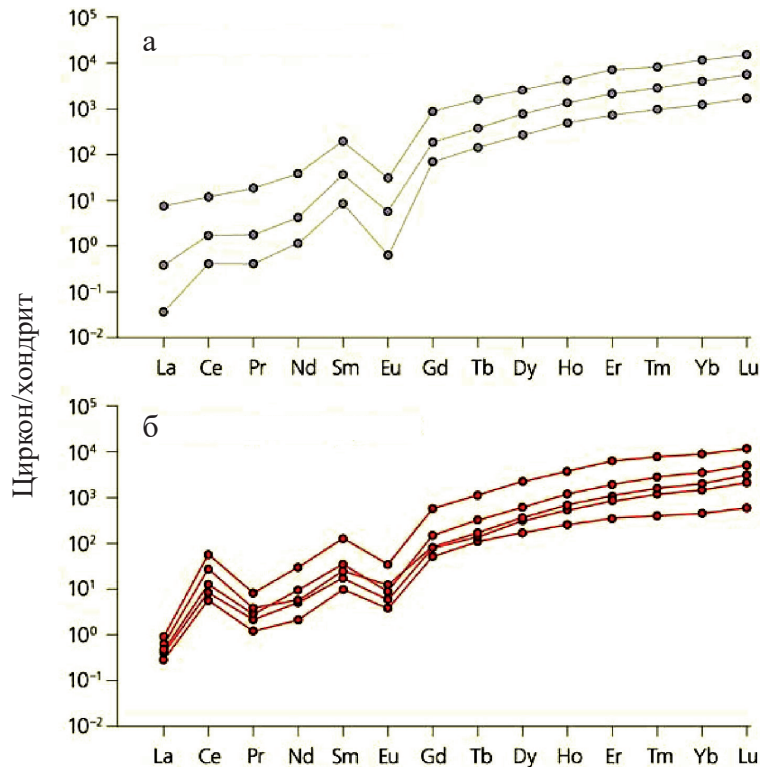


Рис. 5. Графики нормированных по хондриту содержаний редкоземельных элементов в лунных (а – по [Taylor et al., 2009]) и гадейских (б – по [Maas et al., 1992]) цирконах.

Возраст лунных и гадейских цирконов 4.0–4.4 млрд лет. Температура образования лунных цирконов 975–1150°C [Taylor et al., 2009], гадейских $\approx 700^\circ\text{C}$ [Harrison et al., 2008].

Fig. 5. Chondrite-normalized graphs of the contents of rare-earth elements in the lunar ones (a; by [Taylor et al., 2009]) and gadeian (б; according to [Maas et al., 1992]) zircons.

Age of the lunar and Gadeian zircon 4.0–4.4 Ga. The temperature of formation of lunar zircons is 975–1150°C [Taylor et al., 2009], Gadeian $\approx 700^\circ\text{C}$ [Harrison et al., 2008].

ванных породах были обнаружены цирконы с возрастом 4376 млн лет [Myers, 1988]. Этот период – начало геологической истории Земли. Вначале были большие сомнения, можно ли раскрыть условия формирования первых пород на Земле, опираясь на столь скудный материал, как сохранившиеся от тех пород акцессорные минералы. Однако уже в текущем XXI в. в связи с развитием современных аналитических методов исследования были получены ощутимые результаты, позволяющие понять геологическую ситуацию на Земле в гадейское время.

Результаты детальных исследований гадейских цирконов приведены в работе [Nebel et al., 2014], кроме того, последние данные об исследованиях геологической обстановки гадейского эона даны в [Кузьмин, 2014; Кузьмин, Ярмолюк, 2016; и др.]. Первые результаты по содержанию редких элементов в гадейских цирконах были получены Р. Маасом и коллегами [Maas et al., 1992]. Они показали, что эти цирконы имеют содержания $\text{Hf} = 0.86\text{--}1.30 \text{ мас. } \%$, $\text{Zr}/\text{Hf} = 30\text{--}57$; фракционированное распределение РЗЭ (высокое отношение $\text{TPЗЭ}/\text{LPЗЭ}$), характери-

зуются положительной Се и отрицательной Eu аномалиями. Эти же исследователи обнаружили присутствие в цирконах включений калиевого полевого шпата, кварца, плагиоклаза, моноцита и апатита, что позволило авторам исследований сделать заключение о гранитном составе источника гадейских цирконов.

Большое значение для восстановления условий кристаллизации цирконов в гадейское время имели исследования в них изотопного состава кислорода. Необходимо указать, что изотопы кислорода могут фракционировать во время магматической дифференциации. Изотопный состав пород может быть существенно изменен в процессах выветривания, когда продукты выветривания обогащаются тяжелым изотопом кислорода по сравнению с первичными породами. Соответствующие изменения изотопного состава кислорода были установлены в гадейских цирконах, что позволило сделать вывод о том, что: 1) в гадейское время действовали процессы выветривания, подобные современным; 2) процессы образования гранитоидных расплавов протекали в близповерхностных условиях [Nebel et al., 2014].

Большое значение для понимания геологических процессов в гадейское время имело открытие цирконов на Луне. Последние [Taylor et al., 2009], как и гадейские [Nebel et al., 2014], имеют одинаковый возраст 4.0–4.4 млрд лет, но температуры их образования различны: гадейские цирконы кристаллизовались при $\approx 700^\circ\text{C}$ [Harrison et al., 2008], а лунные – при $975\text{--}1150^\circ\text{C}$ [Taylor et al., 2009]. Нормированные графики распределения РЗЭ в лунных (рис. 5а) и гадейских (рис. 5б) цирконах близкие и характеризуются преобладанием тяжелых редкоземельных элементов над легкими. При этом лунные цирконы отличаются от гадейских отсутствием положительной аномалии Се, соответственно, они формировались в восстановительной среде. Важный вывод по лунным кристаллам цирконов был сделан при изучении микроструктуры цирконов [Grange et al., 2013]. В них встречены локальные участки перекристаллизации, локализованные аморфные участки, кристаллопластические деформации и разрывы, трещины, т.е. типичные следы импактных структур.

Учитывая близкое по космическим масштабам расположение Луны и Земли, ясно, что эти два космических тела одновременно подвергались метеоритно-астероидным бомбардировкам. На Луне эти бомбардировки зафиксированы многочисленными метеоритными кратерами. На Земле эти бомбардировки вызывали постоянное уничтожение создаваемой континентальной коры, которая погружалась в мантию и расплавлялась. При этом тугоплавкие кристаллы цирконов сохранялись и с новыми порциями основных мантийных магм в результате мантийных переворотов (мантийных плюмов) изливались на поверхность, дифференцировались, а из малых объемов гранитоидных расплавов кристаллизовались зональные цирконы. Таким был своеобразный рециклинг гадейской континентальной коры, о котором свидетельствуют зональные гадейские цирконы [Nebel et al., 2014].

Несмотря на тяжелую бомбардировку планет земной группы, которая была вызвана, как было упомянуто ранее, стабилизацией орбит планет-гигантов Сатурна и Юпитера, маленький остаток первичной коры гадейского эона все же сохранился и был открыт и подробно описан в работе [O'Neil et al., 2012]. Эти древнейшие породы Земли обнаружены в самые последние годы в Нуввуагитутском (Nuvvuagittuq) зеленокаменном поясе на северо-восточном побережье Гудзонского залива в Канаде. Его центральная часть (серия Ujaraaluk) сложена основными и ультраосновными вулканическими и интрузивными породами. Возраст пород оценен по соотношению продуктов распада короткоживущей ($^{146}\text{Sm} \rightarrow ^{142}\text{Nd}$; $T_{1/2} = 68$ млн лет) и долгоживущей ($^{147}\text{Sm} \rightarrow ^{143}\text{Nd}$; $T_{1/2} = 106$ млрд лет) изотопных систем и составил около 4400 млн лет. Полученные оценки позволяют говорить об этих породах как о древней-

