

Происхождение раннедокембрийских кристаллических комплексов и природа правила Клиффорда

В.С.ШКОДЗИНСКИЙ (Институт геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения Российской академии наук (ИГАБМ СО РАН), 677980, г. Якутск, проспект Ленина, д. 39),

Приведены доказательства существования на Земле в докембрии слоистого глобального океана магмы. Затвердевание его кислого слоя привело к образованию кристаллической коры. Она сначала покрывала всю поверхность. Под влиянием деформаций площадь ее уменьшилась. Вследствие повышения температуры при аккреции верхняя мантия сначала имела более высокую температуру, чем нижняя. Поэтому в раннем докембрии не происходил подъем нижнемантийных плюмов. Правило Клиффорда обусловлено формированием древних кристаллических комплексов и алмазоносных кимберлитовых остаточных расплавов в результате кристаллизации магматического океана.

Ключевые слова: магматический океан, генезис кристаллической коры, природа магм, мантия, правило Клиффорда

Шкодзинский Владимир Степанович



shkodzinskiy@diamond.ysn.ru

Genesis of early Pre-Cambrian crystalline rocks and Clifford rule

V.S.SHKODZINSKIY

It was shown that layered magma ocean existed on the Earth in early Pre-Cambrian. Origin of crystalline crust is a result of crystallization of its acid layer. It covered all the Earth. Late deformations decreased its area. Owing to the rise of temperature during accretion, temperature of the lower mantle was lower than that of the upper mantle during early Pre-Cambrian. Therefore, mantle plumes did not formed. Clifford rule is a result of crust and kimberlite origin in magma ocean.

Key words: magma ocean, crystalline crust, origin of magmas, mantle, Clifford rule.

Раннедокембрийские (древнее 1,6 млрд. лет) геологические процессы резко отличались от более поздних формированием огромных объемов кислой кристаллической коры, гранитоидов, автономных анортозитов, месторождений железных руд. В соответствии с правилом Клиффорда только в областях распространения раннедокембрийских комплексов присутствуют алмазоносные кимберлиты. Природа этих особенностей до настоящего времени не получила убедительного объяснения. Выявленные в последние десятилетия доказательства горячей аккреции планет земной группы впервые позволяют полностью понять их природу.

Доказательства горячей аккреции Земли. Первые свидетельства горячего образования получены для Луны. На ней было установлено существование преимущественно анортозитовой коры мощностью до 100 км. Такая кора могла образоваться только путем всплывания плагиоклаза в океане магмы глубиной около 1000 км [16]. О существовании подобного океана на Земле свидетельствует присутствие трендов магматического фракционирования в породах мантийных ксенолитов из кимберлитов [14] и уменьшение среднего изотопного возраста и температуры образования раз-

личных пород этих ксенолитов в полном соответствии с последовательностью кристаллизации при фракционировании (рис. 1).

Оказалось, что подобные тренды фракционирования характерны и для кристаллических пород Алдано-Станового щита. Гнейсы и кристаллические сланцы Олекминского комплекса соответствуют по составу типичным магматическим породам от лейкогранитов и гранитов до базитов и поля их составов располагаются вдоль единого тренда магматического фракционирования (рис. 2). Такие же тренды получены для хорошо изученных крупных Федоровского и Курультинского комплексов. Средний изотопный возраст уменьшается от основных высокотемпературных пород к кислым более низкотемпературным (рис. 3), то есть в полном соответствии с последовательностью кристаллизации при магматическом фракционировании.

Это свидетельствует о том, что данные кристаллические комплексы образовались не в результате метаморфизма гипотетических осадочно-вулканогенных толщ, как обычно предполагается, а путем кристаллизации и фракционирования огромного объема магмы. Проекция линий геотермических палеоградиентов ран-

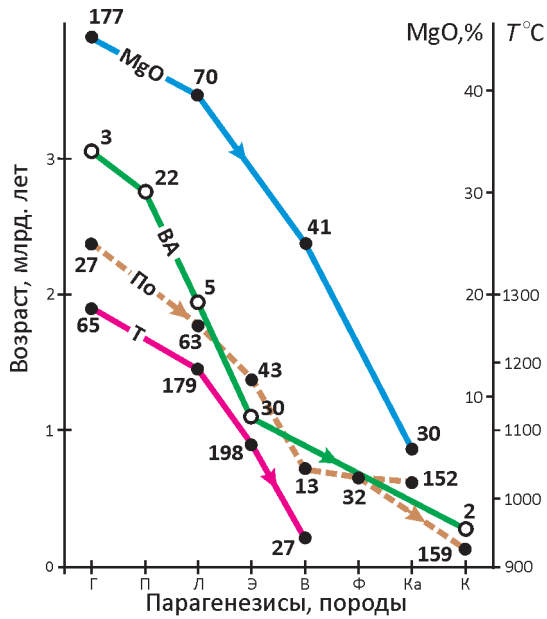


Рис. 1. Средние изотопные возрасты различных мантийных пород из ксенолитов в кимберлитах (линия По) и включений в алмазах (ВА), средняя температура образования при 5 ГПа (Т) и среднее содержание MgO в породах (MgO) [14]:

