

Эволюция геодинамических обстановок в истории Земли

На основании полученных доказательств горячей гетерогенной аккреции Земли выделены три новые геодинамические обстановки, связанные с присутствием глобального магматического океана на ранней стадии эволюции. Приведены доказательства существования на этой стадии обратного геотермического градиента в мантии и отсутствия современных геодинамических обстановок. Последние появились в конце протерозоя после прогрева мантии ядром. Магмы формировались в результате фракционирования магматического океана и путем декомпрессионного и фрикционного переплавления его дифференциатов.

Ключевые слова: геодинамические обстановки, магматический океан, генезис магм.

V. S. SHKODZINSKIY (DPAMGI SB RAS)

Evolution of geodynamic settings in the Earth history

Three new geodynamic settings associated with the presence of the global magmatic ocean that existed at an early stage of evolution have been identified based on the obtained data of hot heterogeneous accretion of the Earth. Evidence is given for the existence of a reverse geothermal gradient in the mantle at this stage and the lack of recent geodynamic settings. The latter emerged in the late Proterozoic after the mantle was heated by the core. Magmas were formed due to the fractionation of the magmatic ocean and by the decompression and frictional remelting of its differentiates.

Keywords: geodynamic settings, magmatic ocean, magma genesis.

Для цитирования: Шкодзинский В. С. Эволюция геодинамических обстановок в истории Земли // Региональная геология и металлогения. – 2021. – № 85. – С. 103–113.

Введение. Крупнейшим достижением геологической науки является установление во второй половине прошлого столетия расширения океанического дна и разработка на этой основе теории тектоники литосферных плит. Эта теория убедительно объяснила природу главных современных геодинамических обстановок — океанических, субдукционных и коллизионных.

Но непонятными остаются обстановки ранних стадий развития Земли и генезис магм. Очевидно, что для решения этих проблем необходимо знать происхождение Земли. По господствующей гипотезе холодной гомогенной аккреции [22], в раннем докембрии должны были существовать те же обстановки и процессы магнообразования, что и в фанерозое. Однако к настоящему времени получено большое количество доказательств ошибочности этой гипотезы. Они указывают на горячее гетерогенное формирование Земли.

О таком ее происхождении свидетельствуют расчеты, показавшие, что импактное тепловыделение при образовании Земли равно около 9000 ккал/г. Оно было способно разогреть ее вещество на 34 тысячи градусов [12]. Большую величину этого тепловыделения демонстрируют плавление и частичное испарение вещества падающих метеоритов. Следовательно, аккреция была горячей. Это подтверждается существованием трендов магматического фракционирования

в мантийных ксенолитах и раннедокембрийских ортогнейсовых комплексах, полным соответствием среднего изотопного возраста и температуры кристаллизации их различных пород последовательности образования при фракционировании, проекцией ранних геотермических градиентов в область высокой температуры на земной поверхности (до 1000 °С) и многими другими данными [19].

Резкая химическая неравновесность мантийных пород с металлическим железом в отношении содержания в них хорошо растворимых в железе сидерофильных элементов, в двадцать тысяч раз более высокая фугитивность в них кислорода [12; 26], распространение на Земле H₂O и CO₂, а не продуктов их восстановления (H₂ и CO), и другие данные указывают, что железные и силикатные частицы никогда не были перемешаны в земных недрах. Аккреция была гетерогенной. Ядро образовалось раньше мантии в результате объединения железных частиц под влиянием магнитных сил [24], поскольку при небольшом размере тел они были в миллиарды раз мощнее гравитационных [19]. Наглядно это иллюстрирует быстрое объединение намагниченных мелких железных предметов (например, скрепок), тогда как под влиянием сил гравитационного притяжения они никогда не объединятся. Вследствие нахождения на стадии

Т Тельца формирующееся Солнце в это время имело в тысячи раз более мощное магнитное поле, чем сейчас. Это обусловило сильное намагничивание железных частиц протопланетного диска после остывания его до температуры Кюри и их быстрое объединение. Огромная вязкость мантии (10^{22} – 10^{23} пуаз) и ее высокая окисленность противоречат предположениям о продолжающемся до настоящего времени выделении вещества ядра из мантии [15] или выделению его в архее, что согласуется с данными по изотопам Hf, W, Pb. Они демонстрируют, что на Земле аккреция и выделение ядра имели место в первые 100 млн лет [4; 25; 28], а на Луне – в первые 40 млн лет [8]. Исчезновение протопланетных дисков вокруг звезд с возрастом более 10 млн лет [27] указывает, что аккреция и объединение железных частиц произошли примерно через 5–10 млн лет после образования дисков.

Хадейская панмагматическая геодинамическая обстановка. Импактное плавление вещества при аккреции обусловило возникновение глобального магматического океана. Это позволяет сделать очень важный вывод о том, что при аккреции мантии и некоторое время после завершения ее (в хадее) поверхность Земли была покрыта магмой и на ней существовала *панмагматическая геодинамическая обстановка* (рис. 1). В опубликованных многочисленных моделях магматического океана обычно не учитывается сильное влияние давления на его кристаллизацию. Поэтому чаще всего предполагается очень большая его глубина – до 3500 км [16]. Однако, как иллюстрирует положительный наклон линий кристаллизации расплава при отсутствии флюидной фазы на Р-Т диаграмме для кислых магм (рис. 2), чтобы затвердеть до такой глубины температура верхней части магматического океана должна быть около семи тысяч градусов. Большинство слагающих

Землю элементов испаряются при первых тысячах градусов. Поэтому при такой высокой температуре верхняя часть магматического океана должна была испаряться и теряться в космическом пространстве под влиянием солнечного ветра и большой скорости броуновского движения атомов. Земля прекратила бы свой рост и была бы намного меньше современной.

Процессы кристаллизации придонных частей магматического океана под влиянием роста давления нагрузки возникающих при аккреции верхних частей сильно ограничивали его глубину. Максимальное давление при кристаллизации в 8,0 ГПа, устанавливаемое в ксенолитах, вынесенных придонными кимберлитовыми остаточными расплавами океана, указывает на предельную глубину его около 250 км. Относительно небольшая глубина магматического океана объясняет отсутствие идеальной расслоенности Земли, которая должна была возникнуть при существовании стадии ее полного расплавления.

При такой глубине приповерхностные части магматического океана имели температуру около 2200 °С, часть его вещества находилась в газобразном состоянии и на Земле существовала плотная атмосфера из паров высоколетучих компонентов. Потеря этих паров в космическое пространство обусловила обедненность Земли летучими компонентами по сравнению с углистыми хондритами [12] – предполагаемым исходным веществом Земли. Например, калия на ней в шесть раз меньше, а натрия – в четыре раза. Приповерхностные породы Луны еще больше обеднены ими, а также легкоплавкими элементами. Это связано с более чем в два раза меньшей мощностью на ней мантии и намного меньшими масштабами накопления в ее синаккреционном магматическом океане расплавофильных элементов, обычно являющихся легкоплавкими. Отсутствие на Луне кислой коры противоречит



Рис. 1. Схема образования различных геодинамических обстановок и магм
 1 – кислых; 2 – основных; 3 – анортозитовых; 4 – щелочно-основных; 5 – щелочно-ультраосновных карбонатит-содержащих; 6 – кимберлитовых; 7 – океанических и траппов, иногда содержащих ксенолиты ядра

гипотезе ее ударного генезиса преимущественно из вещества Земли.