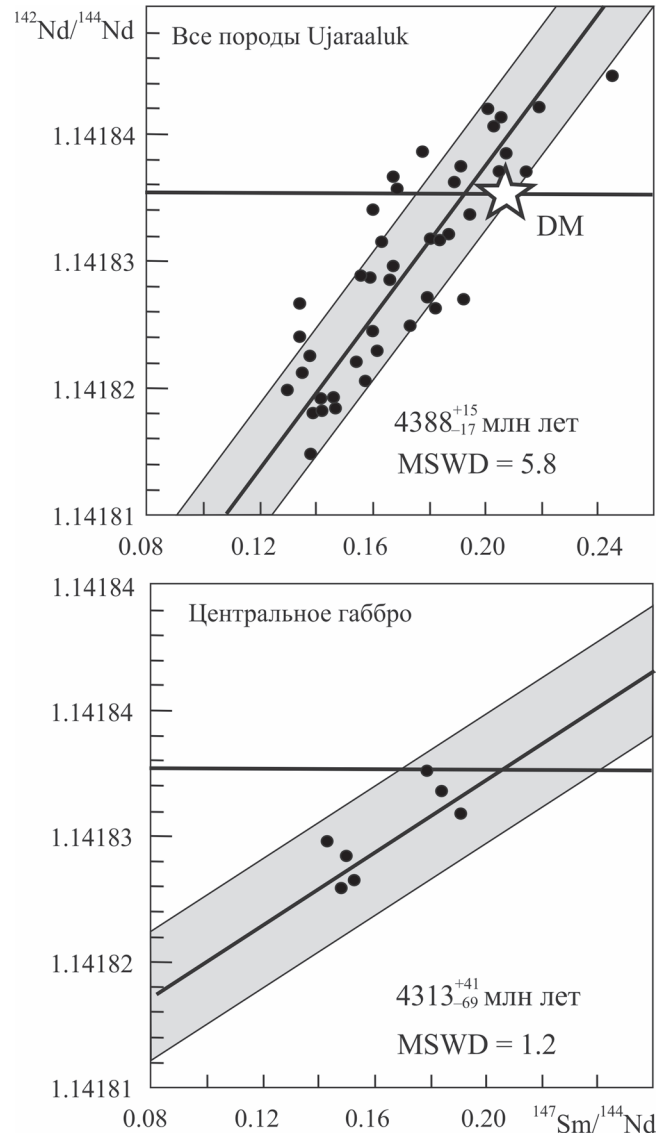


Рис. 6. Возраст пород серии Ujaraaluk по данным использования двух изотопных пар $^{147}\text{Sm} \rightarrow ^{143}\text{Nd}$, $T_{1/2} = 106$ млрд лет и $^{146}\text{Sm} \rightarrow ^{142}\text{Nd}$, $T_{1/2} = 68$ млн лет, по [O'Neil et al., 2012].

Возможно, это единственный остаток гадейской коры, оставшейся после гигантского импакта, сформировавшего Луну. Участок сохранился после последней тяжелой бомбардировки Земли, уничтожившей гадейскую кору.

Fig. 6. Age of the Ujaraaluk series according to the use of two isotopic pairs $^{147}\text{Sm} \rightarrow ^{143}\text{Nd}$, $T_{1/2} = 106$ billion years and $^{146}\text{Sm} \rightarrow ^{142}\text{Nd}$; $T_{1/2} = 68$ Ma, by [O'Neil et al., 2012].

Perhaps this is the only remnant of the Hades cortex left after the giant impact that formed the Moon. The site was preserved after the last heavy bombardment of the Earth, which destroyed the Gadeyskaya crust.

шей коре Земли, которая сформировалась уже после образования Луны. Определение возраста гадейских пород приведено на рис. 6 [O'Neil et al., 2012].

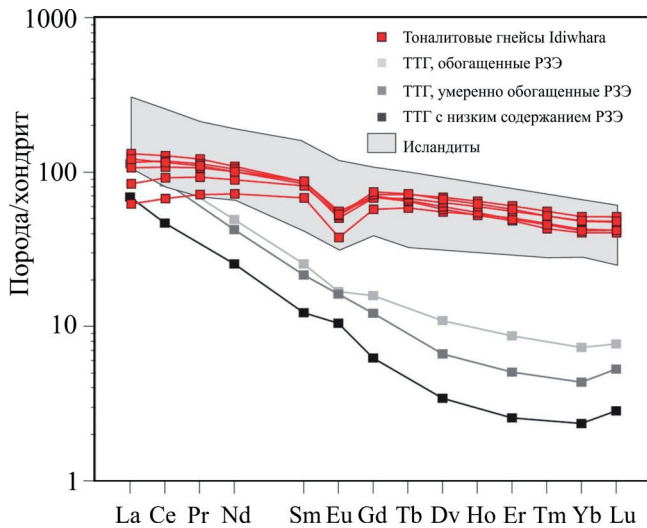


Рис. 7. Нормированное распределение редкоземельных элементов в тоналитовых гнейсах участка Idiwhaa (4.03 млрд лет) и в архейских породах ТТГ серии, по [Reimink et al., 2014].

Fig. 7. The normalized distribution of rare-earth elements in the tonalite gneisses of the Idiwhaa section (4.03Ga) and in the Archean rocks of the TTG series, by [Reimink et al., 2014].

В последнее время среди пород Нуввуагитугского зеленокаменного пояса был обнаружен также небольшой участок, названный Idiwhaa, в котором был открыт выход гадейских гранитоидных пород возраста 4.03 млрд лет [Reimink et al., 2014]. Эти гранитоиды залегают среди типичных архейских пород ТТГ серии в гнейсовом комплексе Акаста (Acasta) Канады. Выявленные гранитоиды участка Idiwhaa слагают тонкие прослои от нескольких сантиметров до дециметра в амфиболитах и гнейсах. Породы тоналитового состава сложены минеральной ассоциацией плагиоклаз + кварц + роговая обманка + биотит. Их состав в мас. %: SiO₂ – 57.9–66.9, при низком содержании Al₂O₃ – 13.8–14.1, высоким – общего железа – Σ FeO – 8.6–15.2, и низким коэффициенте магнезиальности Mg# – 13–18. В отличие от архейских ТТГ гадейские тоналиты имеют совершенно другое распределение нормированных редкоземельных элементов (рис. 7). Если архейские ТТГ обогащены легкими РЗЭ, что указывает на их формирование при частичном плавлении мантийного вещества в присутствии граната, то тоналиты гадея возникли на меньших глубинах при частичном плавлении гидратированной базальтовой коры в присутствии плагиоклаза, что способствовало появлению отрицательной Eu-аномалии.

Гранитоидные породы гадея такого генезиса, очевидно, формировались в различное время. В архейских ТТГ с возрастом 3.9 млрд лет были найдены ксенокристаллы цирконов с возрастом 4.2 млрд лет [Iizuka et al., 2006]. (Пример такого ксенокри-

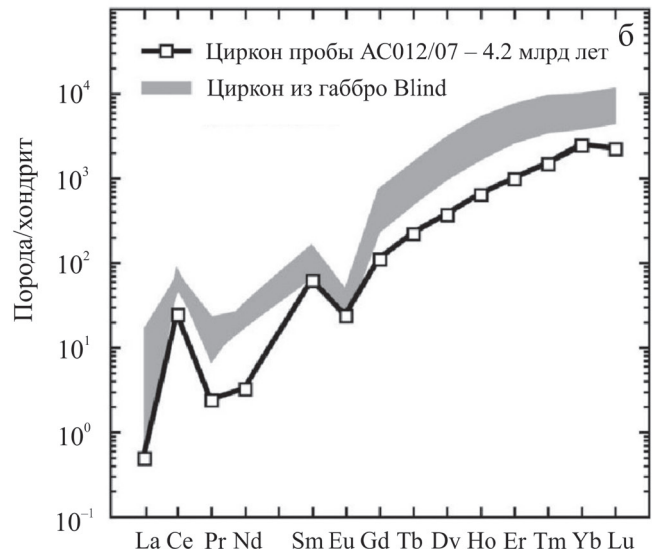
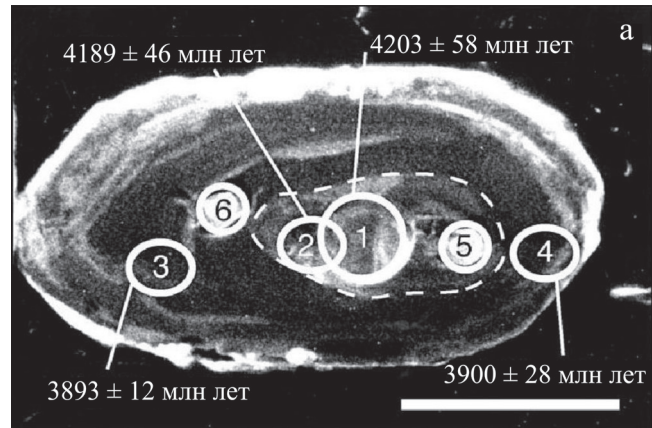


Рис. 8. Сравнение ксенокристаллов гадейского возраста с цирконом-хозяином архейского возраста из пород гнейсового комплекса Acasta Канады, по [Iizuka et al., 2012].