составы включений в алмазах и пород ксенолитов: Г – гарцбургитовый, П – перидотитовый нерасчлененный, Л – лерцолитовый, Э – эклогитовый, В – верлитовый и вебстеритовый, Ф – флогопитсодержащие породы, Ка – карбонатиты, Ки – кимберлиты; числа у точек – количество использованных определений

недокембрийских кристаллических комплексов и $P-T$ условий образования ксенокристаллов клинопироксена из кимберлитов в область очень высокой температуры на земной поверхности (до 1000°C) свидетельствуют о том, что резервуар магмы сначала простирался до земной поверхности и, следовательно, представлял собой глобальный магматический океан [14].

Выполненный анализ планетологических и геологических данных [14] показал, что земное ядро сформировалось раньше силикатной мантии и имело более высокую температуру вследствие в 20 тыс. раз большей скорости слипания железных частиц в протопланетном диске под влиянием магнитных сил по сравнению с силикатными [2, 17]. Такой генезис ядра подтверждается отсутствием деплетированности мантийных пород хорошо растворимыми в железе сидерофильными элементами [8] и кислородом [18]. Это свидетельствует о том, что железные и силикатные частицы никогда не были перемешаны в недрах Земли, как предполагается в гипотезе гомогенной аккреции. Следовательно, аккреция была гетерогенной. Изотопные данные подтверждают очень раннее образование ядра [6].

Выпадавшие на железное ядро силикатные частицы плавилась в результате импактного тепловыделения. Придонные части возникшего океана магмы частично кристаллизовались под влиянием роста давления новообразованных верхних частей и формировали из кумулатов породы нижней мантии, а из остаточных расплавов – различные слои магматического океана.

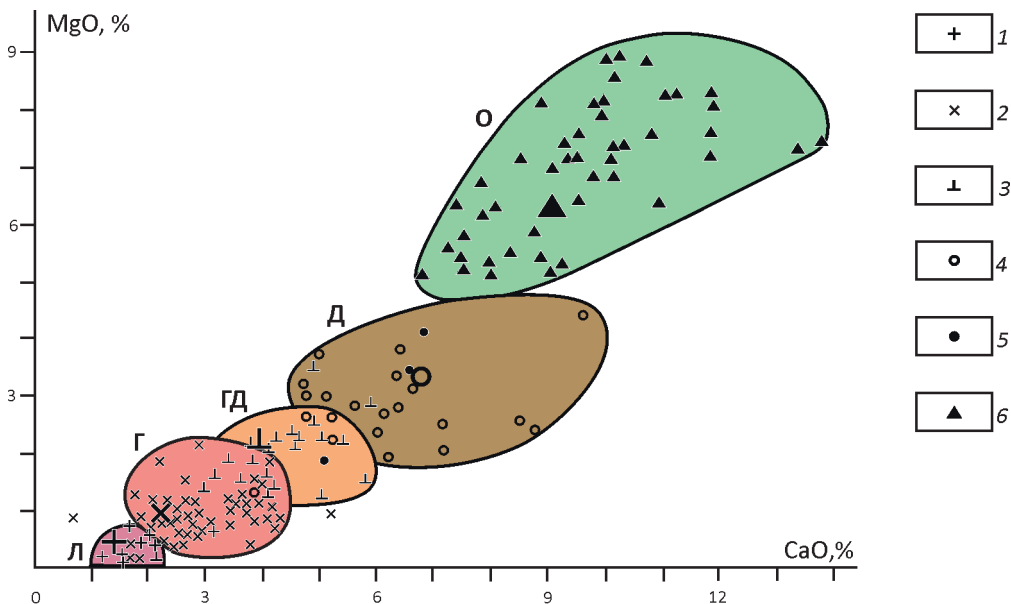


Рис. 2. Соотношение CaO-MgO в гнейсах и кристаллических сланцах Олекминского комплекса Алдано-Станового щита:

1 – лейкограниты (Л; SiO_2 73–78%); 2 – граниты (Г; SiO_2 68–73%); 3 – гранодиориты (ГД; SiO_2 63–68%); 4 – кварцевые диориты (Д; SiO_2 58–63%); 5 – диориты (SiO_2 53–58%); 6 – базиты (О; SiO_2 44–53%); крупные точки внутри полей – средние составы рассмотренных типов пород по работе [1]; использованы анализы недиффторированных пород из работ [3, 4]

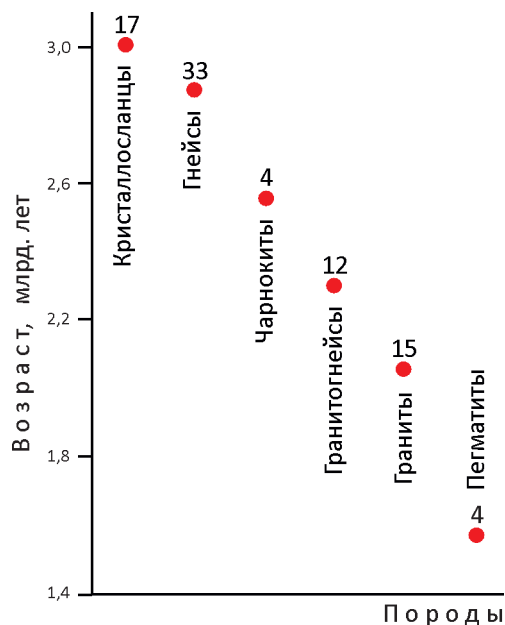


Рис. 3. Средние U-Pb и Rb-Sr возрасты различных кристаллических пород Алдано-Станового щита:

числа у точек – количество использованных определений по данным работ [3, 4].

Вследствие еще незначительной его глубины и пониженной силы тяжести на ранней небольшой Земле придонное фракционирование длительное время было малобарическим, поэтому остаточные расплавы варьировали по составу от гранитов до толеитов и пикритов. Вследствие возрастания плотности (от 2,3 до 2,8 г/см³) с глубиной в постаккреционном слоистом магматическом океане со средней глубиной около 240 км не возникла обширная конвекция, и он длительно затвердевал сверху вниз в основном в результате кондуктивных теплопотерь [14].

Происхождение раннедокембрийских кристаллических комплексов. Существование на Земле магматического океана решает все дискуссионные проблемы генезиса раннедокембрийских комплексов. Наиболее непонятным до настоящего времени было происхождение кислых магм. По экспериментальным данным, обобщенным Д.Х.Грином [5], кислые расплавы в реальных бедных водой первичных мафических породах могли формироваться при малобарическом (<0,3 ГПа) начальном (на 1–3%) их плавлении. Однако на Земле температура недр при таком давлении на глубине менее 10 км по господствующей гипотезе холодной аккреции всегда была в несколько раз ниже, чем необходимо (более 1000°C) для начала плавления этих пород. Предположения о генезисе таких расплавов в результате выплавления из мантийных основных пород (эклогитов и метабазитов) противоречат отсутствию кислых обособлений во множестве изученных ксенолитов этих пород из кимберлитов, большая древность кислой кристаллической коры (3,8–2 млрд. лет) по сравнению с эклогитами (в среднем 1,4 млрд. лет) (см. рис. 1). Этому противоречит и отсутствие в породах мантийных ксенолитов признаков повышения температуры, с которыми и можно было связывать явления плавления. Наоборот, в них широко распространено замещение высокотемпературных минералов низкотемпературными, свидетельствующее об остывании верхней мантии примерно на 200° за каждый миллиард лет (см. рис. 1). Кроме того, автохтонность и равномерность распределения антектического жильного материала в парагнейсах даже при содержании его 40% [13, 14] и отсутствие процессов отделения выплавов в перидотитах, расплавленных в экспериментах менее чем на 30 % [15], свидетельствуют об ошибочности господствующей гипотезы магмообразования путем отделения выплавов в слабо подплавленных (на 0,5–20%) породах [8]. Очень высокая вязкость таких пород (в тысячи раз большая, чем расплава) препятствует отделению в них выплавов.

