

## — ГЕОЛОГИЯ —

УДК552.2(571.56)

DOI 10.25587/SVFU.2020.20.4.007

*В.С. Шкодзинский*

Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск, Россия

**ПРИРОДА МАГМАТИЗМА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ  
ПО ДАННЫМ О ГОРЯЧЕЙ ГЕТЕРОГЕННОЙ АККРЕЦИИ ЗЕМЛИ**

*Аннотация.* Приведены планетологические и геологические доказательства горячей гетерогенной аккреции Земли и существования на ранней стадии ее эволюции глобального магматического океана. Он имел состав от кислого в верхних частях до ультраосновного в нижних. С учетом этого рассмотрен генезис главных магматических пород Сибирской платформы. Раннедокембрийские кристаллические комплексы возникли в результате кристаллизации верхних частей слоистого магматического океана. Их неоднородность обусловлена многократным погружением закристаллизованных верхних частей океана и всплыванием нижних жидких. Автономные анортозиты сформировались путем внедрения еще не затвердевших плагиоклазовых кумулатов его среднего и основного слоев. Щелочно-ультраосновные карбонатсодержащие плутоны образовались из остаточных расплавов фракционированного пикритового слоя магматического океана. Очень высокие содержания в них редких элементов обусловлены длительными процессами накопления их в остаточных расплавах. Кимберлиты возникли из остаточных расплавов придонного перидотитового слоя. Алмаз в них кристаллизовался вследствие накопления углерода в остаточных расплавах. Магмы траппов сформировались в результате процессов декомпрессионного плавления во всплывавших основных плюмах. Мезозойские щелочные интрузии Алданского щита образовались путем фрикционного переплавления щелочных дифференциатов магматического океана в зонах глубинных тектонических дислокаций.

*Ключевые слова:* глобальный магматический океан, магматическое фракционирование, декомпрессионное и фрикционное плавление, генезис геосфер и магм.

*V.S. Shkodzinskiy*

Institute of Diamond and Precious Metal Geology, Siberian Branch, SB RAS

**THE NATURE OF MAGMATISM OF THE SIBERIAN PLATFORM  
ACCORDING TO DATA ON HOT HETEROGENEOUS ACCRETION  
OF THE EARTH**

*Abstract.* The article presents planetary and geological evidence of the hot heterogeneous accretion of the Earth and the existence of a global magma ocean at an early stage of its evolution. It had a composition ranging from acidic in the upper parts to ultrabasic in the lower parts. With this in mind, the genesis of the main igneous rocks of the Siberian platform was considered. The Early Precambrian crystalline complexes arose from the crystallization of the upper parts of the layered magma ocean. Their heterogeneity was due to the multiple subsidence of the crystallized upper parts of the ocean and the emergence of the lower liquid ones. Autonomous anorthosites were formed by intrusion of not yet solidified plagioclase cumulates of its middle and main layers. Alkaline-ultrabasic carbonatite-bearing plutons were formed from the residual melts of the fractionated picrite layer of the magmatic ocean. Very high contents of rare elements in them were due to the long-term processes of their accumulation in the residual melts. The kimberlites arose from the residual melts of the bottom peridotite layer. The diamond in them crystallized due to the accumulation of carbon in the residual melts. Trap magmas

*ШКОДЗИНСКИЙ Владимир Степанович* – д.г.-м.н., в.н.с. Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН. E-mail: shkodzinskiy@diamond.ysn.ru

*SHKODZINSKIY Vladimir Stepanovich* – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, Institute of Geology of Diamond and Precious Metals, SB RAS. E-mail: shkodzinskiy@diamond.ysn.ru

were formed as a result of decompression melting processes in the emerging main plumes. Mesozoic alkaline intrusions of the Aldan Shield were formed by frictional remelting of alkaline differentiates of the magmatic ocean in zones of deep tectonic dislocations.

*Keywords:* global magma ocean, magmatic fractionation, decompression and frictional melting, genesis of geospheres and magmas.

### **Введение**

На Сибирской платформе находится множество магматических пород, с которыми связано разнообразное оруденение. Для успешного прогноза и поиска его и решения других геологических задач необходимо выяснение происхождения этих пород. Обоснованное решение этой проблемы невозможно без знания генезиса геосфер и Земли, что обычно не учитывается при геологических исследованиях. Современные представления о природе глобальных геологических процессов базируются на гипотезе холодной гомогенной аккреции Земли, выдвинутой математиком О.Ю. Шмидтом [1] в прошлом столетии на основании предположения о формировании протопланетного диска в результате захвата гравитационным полем Солнца космического холодного газово-пылевого облака. По этой гипотезе Земля возникла путем одновременного объединения холодных железных и силикатных частиц этого облака под влиянием гравитационных сил. Разделение этих частиц в земных недрах по плотности привело к формированию железного ядра и силикатной мантии. Ранняя геологическая история принципиально не отличается от фанерозойской. Магмы возникают путем отделения выплавок из глубинных пород, слабо подплавленных (на 0,1 – 15 %) [2] под влиянием радиогенного тепловыделения.

Однако к настоящему времени установлено существование большого количества противоречий этой системе взглядов [3, 4]. Вязкость слабо подплавленных пород очень велика и препятствует отделению из них выплавок. Например, в подплавленной на 6 % астеносфере с вязкостью  $10^{18} \text{Н} \cdot \text{с} / \text{м}^2$  капли основного расплава радиусом 1 см за всю историю Земли (4,5 млрд. лет) способны всплыть менее чем на 2 мм [4]. Это подтверждается отсутствием процессов отделения расплавов в экспериментах по плавлению перидотитов менее чем на 35 % [5] и автохтонностью анатектического жильного материала в огромных полях мигматитов. Встречающиеся в мигматитах тела гранитов имеют другой состав и возраст, чем анатектический жильный материал.

### **Происхождение кислой кристаллической коры и древних магматических пород**

В настоящее время установлено, что протопланетный диск имел тот же исходный состав, что и Солнце, и очень высокую первичную температуру – до 1800 К [6]. Выделение потенциальной энергии при аккреции составляло 9000 кал/г, что было способно разогреть Землю до 34000°C [7]. О.Ю. Шмидт предполагал, что аккреция происходила в течение более миллиарда лет. За это огромное время импактное тепло полностью излучилось в космическое пространство. Но современные изотопные данные свидетельствуют, что планеты сформировались менее чем за 10 миллионов лет [8]. Это указывает на горячую аккрецию Земли.