а. Положение ксенокристаллов в цирконе-хозяине и их возрастные характеристики.

б. Распределение нормированных по хондриту содержаний редкоземельных элементов в ксенокристаллах циркона. Для сравнения дано распределение РЗЭ в габбро.

Fig. 8. Comparison of Gadey age xenocrystals with Archean age zircon from the rocks of the Acasta Canada gneiss complex, by [Iizuka et al., 2012].

а. Position of xenocrystals in zircon host and their age characteristics.

б. Normalized distribution of chondrite-normalized contents of rare-earth elements in zircon xenocrysts. For comparison, the distribution of REE in gabbro is given.

сталла показан на рис. 8а, он расположен в центре магматического циркона с возрастом приблизительно 3.9 млрд лет. В данном случае магма, давшая начало архейским породам серии ТТГ, выплавлялась, очевидно, из остаточного магматического резервуара гадейского возраста. Возможно, это был частично расплавленный остаток гадейской коры,

погруженный в мантию в результате метеоритной бомбардировки.) На рис. 8б показано распределение нормированных редкоземельных элементов в гадейских цирконах с возрастом приблизительно 4.2 млрд лет. По распределению РЗЭ эти цирконы сопоставимы с гадейскими цирконами, найденными в Австрии. Важно подчеркнуть, что гадейские цирконы в виде ксенокристаллов были встречены в породах различных кратонов, что свидетельствует о широком распространении гадейской континентальной коры на Земле.

Между тем имеющиеся данные по возможному механизму образования расплава для цирконов гадейского возраста указывают на то, что гранитоидные расплавы могли формироваться в гадее различными путем, но в неглубоких камерах, обычно в окислительной обстановке при плавлении гидратированной базальтовой коры.

Заканчивая анализ геологической истории гадейского эона, считаем необходимым подчеркнуть одно важное обстоятельство, отмеченное в работе [Jackson et al., 2017]. Эти авторы обратили внимание на высокие величины отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$ в некоторых базальтах, которые, как они показали, связаны с горячими плюмами, а именно Гавайским и Исландским. В этих базальтах величина $^3\text{He}/^4\text{He}$ выше его атмосферных значений в 30–50 раз. Было высказано предположение, что это может быть связано с наличием в мантии недегазированных резервуаров, которые сохранились до настоящего времени; возможно, что такие резервуары имеют высокую плотность, поэтому они не перемещались в процессе мантийной конвекции. Авторы данной статьи ссылаются на олигоценовые базальты о-ва Баффин (Западная Гренландия), связанные с прото-Исландским плюмом, в которых такие базальты на изотопных диаграммах свинца расположены в интервале геоизохрон 4.55–4.45 млрд лет, как это показано в работе [Jackson et al., 2010]. Однако на этой диаграмме в этом же (по соотношению изотопов свинца) поле расположены базальты ряда горячих точек, не имеющих высоких отношений $^3\text{He}/^4\text{He}$, и базальты срединно-океанических хребтов, что не позволяет однозначно отнести рассматриваемые базальты с высоким $^3\text{He}/^4\text{He}$ -отношением к продуктам древних мантийных недегазированных резервуаров. В то же время известно, что летучие, в частности He и H, могут образовывать соединения с металлами (He–металл высокой плотности), возможно, при аккреции Земли и формирования ядра некоторые из таких образований попали в ядро Земли [Gilat, Vol, 2012]. В дальнейшем эти элементы (или соединения) сконцентрировались во внешнем ядре, плотность которого ниже внутреннего, потом могли попасть в слой D", в котором геофизики выделяют ультраскоростные участки [Garnero, McNamara, 2008], представляющие, возможно, магматические камеры, питаю-

щие мантийные плюмы. Очевидно, исследования в данном направлении следует продолжить, поскольку они помогут решить ряд вопросов ранней эволюции Земли.

АРХЕЙСКИЕ ТТГ СЕРИИ ПОРОД – СОХРАНИВШАЯСЯ ДРЕВНЕЙШАЯ КОНТИНЕНТАЛЬНАЯ КОРА ЗЕМЛИ

Архейский период ознаменовался сохранением континентальной коры, представленной тонолит-трондьемит-гранодиоритовой (ТТГ) ассоциацией пород. Тонолит-трондьемит-гранодиоритовые раннеархейские серии (серые гнейсы) заметно отличаются от фанерозойских гранитоидов петрохимически и геохимически [Condie, 2011].

ТТГ отличаются петрохимически и геохимически от позднеархейских, протерозойских и фанерозойских пород. На рис. 9а видно, что ТТГ – типичные натриевые породы, расположенные в натриевом углу тройной Na–K–Ca диаграммы. вполне понятно, что материнскими для пород ТТГ служила древняя мантия Земли, которая еще не отдала основную массу литосферных элементов на формирование континентальной коры Земли [Кузьмин, Ярмолюк, 2017]. Постархейские известково-щелочные породы, приуроченные обычно к зонам субдукции, существенно более калиевые, так как основой для их генезиса служит литосфера с большим участием континентальной коры. Еще более контрастно отличаются породы по содержанию редких элементов (рис. 9б). Во-первых, ТТГ резко обогащены легкими редкоземельными элементами. Это связано, очевидно, со значительной глубиной частичного плавления при погружении в мантию базальтовой древней архейской коры, которая, очевидно, была обогащена по сравнению с фанерозойскими базальтами MORB литофильными элементами, древние основные породы были выделены нами еще в 1977 г. в виде протоофиолитов [Глуховский и др., 1977]. Резкое преобладание в ТТГ легких РЗЭ хорошо видно на рис. 9в. Постархейские гранитоиды и известково-щелочные вулканиды также имеют высокие содержания легких РЗЭ в сравнении с тяжелыми, но их преобладание меньше, что может говорить о формировании фанерозойских вулканидов на меньших глубинах.

Суммируя приведенные данные по составу тоналит-трондьемит-гранодиоритовой серии пород, учитывая приведенные в ряде публикаций данные по изотопному составу ТТГ, полученные по U–Th–Pb, Sm–Nd, Rb–Sr и Re–Os системам, многие из которых приведены в монографии [Condie, 2011], можно однозначно сказать, что данная серия континентальных сохранившихся архейских пород имеет мантийный генезис. Установлено, что ТТГ образуется при плавлении высоко гидратированных базальтов при достаточно высо-