В случае глобального магматического фракционирования формирование кислых остаточных расплавов является естественным следствием очень низкого давления в раннем магматическом океане, обусловленного его небольшой глубиной и пониженной силой тяжести (в 2–3 раза) на еще небольшой Земле. Такой их генезис объясняет кислый состав кристаллической коры древних платформ и самых древних гнейсов Акаста в Канаде с возрастом циркона около 4 млрд. лет. Огромная по объему нижняя мантия сформировалась при низкобарическом фракционировании океана магмы. Это объясняет большой объем сформировавшихся кислых расплавов и кристаллической коры. С учетом кристаллизации последних пегматитовых расплавов 1,6 млрд. лет назад (см. рис. 3) и возраста Земли 4,56 млрд. лет кислый слой магматического океана остывал около 3 млрд. лет, и в течение первых полу-миллиарда лет земная поверхность, по-видимому, была полностью покрыта расплавом. Это объясняет казавшееся загадочным отсутствие на Земле пород древнее 4 млрд. лет и кратеров гигантской метеоритной бомбардировки, завершившейся на Луне около 3,9 млрд. лет назад, а также большой разброс цифр определений изотопного возраста раннедокембрийских кристаллических комплексов.

Важной особенностью состава кислой кристаллической коры, судя по результатам изучения ее ксенолитов в кимберлитах Якутии [9], является количественное преобладание в ней гиперстеновых плагиогнейсов, бедных калием и водой. Это обусловлено формированием их родоначальных кислых расплавов на ранней стадии аккреции силикатного материала, когда в протопланетном диске еще не произошла конденсация низкотемпературных компонентов K₂O и H₂O.

Температура конденсации калиевого полевого шпата и гидратированных силикатов в облаке солнечного состава при давлении 100 Па составляла соответственно 730 и 100–0°C, тогда как металлического железа – 1200–1030°C, а CaO, Al₂O₃, TiO₂ и ZrO₂ – 1570–1230°C [8]. Поэтому выпадавший ранний силикатный материал содержал небольшое количество калия и воды. Это же, по-видимому, обусловило бедность щелочами и водой базальтов срединно-океанических хребтов, магмы которых сформировались из раннего вещества придонных частей нижней мантии. Такой состав кристаллической коры подтверждает очень раннее формирование ее исходных расплавов.

Затвердевание верхнего кислого слоя магматического океана привело к формированию слагающих кристаллическую кору гнейсов и кристаллических сланцев из кумулатов и древних гранитов из остаточных расплавов. Обособление остаточных расплавов при кристаллизации ортогнейсов обусловило образование в них большого количества автохтонных гранитоидных выделений. Это решает проблему природы региональной гранитизации докембрия, которая около двух веков была предметом массовой острой дискуссии. Сначала чаще всего предполагали их метасоматический, затем анатектический генезис. Однако, в отличие от реальных анатектических мигматитов, температура образования минеральных парагенезисов в гранитных обособлениях ортогнейсов ниже, чем в субстрате, поскольку их темноцветная составляющая обогащена гидроксилсодержащими минералами (биотитом, амфиболом, иногда мусковитом). Это противоречит их анатектическому происхождению и указывает на остаточно-магматический генезис [13].

Значительный рост мафичности и плотности магм с глубиной в расслоенном океане препятствовал опусканию в нем остывавших расплавов. После кристаллизации самых верхних частей кислого слоя они вместе с сформировавшимися осадочными породами периодически тонули вследствие значительного (до 10%) возрастания их плотности. Нижерасположенные более мафические расплавы всплывали. Затем процесс повторялся. Это объясняет пестрый состав гнейсовых комплексов, большие колебания их основности, частое присутствие среди них парапород. С этим же связаны вариации плотности и скорости прохождения сейсмических волн в глубинных частях кристаллической коры.

Относительно быстрое затвердевание верхнего кислого слоя объясняет раннее возникновение на кислой коре осадочных пород и живых организмов. Ортогнейсы на земной поверхности подвергались интенсивному химическому изменению под влиянием остывавшей горячей газовой-паровой оболочки, обогащенной кислотными эманациями магматического океана. В результате оглинивания полевых шпатов и отделения глинистого материала возникали скопления глин и

остаточного кварца. Их метаморфизм после погружения в горячее основание обусловил формирование тел высокоглиноземистых гнейсов и кварцитов и обычно совместное их нахождение. Это объясняет относительно широкое распространение и очень большую мощность их тел (до 1 км для кварцитов). По мере снижения температуры в горячих водоемах происходило осаждение карбонатов и образование мраморов и кальцифиров, характерных для верхних частей докембрийских толщ. Все эти парапороды существенно отличаются по составу от преобладающих ортогнейсов. Высокая пластичность полузакристаллизованной кристаллической коры препятствовала возникновению на ней значительных перепадов высот рельефа и формированию конгломератов.

