

УДК 552.11

ПРОИСХОЖДЕНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ КОРЫ И ЛИТОСФЕРЫ ДРЕВНИХ ПЛАТФОРМ С УЧЕТОМ ДАННЫХ О ГОРЯЧЕЙ ГЕТЕРОГЕННОЙ АККРЕЦИИ ЗЕМЛИ

© 2017 г. В. С. Шкодзинский

*Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677981, г. Якутск, просп. Ленина, 39,
e-mail: shkodzinskiy@diamond.ysn.ru*

Поступила в редакцию 29.12.2015 г.; принята к печати 08.07.2016 г.

Наиболее распространенные представления о природе геосфер и эндогенных процессов основаны на выдвинутой в середине прошлого столетия гипотезе холодной гомогенной аккреции Земли. Полученные в последние десятилетия данные пришли в противоречие с этой гипотезой. Установлено, что составы, изотопные возрасты и температуры образования пород кристаллической коры и литосферной мантии соотносятся по законам магматической дифференциации. Это свидетельствует о формировании их в результате фракционирования глобального океана магмы. Сильная химическая неравновесность мантийных пород с металлическим железом указывает на более раннее формирование земного ядра по сравнению с мантией в результате слипания железных частиц под влиянием в основном магнитных сил. Следовательно, аккреция была гетерогенной. Эти результаты приводят к новому решению дискуссионных генетических проблем. Быстрая аккреция ядра обусловила его очень высокую температуру. В последующем подогрев им мантии явился причиной возникновения в ней конвекции. Придонная часть сформировавшегося в результате импактного плавления силикатного океана магмы кристаллизовалась под влиянием роста давления его образующихся верхних частей. Кумулаты сформировали нижнюю мантию, а расположение по плотности разных по составу остаточных расплавов привело к возникновению слоистости в магматическом океане. Небольшая глубина раннего океана и пониженная сила гравитации на еще небольшой Земле обусловили низкое давление при его придонном фракционировании. Это привело к образованию большого количества кислых остаточных расплавов, что и объясняет раннее формирование кислой кристаллической коры платформ. Вследствие увеличения плотности с глубиной в слоистом океане магмы после прекращения аккреции не возникла обширная конвекция. Поэтому он длительно остывал и кристаллизовался сверху вниз преимущественно в результате кондуктивных теплопотерь и сформировал литосферу древних платформ. Последовательный подъем остаточных расплавов из различных слоев магматического океана обусловил закономерную эволюцию магматизма платформ от кислого к субщелочному и щелочному основному и кимберлитовому. Декомпрессионное плавление эколгитов при подъеме нижнемантийных плюмов приводило к массовому образованию очагов толеитовых магм в астеносфере. Их фракционирование сопровождалось возникновением кислых магм в условиях небольшого давления и щелочных – в условиях большого.

Ключевые слова: горячая гетерогенная аккреция, происхождение кристаллической коры и литосферы, генезис магм

GENESIS OF CRYSTALLINE CRUST AND LITHOSPHERE OF ANCIENT PLATFORM ACCORDING TO DATA ON THE HOT HETEROGENEOUS ACCRETION OF THE EARTH

Vladimir S. Shkodzinskii

*Diamond and Precious Metal Geology Institute, SB RAS, 39 Lenin av., Yakutsk, 677007, Russia,
e-mail: shkodzinskiy@diamond.ysn.ru*

Received 29.12.2015; accepted 08.07.2016

Compositions of gneisses from the Early Precambrian crystalline complexes of the Aldan shield and of mantle xenoliths from kimberlites plot along the magmatic fractionation trends. Their isotope age and crystallization temperature decrease in according to the sequence of their formation during fractionation. This indicates that the crystalline crust and lithosphere mantle formed as a result of crystallization and fractionation of a layered magma ocean. Evidence of chemical disequilibrium between the mantle rocks and metallic iron suggests that accretion of the Earth's core occurred before that of the silicate mantle under the effect of magnetic forces. In the silicate magma ocean, which originated through impact melting, the processes of compressional crystallization and fractionation of its near-bottom parts occurred. Due to a very low pressure in

Для цитирования: Шкодзинский В.С. (2017) Происхождение кристаллической коры и литосферы древних платформ с учетом данных о горячей гетерогенной аккреции Земли. *Литосфера*, 17(5), 5-15. DOI: 10.24930/1681-9004-2017-17-5-005-015

For citation: Shkodzinskii V.S. (2017) Genesis of crystalline crust and lithosphere of ancient platforms according to data on the hot heterogeneous accretion of the Earth. *Litosfera*, 17(5), 5-15. DOI: 10.24930/1681-9004-2017-17-5-005-015

the incipient magma ocean, the early formed residual melts varied in composition from granites to tholeiites. This provided very early formation of the acid crystalline crust. An increase in temperature during the accretion process resulted in the higher temperature of the upper mantle compared to the lower one. For this reason the lower mantle plumes did not ascend in the Early Precambrian, and magmas in ancient platforms were forming mainly from residual melts of compositionally varying layers of the magma ocean. In the Phanerozoic, the temperature of the lower mantle became higher than that of the upper one. As a result, lower mantle plumes, oceans and lithosphere of platforms came into existence. In the ascending mantle plumes, basic eclogites were subject to decompression melting. Fractionation of the formed magma chambers led to the formation of acid magmas under low pressure conditions and of various alkali-basic magmas under high pressures.

Keywords: *hot heterogeneous accretion, genesis of crystalline crust and lithosphere, origin of magmas*

НЕДОСТАТКИ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ, ОСНОВАННЫХ НА ГИПОТЕЗЕ ХОЛОДНОЙ ГОМОГЕННОЙ АККРЕЦИИ ЗЕМЛИ

Распространенные в настоящее время представления о глубинных геологических процессах, происхождении геосфер, магм, магматических и метаморфических пород возникли в середине прошлого столетия. Они основаны на появившейся в то время гипотезе формирования Земли путем холодной гомогенной аккреции [Шмидт, 1962]. По этой гипотезе в протопланетном диске одновременно объединялись и формировали Землю относительно холодные силикатные и железные частицы. Железное ядро, силикатная мантия и земная кора образовались в результате последующего разделения разных составляющих возникшей смеси по плотности. Использование в генетических концепциях гипотезы холодной гомогенной аккреции привело к игнорированию в них самого эффективного и массового процесса дифференциации земного вещества – магматического фракционирования. Это затруднило решение большинства генетических проблем и привело к выдвиганию предположений о существовании малореальных глубинных процессов. Такие предположения в настоящее время пришли в противоречие со многими данными.

Так, многообразие состава магматических пород принято объяснять отделением расплава в разной степени частично (на 0.1–20%) расплавленных глубинных породах [Рингвуд, 1981] и процессами привноса в зоны плавления гипотетическими потоками флюида малораспространенных в мантии щелочей, легких редких земель, воды, углекислоты [Johnson, Phillips, 2003; Jacob et al., 2008]. Однако экспериментальные исследования [Arndt, 1977] свидетельствуют, что расплав не отделяется от перидотита при плавлении его менее чем на 30% вследствие большой прочности его кристаллического каркаса. Это подтверждается равномерным распределением и отсутствием инъекций во вмещающие породы и, следовательно, автохтонностью анатектического жильного материала в единственном доступном наблюдению примере массового частичного плавления – в раннедокембрийских парагнейсах [Шкодзинский, 2014].