При горячей гетерогенной аккреции Земли легко решаются все генетические проблемы петрологии, не имевшие обоснованного решения с позиций гипотезы ее холодного образования. Распределение по плотности расплавов в магматическом океане привело к возникновению в нем слоистости, к отсутствию обширной от дна до поверхности конвекции расплавов при остывании и к затвердеванию его сверху вниз преимущественно в результате кондуктивных теплопотерь после прекращения аккреции. Такое остывание является в десятки раз более медленным, чем с участием конвекции. Судя по отсутствию пород древнее 3,8 млрд лет, в течение первых примерно 0,75 млрд лет поверхность Земли была покрыта расплавом.

Это обусловило отсутствие на Земле очень древних пород и редкость кратеров завершающей аккрецию гигантской метеоритной бомбардировки. Чаще всего эти явления объясняют уничтожением наиболее ранних пород и кратеров поздними геологическими процессами [13]. Однако широкое распространение на Луне пород с возрастом 4,3–4,5 млрд лет [12] и хорошо видимых гигантских импактных бассейнов размером более тысячи километров противоречат предположению об уничтожении их поздними процессами.

Присутствие в это время глобального магматического океана полностью объясняет отсутствие на Земле очень древних пород и редкость очень крупных кратеров. Вследствие примерно в 8 раз меньшей массы Луны по сравнению с Землей ее магматический океан затвердел значительно раньше. Это является причиной существования на ней очень древних пород и кратеров с возрастом около 4,0–3,8 млрд лет. На 0,5–0,7 млрд лет более молодой возраст кратеров Луны, чем возраст ее аккреции, обусловлен длительным существованием на ней, как и на Земле, магматического океана. Невнимание к этому факту привело к широкому распространению представлений об оторванности гигантской метеоритной бомбардировки от процессов аккреции и о существовании в Солнечной системе этапа перераспределения астероидов и планет под влиянием движения Юпитера. При учете существования магматического океана гигантская метеоритная бомбардировка не была оторвана от процессов аккреции и завершала ее, что хорошо объясняет выпадение в этот период преимущественно очень крупных тел и зависимость времени образования ими кратеров от момента затвердевания на них магматических океанов.

В панмагматической геодинамической обстановке выделяются две стадии – ранняя синаккреционная и поздняя постаккреционная. В течение синаккреционной стадии на Земле происходили гигантские по масштабам процессы придонной кристаллизации и фракционирования магматического океана под влиянием роста давления

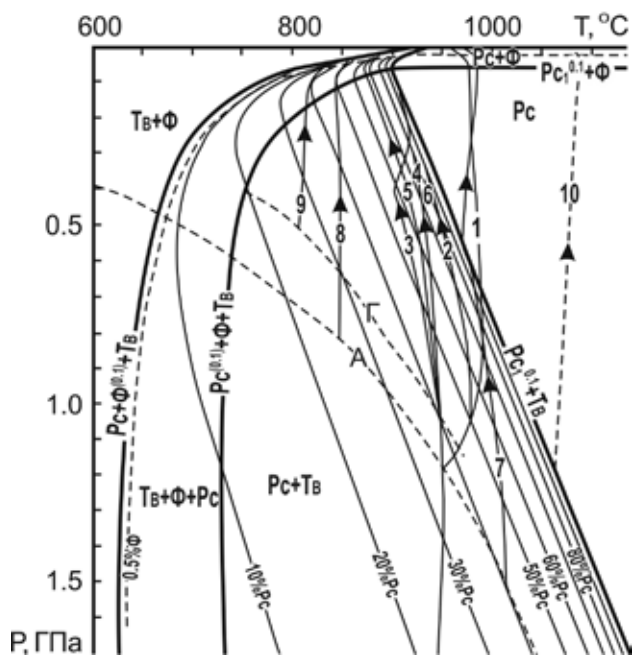


Рис. 2. P-T диаграмма фазового состава и эволюции (линии со стрелками) кислых магм с содержанием 1 % H₂O и 0,1 % CO₂

1–10 – линии эволюции магм при всплывании (1, 8–10) и тектоническом выжимании (2–7) [18]. Рс – расплав, Ф – флюид, Тв – твердая фаза; А – палеогеотерма Алданского щита, Г – более высокотемпературная геотерма

возникавших при аккреции его верхних частей. При мощности мантии в 2900 км, а глубины постаккреционного магматического океана в 250 км объем продуктов синаккреционного фракционирования был более чем в десять раз больше, чем постаккреционного. Между тем в опубликованных моделях магматического океана обычно рассматривается только постаккреционная стадия и предполагается, что она определила главные особенности состава и строения геосфер [16]. Полученные результаты свидетельствуют об ошибочности таких представлений [19; 20].

Придонное синаккреционное фракционирование магматического океана обусловило главные особенности состава мантии и ранней коры. Малобарическая компрессионная кристаллизация и фракционирование раннего еще малоглубинного магматического океана привели к образованию большого количества кислых и толеитовых остаточных расплавов, что объясняет очень широкое распространение на Земле пород такого состава и кислой кристаллической коры. Проблема генезиса кислых магм не имеет обоснованного решения с позиций господствующей гипотезы холодной аккреции. Это связано с тем, что для образования кислых выплавов из первичных ультраосновных пород необходимо давление менее 0,2 ГПа [6]. Но при холодной аккреции на соответствующей этому давлению глубине менее 7–8 км никогда не могли

существовать крупные участки с температурой более 900 °С, необходимой для начала плавления ультраосновных пород. Многочисленным предположениям [7; 9; 13] о выплавлении кислых магм из глубинных основных пород противоречит отсутствие признаков плавления основных кристаллических сланцев даже в самых высокотемпературных метаморфических комплексах, а также кислых обособлений в многочисленных ксенолитах эклогитов в кимберлитах и наиболее раннее начало формирования кислых магматических пород (3,8 млрд лет назад) на Земле [2].

Постепенное увеличение температуры и глубины магматического океана обусловили эволюцию состава остаточных расплавов, возникавших при его придонном фракционировании, от кислых к основным и ультраосновным и образование идентичных им слоев в магматическом океане (рис. 1). Его кумулаты сформировали ультраосновные породы мантии. Постепенное накопление в магматическом океане остаточных расплавов по мере аккреции мантии приводило к увеличению содержания в нем и в осаждавшихся кумулатах расплавофильных компонентов. Это обусловило увеличение их содержания в мантийных породах снизу вверх.