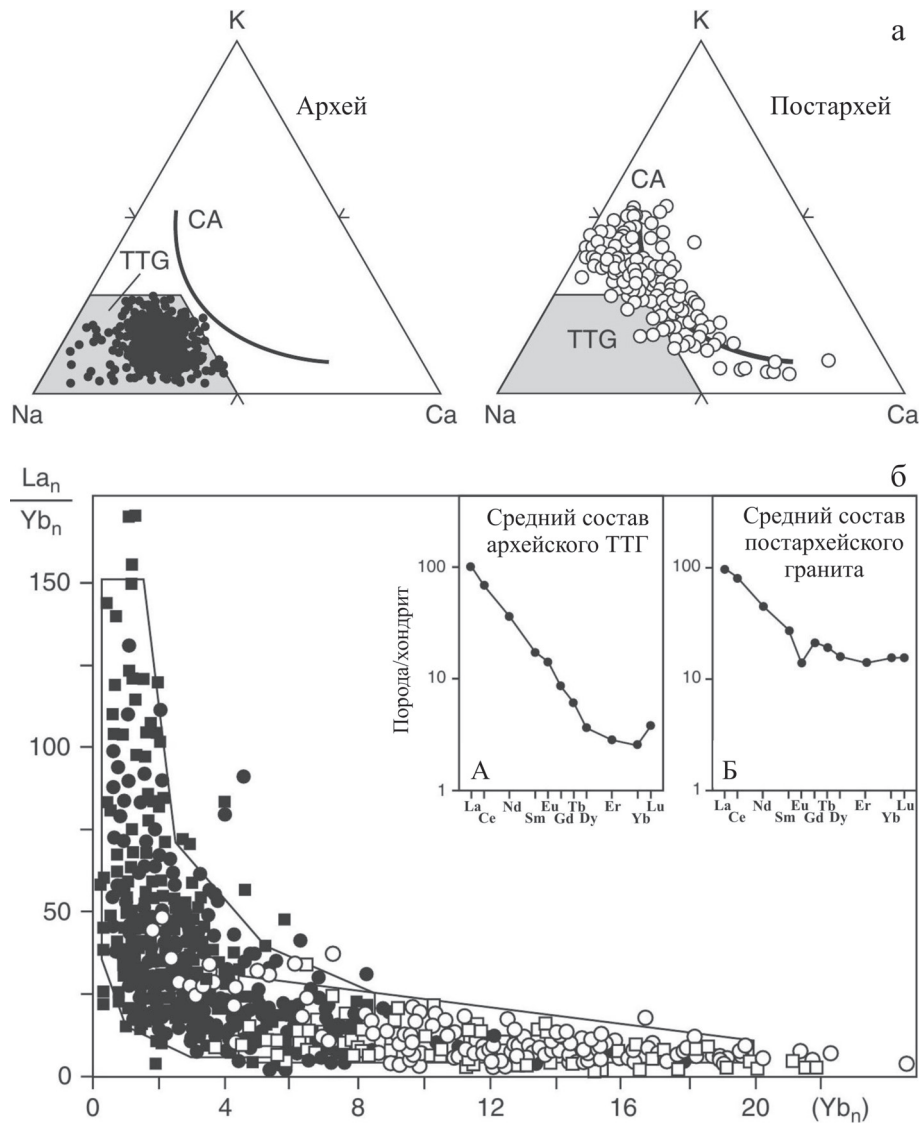


Рис. 9. Сопоставление составов пород архейской тоналит-трондьемит-гранодиоритовой серии (А) и постархейских гранитов (Б), по [Condie, 2011].

9а. На диаграммах К–Na–Са видны различия, определяемые преимущественно натровым составом пород ТТГ серии и известково-щелочным составом постархейских вулканитов и гранитов, по [Condie, 2011].

9б. Распределение нормированных содержаний РЗЭ, а так же отношения La/Yb на графике $La/Yb - Yb_{norm}$ в породах ТТГ и породах постархей. Породы ТТГ обогащены легкими РЗЭ по отношению к тяжелым

Fig. 9. Comparison of the rock formations of the Archaean tonalite-trondhjemite-granodiorite series (A) and the postarchaean granites (B), by [Condie, 2011].

9а. The diagrams of K–Na–Ca show differences, determined mainly by the sodium composition of the TTG series and by the calc-alkaline composition of the Postarchaean volcanics and granites, by [Condie, 2011].

9б. The distribution of normalized REE contents, as well as the La/Yb ratio on the $La/Yb - Yb_{norm}$ plot in the rocks of the TTG and the rocks of the Postarchean. The rocks of TTG are enriched with light REE in relation to heavy

ких давлениях, при которых в тугоплавком остатке устойчив гранат [Reimink et al., 2014] т.е. характерен эклогитовый парагенезис. При этом наличие в исходных базальтах повышенных значений некогерентных элементов определяет, что состав пород ТТГ серии сопоставим с островодужными породами фанерозойского возраста. Одна-

ко никаких следов субдукционных обстановок при образовании пород ТТГ серии не установлено. Можно полагать, что мантийные основные-ультраосновные магмы, связанные с архейскими плюмами, были ответственны за образование мощной базальтоидной коры. Образованные из этих магм архейские базальтоиды были обога-

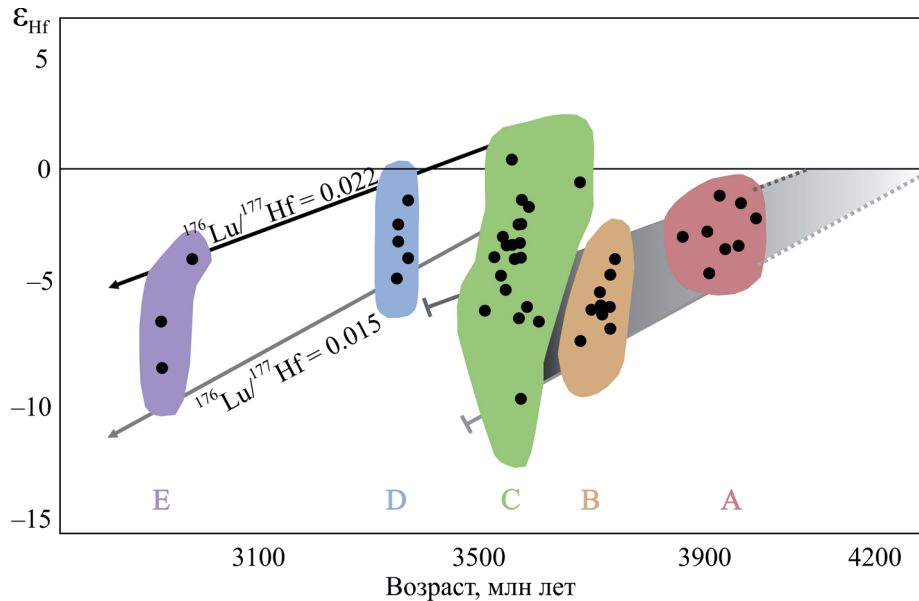


Рис. 10. Оценка модельного Lu/Hf возраста источников пород ТТГ серии из гнейсовидных пород Acasta (Канада), по [Bauer et al., 2017].

Судя по представленным данным, источник гнейсов группы А и В менее радиоактивен, чем источник магм гнейсов более молодого возраста.

Fig. 10. Estimation of the model Lu/Hf age of the TTG series rock sources from the gneissic Acasta rocks (Canada), by [Bauer et al., 2017].

Judging from the data presented, the gneiss source of groups A and B is less radioactive than the source of magma gneiss of a younger age.

щены литофильными элементами по сравнению с фанерозойскими базальтами MORB.

Верхи мантии, связанные с подъемом плюмов, были насыщены флюидами, а коровые базальты – некогерентными элементами. Под тяжестью мощной базальтоидной коры происходило прогибание и погружение базальтоидов в мантию. Этот процесс получил название “сагдукции” (от английского слова *sag* – прогиб). Он был связан с вертикальными движениями [Хаин, 2003].

Формирование наиболее древних (3.9–3.8 млрд лет) пород серии ТТГ происходило с использованием протолитов или корового гадейского вещества при образовании первичных магм для архейских ТТГ. Доказательство участия гадейского мантийного источника (возраста > 4.0 млрд лет) при формировании архейской гнейсовой серии ТТГ (Канада) на основе исследования изотопов Lu–Hf и U–Pb в гнейсах подробно рассмотрено в работе [Bauer et al., 2017]. На диаграмме (рис. 10) показано распределение изотопных характеристик, полученных при изучении тоналитов (ТТГ) гнейсовой серии Акаста (Acasta) Канады изотопов двух вышеупомянутых изотопных серий. По величине субхондритового соотношения $^{177}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ они связаны двумя значениями этого соотношения 0.015 и 0.022, а по возрасту выделяется пять групп пород:

3.96–3.94 (группа А), 3.74–3.72 (В), 3.66 – 3.58 (С), ≈3.4 (D) и 2.9 (E) млрд лет. Как показано [Bauer et al., 2017], эта группа пород ТТГ серии, очевидно, связана с двумя одновременными магматическими протолитами гадейского возраста. Породы группы А, В и частично С (нижняя часть этой группы на рис. 10), связаны с гадейской субхондритовой составляющей с соотношением $^{177}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.015$, а вторая группа D и E, и верхняя часть группы С – с субхондритовой составляющей этих же изотопов равной 0.022. Как считают авторы статьи [Bauer et al., 2017], что совершенно правильно, это связано с разной глубиной “захоронения” одновременных остатков гадейской коры, провалившихся в мантию в результате метеоритных бомбардировок. Это гадейская кора расплавлялась и смешивалась с мантийным материалом, который служил в дальнейшем протолитом для магм, давшим начало архейским породам серии ТТГ. Возможно, протолиты – источник более молодых пород – сформировался на больших глубинах, соответственно, был вовлечен в магнообразование позднее.