В мантийных ксенолитах обычно отсутствуют признаки повышения температуры и частичного плавления. Наоборот, в них широко распространены явления распада высокотемпературных минералов и замещения низкотемпературными [Alifrova et al., 2012]. Судя по минеральным равновесиям в породах ксенолитов из кимберлитов, температура литосферной мантии древних платформ на глубине 150 км снижалась примерно на 200°C за каждый миллиард лет (рис. 1). Поэтому в ней не происходило процессов разогрева, частичного плавления и отделения выплавов, как обычно предполагается.

С позиций гипотезы холодной аккреции невозможно убедительно объяснить раннее формирование больших объемов кислых магм и кислой кристаллической коры. По экспериментальным данным кислые расплавы в реальных бедных водой мафических породах могли формироваться при малобарическом (менее 0.3 ГПа) начальном (на 1–3%) частичном их плавлении. Однако при холодном образовании на Земле не могли происходить массовые процессы частичного плавления первичных ультраосновных пород на глубине менее 10–12 км, где давление было ниже 0.3 ГПа. Попыткам объяснить генезис этих расплавов отделением их из частично расплавленных мантийных эклогитов [Грин, Рингвуд, 1968] противоречат отсутствие кислых обособлений в многочисленных изученных ксенолитах этих пород из кимберлитов [Helmstaedt, Doing, 1975; Jacob et al., 2008] и **намного большая древность** кислой кристаллической коры (3.8–2.0 млрд лет) по сравнению с верхнемантийными эклогитами (в среднем 1.4 млрд лет, см. рис. 1).

Мантийные породы очень бедны летучими компонентами (обычные их содержания – доли процента), поэтому в них нет источников флюида. Нет их и в ядре, судя по бедности ими железных метеоритов, являющихся чаще всего обломками ядер разрушенных мелких планет [Додд, 1986]. Вследствие очень высокого давления в мантии не могут существовать сообщающиеся открытые трещины и поры, необходимые для движения флюида. Судя по экспериментальным данным, температура мантии на сотни градусов выше солидуса ее пород в присутствии флюидной фазы. Поэтому мантия полностью расплавилась бы в случае присутствия в ней флюида [Шкодзинский, 2014]. Следовательно, пре-

имущественно твердофазное ее состояние по геофизическим данным указывает на отсутствие в ней флюидной фазы, ее потоков и связанных с ними массовых процессов метасоматоза. Небольшое количество ее летучих компонентов растворено в расплаве или связано в минералах.

Таким образом, основанные на гипотезе холодной аккреции главные представления о происхождении магм и геосфер находятся в противоречии с эмпирическими данными и создают лишь видимость решения проблем. Вследствие массового повторения в течение десятков лет эти представления глубоко укоренились в сознании и не подвергаются сомнению. Однако получаемые путем использования ошибочных исходных положений решения частных генетических проблем также во многом являются ошибочными и лишь увеличивают число неясных вопросов. По этой причине большие затраты средств и труда тысяч исследователей являются малоэффективными и не приводят к существенному прогрессу геологической науки. Все это свидетельствует о том, что ее главные генетические концепции нуждаются в кардинальном пересмотре.

ДОКАЗАТЕЛЬСТВА ГОРЯЧЕЙ ГЕТЕРОГЕННОЙ АККРЕЦИИ ЗЕМЛИ И МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ НА НЕЙ МАГМАТИЧЕСКОГО ОКЕАНА

Основой для такого пересмотра являются современные данные о горячей гетерогенной аккреции нашей планеты. Крупным достижением планетологии в последние десятилетия является получение убедительных доказательств горячей аккреции планет земной группы и существования на них глобальных океанов магмы глубиной в сотни–тысячи километров. К их числу относятся установленный в результате полетов на Луну магматический генезис всех ее коренных пород, их очень древний возраст (обычно более 4 млрд лет), часто сильно фракционированный преимущественно анортозитовый состав и большая мощность (до 100 км) ее коры [Snyder et al., 2000]. Такая кора могла сформироваться только в результате всплывания плагиоклаза в кристаллизовавшемся глобальном океане магмы глубиной около 1000 км.

О существовании подобного океана на Земле свидетельствуют присутствие трендов магматического фракционирования в мантийных ксенолитах из кимберлитов (см. рис. 1, линия MgO), уменьшение среднего изотопного возраста разных верхнемантийных пород (линия По) и включений в алмазе (линия ВА), а также температуры кристаллизации пород (линия Т) в полном соответствии с последовательностью их формирования при магматическом фракционировании. Оказалось, что подобные тренды фракционирования характерны и для кристаллических пород Алдано-Станового щита. Гнейсы и кристаллические сланцы наиболее крупных Олек-

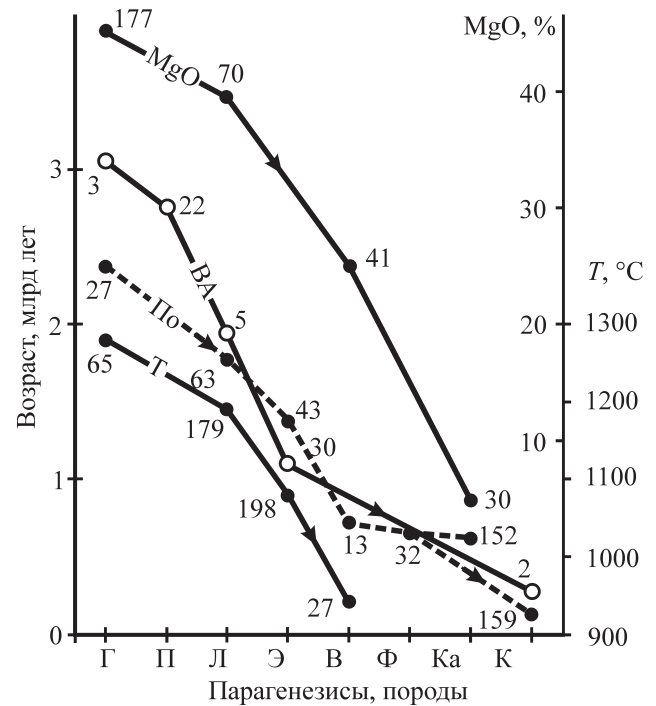


Рис. 1. Средние изотопные возрасты разных мантийных пород из ксенолитов в кимберлитах (линия По), включений в алмазах (линия ВА), средняя температура образования при 5 ГПа (линия Т) и среднее содержание MgO в породах (линия MgO).

Составы ксенолитов и включений в алмазах: Г – гарцбургитовый, П – перидотитовый нерасчлененный, Л – лерцолитовый, Э – эколитовый, В – верлитовый и вебстеритовый, Ф – флогопитсодержащие породы, Ка – карбонатиты, К – кимберлиты. Числа у точек обозначают количество использованных определений [Шкодзинский, 2014].

Fig. 1. Average isotope ages of different mantle rocks from xenoliths in kimberlite (line По), of inclusions in diamonds (line ВА), of average origin temperature (line Т) and of average contents MgO in rocks (line MgO).