Обстановка образования раннедокембрийских кристаллических комплексов и кислой коры в результате кристаллизации кислого слоя магматического океана. Обычно предполагается, что раннедокембрийские комплексы формировались в субдукционных геодинамических обстановках [9; 13]. Иногда принимается возникновение их и в океанических условиях [9; 11]. Однако этим предположениям противоречит значительная специфичность слагающих их пород – огромное распространение гранитоидов, редкость щелочных магматических пород и молассовых толщ, почти общепризнанное отсутствие офиолитов (рис. 3). Вследствие нерешенности большинства генетических проблем эти комплексы иногда называли окаменевшей бессмыслицей.

Горячая аккреция Земли и существование на ней глобального магматического океана позволяют объяснить все особенности раннедокембрийских комплексов. При таком образовании Земли постепенное неизбежное укрупнение тел в протопланетном диске, обусловившее сокращение удельных потерь импактного тепла на излучение, а также рост силы гравитационного притяжения увеличивавшейся Земли, приводили к возрастанию температуры от ранних стадий аккреции мантии к поздним. Величина этого возрастания различными исследователями оценивается в 800–3000 °С [19]. Из этого следует очень важный вывод о том, что на ранней Земле температура в мантии увеличивалась снизу вверх, в ней существовал обратный к современному геотермический градиент, как предполагалось некоторыми исследователями [14; 15]. Следовательно в это время не было всемантийной конвекции и отсутствовали современные геодинамические обстановки. Они появились в конце протерозоя после прогресса мантии изначально очень горячим ядром. Значительно меньшие по размеру ядра на других планетах земной группы не смогли прогреть их мантии. Это объясняет, казалось бы, удивительный факт отсутствия на них ясных признаков проявлений плитной тектоники и современного магматизма.

Наиболее древние гнейсы имеют изотопный возраст около 3,8 млрд лет, который свидетельствует о начале затвердевания в это время магматического океана и возникновения геодинамической обстановки образования раннедокембрийских комплексов и кислой коры путем кристаллизации кислого слоя магматического океана. Расчеты [19] показали, что плотность возникавших в результате остывания кислых и средних по составу пород (2,6–2,9 г/см³) становилась выше, чем подстилавших не закристаллизованных расплавов от кислого (2,25–2,4 г/см³) до основного (2,55–2,76 г/см³) и частично ультраосновного (более 2,76 г/см³) составов. Это приводило к периодическому погружению затвердевших пород и начавших на них формироваться осадков

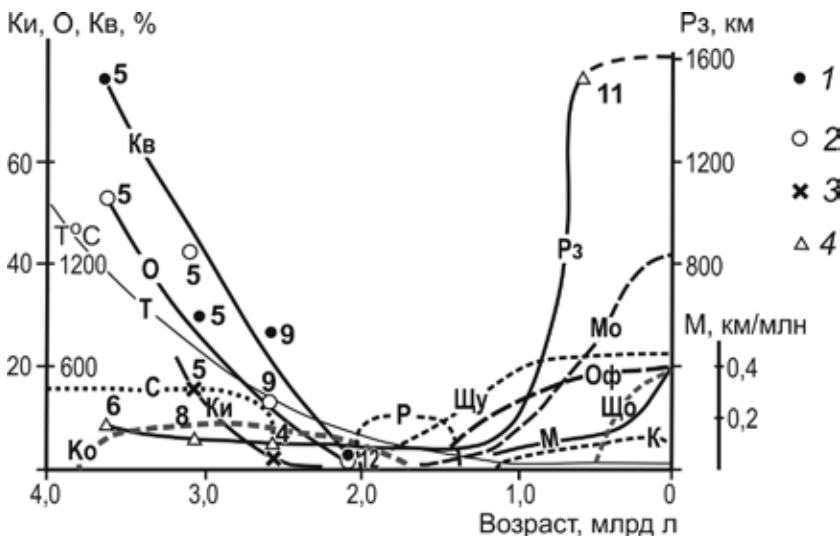


Рис. 3. Средняя распространенность различных пород в зависимости от возраста

Ки, О и Кв – распространенность для соответственно кислых (1) и основных вулканитов (2), кварцитов (3, по отношению к парапородам) по данным [13]. Цифры у точек – количество изученных регионов. С, К, Ко, Мо, Оф, Р, Що, Щу – распространенность соответственно серых гнейсов, кимберлитов, коматитов, моласс, офиолитов, рапакиви, щелочных базитов и ультраосновных щелочных пород [3]. М и Рз (4) – изменения соответственно средней мощности образующихся осадочных пород за миллион лет [13] и среднего поперечного размера возникавших тектонических мегаструктур

и к всплыванию на их место подстилавших магм от кислого до ультраосновного составов. Такое явление объясняет широко распространенное в этих комплексах чередование ортогнейсов, парагнейсов и кристаллических сланцев. При этом ультраосновные кристаллические сланцы встречаются во много раз реже основных, что обусловлено большой плотностью их исходных наиболее мафических расплавов и поэтому неспособностью к процессам всплывания. Вследствие большого давления плотной газовой оболочки излияния магм не сопровождалось взрывами в результате быстрого выделения газов, что обусловило, как правило, отсутствие в кристаллических комплексах метаморфизованных вулканических брекчий.

Длительный (более 1 млрд лет) периодический подъем и излияние кристаллизовавшихся глубинных магм является причиной сонахождения иногда в одних и тех же обнажениях минеральных парагенезисов различной глубинности и изотопного возраста. Раннее затвердевание высокотемпературных основных магм по сравнению с кислыми при остывании магматического океана объясняет в среднем на сотни миллионов больший изотопный возраст основных кристаллических сланцев, чем кислых гнейсов [19]. Большая длительность остывания огромного объема глобального океана магмы обусловила огромную продолжительность формирования раннедокембрийских кристаллических комплексов, достигающую на Алданском щите более миллиарда лет.

Идентичность гистограмм распределения температуры кристаллизации гиперстенсодержащих и безгиперстеновых гнейсов [19] свидетельствует, что образование этих пород обусловлено не различной температурой их гипотетического метаморфизма, как обычно принимается, а различным содержанием воды в исходных магмах. Это подтверждается широко распространенным переслаиванием гиперстеновых и безгиперстеновых гнейсов и обычно отсутствием случаев развития гиперстенсодержащих пород по безгиперстеновым [13].

Магматический генезис большинства пород раннедокембрийских кристаллических комплексов объясняет одинаковую во всех регионах очень высокую температуру их образования (в среднем 800–850 °С) (рис. 4), только регрессивную последовательность минералообразования в них, отсутствие постепенных переходов в низкотемпературные комплексы и признаков существования мощных (десятки километров) перекрывающих толщ, с теплоизолирующим влиянием которых обычно связывают их гипотетический метаморфизм.