Богатые кислотными эманациями магматического океана горячие дождевые воды выносили железо и кремнекислоту из химически изменявшихся ортогнейсов в ранние водоемы. Это привело к образованию большого количества железистых кварцитов, являющихся главными месторождениями железных руд. Вследствие очень высокой температуры газовой-паровой оболочки отделившиеся из магматического океана эманации мало остывали, рассеивались в ней и чаще всего не формировали гидротермальные месторождения. Это объясняет обычно безрудность огромных объемов древних гранито-гнейсов в отличие от высокой гидротермальной рудоносности фанерозойских гранитов. Накопление рудных компонентов в газовой-паровой оболочке привело к массовому образованию стратиформных месторождений меди, свинца, цинка и некоторых других элементов в основном в протерозое и в раннем палеозое, когда эта оболочка остыла, и произошло осаждение из нее рудных компонентов [14].

Массовые процессы испарения дождевых вод на горячей земной поверхности и конденсации паров в верхней части газовой-паровой оболочки обусловили интенсивную ионизацию последней и возникновение многочисленных электрических разрядов. Они способствовали формированию органических соединений и зарождению примитивных бактерий в горячих водоемах [14].

Постепенное укрупнение планетизмалей в протопланетном диске приводило к резкому уменьшению потерь импактного тепла на излучение при аккреции. Это обусловило постепенное значительное возрастание температуры накапливавшегося материала. По расчетам различных исследователей, такое увеличение температуры составляло от 800 до 2000°C [8, 11]. Вследствие более ранней по сравнению с мантией аккреции ядра его возникновение не повлияло на ее температуру, хотя в последующем оно интенсивно ее подогревало. Из этого следует, что температура нижней мантии сначала была значительно меньше, чем верхняя, а не наоборот, как обычно предполагается. Поэтому геотермический градиент в земных недрах в раннем докембрии был обратным по отношению к современному (рис. 4).

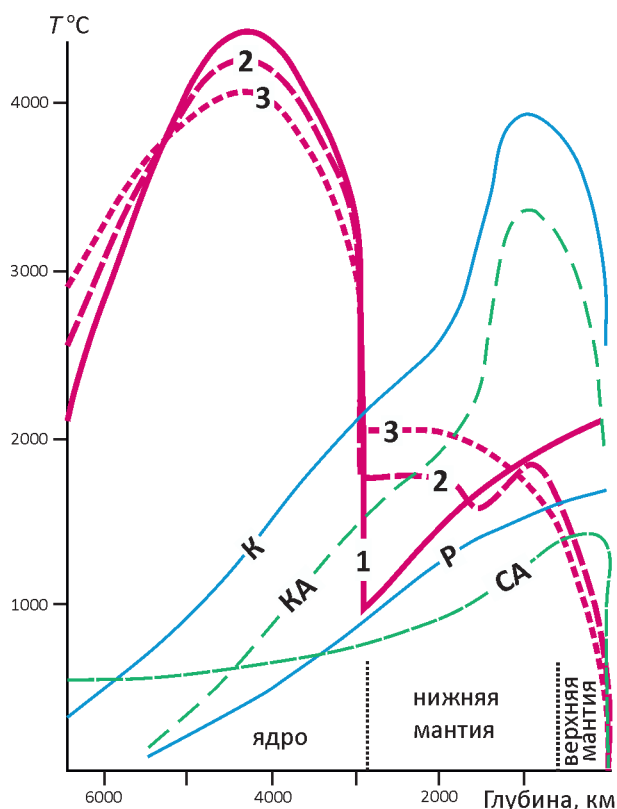


Рис. 4. Эволюция температуры:

при аккреции Земли по данным У.М.Каулы (КА) и В.С.Сафронова (СА); первичное распределение температуры в недрах Земли по данным У.М.Каулы (К) и А.Е.Рингвуда (Р) [8, 11]; 1–3 – распределение температуры по расчетам автора: 1 – первичное [14], 2 – в конце протерозоя, 3 – в фанерозое

Из этого следует очень важный вывод о том, что в раннем докембрии не существовали нижнемантийные плюмы, океанические области и геодинамические обстановки современного типа. Поэтому к раннему докембрию нецелесообразно применять понятия и термины фанерозойской геодинамики (террейны, сутуры, аккреция, зоны меланжа), поскольку подразумеваемые в них процессы еще не существовали в это время.

С течением времени нижняя мантия постепенно разогревалась под влиянием изначально более горячего ядра, а верхняя остывала вследствие теплоотдачи в более холодную земную кору. Под влиянием этого произошла инверсия распределения температуры, и возник современный геотермический градиент. Это объясняет появление траппов и эвгеосинклинальных магматических пород складчатых поясов – в основном в конце протерозоя, а океанической коры и современных океанов – только в юре. То есть процесс инверсии геотермического градиента занял около 4 млрд. лет.