Compositions of inclusions in diamonds and of xenoliths: Г – harzburgite, П – peridotite non-articulated, Л – lherzolite, Э – eclogite, Ф – phlogopite rocks, Ка – carbonatite, К – kimberlite. Numbers next to dots – numbers of data [Shkodzinskii, 2014].

минского, Федоровского и Курультинского комплексов, судя по более чем 600 опубликованным химическим анализам [Смелов и др., 2009; Березкин и др., 2015], соответствуют по составу типичным магматическим породам от лейкогранитов и гранитов до базитов и поля их составов располагаются вдоль единого тренда магматического фракционирования (рис. 2). Средний изотопный возраст уменьшается от основных высокотемпературных пород к кислым более низкотемпературным (рис. 3), то есть в полном соответствии с последовательностью кристаллизации при магматическом фракционировании.

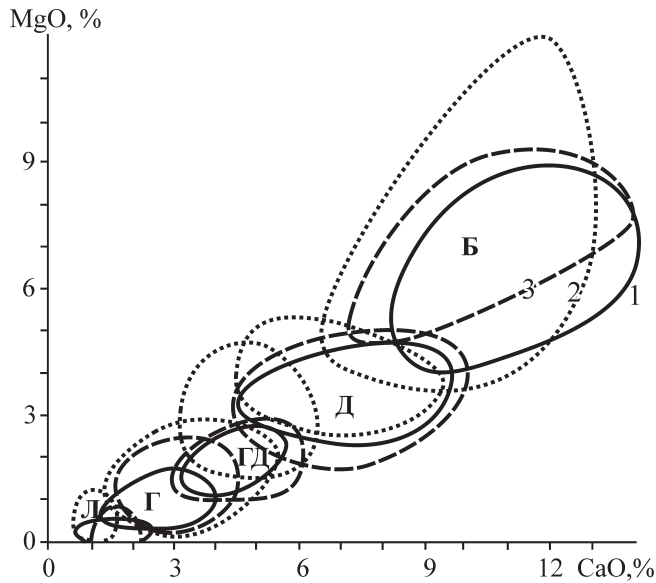


Рис. 2. Соотношение CaO–MgO в гнейсах и кристаллических сланцах Олекминского (1), Федоровского (2) и Курультинского (3) комплексов Алдано-Станового щита.

Поля: Л – лейкогранитов (73–78% SiO₂); Г – гранитов (68–73% SiO₂); ГД – гранодиоритов (63–68% SiO₂); Д – диоритов (53–63% SiO₂); Б – базитов (44–53% SiO₂). Используются анализы недиффторированных пород (исключая высокоглиноземистые гнейсы). Из работ [Смелов и др., 2009; Березкин и др., 2015].

Fig. 2. The ratio of CaO–MgO in gneisses and crystalline schists of Olekminsky (1), Fedorovsky (2) and Kurultinsky (3) complexes of the Aldan-Stanovoi Shield.

Fields: L – leucogranites (73–78% SiO₂); G – granites (68–73% SiO₂); GD – granodiorite (63–68% SiO₂); D – diorites (53–63% SiO₂); B – basite (44–53% SiO₂). Analyzes of non-diafforated rocks (excluding high-alumina gneisses) were used. From the works [Smelov et al., 2009; Berezkin et al., 2015].

Это свидетельствует о том, что данные кристаллические комплексы образовались не в результате высокотемпературного метаморфизма гипотетических осадочно-вулканогенных толщ, как обычно предполагается, а путем кристаллизации и фракционирования огромного объема магмы. Проекция линий геотермических палеоградиентов раннедокембрийских кристаллических комплексов и полей *P-T* условий образования ксенокристаллов клинопироксена из кимберлитов в область очень высокой температуры на земной поверхности (до 1000°C) указывают на то, что резервуар магмы сначала простирался до земной поверхности и, следовательно, представлял собой магматический океан [Шкодзинский, 2014]. Все это свидетельствует о возникновении мантии и кристаллической коры Земли в результате фракционирования глобального океана магмы.

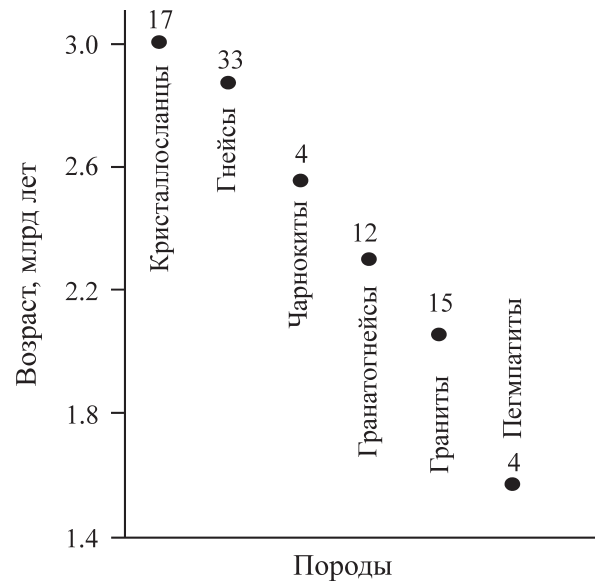


Рис. 3. Средние U-Pb и Rb-Sr возрасты различных кристаллических пород Алдано-Станового щита.

Числа у точек – количество использованных определений. Построено по данным [Смелов и др., 2009; Березкин и др., 2015].

Fig. 3. Average U-Pb and Rb-Sr ages of different crystalline rocks of the Aldan-Stanovoi Shield.

The number of points is the number of definitions used. It is constructed according to [Smelov et al., 2009; Berezkin et al., 2015].

К настоящему времени предложено множество моделей фракционирования лунного и земного магматических океанов. Главным их недостатком является отсутствие убедительного обоснования исходного состава океана и его эволюции на синаккреционной стадии. В соответствии с гипотезой гомогенной аккреции Земли обычно предполагается одновременное выпадение железных и силикатных частиц и рассматривается постааккреционная эволюция смеси силикатного и железного расплавов [Рингвуд, 1981; Федорин, 1991; Honda et al., 1998]. Однако такой подход не позволяет объяснить высокое содержание в породах мантии кислорода и сидерофильных элементов. Они хорошо растворимы в металлическом железе и поэтому были бы в большой степени вынесены из силикатной мантии в железное ядро в случае совместного выпадения и нахождения этих веществ в магматическом океане. Тем не менее содержание Ni, Co, Cu, Au и фугитивность кислорода при кристаллизации [Рингвуд, 1981; O'Neil, 1990] в породах мантии являются, соответственно, на два и четыре порядка более высокими, чем в случае химической равновесности ее пород с металлическим железом. Это свидетельствует о сильной химической неравновесности силикатной мантии с железным ядром. Непонятной

остается причина очень раннего образования большого объема кислой кристаллической коры.