Затвердевавшие магматические породы подвергались интенсивным процессам кислотного выщелачивания под влиянием отделявшихся от магматического океана кислотных газов — HCl, HF, H₂S и др. Это объясняет преобладание среди парапород высокоглиноземистых гнейсов и кварцитов (рис. 3). Большая пластичность коры и размещение ее на океане магмы — причина

выравнивания рельефа и отсутствия мощных пластов конгломератов, встречающихся в фанерозойских толщах.

Таким образом, раннедокембрийские кристаллические комплексы и кислая кора являются не метаморфизованными вулканогенно-осадочными толщами, а огромным длительно формировавшимся единым многофазным магматическим телом, в котором каждая фаза образовывала преимущественно слоеподобные тела над более ранними. Поздними тектоническими процессами оно было расчленено на блоки и комплексы.

По мере остывания и кристаллизации глубинных частей магматического океана их плотность повышалась. Поэтому затвердевавшие верхние части кислого слоя переставали погружаться и формировали древние ядра консолидации. Первыми переставали тонуть самые верхние и гранитные части кислого слоя вследствие их пониженной плотности, что и обусловило преимущественно гранитоидный состав самых древних из этих ядер. Подстилавшие более основные и плотные их части продолжали тонуть после значительной кристаллизации. Всплывавшие и растекавшиеся под пластичной корой магмы вызывали деформации возникших ядер консолидации

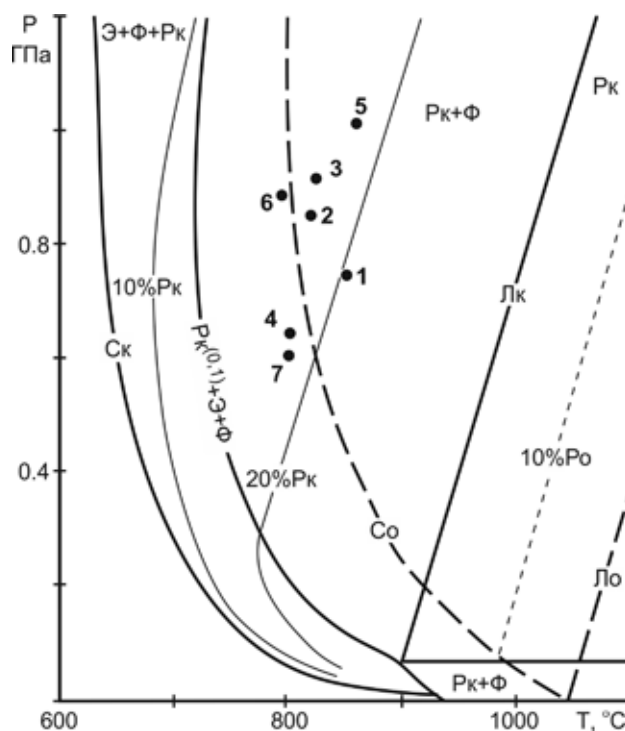


Рис. 4. Средние параметры образования кристаллических комплексов Алданского щита (1, среднее из 36 определений), Анабарского щита (2, 12 определений), Лапландского пояса (3, 11 определений), Украинского щита (4, 4 определения), Антарктиды (5, 1 определение), Урала (6, 10 определений), Беломорья (7, 12 определений) по данным [5]. Лк и Ло, Ск и Со — соответственно ликвидусы и солидусы кислых и основных магм; Рк и Ро — расплавы соответственно кислые и основные; Ф — флюид; Э — минералы гранитов; 10 %Рк и 10 %Ро — содержания соответственно кислого и основного расплава; Рк^(0,1) — кислый расплав с отношением количества СО₂ к Н₂О, равным 0,1 [18]

и формирование на них грабеноподобных опусканий. Заполнение их осадками и вулканическими породами приводило к образованию зеленокаменных толщ. Вследствие незначительной закристаллизованности еще пикритового слоя его магма иногда в значительном количестве заполняла наиболее ранние впадины, что и обусловило широкое распространение коматитов в самых древних зеленокаменных поясах.

Всплывавшие магмы под влиянием силы Кориолиса сильно отклонялись к западу. Это приводило к перемещению их и перекрывавшей пластичной коры в этом направлении и объясняет преимущественно субмеридиональное простирание раннедокембрийских кристаллических комплексов и зеленокаменных поясов и широко распространенное на Алданском щите надвижение с востока на запад раннедокембрийских гнейсовых пластин.

После возникновения ранних ядер консолидации на земной поверхности сохранялись также участки выхода расплавов магматического океана, более мафических и первоначально более глубоких, чем гранитные. С течением времени количество таких выходов магм уменьшалось, а среди оставшихся все больше увеличивалась доля основных по составу. В этом причина чаще всего более молодого возраста (в среднем на 0,8 млрд лет) гранулитовых комплексов Алданского щита по сравнению с серыми гнейсами [19]. Более глубокие мантийные ксенолиты из кимберлитов имеют еще более молодой возраст (в среднем 1,777 в лерцолитовых и 0,713 млрд лет в вебстеритовых), что отражает кристаллизацию магматического океана сверху вниз. Движение ядер консолидации на запад под влиянием давления силы Кориолиса на всплывавшие магмы, видимо, приводило к скупиванию их и возникновению ранних протоконтинентов. За их пределами располагались выходы затвердевших более глубоких и мафических частей магматического океана. Они, видимо, были покрыты мелководными морями. Вследствие небольшого размера конвективных ячеек в океане магмы в это время существовала тектоника малых пластичных коровых плит.

Отделение рудоносных эманаций кислого слоя магматического океана привело к образованию многочисленных рудных месторождений преимущественно в зеленокаменных поясах. Огромный объем кислого слоя обусловил возникновение иногда уникально больших запасов этих месторождений. Например, суммарная мощных рудных пластов на железорудных месторождениях иногда составляет более километра. На месторождении Витватерсранд уже извлечено около 40 % золота, добытого человечеством. Наибольшее содержание летучих компонентов в кислых магмах позволяет предполагать присутствие уникально крупных месторождений в участках максимальной мощности коры наиболее кислого состава. Такая кора находится в районе уникального месторождения Витватерсранд. Эти участки содержат повышенное количество зеленокаменных поясов.

Обстановка образования литосферы древних платформ в результате кристаллизации глубинных частей магматического океана. Наиболее молодые гранулитовые комплексы обычно имеют изотопный возраст около 2 млрд лет. Он отражает время завершения процессов затвердевания большинства кристаллических комплексов и кислой коры и возникновения геодинамической обстановки образования литосферы древних платформ путем затвердевания глубинных слоев магматического океана. Наиболее важным процессом этой обстановки было формирование и всплывание остаточных расплавов глубинных слоев магматического океана.