Геологические данные полностью подтверждают этот вывод. Оказалось, что составы пород мантийных ксенолитов и раннедокембрийских кристаллических комплексов образуют тренды магматического фракционирования, их изотопный возраст и температура кристаллизации уменьшаются в последовательности образования при фракционировании. Древние геотермические градиенты проектируются в область очень высокой температуры (до 1000°C) на земной поверхности [4]. Эти и многие другие данные свидетельствуют о горячей аккреции и о необходимости кардинального пересмотра генетических гипотез петрологии.

Резкая химическая неравновесность мантийных пород с металлическим железом и присутствие на Земле  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$ , а не  $\text{H}_2$  и  $\text{CO}$  [7], указывают, что железные и силикатные частицы никогда не были перемешаны в земных недрах и, следовательно, аккреция была гетерогенной. Железное ядро образовалось раньше силикатной мантии в результате быстрого объединения железных частиц под влиянием магнитных сил, поскольку, например, при сантиметровом размере частиц мощность этих сил была в миллиарды раз больше чем гравитационных [4]. Огромная мощность этих сил обусловила на тысячи градусов больший импактный разогрев ядра по сравнению с мантией при аккреции, объясняет намного большую его температуру, подогрев им мантии и возникновение в ней конвекции.

Расчеты [4] свидетельствуют, что выпадавшие на сформировавшееся ядро силикатные частицы плавилась в результате импактного тепловыделения. Придонные части возникшего магматического океана при аккреции частично кристаллизовались под влиянием роста давления формировавшихся его верхних частей и образовали из кумулатов породы мантии, а из всплывавших остаточных расплавов – различные по составу слои магматического океана. Вследствие незначительной еще глубины океана и пониженной силы тяжести на ранней небольшой Земле придонное фракционирование длительное время было малобарическим, поэтому возникавшие остаточные расплавы в соответствии с экспериментальными данными [2] варьировали по составу от толеитов до гранитов. Существование этих ранних массовых малобарических процессов синаккреционного фракционирования объясняет широкое развитие на Земле пород такого состава. Подтверждением очень раннего формирования исходного вещества гранитов являются самый древний их максимальный изотопный возраст и большие величины начального отношения в них изотопов стронция (до 0,716, рис. 1). Эти большие величины связаны с формированием кислых расплавов при аккреции около 4,5 млрд. лет назад. Очень длительное (более 0,7 млрд. лет) существование этих расплавов привело к большому накоплению в них радиогенного стронция за счет распада радиоактивного изотопа рубидия к началу кристаллизации гранитов (3,8 млрд. лет назад).

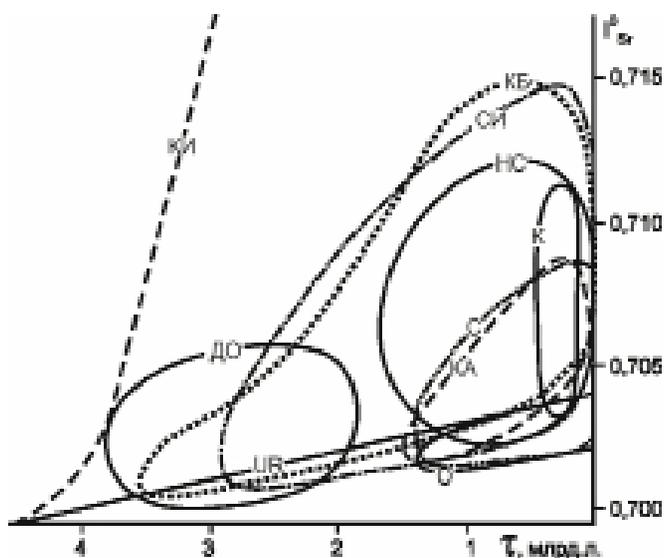


Рисунок 1 – Соотношение возраст – начальное отношение изотопов стронция в кислых магматических породах (КИ), докембрийских гнейсах (ДО), континентальных базитах (КБ), сиенитах (СИ), субдукционных магматических породах (С), нефелиновых сиенитах (НС), океанических базальтах (О), карбонатах (КА) и кимберлитах (К) [9, 10].

Размещение различных расплавов по плотности обусловило возникновение слоистости в магматическом океане. Сильное возрастание плотности с глубиной (от 2,3 до 2,8 г/см<sup>3</sup>) привело к отсутствию в нем обширной единой конвекции от дна до поверхности. Поэтому после прекращения аккреции он длительно затвердевал сверху вниз преимущественно в результате кондуктивных теплопотерь. Это объясняет отсутствие на Земле пород древнее 4 млрд. лет и кратеров завершавшей аккрецию гигантской метеоритной бомбардировки, закончившейся на Луне около 3,8 млрд. лет назад. Самые древние раннедокембрийские кристаллические комплексы Алданского щита на Сибирской платформе имеют U-Pb и Rb-Sr возраст около 3,5 млрд. лет [11, 12]. Вследствие увеличения плотности при кристаллизации затвердевавшие верхние части магматического океана периодически тонули вместе с начавшими формироваться на них осадками а на их место всплывали нижние жидкие. Это объясняет пестрый состав раннедокембрийских кристаллических комплексов, обычно линзовидную и неправильную форму тел слагающих их гнейсов и присутствие среди них паропород.

Образование кристаллической коры путем затвердевания магматического океана объясняет выдержанные на всей Земле магматические температуры ее кристаллизации (600 – 900°С), отсутствие на Сибирской платформе и в других регионах постепенных переходов кристаллических комплексов в метаморфизованные породы и реликтов в них ранних низкотемпературных минералов, отсутствие признаков существования мощных (десятки километров) перекрывающих толщ, теплоизолирующим влиянием которых должен бы быть обусловлен гипотетический метаморфизм. Подошва кристаллической коры (граница Мохо, М на рис. 2), видимо, обусловлена сменой содержащих полевые шпаты продуктов затвердевания остаточных расплавов кумулатами темноцветных минералов.