Учет синаккреционной стадии эволюции магматического океана и данных об аккреции железного ядра раньше силикатной мантии позволяет избежать этих трудностей. Расчеты Харриса и Тозера [Harris, Tozer, 1967] показали, что скорость слипания железных частиц под влиянием магнитных сил в протопланетном диске была в 20 тыс. раз больше, чем силикатных под воздействием гравитационного притяжения. Поэтому при образовании Земли аккреция железных частиц произошла раньше, чем силикатных, и ядро сформировалось раньше мантии [Войткевич, 1983; Шкодзинский, 2014]. Следовательно, аккреция была гетерогенной. Это объясняет отсутствие обедненности мантийных пород сидерофильными элементами и кислородом и согласуется с изотопными данными [Yin et al., 2002] об очень раннем образовании ядра (в первые десятки миллионов лет эволюции Солнечной системы).

Выпадавшие на ядро силикатные частицы плавилась в результате импактного тепловыделения. Придонные части возникшего океана магмы должны были частично кристаллизоваться под влиянием роста давления образующихся его верхних частей и сформировали в основном из кумулатов породы нижней мантии, а из различных по составу остаточных расплавов – магматический океан. Эти расплавы и недифференцированные импактные ультраосновные магмы располагались в соответствии со своей плотностью и сформировали слоистость в магматическом океане. С геологическими данными лучше всего согласуется [Шкодзинский, 2014] его средняя глубина после прекращения аккреции около 240 км (рис. 4). Повышение основности с глубиной привело к возрастанию плотности расплава (от 2.3 до 2.8 г/см³) в этом направлении. Поэтому в магматическом океане при остывании не возникла обширная (от дна до поверхности) конвекция и он длительно затвердевал сверху вниз преимущественно в результате кондуктивных теплопотерь.

ПРИРОДА КИСЛОЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ КОРЫ В СООТВЕТСТВИИ С ДАННЫМИ О ГОРЯЧЕЙ ГЕТЕРОГЕННОЙ АККРЕЦИИ ЗЕМЛИ

Быстрая аккреция резко сократила масштабы рассеивания импактного тепла за счет излучения при формировании ядра, обусловила его изначально более высокую температуру по сравнению с позже формировавшейся силикатной мантией и существование на их границе в настоящее время скачка температуры до 3000 К [Raymond, Quentin, 1998]. Это является причиной последующего подогрева ядром мантии и возникновения в ней конвективных потоков. Такой генезис решает дискуссионную проблему природы мантийной конвекции и

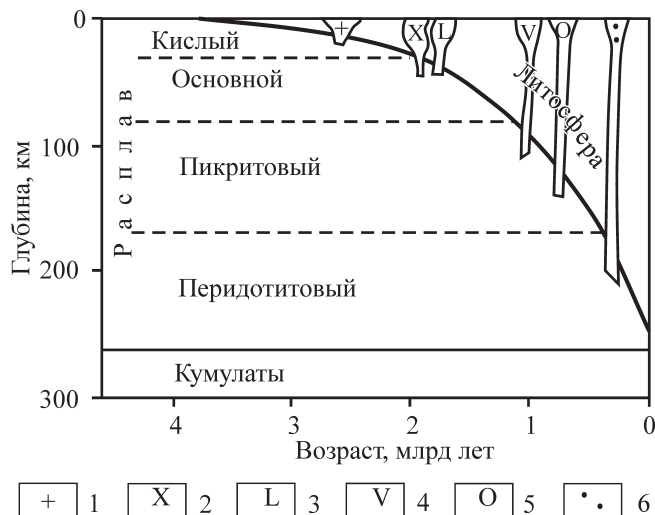


Рис. 4. Схема кристаллизации постааккреционного расслоенного магматического океана и эволюции магматизма на древних платформах.

Состав магм: 1 – кислый, 2 – субщелочной, 3 – анортозитовый, 4 – карбонатитовый, 5 – щелочной, 6 – кимберлитовый.

Fig. 4. Scheme of crystallization of postaccretion magma ocean and of magmatite evolution on ancient platforms.

Magma compositions: 1 – acid, 2 – subalkaline, 3 – anorthosite, 4 – carbonatite, 5 – alkaline, 6 – kimberlite.

не требует недоказуемого предположения о выделении из ядра в мантийные плюмы разуплотняющих их летучих компонентов.

Вследствие небольшой глубины раннего магматического океана и пониженной силы тяжести на еще небольшой Земле его придонное фракционирование длительное время было малобарическим. Поэтому остаточные расплавы в зависимости от степени компрессионного затвердевания импактных магм варьировали по составу от толеитов до гранитов. Это является причиной широкого распространения на Земле данных пород и очень раннего образования кислой кристаллической коры. Оно объясняет происхождение, состав, огромную мощность (30–40 км) кристаллической коры и повсеместное распространение в ней высокотемпературных минеральных парагенезисов. Их высокотемпературность обусловлена магматическим происхождением кристаллической коры и не связана с обычно предполагаемым существованием труднообъяснимого разогрева и метаморфизма гипотетических мощных вулканогенно-осадочных толщ. Это подтверждается идентичностью минеральных парагенезисов и температуры кристаллизации кристаллической коры с таковыми кислых магматических пород, с их распространением на огромных площадях, с отсутствием в них зональности и реликтов прогрессивной стадии.

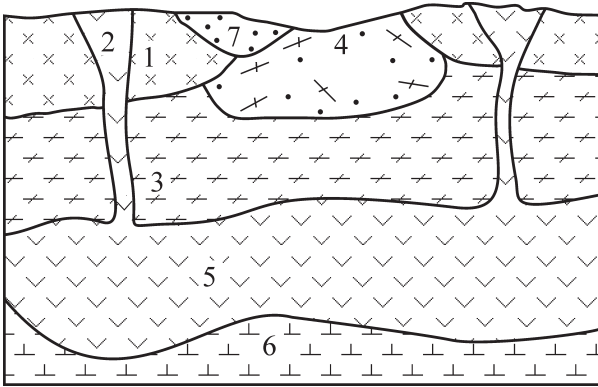


Рис. 5. Главные генетические типы раннедокембрийских комплексов.

1 – гранит-тоналит-трондьемитовые ранней кристаллизации океана магмы; 2 – зеленокаменные; 3 – гранулитогнейсовые инфракrustальные; 4 – гранулитогнейсовые супра-инфракrustальные; 5 – нижнелитосферные базит-гранулитовые; 6 – нижнемантийные мафические; 7 – вулканогенно-терригенные.

Fig. 5. The main genetic types of Early Precambrian complexes.

1 – granite-tonalite-trondhjemite early crystallization of the magma ocean; 2 – greenstone; 3 – granulite-gneiss infracrustal; 4 – granulite-gneiss supra-infracrustal; 5 – lower-lithospheric basite-granulite; 6 – lower mantle mafic; 7 – volcano-terrigeneous.

На ранней стадии аккреции силикатного материала еще не произошло образования в протопланетном диске фаз, содержащих K_2O и H_2O , поскольку температура конденсации щелочных полевых шпатов и гидратированных силикатов в нем 730 и 100–0°C соответственно, а ранние конденсаты (CaO , Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2) возникли при 1570–1230°C [Рингвуд, 1981]. Поэтому формировавшийся Землю ранний силикатный материал был беден этими компонентами. Это объясняет их пониженное содержание в кислой кристаллической коре и преобладание в ней богатых кальцием и алюминием гиперстеновых плагигнейсов.