На поздних стадиях кристаллизации кислого слоя магматического океана в нем формировались лейкократовые остаточные кислые расплавы. Это является причиной широко распространенного внедрения в раннедокембрийские кристаллические комплексы гранитных интрузий иногда лейкократового субщелочного состава (рис. 1). Последующая кристаллизация более глубоких среднего и основного по составу слоев обусловила образование и всплывание субщелочных и щелочных остаточных расплавов и формирование соответствующих по составу пород. Подъем богатых плагиоклазовыми кумулатами магм привел к образованию автономных анортозитов, широко распространенных на древних щитах. После полного затвердевания верхних частей магматического океана внедрение их прекратилось. Это объясняет ограниченный возрастной интервал (2,8–1,1 млрд лет [2]) образования автономных анортозитов и их обычно значительную древность. Участие в их формировании среднего по составу слоя магматического океана – причина часто андезинового состава их плагиоклаза.

По экспериментальным данным, кристаллизация мафических магм, содержащих более 0,6 мольной доли углекислоты во флюидной составляющей, приводит к образованию карбонатитовых остаточных расплавов при давлении менее 2,5 ГПа и кимберлитовых – при более высоком, что обусловило формирование карбонатитов и кимберлитов на древних платформах. Кристаллизация магматического океана сверху вниз – причина более древнего возраста карбонатитов по сравнению с кимберлитами – в среднем соответственно 688 и 236 млн лет [19]. Раздвижение континентальной литосферы при образовании океанических областей – причина обычно отсутствия в них кимберлитов (правило Клиффорда). Таким образом, кристаллизация магматического океана объясняет генезис, состав и последовательность образования магматических пород на древних платформах.

Интенсивность геологических процессов в период 2,2–1,2 млрд лет назад была самой низкой в истории Земли (рис. 3). Этот период получил название мертвой земли [8]. Причина этого в том, что на тот момент глобальный магматический океан почти полностью остыл

и затвердел, а процессы всемантийной конвекции еще не начались.

Возникновение преимущественно фанерозойских океанических и субдукционных обстановок. Постепенный прогрев мантии изначально очень горячим ядром должен был привести к возникновению прямого геотермического градиента и мощной всемантийной конвекции. Резкое возрастание после 1,2 млрд лет назад интенсивности тектонических процессов, мощности сформировавшихся осадков и возраст дна современных океанов менее 0,15 млрд лет [13] указывают, что интенсивная конвекция началась в конце протерозоя. При горячей гетерогенной аккреции Земли должны существовать два типа мантийных плюмов — очень крупные преимущественно ультраосновные и более мелкие основные. Прогрев мантии горячим ядром приводил к всплыванию ее горячих нижних ультраосновных частей после установления прямого геотермического градиента. В результате большого размера этих частей и небольшой разницы плотностей подогретых и не подогретых пород (сотые доли грамм на сантиметр кубический) возникали огромные суперплюмы. Преимущественно ультраосновной состав их вещества обусловил пониженную степень декомпрессионного плавления при подъеме и его огромную вязкость. Судя по вязкости астеносферы, она составляет около 10^{19} пуаз. Вследствие очень большой ее величины растекавшееся под литосферой вещество суперплюмов оказывает на нее огромное динамическое воздействие. Оно приводит к ее раздвижению, возникновению океанических и складчатых областей и к другим проявлениям тектоники литосферных плит. Эти суперплюмы в большей степени тектоногенерирующие.

Возникавшие при аккреции на дне магматического океана импактные кратеры заполнялись преимущественно основными придонными его магмами, которые быстро компрессионно затвердевали и формировали крупные тела основных пород. Они имеют в среднем примерно на $0,1-0,2 \text{ г/см}^3$ меньшую плотность, чем вмещающие ультраосновные породы, поэтому должны всплывать после установления в мантии прямого геотермического градиента. То есть, кроме конвекции, связанной с подогревом мантийного вещества ядром, существует конвекция, обусловленная первичной неоднородностью состава мантии. Вследствие легкоплавкости вещество основных плюмов почти полностью переплавлялось под влиянием огромной декомпрессии при подъеме и поэтому имело в миллиарды раз меньшую вязкость (первые пуазы), чем ультраосновное вещество суперплюмов. По этой причине основные плюмы оказывали небольшое механическое воздействие на литосферу. Но расплавленное состояние их вещества приводило к быстрому образованию больших объемов магматических пород. Это объясняет формирование преимущественно в фанерозое за 1–2 млн лет и меньше

гигантских полей траппов объемом в миллионы кубических километров. Такие плюмы преимущественно магомгенерирующие.

В траппах иногда присутствуют крупные (до десятков тонн) тела самородного железа и мелкозернистые железо-силикатные агрегаты, возникшие из остаточных расплавов с растворенным железом. Обычно отсутствие пространственной связи с углеродсодержащими толщами противоречит иногда предполагаемому их образованию в результате ассимиляции этих толщ. Фугитивность кислорода при формировании мантийных пород, в двадцать тысяч раз большая, чем в случае химической равновесности их с железом [26], а также другие данные указывают, что они не могли образоваться под влиянием подъема гипотетических потоков водорода, а содержание никеля (до 7 %) и другие примеси — на близость их по составу к низкотемпературным железным метеоритам, являющимся обломками ядер мелких планет [10]. Поэтому они должны быть ксенолитами внешних частей земного ядра, возникшими в наиболее ранних импактных кратерах на дне магматического океана (рис. 1). Эти ксенолиты захватывались всплывавшим основным веществом. Они позволяют оценить состав примесей в ядре [20].

Связь движений литосферных плит с ультраосновными суперплюмами, а магматизма — преимущественно с основными плюмами иногда приводит к совмещению процессов движения плит и магматизма. Это объясняет существование магматизма «горячих точек». Он обусловлен длительным подъемом относительно стационарных небольших основных плюмов под движущимися плитами, что повлекло образование цепочек магматических тел с уменьшающимся возрастом.

Вследствие гетерогенной аккреции и фракционирования при образовании Земли глобального магматического океана содержание накапливавшихся в расплавах компонентов увеличивается в мантии снизу вверх. Поэтому возникшие в результате декомпрессионного переплавления ранних основных пород нижней мантии базальты срединно-океанических хребтов и траппов с ксенолитами ядра наиболее бедны калием (в среднем менее 0,5 %, овал П на рис. 5) и другими расплавофильными компонентами. Раннедокембрийские кристаллические сланцы (поле Д) намного богаче ими (до 2,7 % K_2O), так как они возникали из вещества позднего магматического океана, в котором накопились эти компоненты.