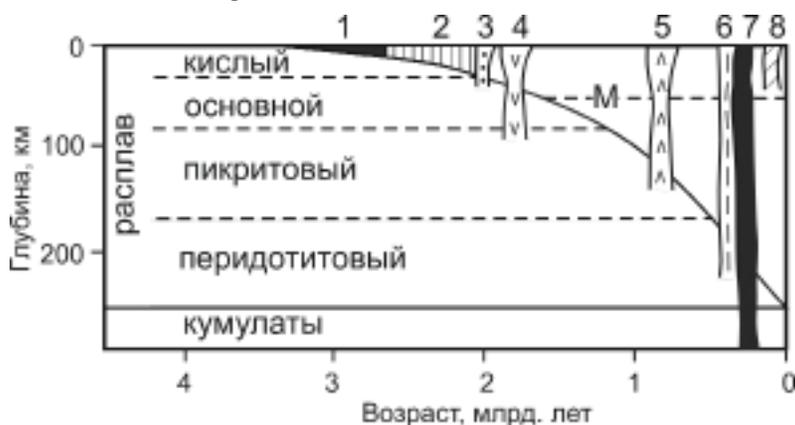


Рисунок 2 – Последовательность кристаллизации различных слоев глобального магматического океана и образования в них магм различных пород Сибирской платформы: 1 – кристаллических комплексов западной и центральной частей Алданского щита; 2 – восточной части щита; 3 – автономных анортозитов, 4 и 5 – соответственно Селигдарского и Томторского карбонатитосодержащих комплексов, 6 – кимберлитов; 7 – траппов; 8 – мезозойских щелочных интрузий Алданского щита.

Вследствие существования океана магмы при образовании раннедокембрийских кристаллических комплексов, вопреки широко распространенным предположениям, не было процессов накопления мощных осадочно-вулканогенных толщ и их регионального метаморфизма. Одинаковые гистограммы распределения температуры кристаллизации гиперстенсодержащих и безгиперстеновых гнейсов (рис. 3) указывают, что присутствие и отсутствие в них гиперстена обусловлено не принадлежностью их соответственно к гранулитовой и амфиболитовой

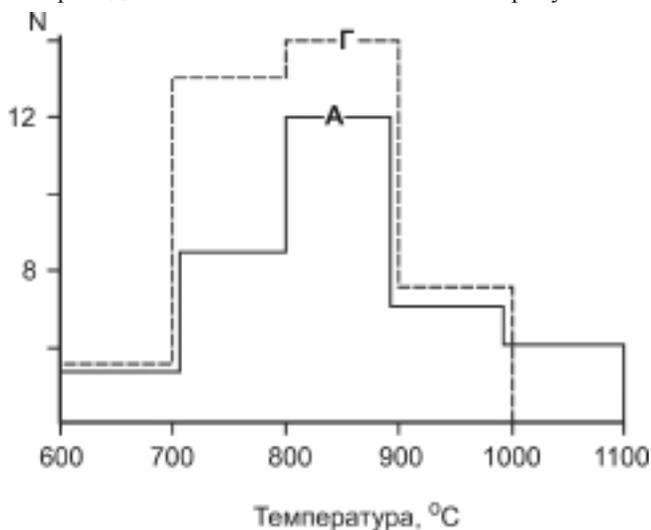


Рисунок 3 – Гистограммы температур кристаллизации гиперстенсодержащих (Г) и безгиперстеновых (А) гнейсов Алданского, Анабарского, Балтийского и Украинского щитов по данным из [13].

фациям метаморфизма, а низким и повышенным содержанием воды в их исходных магмах. Накоплением воды в остаточных кислых расплавах и их всплыванием обусловлено распространение безгиперстеновых кристаллических комплексов чаще в верхних частях кристаллической коры, а гиперстеносодержащих – в средних. Неоднократные процессы погружения кристаллизовавшихся верхних частей кислого слоя магматического океана и всплывания менее закристаллизованных нижних обусловили сонахождение в одних и тех же обнажениях минеральных парагенезисов, относимых к различным фациям метаморфизма, например, гранат-кордиеритовых и силлиманит-биотитовых, гиперстеносодержащих и безгиперстеновых.

Неизбежное постепенное укрупнение частиц в протопланетном диске и увеличение силы гравитации на образующейся Земле привели к росту импактного тепловыделения в процессе аккреции мантии. Величина этого импактного разогрева оценивается различными исследователями в 800 – 3400°C [4]. Из этого следует очень важный вывод о том, что геотермический градиент в мантии в раннем докембрии был обратным по отношению к современному, то есть температура уменьшалась с глубиной. Следовательно, тогда не было всемантийной конвекции и современных геодинамических обстановок. Это объясняет отсутствие в кристаллической коре Сибирской и других платформ глубоководных океанических отложений. Локальные процессы погружения и всплывания вещества в кристаллизовавшемся магматическом океане приводили к возникновению процессов растяжения и сжатия в затвердевавшей кристаллической коре и к образованию в ней зеленокаменных поясов и осадочно-вулканогенных бассейнов. Породы их слабо метаморфизовались под влиянием горячего основания. Локальность этих процессов обусловила относительно небольшой размер возникавших тектонических структур. Например, на Алданском щите они имеют протяженность десятки – сотни километров, тогда как размер современных океанов и горных хребтов достигает многих тысяч километров. Небольшая высота возникавших поднятий в пластичной коре объясняет нехарактерность конгломератов для древнейших комплексов. В раннем докембрии существовала *тектоника малых пластичных коровых плит*.

Отсутствие на Сибирской платформе пород древнее 3,5 миллиарда лет [11, 12] указывает, что примерно до этого времени земная поверхность здесь была покрыта расплавом и на ней отсутствовали твердые породы. В это время началась кристаллизация верхнего кислого слоя глобального магматического океана (1 и 2 на рис. 2) с погружением его закристаллизованных верхних частей и всплыванием нижних менее затвердевших. Судя по минимальному возрасту кристаллических пород эти процессы продолжались до примерно двух миллиардов лет назад. Большая глубина магматического океана (около 250 км) обусловила большую длительность (около 1,5 млрд. лет) образования раннедокембрийских кристаллических комплексов и всегда высокую температуру кристаллизации их пород во всех регионах.