С учетом кристаллизации последних пегматитовых расплавов 1.76 млрд лет назад (см. рис. 3) и возраста Земли 4.56 млрд лет кислый слой магматического океана остывал около 3 млрд лет и в течение первого полмиллиарда лет земная поверхность, видимо, была полностью покрыта расплавом. Это объясняет казавшееся загадочным отсутствие на Земле пород древнее 4 млрд лет и кратеров гигантской метеоритной бомбардировки, завершившейся на Луне около 3.9 млрд лет назад, а также большой разброс цифр определений изотопного возраста раннедокембрийских кристаллических комплексов. Первые кристаллы в кислом слое появились, видимо, около 4.3 млрд лет назад, судя по изотопному возрасту ядер некоторых цирконов.

Значительный рост основности и плотности магм с глубиной в расслоенном океане препятствовал опусканию в нем остывавших расплавов. Однако после кристаллизации самых верхних частей кислого слоя они вместе со сформировавшимися на них осадочными породами периодически тонули вследствие значительного (до 10%) возрастания их плотности при кристаллизации. Ниже расположенные более мафические расплавы всплывали. Затем процесс повторялся. Это объясняет пестрый состав гнейсовых комплексов, большие вариации их основности, частое присутствие среди них парапород. С этим же должны быть связаны вариации плотности и скорости прохождения сейсмических волн в глубинных частях кристаллической коры. Процессы течения сильно закристаллизованных магм обусловили возникновение в сформированных ими породах бластических структур и гнейсовидных текстур.

Раньше всего затвердели самые кислые верхние части магматического океана с формированием гранитных и тоналит-трондьемитовых комплексов. При их кристаллизации еще не происходили процессы осадкообразования, поэтому эти комплексы обычно не содержат тел парапород. Всплывавшие расплавы глубинных частей магматического океана формировали на их поверхности зеленокаменные пояса (рис. 5). Подъем подстилавших их более высокотемпературных магм приводил к раздвижению блоков гранит-зеленокаменных комплексов и возникновению на земной поверхности ареалов развития гранулитовых гнейсов. Это объясняет часто меньший изотопный возраст этих пород по сравнению с гранит-зеленокаменными. При их кристаллизации уже начинались процессы формирования осадочных пород, что является причиной присутствия парапород во многих гранулитогнейсовых комплексах.

Обособление остаточных расплавов при кристаллизации ортогнейсов сопровождалось образованием в них большого количества бескорневых гранитоидных тел. Это решает крупную проблему природы региональной гранитизации докембрийских гнейсов, которая в течение почти двух веков была предметом острой дискуссии.

Быстрое затвердевание верхнего кислого слоя магматического океана путем кондуктивных теплопотерь объясняет сравнительно раннее возникновение на кислой коре осадочных пород. Ортопороды на земной поверхности подвергались интенсивному химическому воздействию горячей газопаровой оболочки, обогащенной кислотными эманациями магматического океана (HCl , HF , H_2S и др.). В результате оглинивания полевых шпатов и отделения глинистого материала возникали скопления глин и остаточного кварца. Их метаморфизм под влиянием еще горячего основания обусловил формирование крупных тел высокоглино-

земистых гнейсов и кварцитов и обычно совместное их нахождение. Это объясняет казавшееся непонятным широкое развитие этих пород в древних комплексах. По мере снижения температуры в первоначально горячих водоемах происходило осаждение карбонатов и образование тел карбонатных пород, характерных для верхних частей раннедокембрийских комплексов.

Горячие дождевые воды выносили железо и кремнекислоту из пород в ранние водоемы. Это привело к образованию большого количества железистых кварцитов, что и объясняет их аномально широкое распространение в раннедокембрийских толщах. Вследствие первоначально очень высокой температуры газово-паровой оболочки отделявшиеся из магматического океана газовые эманации мало остывали, рассеивались в ней и чаще всего не формировали гидротермальных месторождений. Это объясняет обычную безрудность огромных объемов древних гранитогнейсов в отличие от высокой гидротермальной рудоносности фанерозойских гранитоидов. Накопление рудных компонентов в газово-паровой оболочке привело к массовому образованию стратиформных месторождений меди, свинца, цинка и некоторых других элементов в основном в протерозое, когда эта оболочка остыла и происходило осаждение из нее рудных компонентов. Это является причиной возникновения большого количества таких месторождений в это время без видимой связи с какими-либо магматическими комплексами.

Массовые процессы испарения дождевых вод на горячей земной поверхности и конденсации паров в верхней части газово-паровой оболочки обусловили интенсивную ионизацию последней и возникновение многочисленных электрических разрядов. Они способствовали формированию органических соединений и примитивных бактерий в горячих водоемах.

Вследствие высокой текучести магм кислый слой магматического океана и сформировавшаяся из него кристаллическая кора сначала должны были покрывать всю поверхность Земли. Последующие тектонические деформации привели к сильному сокращению площади распространения кристаллической коры. Вследствие существования магматического океана магмы зеленокаменных поясов поднимались из его глубинных слоев (см. рис. 5). Это подтверждается участием в формировании этих поясов всех магм этого океана (ультраосновных, основных, средних и кислых) и широким развитием коматитов только в зеленокаменных поясах.

Подъем остаточных расплавов из кристаллизовавшихся и фракционировавшихся нижних частей кислого слоя сопровождался формированием кислых магм (см. рис. 4), сначала малоглубинных с низким содержанием щелочей, затем все более глубинных и щелочных. Это объясняет массовое об-

разование гранитоидов в докембрии. Последующее всплывание и выжимание наиболее кислых полужакристаллизованных частей кристаллической коры в областях коллизии приводило к их декомпрессионному и фрикционному (реоморфическому) плавлению и образованию характерных для этих областей огромных гранитных батолитов. Такой генезис подтверждается идентичностью их состава с раннедокембрийскими гранитоидами и присутствием только в областях с кислой кристаллической корой [Шкодзинский, 2014]. Он решает известную проблему природы гранитоидных батолитов, долгое время бывшую предметом дискуссии.

Выжимание плагиоклазовых кумулатов из кислого и основного слоев преимущественно в протерозое обусловило образование автономных анортозитов, распространенных на многих древних щитах. Участие в их формировании кислых и средних магм является причиной значительно более кислого состава в них плагиоклаза (до андезина и олигоклаза) по сравнению с анортозитами дифференцированных мафических интрузий (лабрадор и битовнит). Подъем остаточных расплавов из основного слоя магматического океана привел к формированию субщелочных и щелочных средних и основных магм.

Процессы фракционирования в нижнем перидотитовом слое магматического океана обусловили образование карбонатитовых и кимберлитовых остаточных расплавов и магм. Очень длительные (миллиарды лет) процессы накопления хорошо растворимых в расплавах щелочей, летучих компонентов и легких редкоземельных элементов объясняют гигантское их содержание (до тысяч хондритовых норм) в карбонатитах и щелочных магматических породах без предположения существования нереальных процессов метасоматического привноса этих компонентов в мантию. Следы кристаллизации богатых расплавофильными компонентами остаточных расплавов в мантийных ксенолитах, видимо, обычно принимаются за признаки протекания глобальных метасоматических процессов.

