

УДК 551+552.4

Коматииты позднего архея – некоторые аспекты рудоносности

Н.О. Сорохтин, Н.Е. Козлов, Е.В. Мартынов, Н.Е. Козлова

Геологический институт КНЦ РАН, Анатитский филиал МГТУ

Аннотация. Исследования зеленокаменных ассоциаций позднего архея позволили разделить все древние континентальные образования на три основные группы – протоэкваториальную, протосеверную и протосюжную, вытянутые в субширотном направлении. Высокоширотные микроконтиненты формировались в сходных условиях относительно меньшего перегрева мантии, нежели приэкваториальная. Зеленокаменные пояса того времени закономерно меняются в пространстве по составу и относительной распространенности вулканогенных пород в соответствии с параметрами изменений температурного режима мантии Земли. Данные по геохимии основных метавулканитов древних конвергентных зон подтверждают геодинамические положения о том, что южные породные ассоциации позднеархейского возраста формировались в условиях более высоких температур мантии. Коматиитовые магмы, сформированные в условиях большего перегрева мантии Земли, были обогащены рядом сидерофильных и халькофильных элементов, что определяло большее количество и более широкое генетическое разнообразие связанных с ними типов месторождений золота, никеля и элементов платиновой группы.

Abstract. Researches of greenstone belt associations of late Archaean have allowed to divide all ancient continental formations into three basic groups – protoequatorial, protonorthern and protosouthern extended in the sublatitudinal direction. Greenstone belts of that time naturally varied in space on structure and relative prevalence of volcanic rock according to parameters of the Earth mantle temperature mode. Geochemistry data of the basic metavulcanite ancient convergent zones have confirmed geodynamic states that southern rock associations of late Archaean age were formed in conditions of higher temperatures of the mantle. Komatiite magmas generated in conditions of greater overheat of the Earth mantle were enriched by a number of siderophilic and halkophilic elements, that determined a great number and genetic variety of deposits of gold, nickel and elements of platinum group.

Ключевые слова: зеленокаменные пояса, коматииты, геохимия, тренды отличия, раннедокембрийская мантия, металлогения
Key words: greenstone belts, komatiites, geochemistry, distinction trends, Early Precambrian mantle, metallogeny

1. Существо проблемы и методика исследования

Позднеархейский коматиитовый магматизм является прямым индикатором эволюции температурного режима мантии в период, когда началось формирование первого в истории Земли суперконтинента. Этот этап протекал на фоне перегрева вещества мантии и постепенного переплавления и дифференциации слагающего ее первозданного вещества. Величина общего перегрева в сравнении с современной обстановкой, по различным источникам, составляла в то время около 300-400, а в отдельные эпохи – 450°C. По данным С.А. Светова (2005), позднеархейские коматииты в зеленокаменных поясах мира кристаллизовались в температурном интервале 1465-1880°C. Проведенный анализ показал, что в большинстве случаев ситуации высоких температур формирования коматиитов совпадают с большими их объемами в разрезах зеленокаменных поясов. Так, например, в кратоне Йилгарн (Зап. Австралия) коматииты слагают значительную часть разреза, а температура их образования варьирует в пределах 1790-1850°C, что однозначно указывает на их формирование в условиях существенного перегрева мантии.

Высокие температуры формирования коматиитов, как нам представляется, прямо коррелируются с содержанием (объемом) ультраосновных-основных пород в разрезах метавулканитов зеленокаменных поясов того времени, в том числе, со значительным количеством самих коматиитов в разрезах. Анализ литературных данных позволяет сделать вывод, что на некоторых щитах южного полушария, приближенных к экватору, среди метавулканитов зеленокаменных поясов ультраосновные и основные разновидности слагают от 80 и более процентов (доля коматиитов составляет при этом от 10 до 60 %), тогда как на щитах, удаленных от экватора, в существенных количествах присутствуют породы среднего и кислого состава, количество же коматиитов редко превышает 10 % (табл. 1). Из этого следует, что коматииты, связанные с более перегретой мантией, территориально приурочены к приэкваториальной зоне Земли (рис. 1). Эти закономерности явились теоретической основой данных исследований.