В результате постепенного укрупнения тел в протопланетном диске крупные импактные кратеры и сформировавшиеся в них исходные для магм большинства траппов и рифтов мантийные основные породы возникали преимущественно на поздней стадии аккреции, когда магматический океан был обогащен расплавофильными компонентами. Это является одной из причин высокого (до 4 % и более в поле Р на рис. 5) содержания в платформенных базитах оксида калия. Последний накапливался в остаточных

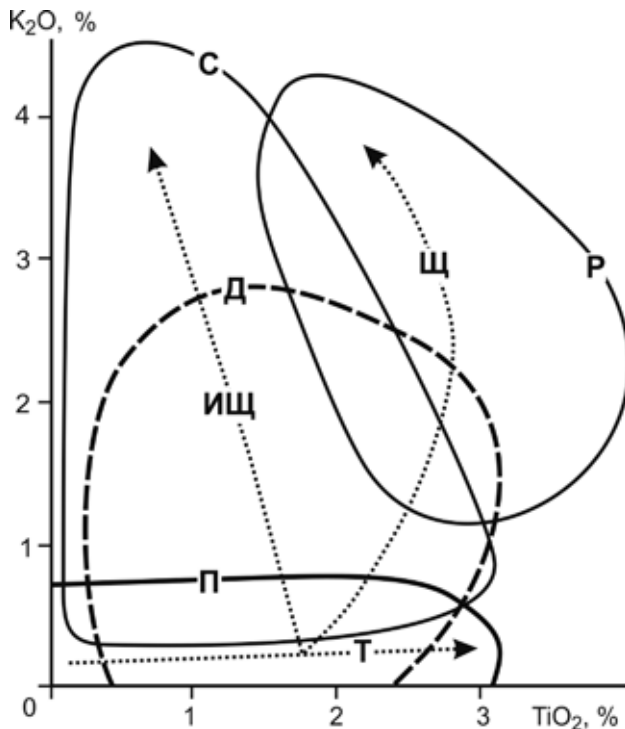


Рис. 5. Соотношение K_2O-TiO_2 в базитах раннего докембрия (Д), континентальных рифтов (Р), зон субдукции (С) и срединно-океанических хребтов (П)

Тренды фракционирования: Щ – щелочной, ИЩ – известково-щелочной, Т – толеитовый [19]

расплавах и при высокобарическом фракционировании магм во время замедления их подъема под толстой литосферой. В этом заключается другая причина его высокого содержания. При высокобарическом фракционировании в большем количестве осаждался гранат. По сравнению с другими темноцветными минералами он был беден титаном. Это привело к повышенному содержанию оксида титана в остаточных расплавах и в сформированных из них платформенных базитах (до 3 % и более TiO_2).

На основании гипотезы холодной гомогенной аккреции Земли обычно предполагается, что магмы образуются в результате отделения выплавок в подплавленных глубинных породах. Степень частичного плавления первичных ультраосновных пород принимается небольшой (от 0,1 % для кимберлитовых магм до примерно 15 % для основных [6]), поскольку при большей степени выплавки не имеют состава природных магм. Однако за почти столетнюю историю использования гипотезы частичного плавления не было приведено ни одного эмпирического доказательства ее справедливости. Наоборот, к настоящему времени получено большое количество свидетельств ее ошибочности.

Изучение единственного доступного непосредственному изучению примера массового частичного плавления мигматитов показало, что анатектический жильный материал из них не удаляется даже при содержании около 40 % [1; 17]. Иногда встречающиеся в них крупные гранитные

тела имеют другой состав и возраст, чем анатектический жильный материал. Автохтонность выплавок подтверждается отсутствием процессов разделения расплава и твердых фаз в экспериментах по плавлению перидотитов менее чем на 30–35 % [23]. Это связано с огромной вязкостью слабоподплавленных пород.

Астеносфера с обычно принимаемым содержанием расплава 6 % имеет вязкость около 10^{19} пуаз. Как показали расчеты по формуле Стокса [18], при такой вязкости капли основного расплава радиусом 1 см за всю историю Земли (4,5 млрд лет) способны всплыть менее чем на 2 мм. Следовательно всплытие выплавок не является причиной магмообразования. Как иллюстрируют линии подъема на Р-Т диаграмме (рис. 2), в природных гранитных магмах под влиянием высокого давления в глубинных условиях содержание твердых фаз возрастает до 60–80 %. Поэтому из очагов зарождения магм начинает подниматься не расплав, а преимущественно твердофазные мигмы. При подъеме твердые фазы в них переплавляются под воздействием декомпрессии и фрикционного тепловыделения, что подтверждается гомогенизацией вещества гранито-гнейсовых диапиров при всплытии [18]. Поэтому кроме импактного тепловыделения при аккреции мантии мощными магмообразующими факторами являются декомпрессия и фрикционное тепловыделение. Поле основных пород субдукционных обстановок (С на рис. 5) в малокалиевой области совпадает с полем раннедокембрийских кристаллических сланцев. Это подтверждает образование магм зон субдукции путем переплавления пород литосферы в результате огромного фрикционного тепловыделения в зонах интенсивных тектонических деформаций. Как известно, даже холодные приповерхностные породы иногда плавятся в зонах тектонических разломов с образованием псевдотрахилитов.

Большая эффективность фрикционного плавления подтверждается массовым современным вулканизмом на небольшом спутнике Юпитера Ио. На нем интенсивные деформации под влиянием переменного гравитационного притяжения то приближающихся, то удаляющихся Европы, Ганимеда и Юпитера при вращении приводят к извержению более четырехсот вулканов и образованию лавовых озер диаметром до 200 км. Фрикционное переплавление средних и кислых по составу пород литосферы – причина постоянного образования большого количества магматических пород такого состава в субдукционных обстановках. Снижение интенсивности тектонических деформаций с удалением от океанов объясняет увеличение доли более низкотемпературных кислых магматических пород в этом направлении. Обычно повышенные величины начальных отношений изотопов стронция в субдукционных магматических породах (до 0,7226 в кислых вулканитах Перу) обусловлено большим накоплением радиогенного стронция за длительное время (более миллиарда лет) существования

раннедокембрийских кислых пород в континентальной кристаллической коре до периода их фрикционного переплавления. Это и близость состава субдукционных кислых магматических пород к раннедокембрийским подтверждают фрикционное происхождение субдукционных магм. Такая близость обусловлена не образованием раннедокембрийских пород в этих обстановках, как обычно предполагается [11], а возникновением субдукционных магм путем переплавления кристаллической коры. Присутствие высококальциевых разновидностей субдукционных основных пород (рис. 5), видимо, связано с протеканием иногда процессов высокобарического фракционирования возникших магм.

Изучение [21] показало, что коллизионные границы Главного батолитового пояса Яно-Колымской складчатой области по составу идентичны раннедокембрийским гранитоидам Алданского щита, удаленного от них на многие сотни километров. Этот факт, а также высокое начальное отношение изотопов стронция (до 0,715), прямая корреляция объемов возникших гранитоидов с масштабом деформаций коры и выполненные расчеты свидетельствуют о формировании коллизионных гранитов путем фрикционного переплавления наиболее легкоплавких пород кристаллической коры при тектонических деформациях ее под влиянием мощного давления океанических плит.