Вследствие кристаллизации расслоенного магматического океана сверху вниз его придонный перидотитовый слой фракционировал наиболее поздно. Это обусловило относительно молодой возраст карбонатитов и особенно кимберлитов (см. рис. 1), возникавших из его последних расплавов.

Судя по содержанию в кимберлитах до тысячи хондритовых норм легких редких земель, кимберлитовые остаточные расплавы возникали после кристаллизации перидотитового слоя примерно на 99.90–99.99%. Это является причиной незначительного объема кимберлитовых расплавов в мантии и обычно небольшого размера сформированных ими тел в земной коре (десятки–сотни метров), а также низкотемпературности их магм (около 500°C после взрыва) [Шкодзинский, 2014]. Низкотемпе-

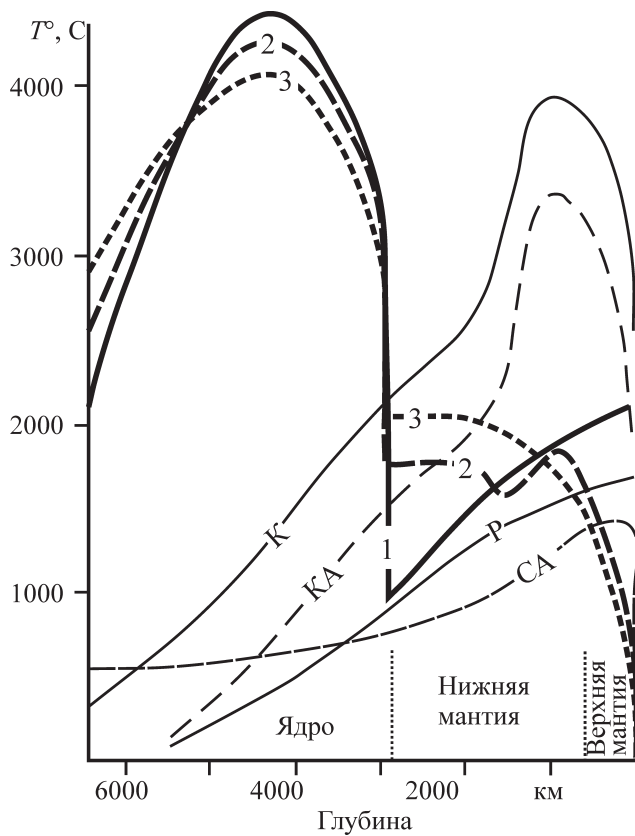


Рис. 6. Эволюция температуры при аккреции Земли по данным У. Каулы (КА) и В.С. Сафронова (СА). Первичное распределение температуры в недрах Земли по данным У. Каулы (К) и А.Е. Рингвуда (Р) [Рингвуд, 1981; Сафронов, 1987; Федорин, 1991].

1–3 – распределение температуры по оценкам автора: 1 – первичное [Шкодзинский, 2014], 2 – в конце протерозоя, 3 – в фанерозое.

Fig. 6. Evolution of temperature in accretion of the Earth according to the data of U. Kaula (KA) and V.S. Safronova (SA). The primary temperature distribution in the interior of the Earth according to the data of W. Kaula (K) and A.E. Ringwood (R) [Ringwood, 1981; Safronov, 1987; Fedorin, 1991].

1–3 – temperature distribution according to the author's estimates: 1 – primary [Shkodzinsky, 2014], 2 – at the end of the Proterozoic, 3 – in the Phanerozoic.

ратурность привела к затвердеванию (путем остеклования или кристаллизации расплава) кимберлитовых магм на поздних стадиях подъема вследствие выкипания из них при декомпрессии сильнейших плавней – летучих компонентов. Дальнейший подъем сопровождался взрывом верхних частей кимберлитовых колонн под влиянием высокого внутреннего давления законсервированной затвердеванием газовой фазы. Это объясняет образование кимберлитовыми магмами преимущественно трубок взрыва и брекчий и обычно отсутствие ким-

берлитовых лав на земной поверхности. Раздвижение продуктов фракционирования перидотитового слоя под океаническими областями поднимавшимся и растекавшимся веществом плюмов при формировании этих областей является причиной, казалось бы, загадочного отсутствия в них кимберлитов (правило Клиффорда).

Накопление углерода в остаточных расплавах при кристаллизации перидотитового слоя, вследствие незначительной растворимости этого компонента в породообразующих минералах, обусловило длительную (в течение примерно 3 млрд лет) кристаллизацию в них алмазов. Накопление в этих расплавах кремнекислоты приводило к возрастанию их вязкости. Это вызвало снижение скорости диффузии в них углерода, увеличение степени пересыщения их этим компонентом, уменьшение площади возникавших слоев роста на кристаллах алмаза и эволюцию их морфологии от гладкогранных октаэдров к ламинарным октаэдрам и округлым додекаэдроэдрам и далее к кубам и агрегатам. Возрастание степени пересыщения расплавов углеродом обусловило постепенное сокращение при кристаллизации алмазов роли послыоного роста и возрастание роли нормального радиального. Радиальный рост привел к возникновению на поздних алмазах большого количества разнообразных скульптур. Накопление расплавофильных компонентов в остаточных расплавах является причиной постепенного возрастания их содержания в алмазах, особенно азота и легкого изотопа углерода, и эволюции состава минеральных включений в них от перидотитового к эклогитовому и далее к кимберлитовому.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЛИТОСФЕРЫ ДРЕВНИХ ПЛАТФОРМ

Постепенное укрупнение планетизималей в протопланетном диске приводило к резкому уменьшению потерь импактного тепла на излучение при аккреции. Это обусловило постепенное возрастание температуры накапливавшегося материала. По расчетам разных исследователей такое увеличение температуры составляло от 800 до примерно 3600°C [Рингвуд, 1981; Федорин, 1991]. Следовательно, температура нижней мантии сначала была значительно меньше, чем верхней, а не наоборот, как обычно предполагается. Поэтому геотермический градиент в земных недрах в раннем докембрии был обратным по отношению к современному (рис. 6). Из этого следует очень важный вывод о том, что в раннем докембрии не существовали нижнемантийные плюмы, океанические области и геодинамические обстановки современного типа. С течением времени нижняя мантия постепенно разогревалась под влиянием изначально более горячего ядра, а верхняя остывала вследствие теплоотдачи в более холодную земную кору. Под влиянием

этого произошла инверсия распределения температуры и возник современный геотермический градиент. Это объясняет появление траппов и эвгеосинклинальных магматических пород складчатых поясов в основном в конце протерозоя, а океанической коры и современных океанов – только в юре. То есть процесс полной инверсии геотермического градиента занял около 4 млрд лет.