В рассматриваемой работе авторы исследовали по аналогичной методике архейские породы Гренландии и Центральной Африки, для которых они установили близкие возрастные группы, связанные с несколькими различными субхондритовыми соотно-

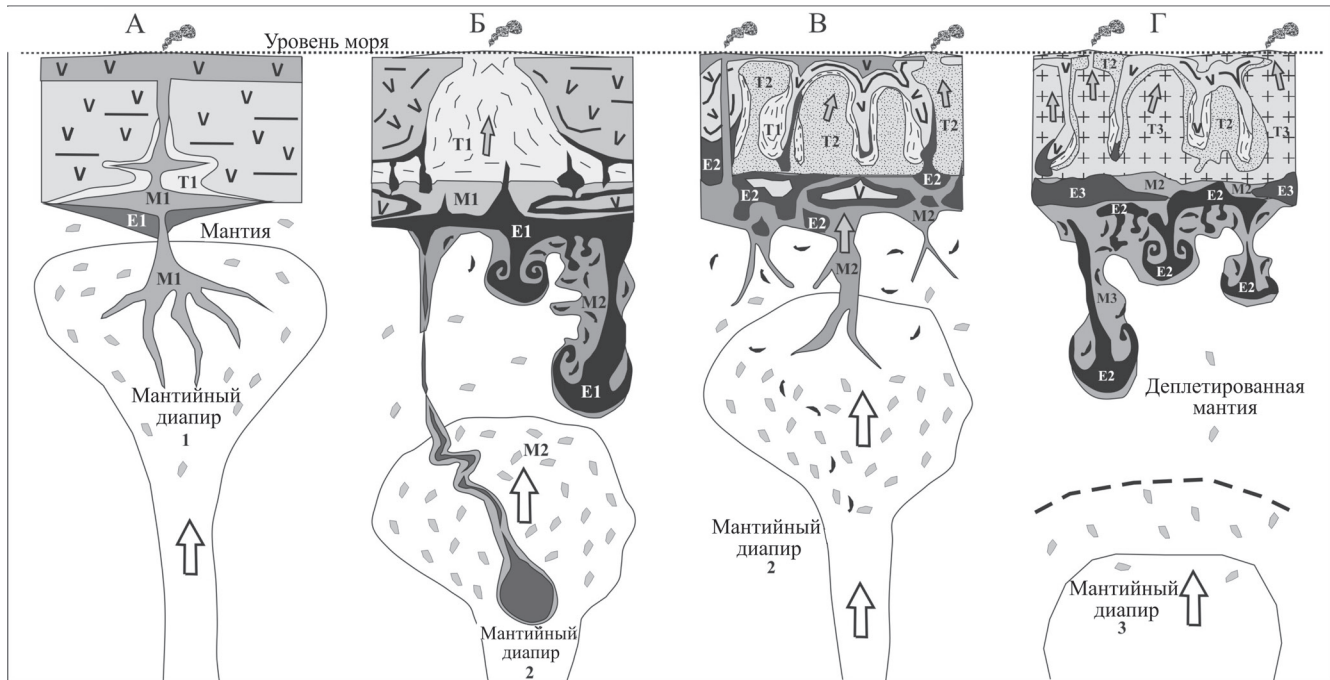


Рис. 11. Модель сагдукции, обеспечивающая формирование пород ТТГ возраста 3.9–3.1 млрд лет [Bédard, 2006].

Архейская кора повышенной мощности погружается (проваливается) в мантию до глубины, на которых при плавлении в респите остается гранат. Под влиянием высоких мантийных температур происходит выплавление из эколгитизированного архейского базальтоида пород серии ТТГ, которые интродуцируются в основную архейскую кору, образуя сохранившуюся первую континентальную кору. J.H. Bédard отметил, что таких стадий может быть 3–4.

Fig. 11. The model of sagduction providing generation of TTG rocks of age 3.9–3.1 billion years [Bédard, 2006].

The Archean crust of high power is submerged (falls through) into the mantle to a depth at which garnet remains during melting in residue. Under the influence of high mantle temperatures, the TTG series rocks are melted from the eclogitized Archean basaltoid, which intrude into the main Archean cortex, forming the preserved first continental crust. J.H. Bédard noted that can be 3–4 such stages.

шениями изотопов Lu/Hf. Данные наблюдения свидетельствуют о широком распространении гадейской коры на Земле.

Модель сагдукции, основанную на детальном петролого-геохимическом изучении зеленокаменного пояса в Сьюперior (Superior) провинции (Канада), состоящего из вулканитов базальтокоматиитового состава, с которыми ассоциируют породы тоналит-трондьемитовой серии, детально рассмотрена в работе [Bédard, 2006] (рис. 11). Ее суть такова: Базальтоидные вулканические серии коры повышенной мощности интродуцируются магмами, генерируемыми поднимающимся плюмом. В результате происходит частичное плавление вулканитов, опускание респитов, а гранитоидные (толеитовые) магмы поднимаются от низов коры к ее верхним уровням. Процесс формирования ТТГ серии многостадийный. В предлагаемой модели он включает как минимум 3–4 стадии. В какой-то мере эта модель может быть применена к формированию океанических плато. Очевидно, бурение современных океанических плато, которые так же, как и архейские серии ТТГ, образуются над мантийными плюмами, поможет лучше по-

нять этот процесс. Образование гранитоидных пород во многом похоже на процессы формирования известково-щелочных серий вулканитов и гранитоидов, связанных с зонами субдукции. В отличие от субдукции процесс сагдукции основан на вертикальных опусканиях (провалах) базальтоидных пород в глубины мантии.

В 2011–2016 гг. выполнялась международная программа по изучению архейского магматизма Земли. Результаты этих исследований опубликованы в коллективной работе [Halla et al., 2017]. В процессе работ по программе были изучены архейские гранитоидные образования: Северо-Атлантического, Феро-скандинавского, Индийского и Украинского щитов.

Исполнители программы пришли к следующим выводам.

Тоналит-трондьемит-гранодиоритовые ассоциации пород (в России их называют “серые гнейсы”) в изученных кратонах формировались в интервале 3.9–3.6–3.4–3.1 млрд лет.

Гранитоидные массивы (в том числе и батолиты) моложе 3.1 млрд лет сменились калиевыми известково-щелочными гранитоидами, среди которых выделяются: санукитоиды, монцограни-