Очевидно, что в океанических областях тела основных пород в поднимающемся веществе суперплюмов должны плавиться и формировать основные магмы. Это объясняет массовое распространение базальтов в этих областях. Подъем из каждого плавающего тела основных пород в мантии должен был приводить к образованию на океаническом дне поднятий и островов. Их обилие в океанах указывает на существование большого количества линз основных пород в мантии. Смена во времени на островах толеитового магматизма щелочным подтверждает процесс фракционирования магм на глубинных этапах подъема.

Заключение. Учет данных о горячей гетерогенной аккреции Земли позволил выделить три принципиально новых геодинамических обстановки — панмагматическую, образования кислой коры и раннедокембрийских комплексов путем кристаллизации кислого слоя магматического океана и формирования литосферы древних платформ в результате затвердевания его глубинных слоев. Он объясняет происхождение и эволюцию различных геодинамических обстановок, магм и главные особенности состава, возраста и размещения магматических пород на Земле, а также некоторые особенности эволюции планет земной группы. Из полученных данных следует, что главная причина эволюции геодинамических обстановок и магматизма — остывание Земли. Разнообразие состава магматических пород обусловлено процессами синаккреционного

и постааккреционного фракционирования глобального магматического океана, а не разной степенью частичного плавления глубинных пород при образовании магм путем гипотетического отделения выплавок. Это обусловлено в миллиарды раз меньшей вязкостью магм по сравнению со слабоподплавленными породами.

Существует четыре главных механизма образования магм: подъем расплавов из магматического океана (первичные и первично-остаточные магмы древних платформ); декомпрессионное переплавление затвердевших дифференциатов этого океана во всплывавших плюмах (декомпрессионно-плюмовые магмы траппов, рифтов, океанических областей); преимущественно фрикционное переплавление этих дифференциатов в зонах интенсивных тектонических деформаций (фрикционные магмы субдукционных, коллизионных и частично океанических областей) и в результате фракционирования в магматических камерах в условиях различной глубинности (вторично-остаточные магмы поздних фаз магматических комплексов различных обстановок).

1. Аглонов С. В. Геодинамика. — СПб.: Изд-во СПбГУ, 2001. — 360 с.
2. Балашов Ю. А. Изотопно-геохимическая эволюция мантии и коры Земли. — М.: Наука, 1985. — 221 с.
3. Богатиков О. А., Богданова С. В., Борсук А. М. Магматические горные породы. Т. 6: Эволюция магматизма в истории Земли. — М.: Наука, 1987. — 439 с.
4. Витязев А. В., Печерникова Г. В. Ранняя Земля в тесном окружении молодых звезд // Проблема происхождения жизни. — М.: ПИН РАН, 2009. — С. 131–157.
5. Гранулитовые комплексы в геологическом развитии докембрия и фанерозоя: Материалы II Российской конференции по проблемам геологии и геодинамики докембрия. — СПб., 2007. — 407 с.
6. Грин Д. Х. Состав базальтовых магм как критерий условий их возникновения при океаническом вулканизме // Петрология изверженных и метаморфических пород дна океана / ред. Э. Буллард, Дж. Канн, Д. Метьюз. — М.: Мир, 1973. — С. 242–261.
7. Грин Д. Х., Рингвуд А. Е. Происхождение магматических пород известково-щелочного ряда // Петрология верхней мантии / ред. И. Д. Рябчиков. — М.: Мир, 1968. — С. 118–131.
8. Добрецов Н. Л. Основы тектоники и геодинамики. — Новосибирск: НГУ, 2011. — 492 с.
9. Добрецов Н. Л., Туркина О. М. Раннедокембрийская история Земли: роль плейт- и плюм-тектоники и космического фактора // Геология и геофизика. — 2015. — Т. 56, № 7. — С. 1250–1274.
10. Додд Р. Т. Метеориты. Петрология и геохимия. — М.: Мир, 1986. — 382 с.
11. Розен О. М., Щипанский А. А., Туркина О. М. Геодинамика ранней Земли: эволюция и устойчивость геологических процессов (офиолиты, островные дуги, кратоны, осадочные бассейны). — М.: Научный мир, 2008. — 184 с. — (Труды Геологического института; вып. 584).
12. Рингвуд А. Е. Происхождение Земли и Луны. — М.: Недра, 1982. — 294 с.
13. Салоп Л. Н. Геологическое развитие Земли в докембрии. — Л.: Недра, 1982. — 343 с.
14. Сафронов В. С. Происхождение Земли. — М.: Знание, 1987. — 46 с.