Таким образом, под древними платформами верхняя и нижняя части мантии имеют различные состав, происхождение и историю эволюции. Верхняя сложена продуктами фракционирования постаккреционного слоистого океана магмы и в течение всей истории Земли остывала. Как уже отмечалось, кимберлитовые остаточные расплавы отделились от перидотитового слоя после кристаллизации его на 99.90–99.99%. То есть к началу массового внедрения в фанерозое кимберлитов вся верхняя часть мантии под кратонами практически полностью затвердела. Нижняя часть мантии состоит преимущественно из ранних кумулатов синаккреционного магматического океана и в течение всей истории разогревалась под влиянием изначально более горячего ядра. Видимо, в конце протерозоя всплывавшие струи горячего нижнемантийного вещества начали достигать подошвы продуктов фракционирования постаккреционного магматического океана. Последние к этому времени были уже практически полностью раскристаллизованы и поэтому обладали свойствами твердого тела. К этому времени следует относить появление континентальной литосферы. Это согласуется с появлением на платформах в конце протерозоя горизонтально залегающего чехла, указывающее на прекращение их пластических деформаций. Более высокая магнезиальность оливина (до 93%) в перидотитовых ксенолитах из кимберлитов по сравнению с оливином тренда океанического фракционирования (72–84% и меньше) [Aulbach et al., 2003] обусловлена формированием континентальных перидотитов в самом мафическом нижнем слое магматического океана, а не их высокой деплетированностью в результате гипотетических процессов выплавки коматитовых расплавов.

При всплывании подогретого ядром нижнемантийного вещества происходило декомпрессионное плавление в плюмах наиболее легкоплавких пород, эклогитов, возникших путем затвердевания захороненных среди кумулатов расплавов синаккреционного магматического океана. Это приводило к образованию большого количества основных магм в океанических и континентальных областях (рис. 7). Низкое давление при придонном фракционировании раннего синаккреционного магматического океана является причиной толеитового состава большинства нижнемантийных эклогитов и массового формирования толеитовых магм в нижнемантийных плюмах.

Фракционирование очагов толеитовых магм в астеносфере в глубинных условиях обуслови-

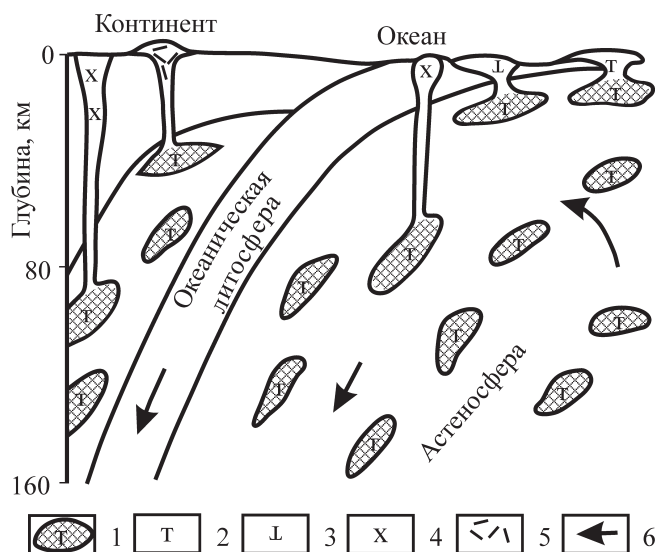


Рис. 7. Схема образования магм в океанах.

1 – очаги толеитовых магм в астеносфере, 2 – недифференцированные магмы срединно-океанических хребтов, 3 – дифференцированные толеитовые магмы океанических островов, 4 – субщелочные и щелочные магмы абиссальных океанических равнин и внешних магматических поясов зон субдукции, 5 – дацит-андезит-базальтовые магмы субдукционных вулканических поясов, 6 – направление потоков в астеносфере.

Fig. 7. Diagram of the formation of magmas in the oceans.

1 – foci of tholeiitic magmas in the asthenosphere, 2 – undifferentiated magmas of mid-oceanic ridges, 3 – differentiated tholeiitic magmas of oceanic islands, 4 – subalkaline and alkaline magmas of abyssal oceanic plains and external magmatic belts of subduction zones, 5 – dacite-andesite-basaltic magmas of subduction volcanic belts, 6 – the direction of flows in the asthenosphere.

ло возникновение остаточных щелочно-основных расплавов и магм. В случае размещения под мощной литосферой континентов их фракционирование вследствие большого давления сопровождалось кристаллизацией алмазов [Шкодзинский, 2015]. Такое происхождение, видимо, имеют алмазы лампроитов и крупных россыпей, для которых не удалось установить кимберлитовые источники, несмотря на длительные поиски. Интенсивное малоглубинное фракционирование очагов толеитовых магм в астеносфере под влиянием охлаждения опускавшейся холодной океанической литосферой приводило к формированию кислых магм в зонах субдукции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, учет данных о горячей гетерогенной аккреции Земли позволяет без малореальных предположений объяснить происхождение, особенности состава, возраста и распространения разных

пород коры и мантии. Вытекающие из них решения генетических проблем хорошо согласуются с эмпирическими данными. Это является доказательством их справедливости. Из этого следует необходимость перехода на новые представления и отказа от устаревших при решении разнообразных генетических проблем. В результате может быть создана единая количественная теория глубинных геологических процессов, позволяющая более успешно решать научные и практические задачи геологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Березкин В.И., Смелов А.П., Зедгенизов А.Н., Кравченко А.А., Попов Н.В., Тимофеев В.Ф., Торопова Л.И. (2015) Геологическое строение центральной части Алдано-Станового щита и химический состав пород раннего докембрия (Южная Якутия). Новосибирск: Изд. СО РАН, 459 с.
- Войткевич Г.В. (1983) Основы теории происхождения Земли. М.: Недра, 168 с.
- Грин Д.Х., Рингвуд А.Е. (1968) Происхождение известково-щелочных магматических пород. *Петрология верхней мантии*. М.: Мир, 118-131.
- Додд Р.Т. (1986) Метеориты – петрология и геохимия. М.: Мир, 382 с.
- Рингвуд А.Е. (1981) Состав и петрология мантии Земли. М.: Недра, 584 с.
- Сафронов В.С. (1987) Происхождение Земли. М.: Знание, 46 с.
- Смелов А.П., Березкин В.И., Тимофеев В.Ф., Зедгенизов А.Н., Попов Н.В., Торопова Л.И. (2009) Геологическое строение западной части Алдано-Станового щита и химические составы пород раннего докембрия (Южная Якутия). Новосибирск: Изд. СО РАН, 168 с.
- Федорин Я.В. (1991) Модель эволюции ранней Земли. Киев: Наукова думка, 112 с.
- Шкодзинский В.С. (2014) Петрология литосферы и кимберлитов (модель горячей гетерогенной аккреции Земли). Якутск: Изд. СВФУ, 452 с.
- Шкодзинский В.С. (2015) Плюмовая природа алмазов россыпей с неизвестным коренным источником. *Литосфера*, (2), 27-39.
- Шмидт О.Ю. (1962) Происхождение Земли и планет. М.: Изд. АН СССР, 132 с.
- Alifirova T.F., Pokhilenko L.N., Malkovets V.G., Griffin W.L. (2012) Petrological inferences for the role of exolution in upper mantle: evidence from the Yakutian kimberlite xenoliths. *10th International Kimberlite Conference*. Bangalore, 101KC-048.
- Arndt N.T. (1977) The separation of magmas from partially molten peridotite. Carnegie Institution of Washington, Yearbook. **76**. 424-428.
- Aulbach S., Griffin N.L., O'Reilly S.Y., McCandless T.E. (2003) The lithospheric mantle beneath Buffalo Head terrane, Alberta: xenoliths from the Buffalo Hills kimberlite. *8th International Kimberlite Conference*, Long Abstracts. Victoria. Canada.
- Harris P.G., Tozer D.C. (1967) Fractionation of iron in the Solar system. *Nature*, **215**, 1449-1451.
- Helmstaedt H., Doing R. (1975) Eclogite nodules from the