Плотность основных расплавов меньше чем кислых и средних по составу магматических пород [4]. Поэтому опускание сильно раскристаллизованных кислых магм могло сопровождаться всплыванием на их место основных расплавов из соответствующего по составу слоя магматического океана. Это объясняет широкое распространение тел основных кристаллических сланцев среди ортогнейсов кислого и среднего состава. Вследствие большого давления присутствовавшей в это время мощной газовой-паровой оболочки излияния основных магм не сопровождались взрывным отделением из них летучих компонентов. Это объясняет нетипичность реликтов обломочных текстур для основных кристаллических сланцев. Состав основных расплавов магматического океана формировался с участием длительных процессов его синаккреционного и постаккреционного фракционирования. Это является причиной чаще всего высокого содержания литофильных компонентов в раннедокембрийских основных кристаллических сланцах. Например, содержание  $K_2O$  в основных кристаллических сланцах западной части Алданского щита составляет 0,88 % (в среднем по 123 анализам) и достигает 2,8 % (рис. 4). Это в несколько раз больше, чем в базальтах срединно-океанических хребтов.

Самые древние породы обнажаются в западной части Алданского щита (1 на рис. 2). Кислые ортогнейсы здесь представлены преимущественно безгиперстеновыми биотитовыми и рогово-обманковыми тоналитами и гранитогнейсами Олекминского комплекса. Такой состав, видимо, обусловлен сохранением здесь самой верхней части кристаллической коры, в которой находи-

лись наиболее богатые водой кислые остаточные расплавы. Пониженная эродированность этих частей щита согласуется с сохранением на левобережье р. Олекмы небольших выходов зеленокаменных комплексов. Выделение летучих компонентов из кристаллизовавшихся гранитных расплавов обусловило широкое распространение в Федоровском комплексе центральной части щита скарновых месторождений флогопита и магнетита.

Массовое отделение летучих компонентов из кристаллизовавшегося магматического океана привело к формированию гидросферы и атмосферы Земли. До этого на ее поверхности присутствовала лишь наиболее тяжелая углекислота, поскольку высокая начальная температура земной поверхности (примерно до 2400 К) препятствовала удержанию на ней более легких газов. Расчеты [4] показали, что пары воды начали удерживаться после падения температуры поверхности ниже 1305 К, азота – при температуре ниже 1015 К, что произошло соответственно около 3,7 и 3,15 млрд. лет назад.

Массовое выделение кислотных газов ( $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ) из кристаллизовавшегося магматического океана приводило к очень широкому распространению процессов кислотного выщелачивания верхних частей коры. Это объясняет широкое распространение на Алданском Анабарском щитах высокоглиноземистых гнейсов и кварцитов. В Курумканской серии Алданского щита тела кварцитов достигают мощности 1 км. Вынос железа и кремнекислоты из магм отделявшимися высокотемпературными эманациями привел к формированию железистых кварцитов, характерных для зеленокаменных поясов на западе Алданского щита. Более низкотемпературные гидротермы обусловили образование в них золотого оруденения и стратиформных месторождений меди в Удоканском грабене. Вследствие пластичности ранней коры в ней сначала не возникали трещины и заполнявшие их рудные жилы. Рудоносные эманации размещались преимущественно в понижениях в рельефе совместно с накапливавшимися здесь ранними осадками. Это объясняет частое присутствие стратиформных месторождений в древних комплексах.

В восточной части Алданского щита широко распространены различные эндербиты, что свидетельствует о поздней кристаллизации их из бедных водой расплавов в среднем более глубоких частях магматического океана (2 на рис. 2). Это согласуется с более молодым изотопным возрастом этих пород (чаще всего 2,1 – 1,8 млрд. лет) и с повышенным содержанием среди них мраморов. Вещество последних выделялось в относительно остывших водоемах, в которых достигался предел растворимости карбонатов. В западной части Анабарского щита обнажаются тоналит-трондьемитовые комплексы, в центральной и восточной наиболее распространены эндербитовые гнейсы.

Образование раннедокембрийских кристаллических комплексов постоянно сопровождалось внедрением гранитоидов. Наиболее поздние из них представлены аляскитами и рапакиви. Они часто имеют субщелочной состав и возникали из остаточных расплавов глубоких частей кислого слоя магматического океана.

Несколько позже (1,93 – 1,84 млрд. лет назад для Каларского массива Алданского щита [11, 12]), а иногда и одновременно с рапакиви внедрялись интрузии автономных анортозитов (3 на рис. 2). Их вещество возникло из плагиоклазовых кумулатов среднего и основного слоев магматического океана и, видимо, внедрялось в виде «каши» из кристаллов плагиоклаза при еще высокой температуре этих слоев. Позже после полного затвердевания расплава внедрение их прекратилось. Это объясняет сравнительно узкий возрастной интервал образования автономных анортозитов и их обычно значительную древность. Участие в формировании среднего по составу слоя магматического океана является причиной часто андезинового состава их плагиоклаза. Этим они кардинально отличаются от анортозитов дифференцированных мафических комплексов, сложенных основным плагиоклазом и имеющих обычно небольшой изотопный возраст. Автономные анортозиты распространены в южной части Алданского щита и в зонах разломов на Анабарском щите. В них содержится титаномангнетитовое и апатитовое оруденение, сформировавшееся из кумулатов исходных магм.

После значительного затвердевания основного слоя магматического океана происходила кристаллизация подстилавшего его пикритового, переходного по составу к самому нижнему перидотитовому слою. Вследствие высокого давления перекрывавших затвердевших частей магматического океана кристаллизация пикритового слоя сопровождалась образованием гра-

ната. Это обусловило повышение щелочности остаточных расплавов. Всплывание последних привело к формированию щелочно-ультраосновных и менее мафических щелочных массивов.