Вследствие отсутствия нижнемантийных плюмов магмы зеленокаменных поясов поднимались из глубинных слоев верхнемантийного постаккреционного магматического океана. Это подтверждается участием в формировании этих поясов всех магм этого океана (ультраосновных, основных, средних и кислых), а также пониженным содержанием в основных породах зеленокаменных поясов и кристаллических комплексов СаО и TiO₂ по сравнению с типичными плюмовыми базитами срединно-океанических хребтов и траппов (рис. 5). Температура конденсации этих компонентов выше 1230°C [8]. Очень ранняя конденсация в протопланетном диске обусловила высокое их содержание в раннем выпадавшем силикатном материале, выносимом нижнемантийными плюмами.

При горячей аккреции Земли высокотемпературность минеральных парагенезисов раннедокембрийских гнейсов обусловлена магматическим происхождением подавляющего большинства из них, а не проявлением труднообъяснимых более поздних глобальных процессов разогрева земной коры. Это однозначно подтверждается весьма выдержанным распространением этих парагенезисов в кристаллических комплексах всех платформ, близостью температур их формирования к магматическим; отсутствием признаков наложения их на более низкотемпературные минеральные ассоциации, существования температурной зональности и развития высокотемпературных минералов по низкотемпературным в мантийных ксенолитах. Последнее указывает на то, что в континентальной верхней мантии не было глобальных эпизодов разогрева и плавления. Следовательно, не было их и в земной коре.

Магматический океан, вследствие его высокой текучести, и сформировавшаяся из него кислая кристаллическая кора сначала должны были покрывать всю поверхность Земли. По имеющимся оценкам, углы падения тел архейских пород в среднем составляют 60–70° [12]. В этом случае площадь их выхода на земной поверхности в результате складчатости уменьшилась в $1:\sin 65^\circ = 1:0,4226 \sim 2,3$ раза. Площадь содержащих кристаллическую кору древних платформ составляет 105 млн. км². Площади складчатых и субокеанических областей, содержащих ее фрагменты, равны соответственно 42 и 93 млн. км² [10]. При этих значениях до времени тектонических деформаций кристаллическая кора должна была занимать площадь примерно $(105+42+93)\times 2,3=558$ млн. км². С учетом существования сдвоенных по надвигам разрезов эта величина должна быть еще больше. Современная площадь поверхности Земли оценивается в 510 млн. км². Следовательно, приведенная примерная оценка подтверждает, что кислая кристаллическая кора сначала покрывала всю земную поверхность. Это согласуется с выводом об отсутствии в раннем докембрии океанических областей современного типа.

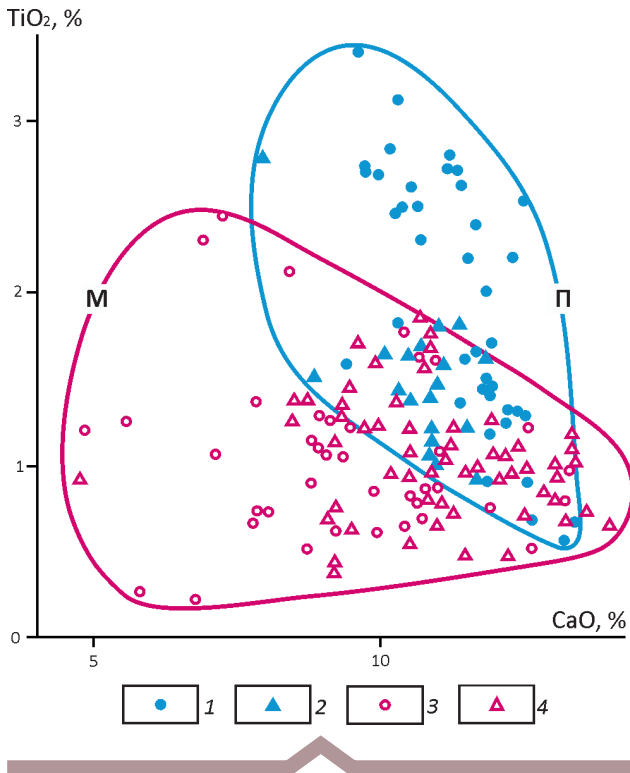


Рис. 5. Соотношение TiO_2 и CaO в основных породах. По данным работ [3, 4, 7]:

1 – срединно-океанические хребты; 2 – траппы (поле П); 3 – кристаллические сланцы и 4 – зеленокаменные пояса Алдано-Станового щита (поле М)