- Colorado plateau – samples of subducted Franciscan type oceanic lithosphere. *Physics and Chemistry of the Earth*, **9**, 95-111.
- Honda R., Mizutany H., Jamamoto T. (1998) Numerical simulation of Earth's core formation. *J. Geophys. Res.*, **988**, 2075-2089.
- Jacob D.E., Viljoen K.S., Grassineau N. (2008) Eclogite xenoliths from Kimberley, South Africa – a case study of extensive mantle metasomatism. *9th International Kimberlite Conference*, Extended Abstract. 91KC-A-00393.
- Johanson L., Phillips D. (2003) ⁴⁰Ar-³⁹Ar dating of mantle metasomatism: a noble approach or all hot air. *8th International Kimberlite Conference*, Long Abstracts. Victoria. Canada.
- O'Neil H.S. (1990) Oxygen fugacity and siderophile elements in the Earth's mantle: implications for the origin of the Earth. *Meteoritics*, **25**, 395.
- Raymond J., Quentin W. (1998) The core-mantle boundary region. *Rev. Miner.*, **37**, 241-259.
- Snyder G.A., Borg L.E., Nyquist L.A. Taylor S.A. (2000) Chronology and isotopic constrains on Lunar evolution. *The origin of the Earth and Moon*. Univ. of Ariz. Press, 361-395.
- Yin Q., Jacobsen S., Yamashita K., Blicher-Toft J., Telouk P., Albarede F.A. (2002.) A short timescale for terrestrial planet formation from Hf-W chronometry of meteorites. *Nature*, **418**, 949-952.

REFERENCES

- Alifirova T.F., Pokhilenko L.N., Malkovets V.G., Griffin W.L. (2012) Petrological inferences for the role of exolution in upper mantle: evidence from the Yakutian kimberlite xenoliths. *10th International Kimberlite Conference*. Bangalore, 101KC-048.
- Arndt N.T. (1977) The separation of magmas from partially molten peridotite. Carnegie Institution of Washington, Yearbook, **76**, 424-428.
- Aulbach S., Griffin N.L., O'Reilly S.Y., McCandless T.E. (2003) The lithospheric mantle beneath Buffalo Head terrane, Alberta: xenoliths from the Buffalo Hills kimberlite. *8th International Kimberlite Conference*, Long Abstracts. Victoria. Canada.
- Berezkin V.I., Smelov A.P., Zedgenizov A.N., Kravchenko A.A., Popov N.V., Timofeev V.F., Toropova L.I. (2015) *Geologicheskoe stroenie tsentral'noi chasti Aldano-Stanovogo shchita i khimicheskii sostav porod rannego dokembriya (Yuzhnaya Yakutiya)* [The geological structure of the central part of the Aldan-Stanovoy Shield and the chemical composition of rocks of the Early Precambrian (South Yakutia)]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 459 p. (In Russian)
- Dodd R.T. (1986) *Meteority – prtrologiya i geokhimiya* [Meteorites – petrology and geochemistry]. Moscow: Mir Publ., 382 p (In Russian)
- Fedorin Ya.V. (1991) *Model' evolyutsii rannei Zemli* [Model of the evolution of the early Earth]. Kiev, Naukova dumka Publ., 112 p. (In Russian)
- Green D.K.H., Ringvud A.E. (1968) The origin of calc-alkaline igneous rocks. *Petrologiya verkhnei mantii* [Petrology of the upper mantle]. Moscow, Mir Publ., 118-131. (In Russian)
- Harris P.G., Tozer D.C. (1967) Fractionation of iron in the Solar system. *Nature*, **215**, 1449-1451.

- Helmstaedt H., Doing R. (1975) Eclogite nodules from the Colorado plateau – samples of subducted Franciscan type oceanic lithosphere. *Physics and Chemistry of the Earth*, **9**, 95-111.
- Honda R., Mizutany H., Jamomoto T. (1998) Numerical simulation of Earth's core formation. *J. Geophys. Res.*, **988**, 2075-2089.
- Jacob D.E., Vilioen K.S., Grassineau N. (2008) Eclogite xenoliths from Kimberley, South Africa – a case study of extensive mantle metasomatism. *9th International Kimberlite Conference*, Extended Abstract, 91KC-A-00393.
- Johanson L., Phillips D. (2003) ⁴⁰Ar-³⁹Ar dating of mantle metasomatism: a noble approach or all hot air. *8th International Kimberlite Conference*, Long Abstracts. Victoria, Canada.
- O'Neil H.S. (1990) Oxygen fugacity and siderophile elements in the Earth's mantle: implications for the origin of the Earth. *Meteoritics*, **25**, 395.
- Raymond J., Quentin W. (1998) The core-mantle boundary region. *Rev. Miner.*, **37**, 241-259.
- Ringvud A.E. (1981) Sostav i petrologiya mantii Zemli [Composition and petrology of the Earth's mantle]. Moscow, Nedra Publ., 584 p. (In Russian)
- Safronov V.S. (1987) *Proishozhdenie Zemli*. [The Origin of the Earth]. Moscow, Znanie Publ., 46 p. (In Russian)
- Shkodzinskii V.S. (2014) *Petrologiya litosfery i kimberlitov (model' goryachei geterogennoi akkretsii Zemli)* [Petrology of the lithosphere and kimberlites (model of hot heterogeneous accretion of the Earth)]. Yakutsk, SVFU Publ., 452 p. (In Russian)
- Shkodzinskii V.S. (2015) The plum nature of placer diamonds with an unknown root source. *Litosfera*, (2), 27-39. (In Russian)
- Shmidt O.Yu. (1962) *Proiskhozhdenie Zemli i planet* [The origin of the Earth and planets]. Moscow, AN SSSR, 132 p. (In Russian)
- Smelov A.P., Berezkin V.I., Timofeev V.F., Zedgenizov A.N., Popov N.V., Toropova L.I. (2009) *Geologicheskoe stroenie zapadnoi chasti Aldano-Stanovogo shchita i khimicheskie sostavy porod rannego dokembriya (Yuzhnaya Yakutiya)* [The geological structure of the western part of the Aldan-Stanovoi Shield and the chemical composition of rocks of the Early Precambrian (South Yakutia)]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 168 p. (In Russian)
- Snyder G.A., Borg L.E., Nyquist L.A., Taylor S.A. (2000) Chronology and isotopic constraints on Lunar evolution *The origin of the Earth and Moon*. Univ. of Ariz. Press, 361-395.
- Voitkevich G.V. (1983) *Osnovy teorii proishozhdeniya Zemli* [Fundamentals of the theory of the origin of the Earth]. Moscow, Nedra Publ., 168 p. (In Russian)
- Yin Q., Jacobsen S., Yamashita K., Blicher-Toft J., Tselouk P., Albarede F.A. (2002.) A short timescale for terrestrial planet formation from Hf-W chronometry of meteorites. *Nature*, **418**, 949-952.