Экспериментальные данные [15, 16] свидетельствуют, что при молекулярной доле углекислоты в летучей составляющей более 0,6 высокобарическое фракционирование мафических магм приводит к накоплению в остаточных расплавах извести и углекислоты – главных составляющих карбонатитовых и кимберлитовых магм. При давлении более 2,5 ГПа карбонатные и силикатные расплавы полностью смешиваются, что приводило к образованию кимберлитовых магм. При меньшем давлении они не смешивались. Это обусловило возникновение карбонатитовых магм и объясняет обычно присутствие поздних карбонатитовых фаз в щелочно-ультраосновных массивах.

Наиболее древними (1,9 – 1,4 млрд. лет [17]) являются карбонатиты Селигдарского и родственных мелких массивов (4 на рис. 2) на Алданском щите. Ассоциация с основными породами указывает на образование их из остаточных расплавов основного слоя магматического океана. Этот слой закристаллизовался примерно 1,5 млрд. лет назад, что объясняет возраст этих карбонатитов. Для них характерно повышенное содержание апатита. Это обусловлено большой расплавофильностью фосфора и поэтому значительным накоплением его в остаточных расплавах.

В период с 1,8 до примерно 0,8 млрд. лет назад на Сибирской платформе не происходили значительные магматические процессы, что характерно и для других регионов. Этот период небольшой интенсивности геологических процессов получил название «мертвая Земля» [18]. Его существование обусловлено затвердеванием к этому периоду верхних слоев магматического океана и отсутствием еще общемантийной конвекции в связи с существованием в мантии обратного геотермического градиента.

#### **Природа фанерозойского магматизма**

В конце протерозоя прогрев мантии изначально на тысячи градусов более горячим ядром привел к появлению в нем прямого геотермического градиента, к началу возникновения всемантийной конвекции и современных геодинамических обстановок. Разогрев нижних частей мантии сопровождался их всплыванием. Вследствие относительно небольшого снижения плотности при разогреве всплывать могли только огромные (поперечником в тысячи километров) суперплюмы преимущественно ультраосновного вещества. Такие суперплюмы в настоящее время установлены под Тихим океаном и Южной Африкой [18]. Большая тугоплавкость привела к небольшой степени декомпрессионного подплавления вещества суперплюмов при подъеме. Содержание расплава в астеносфере по современным оценкам составляет в среднем 6 %. При таком его содержании вязкость вещества верхних частей суперплюмов равна примерно  $10^{18} \text{Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2$  [4]. Вследствие огромных размеров и вязкости подъем и растекание вещества суперплюмов оказывают огромное механическое воздействие на литосферу. Они приводят к раскалыванию континентов, к появлению океанов и зон коллизии, то есть к возникновению *тектоники литосферных плит*. Образование глубоких океанов сопровождалось значительным осушением континентов и сокращением на них морского осадконакопления. На других планетах земной группы небольшие ядра не смогли прогреть их мантии. Это является причиной отсутствия на них четких признаков существования плитной тектоники и современного магматизма.

Положение на окраине Сибирской платформы и относительно небольшой изотопный возраст (0,81 – 0,24 млрд. лет [17]) свидетельствует, что Томторский щелочно-ультраосновной плутон (5 на рис. 2) сформировался под влиянием механического воздействия на литосферу платформы раннего суперплюма. Это воздействие привело к возникновению тектонического раскола и к выжиманию и всплыванию по нему щелочных остаточных расплавов пикритового слоя магматического океана.

Огромная продолжительность процессов фракционирования магматического океана (от примерно 3,5 до 0,3 млрд. лет назад) обусловила гигантское накопление в остаточных расплавах, сформировавших Томторский плутон и другие более мелкие массивы (Арбарастахского, Горное озеро, Поворотный), расплавофильных редкоземельных элементов, Nb, V, а также фосфора и железа и к образованию участков уникально богатых этими компонентами. Суммарное содержание редкоземельных элементов в породах Томторского плутона иногда достигает более

10 %, тогда как в недифференцированных магматических породах оно составляет лишь десятки – сотни грамм на тонну, то есть в тысячи раз ниже. Последние остаточные расплавы были наиболее низкотемпературными и, видимо, всплывали в прикровельные части плутона. Это привело к образованию в них самой богатой верхней рудной зоны мощностью до 12 – 15 м [17].

Судя по присутствию в кимберлитах мантийных ксенолитов и включений в алмазах с возрастом до 3,5 млрд. лет, примерно в это время началась кристаллизация самого нижнего перидотитового слоя магматического океана. Осаждение в нем темноцветных минералов приводило к образованию сначала гарцбургитовых (средний возраст 2,325 млрд. лет), затем лерцолитовых (1,777 млрд. лет), эклогитовых (1,407 млрд. лет) и вебстеритовых (0,713 млрд. лет) кумулатов [4]. Остаточный расплав обогащался углекислотой, водой и известью. В соответствии с экспериментальными данными это привело к образованию кимберлитовых остаточных расплавов. Такой генезис объясняет фанерозойский возраст большинства кимберлитов. Он составляет 236 млн. лет в среднем для кимберлитов различных регионов. Кимберлиты Сибирской платформы имеют палеозойский и мезозойский возраст.

При всплывании и выжимании по зонам растяжения в литосфере остаточные кимберлитовые расплавы захватывали собственные кумулаты, что обусловило постоянное присутствие их ксенолитов и ксенокристаллов в кимберлитовых трубках. Образование из последних относительно низкотемпературных остаточных расплавов приводило к затвердеванию кимберлитовых магм на малоглубинной стадии подъема под влиянием выделения из них летучих компонентов, имеющих свойства сильных плавней. При дальнейшем подъеме происходил взрыв верхних частей поднимавшихся магматических колонн под влиянием законсервированного затвердеванием высокого давления газовой фазы. Сила взрывов могла быть в тысячи раз больше, чем атомных [3]. Это объясняет залегание кимберлитов во всем мире преимущественно в виде протяженных трубок, широкое распространение в них брекчий и обычно отсутствие наземных кимберлитовых лав.

Раздвижение родоначального для кимберлитов основания континентальной литосферы при образовании океанических областей объясняет отсутствие в них кимберлитов, то есть природу правила Клиффорда. Формирование алмазоносных кимберлитов в самых нижних частях континентальной литосферы обусловило их приуроченность к участкам ее повышенной мощности, имеющим литосферные кили.