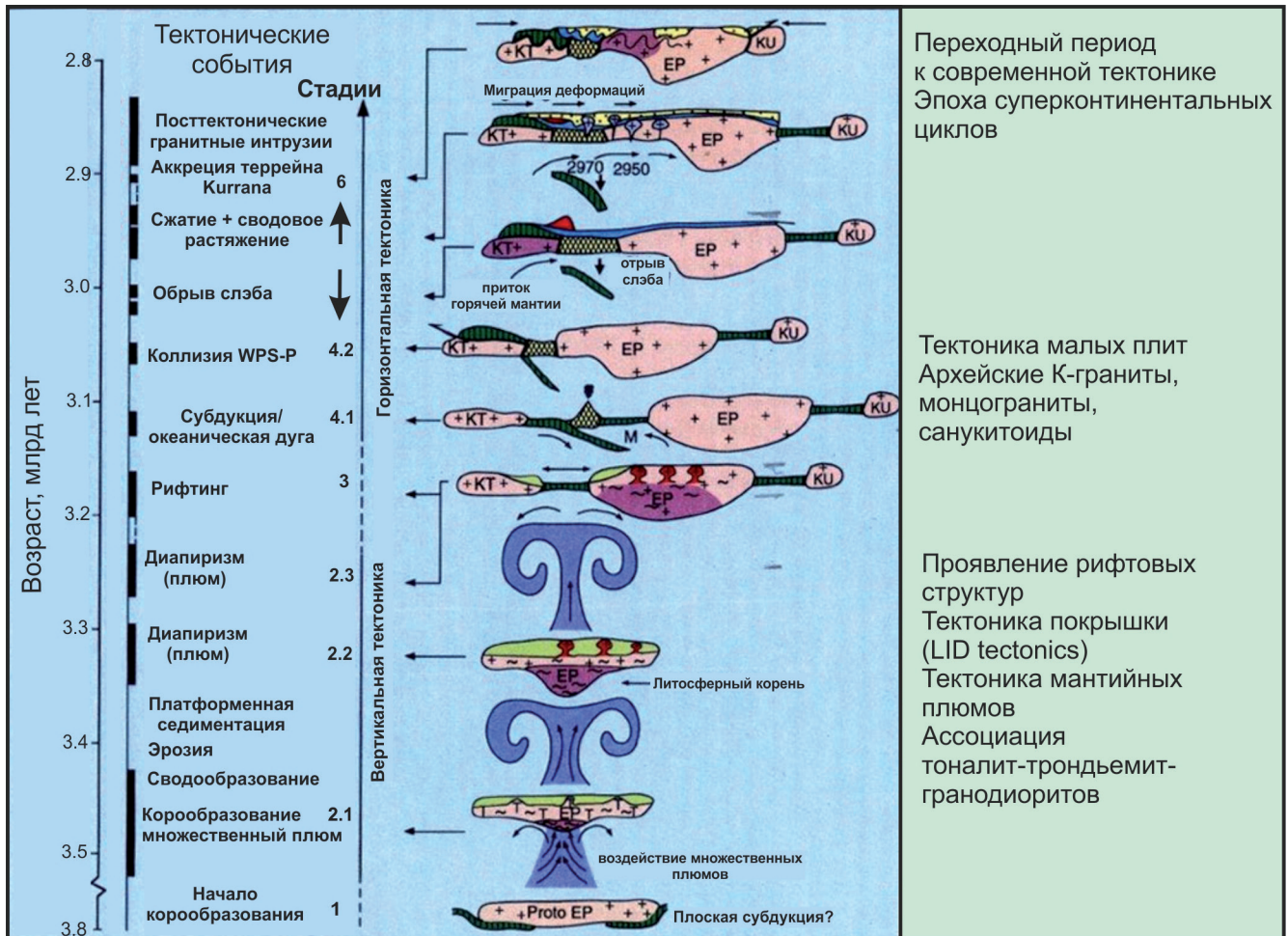


Рис. 12. Диаграмма тектоно-магматических событий формирования геологической структуры кратона Pilbara (Пилбара, Австралия), по [Pease et al., 2008] с добавлениями.

Fig. 12. Diagram of tectonic-magmatic events in the formation of geological structure craton Pilbara (Australia), by [Pease et al., 2008] with the additions.

ты, обогащенные редкими элементами кварцевые монциониты.

По мнению авторов [Halla et al., 2017] в это время произошло изменение динамики Земли, началась тектоника плит.

Предполагается [Halla et al., 2017], что при образовании К гранитоидов возраста 3.1–2.5 млрд лет некоторые докембрийские кратоны, которые ранее слагали единый суперконтинент, были разбиты на серию более мелких, разделенных океаническими бассейнами.

Таким образом, тектоника покрывки (LID tectonics) и тектоника мантийных переворотов, глубинных мантийных плюмов ультраосновного основного состава продолжилась до 3.1 млрд лет.

В интервале времени 3.1–2.7 млрд лет назад, по нашему мнению, был период тектоники малых плит. 2.7–2.0 млрд лет назад – переходный период от тектоники малых плит к современной тектонике.

В это время сформировались все внутренние оболочки Земли [Кузьмин, Ярмолюк, 2016, 2017]. Смену тектонических движений и типов тектонических структур от начала архея до начала тектоники плит можно проиллюстрировать диаграммой (рис. 12) с добавлением авторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение ранних этапов эволюции нашей Земли – основа для понимания ее дальнейшей, в том числе и будущей, геологической истории. Хаотичный эон характеризовался космическими факторами, которые определили начальное развитие нашей планеты. В это время 4568–4500 млн лет назад произошло формирование Земли в результате аккреции планетозималей, космические факторы определяли все процессы, происходящие на Земле: дифференциацию на ядро и мантию, формиро-

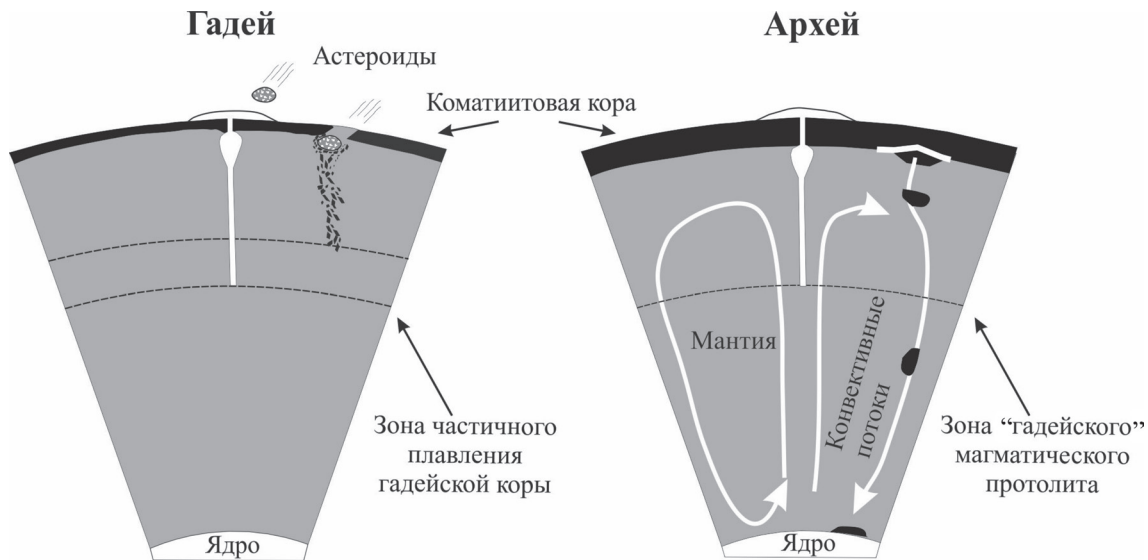


Рис. 13. Модели возможных эндогенных процессов в гадейский эон и эоархейский период времени.

В гадее тонкая кора формировалась мантийными магмами, извержения которых провоцировались падениями астероидов. Бомбардировки разрушали кору, погружавшуюся в верхнюю часть мантии и формировавшую “гадейский” протолит для последующего магмообразования. В архее началась общемантийная конвекция, которая вовлекала в плавление также и “гадейский” протолит. Плавление низов коры под воздействием мантийных магм вызывало появление расплавов, образующих ТТГ комплексы. Реситовая часть нижней коры опускалась в низы нижней мантии (пояснение см. в тексте).

Fig. 13. Models of possible endogenous processes in the Gadia eon and the Eoarchaeon period of time.

вание спутника Земли – Луны. В это же время эволюция самой Солнечной системы определяла ее разделение на каменистую внутреннюю и газОВО-водную внешнюю части, в которых ближе к Солнцу расположились планеты земной группы, а во внешней части – газОВО-ледяные планеты-гиганты. Ранняя история планет-гигантов, а также интенсивность метеоритной бомбардировки планет земной группы во многом способствовали доставке строительного материала во внутренней части системы.

Интенсивные метеоритные бомбардировки продолжались на Земле и в гадейское время, когда началось формирование первой (начальной) земной коры, которая практически была уничтожена в конце гадейского эона, когда планеты-гиганты обосновались на своих орбитах и основной метеоритный материал был принят планетами земной группы, а значительная его часть была поглощена Солнцем.

Гадейская эпоха, несмотря на то, что она рассматривается, как начало геологической истории Земли, развивалась под влиянием космических процессов. В частности, Земля, как и другие планеты земной группы постоянно подвергалась метеоритно-астероидным бомбардировкам. На рис. 13 приведена модель проявленных эндогенных процессов, характерных для гадейского времени. Высокая температура гадейской мантии определялась с одной стороны, недавно закристаллизовавшимся горячим мантийным океаном, образованным в связи импактом ответственным за формирование Луны, а с другой –

наличием множества короткоживущих изотопных систем, при радиоактивном распаде материнских изотопов, когда выделялось большое количество энергии. В связи с этим общемантийной конвекции в гадее, скорее всего, не существовало. На ровную стагнированную поверхность Земли падали космические астероиды или крупные метеориты, вызывая разрушение поверхности планеты, представленной породами, сформированными при излиянии и дифференциации мантийных основных магм. Обломки слагающих поверхность пород погружались в мантию, расплавлялись, смешиваясь с материалом мантии, формируя будущие протолиты позднегадейских и архейских магм, в которых могли оставаться тугоплавкие кристаллы цирконов. В разрушенные участки гадейской земной поверхности изливались новые порции основных и коматиитовых мантийных магм, кристаллизация которых залечивала разбитую поверхностную кору Земли, разрываемую при следующей бомбардировке. Таким образом, эндогенная активность Земли в гадее была полностью обусловлена внешними космическими процессами.