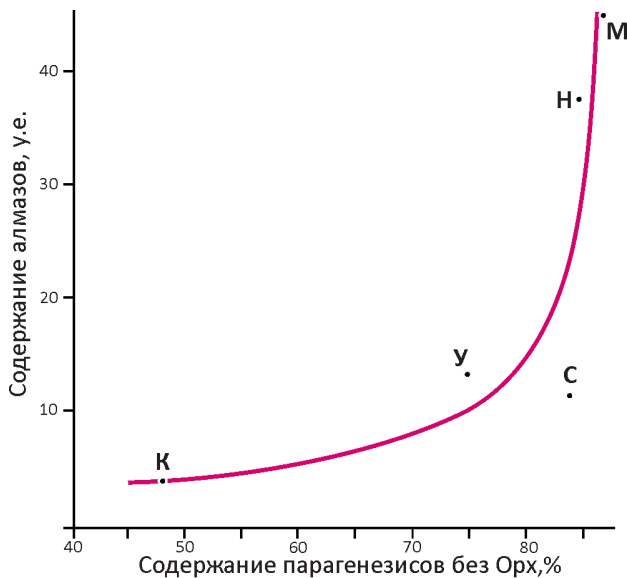


Рис. 6. Соотношение доли безгиперстеновых коровых кристаллических ксенолитов и содержания алмазов в кимберлитах Якутии. По данным работ [9, 14]:

точки – величины соотношений для трубок: К – Комсомольская, М – Мир, Н – Нюрбинская, С – Сытыканская, У – Удачная

Вследствие примерно в 8 раз большей скорости вращения Земли в раннем докембрии всплывавшее горячее вещество постаккреционного магматического океана под влиянием силы Кориолиса в области экватора поднималось под углом около 7° к земной поверхности (то есть, почти горизонтально), сильно отклоняясь к западу [14]. Погружавшееся вещество примерно так же отклонялось к востоку. Это привело к интенсивному пластическому течению вещества кристаллической коры, к возникновению в нем бластических структур и гнейсовидных текстур, к складчатым деформациям и к сокращению площади распространения.

Генезис магматических пород древних платформ.

В кристаллизовавшихся магмах осаждение образующихся твердых фаз происходило в среде расплава с вязкостью в тысячи раз меньшей, чем слабо подплавленных пород. Поэтому разделение расплава и кристаллов в них, в отличие от анатектических мигматитов, происходило относительно быстро и является единственной причиной многообразия состава магматических пород. Подъем остаточных расплавов из нижних частей кислого слоя сопровождался формированием различных кислых магматических пород. Глубинность их зарождения и щелочность в среднем возрастали с уменьшением возраста. Последующее выжимание и всплывание наиболее кислых пластичных частей кристаллической коры в областях коллизии приводило к их фрикционному и декомпрессионному плавлению и к образованию характерных для этих областей огромных гранитных батолитов. Выжимание еще незатвердевших плагиоклазовых кумулатов обусловило формирование крупных тел автономных анортозитов преимущественно в протерозое.

Процессы высокобарического фракционирования в придонном перидотитовом слое магматического океана приводили к образованию щелочных, карбонатитовых и кимберлитовых магм. Очень длительное (около 4 млрд. лет) накопление расплавофильных компонентов в остаточных расплавах при фракционировании является причиной гигантского содержания редких элементов (до десятков тысяч хондритовых норм) в карбонатитах и в щелочных породах. Вследствие кристаллизации расслоенного магматического океана сверху вниз его придонный слой фракционировал наиболее поздно. Это обусловило относительно молодой фанерозойский возраст (в среднем 125 млн. лет) большинства кимберлитов (см. рис. 1).

Природа правила Клиффорда. Древние кристаллические комплексы и кимберлитовые остаточные расплавы являются соответственно малоглубинными и глубинными продуктами фракционирования одного и того же расслоенного магматического океана. Это впервые объясняет природу правила Клиффорда – размещение алмазоносных кимберлитов только в регионах, в которых присутствует древняя кристаллическая кора. Оно объясняет приуроченность таких

кимберлитов к участкам платформ, имеющих очень глубокое (250–400 км) залегание подошвы литосферы, то есть литосферные кили [9]. Очевидно, что в таких участках остаточные кимберлитовые расплавы зарождались в условиях наиболее высокого давления, благоприятного для алмазообразования. На краях платформы обычно отсутствуют самые глубинные части литосферы, по-видимому, вследствие эрозии их астеносферными течениями. Это является причиной примерно в 3 раза меньшего распространения здесь кимберлитовых полей [14] и незначительной их алмазоносности.