Алмаз начал кристаллизоваться на ранних стадиях фракционирования перидотитового слоя магматического океана вследствие накопления в расплаве углерода, поскольку он почти не захватывался порообразующими минералами. Это объясняет древний возраст некоторых включений в алмазах и присутствие этого минерала в мантийных ксенолитах. Рост содержания кремнекислоты в процессе фракционирования приводил к очень сильному (в миллионы раз [3]) росту вязкости остаточных расплавов. Это обусловило примерно такое же уменьшение скорости диффузии в них углерода и сильное возрастание степени пересыщения их этим компонентом. Поэтому тангенциальный послыйный рост алмазов постепенно сменялся радиальным. Это привело к эволюции морфологии формировавшихся алмазов от гладкогранных октаэдров, к ламинарным переходным, затем к додекаэдрам, кубам и агрегатам и к образованию на них скульптур. Накопление расплавофильных элементов в расплавах обусловило рост содержания легкого изотопа углерода, азота и других примесей от ранних алмазов к поздним.

В крупных россыпях севера Сибирской платформы (рр. Маят, Эбелях и др.) и других регионов содержатся крупные преимущественно ромбододекаэдрические алмазы, для которых нигде в мире не удалось найти содержащие их трубки. Судя по ромбододекаэдрической форме большинства алмазов и преобладанию в них включений минералов эклогитового парагенезиса, эти алмазы кристаллизовались в глубинных очагах фракционировавшихся щелочных основных магм. При декомпрессионном затвердевании эти магмы, вследствие небольшого содержания в них рано выделявшейся углекислоты, взрывались в приповерхностных условиях и сформировали преимущественно наземные туфы, а не трубки. Это объясняет неудачные попытки найти последние. Источниками алмазов этих россыпей являются тела наземных туфов. Это подтверждается присутствием триасовых перемытых остатков этих туфов на севере Сибирской платформы [19]. Их алмазы идентичны россыпным. Судя по возрасту, их исходные магмы образовались

из высокобарических остаточных расплавов основного плюма, родоначального для траппов. Такие высокобарические расплавы возникали на периферии плюма, где сохранилась толстая литосфера.

При аккреции мантии падение крупных планетезималей приводило к возникновению импактных кратеров на дне магматического океана. Быстрое компрессионное затвердевание заполнявших их расплавов обусловило формирование крупных тел преимущественно толеитового состава. Их всплывание после возникновения прямого геотермического градиента в мантии привело к формированию основных плюмов. Декомпрессионное переплавление их вещества при подъеме обусловило образование огромных объемов траппов. Такое происхождение должны иметь среднепалеозойские траппы Сибирской платформы (7 на рис. 2). Их огромный объем (несколько миллионов кубических километров) согласуется с большим размером (до тысячи и более километров) импактных бассейнов на Луне. В подобных бассейнах при аккреции Земли формировались исходные для траппов тела основных пород в мантии. Наиболее ранние из этих тел могли захватывать ксенолиты земного ядра, что объясняет иногда присутствие блоков самородного железа в траппах. Ксеногенное происхождение подтверждается признаками их химической неравновесности с вмещающими основными породами.

При скорости подъема плюма впервые сантиметры в год за миллион лет в область декомпрессионного плавления могли подняться и переплавиться миллионы кубических километров основных пород. Это объясняет относительно быстрое образование огромных объемов траппов. Вязкость основных магм составляет десятки  $\text{H}\cdot\text{c}/\text{m}^2$ . Поэтому вязкость сложенного преимущественно этими магмами вещества основных плюмов была примерно в  $10^{16}$  раз меньше, чем вещества ультраосновных суперплюмов. Вследствие этого подъем основных плюмов не сопровождался огромным динамическим воздействием их на литосферу. Это объясняет, казалось бы удивительный факт, что образование огромных объемов сибирских траппов привело лишь к утонению литосферы под Тунгусской синеклизой до нескольких десятков километров и не вызвало раскола платформы и образования океанической области.

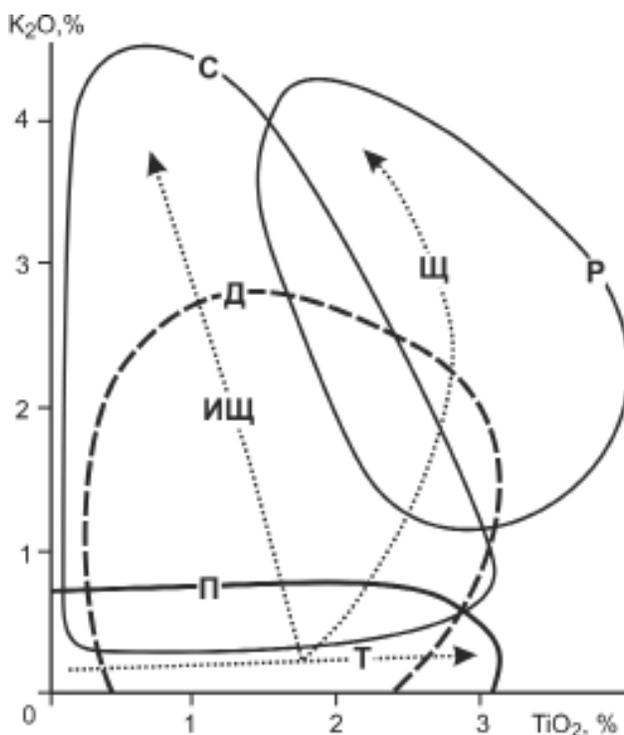


Рисунок 4 – Соотношение  $\text{K}_2\text{O} - \text{TiO}_2$  в базитах раннего докембрия (Д), континентальных рифтов (Р), зон субдукции (С) и срединно-океанических хребтов (П). Тренды фракционирования: Щ – щелочной; ИЩ – известково-щелочной; Т – толеитовый. Построен по данным [11, 12, 14].