В конце гадея, когда завершалась последняя тяжелая метеоритная бомбардировка, в результате которой было потеряно большое количество эндогенной энергии, была понижена температура мантии, чему способствовало, кроме того, прекращение радиоактивного распада короткоживущих изотопов, наступил архейский период геологической истории Земли.

Можно полагать, что снижение температуры мантии, не затронуло термическое состояние ядра Земли. Очевидно, началась общемантийная конвекция (см. рис. 13). Соответственно, началось время самоорганизации самой Земли, что обусловило проявление глубинных тектонических процессов, т.е. эндогенной активности самой Земли, а космическое воздействие на Землю существенно уменьшилось.

Поверхность Земли оставалась стагнированной ровной, т.е. продолжалась LID тектоника, но она разрывалась поднимающимися глубинными плюмами, доставляющими магмы ультраосновного-основного состава, которые в местах выхода формировали мощную кору основного (базальтоидного) состава. Поверхностный слой Земли не выдерживал нагрузки верхнего слоя, который, согласно процессу сагдукиции, проваливался вниз, формируя при этом гранитоидные магмы, дающие породы серии ТТГ, которые изливаясь на поверхности образовывали сохранившуюся до настоящего времени архейскую континентальную гранитоидную кору.

Постепенно мощность континентальной коры увеличивалась, она начинала разламываться и погружаться в мантию, начиналась эпоха тектоники малых плит, которая постепенно с учетом формирования внутренних оболочек Земли [Condie, 2011; Кузьмин, Ярмолюк, 2017] эволюционировала и перешла к современной тектонической активности Земли, при которой сосуществуют процессы тектоники плит и тектоники плюмов.

Конечно, эта общая картина эволюции нашей планеты является во многом умозрительной и требует глубокой дальнейшей переработки, для чего требуются детальные комплексные геологические исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Батыгин К., Лафлин Г., Морбиделли А. (2016) Рожденные из хаоса. *В мире науки*, (7), 16-27.
- Глуховский М.З., Моралев В.М., Кузьмин М.И. (1977) Тектоника и петрогенезис катархейского комплекса Алданского щита в связи с проблемой протофиолитов. *Геотектоника*, (6), 103-117.
- Костицын Ю.А. (2012) Возраст земного ядра по изотопным данным: согласование Hf-W и U-Pb систем. *Геохимия*, (6), 531-554.
- Кузьмин М.И. (2014) Докембрийская история зарождения и эволюции Солнечной системы и Земли. Ст. I. *Geodynam. Tectonophys.*, 5(3), 625-640.
- Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В. (2017) Биография Земли: основные этапы геологической истории. *Природа*, (6), 12-25.
- Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В. (2016) Изменение стиля тектонических движений в процессе эволюции Земли. *Докл. АН*, 469(6), 706-710.
- Лин Д. (2008) Происхождение планет. *В мире науки*, (8), 22-31.
- Хайн В.Е. (2003) Основные проблемы современной геологии. М.: Науч. мир, 348 с.
- Allègre C.J., Poirier J.P., Humler E., Hofmann A.W. (1995) The Chemical-Composition of the Earth. *Earth Planet., Sci. Lett.*, 134(3-4), 515-526. [http://dx.doi.org/10.1016/0012-821X\(95\)00123-T](http://dx.doi.org/10.1016/0012-821X(95)00123-T)
- Bauer A.M., Fisher C.M., Vervoort J.D., Bowring S.A. (2017) Coupled zircon Lu-Hf and U-Pb isotopic analyses of the oldest terrestrial crust, the >4.03Ga Acasta Gneiss Complex. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 458, 37-48.
- Bédard J.H. (2006) A catalytic delamination-driven model for coupled genesis of Archaean crust and sub-continental lithospheric mantle. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 79, 1188-1214.
- Cameron A.G.W. (1986) The impact theory for origin of the Moon. *Origin of the Moon* (Eds W.K. Hartmann, R.J. Phillips, G.J. Taylor). Houston, TX: Lunar & Planetary Institute, 609-616.
- Condie K.C. (2011) Earth as an evolving Planetary System. Elsevier, 574 p.
- Garnero E.J., McNamara A.K. (2008) Structure and Dynamics of Earth's Lower Mantle. *Science*, 320, 626-628.
- Gilat A., Vol A. (2012) Degassing of primordial hydrogen and helium as the major energy source for internal terrestrial processes. *Geosci. Front.*, 1, 911-921. doi:10.1016/j.gsf.2012.03.009
- Goldblatt C., Zahnle K.J., Sleep N.H., Nisbet E.G. (2010) The eons of chaos and hades. *Solid Earth*, 1, 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. (2013) Interpreting the U-Pb data from primary and secondary features in lunar zircon. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 101, 112-132. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2012.10.013>
- Halla J., Whitehouse M.J., Ahmad T., Bagai Z. (2017) Archaean granitoids: an overview and significance from a tectonic perspective <http://sp.lyellcollection.org/bu/guest> on February 3
- Harrison T.M., Schmitt A.K., McCulloch M.T., Lovera O.M. (2008) Early (N = 4.5 Ga) formation of terrestrial crust: Lu-Hf, $\delta^{18}\text{O}$, and Ti thermometry results for Hadean zircons. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 268(3-4), 476-486.
- Hartmann W.K. (1986). Moon origin: the impact-trigger hypothesis. *Origin of the Moon* (Eds W.K. Hartmann, R.J. Phillips, G.J. Taylor). Houston, TX: Lunar & Planetary Institute, 579-608. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2008.02.011>.
- Iizuka T., Horie K., Komiya T., Maruyama S., Hirata T., Hidaka H., Windley B.F. (2006) 4.2 Ga zircon xenocryst in an Acasta gneiss from northwestern Canada: Evidence for early continental crust. *Geology*, 34(4), 245-248.
- Jackson M.G., Carlson R.W., Kurz M.D., Kempton P.D., Don Francis, Blusztajn J. (2010) Evidence for the survival of the oldest terrestrial mantle reservoir. *Nature*, 466, 853-856.
- Jackson M.G., Konter J.G., Becker T.W. (2017) Primordial helium entrained by the hottest mantle plumes. *Nature*, 542, 340-343.
- Lauretta D. (2011) A cosmochemical view of the Solar System. *Elements*, 7(1), 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. (1992) 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*, 56(3), 1281-1300. [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037\(92\)90062-N](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037(92)90062-N)

Maruyama S., Ebisuzaki T. (2017) Origin of the Earth: A proposal of new model called ABEL. *Geosci. Front.*, **8**, 253-274.

Masset F., Snellgrove M. (2001) Reversing type II migration: resonance trapping of a lighter giant protoplanet. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **320**(4), L55-L59.

McDonough W.G., Sun S.S. (1995) The composition of the Earth. *Chem. Geol.*, **120**(3-4), 223-253. [http://dx.doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](http://dx.doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)

Myers J.S. (1988) Early Archean Narryer gneiss complex, Yilgarn Craton, Western-Australia. *Precamb. Res.*, **38**(4), 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. (2014) The role of detrital zircons in Hadean crustal research. *Lithos*, **190-191**, 313-327.

Newsom H.E., Taylor S.R. (1989) Geochemical implications of the formation of the Moon by a single giant impact. *Nature*, **338**, 29-34.

O'Neil J., Carlsons R.W., Paquette J.L., Francis D. (2012) Formation age and metamorphic history of the Nuvvuagittuq Greenstone Belt. *Precamb. Res.*, **220-221**, 23-44.

Pease V., Percival J., Smitbies J., Stevens G., Kranendank M. (2008) When did plate tectonics begin? Evidence from the orogenic record. *Geol. Soc. Amer., Spec. Paper*, **440**, 199-228.

Reimink J.R., Chacko T., Stern R.A., Heaman L.M. (2014) Earth's earliest evolved crust generated in an Iceland-like setting. *Nat. Geosci.*, **7**, 529-533.