Наиболее благоприятными для образования высокоалмазоносных кимберлитов должны быть участки, содержащие наиболее мощную мало нарушенную поздними тектоническими процессами кристаллическую кору, в которых сохранился и ее верхний слой, сложенный гнейсами с амфиболитовыми парагенезисами. В таких участках кимберлитогенерирующие нижние части литосферы также должны быть мало нарушены. Поэтому в ней чаще могли зарождаться высокоалмазоносные кимберлиты, что иллюстрирует рис. 6, из которого видно, что с увеличением доли ксенолитов безгиперстеновых гнейсов и кристаллических сланцев в алмазоносных трубках Якутии резко возрастает содержание алмазов.

Иногда встречающееся размещение алмазоносных магматических пород вне кратонов (например, диатрема Арагайл в Австралии) чаще всего относится к лампроитам. Их магмы и должны были формироваться преимущественно под складчатыми поясами [14]. Поэтому такие случаи не опровергают правило Клиффорда. Однако изредка возможно наложение складчатости на края кратонов с уже сформированными алмазоносными кимберлитами. Поэтому правило Клиффорда имеет вероятностный, а не абсолютный характер.

Таким образом, учет данных о горячем образовании Земли позволяет без предположения существования малореальных процессов объяснить все многочисленные особенности раннедокембрийских кристаллических комплексов.

*Работа выполнена по плану НИР ИГАБМ СО РАН,
проект 0381-2014-0004.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Богатиков О.А., Косарева Л.В., Шарков О.В.* Средние химические составы магматических горных пород. Справочник. – М.: Недра, 1987.
2. *Войткевич Г.В.* Происхождение и химическая эволюция Земли. – М.: Недра, 1983.
3. *Геологическое строение западной части Алдано-Станового щита и химические составы пород раннего докембрия (Южная Якутия) / А.П.Смелов, В.И.Березкин, В.Ф.Тимофеев и др.* – Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2009.
4. *Геологическое строение центральной части Алдано-Станового щита и химические составы пород раннего докембрия (южная Якутия) / В.И.Березкин, А.П.Смелов, А.В.Зедгенизов и др.* – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2015.
5. *Грин Д.Х.* Состав базальтовых магм как критерий их возникновения при вулканизме // *Петрология изверженных и метаморфических пород дна океана.* – М.: Мир, 1973. С. 242–261.
6. *Литасов К.Д., Шацкий А.Ф.* Современные представления о составе ядра Земли // *Геология и геофизика.* 2016. Т. 57. № 1. С. 31–63.
7. *Магматические горные породы. Основные породы / Е.Д.Андреева, В.А.Баскина, О.А.Богатиков и др.* – М.: Наука, 1985.
8. *Рингвуд А.Е.* Состав и петрология мантии Земли. – М.: Недра, 1981. 584 с.
9. *Розен О.М., Манаков А.В., Зинчук Н.Н.* Сибирский кратон: формирование, алмазоносность. – М.: Научный мир, 2006. 184 с.
10. *Таблицы физических величин / В. Г. Аверин, Б.А. Аронзон, Н.С. Бабаев и др.* – М.: Атомиздат, 1976.
11. *Федорин Я.В.* Модель эволюции ранней Земли. – Киев: Наукова думка, 1991.
12. *Черкасов Р.Ф.* Архей Алданского щита. – М.: Наука, 1979.
13. *Шкодзинский В.С.* Проблемы физико-химической петрологии и генезиса мигматитов (на примере Алданского щита). – Новосибирск: Наука, 1976.
14. *Шкодзинский В.С.* Петрология литосферы и кимберлитов (модель горячей гетерогенной аккреции Земли). – Якутск: Издательский дом СВФУ, 2014.
15. *Arndt N.T.* The separation of magmas from partially molten peridotite // *Carnegie Inst. Wash. Yeab.* 1977. 76. Pp. 424–428.
16. *Chronology and isotopic constrains on Lunar evolution / G.A.Snyder, L.E.Borg, L.E.Nyquist, L.A.Taylor // The origin of the Earth and Moon. Univ. of Ariz. Press.* 2000. Pp. 361–395.
17. *Harris P.G, Tozer D.C.* Fractionation of iron in the Solar system // *Nature.* 1967. 215 (5109). Pp. 1449–1451.
18. *O'Neil H.S.* Oxygen fugacity and siderophile elements in the Earth's mantle: implications for the origin of the Earth // *Meteoritics.* 1990. 25 (4). P. 395.