Вследствие гетерогенной аккреции и фракционирования при образовании Земли глобального магматического океана содержание расплавофильных компонентов в мантии увеличивается снизу вверх. Поэтому возникавшие в результате декомпрессионного переплавления ранних основных пород нижней мантии базальты срединно-океанических хребтов наиболее бедны калием (чаще всего около 0,2 %) и другими расплавофильными компонентами. Раннедокембрийские кристаллические сланцы и возникшие путем их фрикционного переплавления при тектонических деформациях субдукционные базиты [4] намного богаче этим компонентами (до 2,7 %). Вследствие постепенного укрупнения тел в протопланетном диске крупные импактные кратеры и сформировавшиеся в них исходные для магм траппов основные породы возникли преимущественно на поздней стадии аккреции, когда магматический океан был обогащен расплавофильными компонентами. Это объясняет чаще всего повышенное (до 4 и более %) содержание в них калия. Последний накапливался в остаточных расплавах и при высокобарическом фракционировании магм во время замедления их подъема под толстой литосферой. При таком фракционировании в больших количествах осаждался гранат. В сравнении с другими темноцветными минералами он был беден титаном. Это привело к повышенному содержанию титана в остаточных расплавах и в сформированных из них базитах континентальных рифтов (до 4 % на рис. 4). Исходное вещество базитов других обстановок возникало при низкобарическом фракционировании в магматическом океане, что является причиной чаще всего более низкого содержания в них титана.

Поздними магматическими породами Сибирской платформы являются мезозойские щелочные плутоны Алданского щита (8 на рис. 2) с изотопным возрастом 109 – 157 млн. лет [20]. В них присутствует значительное количество мафических ксенолитов. Высокое содержание натрия в клинопироксенах последних (до 0,8 – 1 %) и щелочей в наиболее лейкократовых ксенолитах (до 7 %), а также повсеместное присутствие ксенолитов в щелочных магматических породах указывают, что исходное вещество этих пород и ксенолитов образовались в одном и том же процессе магматического фракционирования, как это имело место при формировании кимберлитов. Фракционирование происходило в условиях устойчивости полевых шпатов, судя по присутствию европейских аномалий в породах. Возраст ксенолитов 1,9 – 1,963 млрд. лет, что свидетельствует о фракционировании среднего и, возможно, основного по составу слоев магматического океана. При мезозойских тектонических деформациях затвердевшие щелочные дифференциаты плавилась под влиянием фрикционного тепловыделения и сформировали магмы щелочных плутонов. Фрикционное происхождение имеют и магмы коллизионных и субдукционных обстановок [4]. Ярким подтверждением большой эффективности фрикционного разогрева является спутник Юпитера Ио. На нем деформации под влиянием мощного гравитационного поля Юпитера обусловили существование массового современного вулканизма.

### **Заключение**

Таким образом, учет данных о горячей гетерогенной аккреции Земли позволяет объяснить особенности состава, возраста, распространения и рудоносности магматических пород Сибирской платформы. Из этих данных следует, что главной причиной разнообразия состава магматических пород являются процессы синаккреционного и постааккреционного фракционирования глобального магматического океана, а не разная степень частичного плавления глубоких пород при образовании магм путем гипотетического отделения выплавок. Это обусловлено в триллионы раз меньшей вязкостью магм по сравнению со слабо подплавленными породами, что во столько же раз ускоряло процессы дифференциации в магмах.

Существует четыре главных механизма образования магм: 1) путем подъема расплавов из магматического океана (первичные и первично-остаточные магмы древних платформ), 2) в результате декомпрессионного переплавления затвердевших дифференциатов этого океана во всплывавших плюмах (декомпрессионно-плюмовые магмы траппов, рифтов, океанических областей), 3) путем преимущественно фрикционного переплавления этих дифференциатов в зонах интенсивных тектонических деформаций (фрикционные магмы субдукционных и коллизионных областей) и 4) в результате фракционирования в магматических камерах в условиях различной глубинности (вторично-остаточные магмы поздних фаз магматических комплексов различных обстановок).

Статья подготовлена по плану НИР ИГАБМ СО РАН, проект № 0381-2019-0003.

### Литература

1. Шмидт О.Ю. Происхождение Земли и планет. – М.: Изд. АН СССР, 1962. – 132 с.
2. Грин Д.Х. Состав базальтовых магм как критерий их возникновения при вулканизме / Ред. Э. Буллард, Дж. Канн, Д. Метьюз // Петрология изверженных и метаморфических пород дна океана. – М.: Мир, 1973. – С. 242–261.
3. Шкодзинский В.С. Петрология литосферы и кимберлитов (модель горячей гетерогенной аккреции Земли). – Якутск: изд.-во СВФУ, 2014. – 452 с.
4. Шкодзинский В.С. Глобальная петрология по современным данным о горячей гетерогенной аккреции Земли. Якутск: изд.-во СВФУ, 2018. – 244 с.
5. Arndt N.T. The separation of magmas from partially molten peridotite / N.T. Arndt // Carnegie Inst. Wash. Yearb. – 1977. -Vol. 76. – P. 424–428.
6. Додд Р.Т. Метеориты – петрология и геохимия. – М.: Мир, 1986. – 382 с.
7. Рингвуд А.Е. Происхождение Земли и Луны. – М.: Недра, 1982. – 294 с.
8. Рузмайкина Т.В. Протопланетный диск: от идеи захвата к теории происхождения / Т.В. Рузмайкина // Физика Земли. – 1991. – № 8. – С. 5–14.
9. Балашов Ю.А. Изотопно-геохимическая эволюция мантии и коры Земли. – М: Наука, 1985. – 221 с.
10. Богатиков О.А., Богданов С.В., Борсук А.М. и др. Магматические горные породы. Эволюция магматизма в истории Земли. – М.: Наука, 1987. – 439 с.
11. Смелов А.П., Березкин В.И., Тимофеев В.Ф., Зедгенизов А.Н., Попов Н.В., Торопова Л.И. Геологическое строение западной части Алдано-Станового щита и химические составы пород раннего докембрия (Южная Якутия). – Якутск: Изд. ЯНЦ СО РАН, 2009. – 168 с.
12. Березкин В.И., Смелов А.П., Зедгенизов А.В., Кравченко А.А., Попов Н.В., Тимофеев В.Ф., Торопова Л.И. Геологическое строение центральной части Алдано-Станового щита и химические составы пород раннего докембрия (южная Якутия). – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2015. – 459 с.
13. Гранулитовые комплексы в геологическом развитии докембрия и фанерозоя. – Санкт-Петербург: ИП Каталкина, 2007. – 407 с.
14. Андреева Е.Д., Баскина В.А., Богатиков О.А. и др. Магматические породы. Основные породы. – М.: Наука, 1985. – 368 с.
15. Wyllie P.J. Carbonation and melting reactions in the system CaO-MgO-SiO<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub> at mantle pressure with geophysical and petrological applications /P.J. Wyllie, W.L. Huang // Contr. Mineral. and Petrol. – 1976. -Vol. 54. -№ 2. -P. 79–107.
16. Сурков Н.В., Зинчук Н.Н. Устойчивость глубинных парагенезисов, процессы магнообразования и происхождение кимберлитов // Проблемы алмазной геологии и некоторые пути их решения. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 2001. – С. 101–128.
17. Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республика Саха (Якутия). – М.: Маик, 2001. – 571 с.
18. Добрецов Н.Л. Основы тектоники и геодинамики. – Новосибирск: Изд. НГУ, 2011. – 492 с.
19. Граханов С.А. Триасовые палеороссыпи алмазов северо-востока Сибирской платформы / С.А.Граханов, В.И. Коптиль // Геология и геофизика. – 2003. – Т. 44. – № 11. – С. 1191–1201.
20. Kravchenko A.A., Smelov A.P., Popov N.V., Zaitsev A.I., Beryozkin V.I., Dobretsov V.N. First data on the composition of the lower crust of the central part of the Aldan-Stanovoy Shield: results of study of xenoliths from Mesozoic plutons // Craton Formation and Destruction. – Johannesburg, 2012. – P. 61–63.