Roth A.S.G., Bourdon B., Mojzsis S.J., Touboul M., Sprung P., Guitreau M., Blichert-Toft J. (2013) Inherited ¹⁴²Nd anomalies in Eoarchean protoliths. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **361**, 50-57.

Stern R.J. (2008) Modern-style plate tectonics began in Neoproterozoic time: An alternative interpretation of Earth's tectonic history. *Geol. Soc. Amer., Spec. Paper*, **440**, 265-280.

Taylor D.J., McKeegan K.D., Harrison T.M. (2009) Lu-Hf zircon evidence for rapid lunar differentiation. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **279**(3-4), 157-164. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2008.12.030>

Wood B. (2011) The formation and differentiation of Earth. *Physics Today*, **64**(12), 40-45. <http://dx.doi.org/10.1063/PT.3.1362>

Wood B.J., Halliday A.N. (2010) The lead isotopic age of the Earth can be explained by core formation alone. *Nature*, **465**(7299), 767-771. <http://dx.doi.org/10.1038/nature09072>

REFERENCES

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

Batygin K., Laflin G., Morbidelli A. (2016) Born from the chaos. *V mire nauki*, (7), 16-27. (In Russian)

Bauer A.M., Fisher C.M., Vervoort J.D., Bowring S.A. (2017) Coupled zircon Lu-Hf and U-Pb isotopic analyses of the oldest terrestrial crust, the >4.03Ga Acasta Gneiss Complex. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **458**, 37-48.

Bédard J.H. (2006) A catalytic delamination-driven model for coupled genesis of Archaean crust and sub-continental lithospheric mantle. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **79**, 1188-1214.

Cameron A.G.W. (1986) The impact theory for origin of

the Moon. *Origin of the Moon* (Eds W.K. Hartmann, R.J. Phillips, G.J. Taylor). Houston, TX: Lunar & Planetary Institute, 609-616.

Condie K.C. (2011) Earth as an evolving Planetary System. Elsevier, 574 p.

Garnero E.J., McNamara A.K. (2008) Structure and Dynamics of Earth's Lower Mantle. *Science*, **320**, 626-628

Gilat A., Vol A. (2012) Degassing of primordial hydrogen and helium as the major energy source for internal terrestrial processes. *Geosci. Front.*, **1**, 911-921. doi:10.1016/j.gsf.2012.03.009

Glukhovskii M.Z., Moralev V.M., Kuz'min M.I. (1977) Tectonics and petrogenesis of the Katarchean complex of the Aldan Shield in connection with the problem of protophylites. *Geotektonika*, (6), 103-117. (In Russian)

Goldblatt C., Zahnle K.J., Sleep N.H., Nisbet E.G. (2010) The eons of chaos and hades. *Solid Earth*, **1**, 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. (2013) Interpreting the U-Pb data from primary and secondary features in lunar zircon. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **101**, 112-132. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2012.10.013>

Hain V.E. (2003) *Osnovnye problemy sovremennoi geologii* [The main problems of modern geology]. Moscow, Nauch. mir Publ., 348 p. (In Russian)

Halla J., Whitehouse M.J., Ahmad T., Bagai Z. (2017) Archaean granitoids: an overview and significance from a tectonic perspective. <http://sp.lyellcollection.org/doi/full/10.1017/S0022247517000033>

Harrison T.M., Schmitt A.K., McCulloch M.T., Lovera O.M. (2008) Early (N = 4.5 Ga) formation of terrestrial crust: Lu-Hf, $\delta^{18}\text{O}$ and Ti thermometry results for Hadean zircons. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **268**(3-4), 476-486.

Hartmann W.K. (1986). Moon origin: the impact-trigger hypothesis. *Origin of the Moon* (Eds W.K. Hartmann, R.J. Phillips, G.J. Taylor). Houston, TX: Lunar & Planetary Institute, 579-608.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2008.02.011>.

Iizuka T., Horie K., Komiya T., Maruyama S., Hirata T., Hidaka H., Windley B.F. (2006) 4.2 Ga zircon xenocryst in an Acasta gneiss from northwestern Canada: Evidence for early continental crust. *Geology*, **34**(4), 245-248.

Jackson M.G., Carlson R.W., Kurz M.D., Kempton P.D., Don Francis, Blusztajn J. (2010) Evidence for the survival of the oldest terrestrial mantle reservoir. *Nature*, **466**, 853-856.

Jackson M.G., Konter J.G., Becker T.W. (2017) Primordial helium entrained by the hottest mantle plumes. *Nature*, **542**, 340-343.

Kostitsyn Yu.A. (2012) Age of the Earth's core by isotopic data: matching of Hf-W and U-Pb systems. *Geokhimiya*, (6), 531-554. (In Russian)

Kuz'min M.I. (2014) Precambrian history of the origin and evolution of the solar system and the Earth. Article I. *Geodynam. Tectonophys.*, **5**(3), 625-640. (In Russian)

Kuz'min M.I., Yarmolyuk V.V. (2017) Biography of the Earth: the main stages of geological history. *Priroda*, (6), 12-25. (In Russian)

Kuz'min M.I., Yarmolyuk V.V. (2016) Change in the style of tectonic movements in the evolution of the Earth. *Dokl. Akad. Nauk*, **469**(6), 706-710. (In Russian)

Lauretta D. (2011) A cosmochemical view of the Solar System. *Elements*, **7**(1), 11-16. <http://dx.doi.org/10.2113/gselements.7.1.11>

- Lin D. (2008) Origin of the planets. *V mire nauki*, (8), 22-31. (In Russian)
- Maas R., Kinny P.D., Williams I.S., Froude D.O., Compston W. (1992) 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*, **56**(3), 1281-1300. [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037\(92\)90062-N](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037(92)90062-N)
- Maruyama S., Ebisuzaki T. (2017) Origin of the Earth: A proposal of new model called ABEL. *Geosci. Front.*, **8**, 253-274.
- Masset F., Snellgrove M. (2001) Reversing type II migration: resonance trapping of a lighter giant protoplanet. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **320**(4), L55-L59.
- McDonough W.G., Sun S.S. (1995) The composition of the Earth. *Chem. Geol.*, **120**(3-4), 223-253. [http://dx.doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](http://dx.doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
- Myers J.S. (1988) Early Archean Narryer gneiss complex, Yilgarn Craton, Western-Australia. *Precamb. Res.*, **38**(4), 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. (2014) The role of detrital zircons in Hadean crustal research. *Lithos*, **190-191**, 313-327.
- Newsom H.E., Taylor S.R. (1989) Geochemical implications of the formation of the Moon by a single giant impact. *Nature*, **338**, 29-34.
- O'Neil J., Carlsson R.W., Paquette J.L., Francisc D. (2012) Formation age and metamorphic history of the Nuvvuagittuq Greenstone Belt. *Precamb. Res.*, **220-221**, 23-44.
- Pease V., Percival J., Smitbies J., Stevens G., Kranendank M. (2008) When did plate tectonics begin? Evidence from the orogenic record. *Geol. Soc. Amer., Spec. Paper*, **440**, 199-228.
- Reimink J.R., Chacko T., Stern R.A., Heaman L.M. (2014) Earth's earliest evolved crust generated in an Iceland-like setting. *Nat. Geosci.*, **7**, 529-533.
- Roth A.S.G., Bourdon B., Mojzsis S.J., Touboul M., Sprung P., Guitreau M., Blichert-Toft J. (2013) Inherited ¹⁴²Nd anomalies in Eoarchean protoliths. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **361**, 50-57.
- Stern R.J. (2008) Modern-style plate tectonics began in Neoproterozoic time: An alternative interpretation of Earth's tectonic history. *Geol. Soc. Amer., Spec. Paper*, **440**, 265-280.
- Taylor D.J., McKeegan K.D., Harrison T.M. (2009) Lu-Hf zircon evidence for rapid lunar differentiation. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **279**(3-4), 157-164. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2008.12.030>
- Wood B. (2011) The formation and differentiation of Earth. *Physics Today*, **64**(12), 40-45. <http://dx.doi.org/10.1063/PT.3.1362>
- Wood B.J., Halliday A.N. (2010) The lead isotopic age of the Earth can be explained by core formation alone. *Nature*, **465**(7299), 767-771. <http://dx.doi.org/10.1038/nature09072>