15. Сорохтин О. Г., Ушаков С. А. Развитие Земли. — М.: МГУ, 2002. — 506 с.
16. Федорин Я. В. Модель эволюции ранней Земли. — Киев: Наукова думка, 1991. — 112 с.
17. Шкодзинский В. С. Проблемы физико-химической петрологии и генезиса мигматитов (на примере Алданского щита). — Новосибирск: Наука СО, 1976. — 224 с.
18. Шкодзинский В. С. Фазовая эволюция магм и петрогенезис. — М.: Наука, 1985. — 232 с.
19. Шкодзинский В. С. Глобальная петрология по современным данным о горячей гетерогенной аккреции Земли. — Якутск: Изд. дом СВФУ, 2018. — 244 с.
20. Шкодзинский В. С. Вынос обломков земного ядра основными магмами // Наука и техника в Якутии. — 2020. — № 1. — С. 3–6.
21. Шкодзинский В. С., Недосекин Ю. Д., Сурнин А. А. Петрология позднемезозойских магматических пород Восточной Якутии. — Новосибирск: Наука, 1992. — 237 с.
22. Шмидт О. Ю. Происхождение Земли и планет. — М.: Изд-во АН СССР, 1962. — 132 с.
23. Arndt N. T. The separation of magmas from partially molten peridotite // *Carnegie Institution of Washington Yearbook*. — 1977. — Vol. 76. — Pp. 424–428.
24. Harris P. G., Tozer D. C. Fractionation of iron in the Solar system // *Nature*. — 1967. — No. 215. — Pp. 1449–1451.
25. Holliday A. H. Hf-W chronometry and inner solar system accretion rates // *Space Science Reviews*. — 2000. — Vol. 92. — Pp. 53–63.
26. O'Neil H. S. Oxygen fugacity and siderophile elements in the Earth's mantle: implications for the origin of the Earth // *Meteoritics*. — 1990. — Vol. 25, no. 4. — Pp. 395.
27. Протопланетный диск: [Электронный ресурс] // Википедия. — URL: <https://ru.wikipedia.org/?curid=916140&oldid=110327183> (дата обращения: 06.11.2020).
28. Wood B. J. The formation and differentiation of Earth // *Physics Today*. — 2011. — Vol. 64. — No. 2. — Pp. 40–45. — URL: <https://doi.org/10.1063/PT.3.1362> (дата обращения: 12.02.2021).
1. Aplonov S. V. Geodinamika [Geodynamics]. St. Petersburg, 2001, 360 p.
2. Balashov Yu. A. Izotopno-geokhimicheskaya evolyutsiya mantii i kory Zemli [Isotope-geochemical evolution of the Earth's mantle and crust]. Moscow, Nauka, 1985, 221 p.
3. Bogatnikov O. A., Bogdanova S. V., Borsuk A. M. Magmaticheskie gornye porodny. T. 6: Evolyutsiya magmatizma v istorii Zemli [Magmatic rocks. Vol. 6: Evolution of magmatism in the history of the Earth]. Moscow, Nauka, 1987, 439 p.
4. Vityazev A. V., Pechernikova G. V. Rannyyaya Zemlya v tesnom okruzhenii molodykh zvezd [Rannyyaya Zemlya v tesnom okruzhenii molodykh zvezd]. *Problema proiskhozhdeniya zhizni*, Moscow, 2009, pp. 131–157. (In Russian).
5. Granulitovye komplekсы v geologicheskom razvitii dokembriya i fanerozooya: Materialy II Rossiyskoy konferentsii po problemam geologii i geodinamiki dokembriya [Granulite complexes in the geological development of the Precambrian and Phanerozoic. Materials of the II Russian conference on the problems of geology and geodynamics of the Precambrian]. St. Petersburg, 2007, 407 p.
6. Grin D. Kh. Sostav bazal'tovykh magm kak kriteriy usloviy ikh vozniknoveniya pri okeanicheskom vulkanizme [The composition of basaltic magmas as a criterion for the conditions of their occurrence during oceanic volcanism]. *Petrologiya izverzhennykh i metamorficheskikh porod dna okeana*, Eds.: E. Bullard, Dzh. Kann, D. Met'yuz. Moscow, Mir, 1973, pp. 242–261.
7. Grin D. Kh., Ringvud A. E. Proiskhozhdenie magmaticheskikh porod izvestkovo-shchelochnoho ryada [The origin of calc-alkaline magmatic rocks]. *Petrologiya verkhney mantii*, Ed.: I. D. Ryabchikov. Moscow, Mir, 1968, pp. 118–131. (In Russian).
8. Dobretsov N. L. Osnovy tektoniki i geodinamiki [Foundations of tectonics and geodynamics]. Novosibirsk, 2011, 492 p.
9. Dobretsov N. L., Turkina O. M. Rannedokembriyskaya istoriya Zemli: rol' pleyt- i plyum-tektoniki i kosmicheskogo faktora [Early Precambrian history of the Earth: the role of plate and plume tectonics and the cosmic factor]. *Geologiya i geofizika*, 2015, vol. 56, no. 7, pp. 1250–1274. (In Russian).
10. Dodd R. T. Meteority. Petrologiya i geokhimiya [Petrology and Geochemistry]. Moscow, Mir, 1986, 382 p.
11. Rozen O. M., Shchipanskiy A. A., Turkina O. M. Geodinamika ranney Zemli: evolyutsiya i ustoychivost' geologicheskikh protsessov (ofiolyity, ostrovnyye dugi, kratony, osadochnyye basseyny) [Early Earth geodynamics: stability vs. evolution in geological processes (ophiolites, island arcs, cratons, and sedimentary basins)]. Moscow, Nauchnyy mir, 2008, 184 p.
12. Ringvud A. E. Proiskhozhdenie Zemli i Luny [The origin of the Earth and the Moon]. Moscow, Nedra, 1982, 294 p.
13. Salop L. N. Geologicheskoe razvitie Zemli v dokembrii [Geological development of the Earth in the Precambrian]. Leningrad, Nedra, 1982, 343 p.
14. Safronov V. S. Proiskhozhdenie Zemli [The origin of the Earth]. Moscow, Znanie, 1987, 46 p.
15. Sorokhtin O. G., Ushakov S. A. Razvitie Zemli [Development of the Earth]. Moscow, 2002, 506 p.
16. Fedorin Ya. V. Model' evolyutsii ranney Zemli [Model of the evolution of the early Earth]. Kiev, Naukova dumka, 1991, 112 p.
17. Shkodzinskiy V. S. Problemy fiziko-khimicheskoy petrologii i genezisa migmatitov (na primere Aldanskogo shchita) [Problems of physical and chemical petrology and genesis of migmatites (on the example of the Aldan Shield)]. Novosibirsk, 1976, 224 p.
18. Shkodzinskiy V. S. Fazovaya evolyutsiya magm i petroгенезис [Phase evolution of magmas and petrogenesis]. Moscow, Nauka, 1985, 232 p.
19. Shkodzinskiy V. S. Global'naya petrologiya po sovremennym dannym o goryachey geterogennoy akkretsii Zemli [Global petrology according to modern data on hot heterogeneous accretion of the Earth]. Yakutsk, 2018, 244 p.
20. Shkodzinskiy V. S. Vynos oblomkov zemnogo yadra osnovnymi magmami [Carrying out of fragments of the Earth's core by the main magmas]. *Nauka i tekhnika v Yakutii*, 2020, no. 1, pp. 3–6. (In Russian).
21. Shkodzinskiy V. S., Nedosekin Yu. D., Surnin A. A. Petrologiya pozdnemezozoyevskikh magmaticheskikh porod Vostochnoy Yakutii [Petrology of Late Mesozoic magmatic rocks of Eastern Yakutia]. Novosibirsk, Nauka, 1992, 237 p.
22. Shmidt O. Yu. Proiskhozhdenie Zemli i planet [Origin of the Earth and planets]. Moscow, 1962, 132 p.
23. Arndt N. T. The separation of magmas from partially molten peridotite. *Carnegie Institution of Washington Yearbook*, 1977, vol. 76, pp. 424–428.
24. Harris P. G., Tozer D. C. Fractionation of iron in the Solar system. *Nature*, 1967, no. 215, pp. 1449–1451.
25. Holliday A. H. Hf-W chronometry and inner solar system accretion rates. *Space Science Reviews*, 2000, vol. 92, pp. 53–63.
26. O'Neil H. S. Oxygen fugacity and siderophile elements in the Earth's mantle: implications for the origin of the Earth. *Meteoritics*, 1990, vol. 25, no. 4, pp. 395.
27. Протопланетный диск [Protoplanetary disk]. *Википедия*, available at: URL: <https://ru.wikipedia.org/?curid=916140&oldid=110327183> (accessed 6 November 2020).
28. Wood B. J. The formation and differentiation of Earth. *Physics Today*, 2011, vol. 64, no. 2, pp. 40–45, available at: <https://doi.org/10.1063/PT.3.1362> (accessed 12 February 2021).

Шкодзинский Владимир Степанович – доктор геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник, Институт геологии алмазов и благородных металлов СО РАН (ИГАБМ СО РАН). Пр. Ленина, 39, Якутск, Россия, 677980. <shkodzinskiy@diamond.ysn.ru>

Shkodzinskiy Vladimir Stepanovich – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (DPAMGI SB RAS). 39 Prosp. Lenina, Yakutsk, Respublika Sakha (Yakutiya), Russia, 677980. <shkodzinskiy@diamond.ysn.ru>