### References

1. Shmidt O.Ju. Proishozhdenie Zemli i planet. – M.: Izd. AN SSSR, 1962. – 132 s.
2. Grin D.H. Sostav bazal'tovyh magm kak kriterij ih vzniknovenija pri vulkanizme / Red. Je. Bullard, Dzh. Kann, D. Met'juz // Petrologija izverzhennyh i metamorficheskikh porod dna okeana. – M.: Mir, 1973. – S. 242–261.
3. Shkodzinskij V.S. Petrologija litosfery i kimberlitov (model' gorjachej geterogennoj akkrecii Zemli). – Jakutsk: izd.-vo SVFU, 2014. – 452 s.

4. Shkodzinskij V.S. Global'naja petrologija po sovremennym dannym o gorjachej geterogennoj akkrecii Zemli. Jakutsk: izd.-vo SVFU, 2018. – 244 s.
5. Arndt N.T. The separation of magmas from partially molten peridotite / N.T. Arndt // Carnegie Inst. Wash. Yearb. – 1977. – Vol. 76. – P. 424–428.
6. Dodd R.T. Meteority – petrologija i geohimija. – M.: Mir, 1986. – 382 s.
7. Ringvud A.E. Proishozhdenie Zemli i Luny. – M.: Nedra, 1982. – 294 s.
8. Ruzmajkina T.V. Protoplanetnyj disk: ot idei zahvata k teorii proishozhdenija / T.V. Ruzmajkina // Fizika Zemli. – 1991. – № 8. – S. 5–14.
9. Balashov Ju.A. Izotopno-geohimicheskaja jevoljucija mantii i kory Zemli. – M: Nauka, 1985. – 221 s.
10. Bogatikov O.A., Bogdanov S.V., Borsuk A.M. i dr. Magmaticheskie gornye porodny. Jevoljucija magmatizma v istorii Zemli. – M.: Nauka, 1987. – 439 s.
11. Smelov A.P., Berezkin V.I., Timofeev V.F., Zedgenizov A.N., Popov N.V., Toropova L.I. Geologicheskoe stroenie zapadnoj chasti Aldano-Stanovogo shhita i himicheskie sostavy porod rannego dokembrija (Juzhnaja Jakutija). – Jakutsk: Izd. JaNC SO RAN, 2009. – 168 s.
12. Berezkin V.I., Smelov A.P., Zedgenizov A.V., Kravchenko A.A., Popov N.V., Timofeev V.F., Toropova L.I. Geologicheskoe stroenie central'noj chasti Aldano-Stanovogo shhita i himicheskie sostavy porod rannego dokembrija (juzhnaja Jakutija). – Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2015. – 459 s.
13. Granulitovye komplekсы v geologicheskom razvitii dokembrija i fanerozoja. – Sankt-Peterburg: I.P. Katalina, 2007. – 407 s.
14. Andreeva E.D., Baskina V.A., Bogatikov O.A. i dr. Magmaticheskie porodny. Osnovnye porodny. – M.: Nauka, 1985. – 368 s.
15. Wyllie P.J. Carbonation and melting reactions in the system CaO-MgO-SiO<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub> at mantle pressure with geophysical and petrological applications / P.J. Wyllie, W.L. Huang // Contr. Mineral. and Petrol. – 1976. – Vol. 54. – № 2. – P. 79–107.
16. Surkov N.V., Zinchuk N.N. Ustojchivost' glubinyh paragenezisov, processy magmoobrazovanija i proishozhdenie kimberlitov // Problemyalmaznoj geologii i nekotorye puti ih reshenija. – Voronezh: Izd-vo VGU, 2001. – S. 101–128.
17. Tektonika, geodinamika i metallogenija territorii Respublika Saha (Jakutija). – M.: Maik, 2001. – 571 s.
18. Dobrecov N.L. Osnovy tektoniki i geodinamiki. – Novosibirsk: Izd. NGU, 2011. – 492 s.
19. Grahanov S.A. Triasovye paleorossypialmazov severo-vostoka Sibirskoj platformy / S.A. Grahanov, V.I. Koptil' // Geologija i geofizika. – 2003. – T. 44. – № 11. – S. 1191–1201.
20. Kravchenko A.A., Smelov A.P., Popov N.V., Zaitsev A.I., Beryozkin V.I., Dobretsov V.N. First data on the composition of the lower crust of the central part of the Aldan-Stanovoy Shield: results of study of xenoliths from Mesozoic plutons // Craton Formation and Destruction. – Johannesburg, 2012. – P. 61–63.