При проведении различного рода сопоставлений вещественного состава породных ассоциаций и поиске трендов его изменения использовался метод поиска тренда отличий в заданных рядах совокупностей (или поиска тренда отличий относительно отношения частичного порядка). Сущность

этого метода состоит в следующем. Пусть $Z = \{Z_i\}$ – множество n -мерных случайных величин, и на множестве $Z \times Z$ задано отношение частичного порядка " $<$ ". Если c – n -мерный вектор единичной длины, то скалярное произведение (c, Z_i) является одномерной случайной величиной. Эту случайную величину можно охарактеризовать ее математическим ожиданием $M\{(c, Z_i)\}$. Для сравнения математических ожиданий использовался ранговый статистический критерий Пури-Сена-Тамуры (Справочник..., 1987) о равенстве средних. В этих целях необходимо произвести оценку средних (в качестве этой оценки выбирается медиана $Me\{(c, Z_i)\}$) и вычислить статистику Пури-Сена-Тамуры $\Lambda((c, Z_i), (c, Z_j))$. На вектор c могут быть наложены дополнительные ограничения. В частности, часть элементов вектора – больше нуля, т.е. $c_{i_1} > 0, \dots, c_{i_k} > 0$, другая – меньше нуля, т.е. $c_{j_1} < 0, \dots, c_{j_s} < 0$, остальные могут принимать произвольные значения. Статистическое моделирование характеристики, множество значений которой задано отношением " $<$ ", заключается в поиске такого n -мерного вектора c единичной длины, для которого, при выбранном уровне значимости δ , выполняются условия:

$$Me\{(c, Z_i)\} < Me\{(c, Z_j)\} \text{ и } \Lambda[(c, Z_i), (c, Z_j)] > \chi^2(\delta), \quad (1)$$

здесь $\chi^2(\delta)$ – значение квантили χ^2 -распределения для уровня значимости δ для всех пар $\langle Z_i, Z_j \rangle$ таких, что $Z_i < Z_j$, а также с учетом дополнительных ограничений. Выбор указанного статистического критерия определяется его устойчивостью относительно нарушения условия нормальности (и даже унимодальности) распределений случайных величин, а также относительно наличия в выборках аномальных наблюдений. Эти нарушения (и наличие аномальных наблюдений) характерны для реальных выборок.

Таблица 1. Оценка распространенности типов вулканических пород (в %) в архейских зеленокаменных поясах различных регионов с использованием литературных материалов (Курумджян, Jost, 2006; Puchtel et al., 1993; Конди, 1983; Смолькин, 1992)

Геологические подразделения	Ультраосновные	Основные	Средние и кислые
Северная Америка			
1. Берч – Учи	4	54	42
2. Вабигун	4	58	38
3. Абитиби	5	50	45
4. Йеллоунайф	<1	65	34
Балтийский щит			
1. Колмозеро-Воронья	13	22	55
Алданский щит			
1. Тунгурча	10-12	20	68-70
Южная Америка			
1. группа Пилар де Гоиас	10-60	90-40	–
Африка			
1. Кратон Зимбабве	10	75	15
2. Кратон Каапваль	24	72	4
3. Танзанский щит	Первые %	10-15	85-90
Австралия			
1. Кулгарли – Норсмен	20	62	18

Содержательно задача моделирования сводится к аппроксимации отношения частичного порядка линейной функции $P: Z \rightarrow R$, связанной с параметрами химического состава образований в виде $P(Z_i) = M\{(c, Z_i)\}$. Качество аппроксимации оценивается значением функционала:

$$J(P) = \min_U \Lambda [(c, Z_i), (c, Z_j)], \text{ где } \{ \langle Z_i, Z_j \rangle \mid Z_i < Z_j \}. \quad (2)$$

Вектор c можно назвать фактором частичного порядка. Он характеризует общую направленность изменчивости химических составов относительно частичного порядка.

2. Обсуждение результатов

Можно полагать, что пространственная неоднородность разогрева мантии влечет за собой целый ряд металлогенических закономерностей. Так, коматииты, сформированные в условиях более разогретой

мантии, должны быть обогащены элементами протокристаллизации, стоящими в начале ряда элементов, наиболее характерных для ультраосновных магм, и обеднены элементами, располагающимися ближе к его концу ("ряд мантийности" по А.И. Перельману (1989)): Ni > Cr > Mg > Co > Fe > Mn > Au > (O, Si, Ge, Se, Ag, Te) > (C, Sc, V) > Cd > Cu > (N, Cl, As) > (Na, S, Ca, Br) > (P, Zr, Mo, Sn, Sb) > F > Hg > Bi > (Ti, Ga) > (B, W) > (Be, Al, Nb, In) > Sr > Cs > I > Li > (K, Rb) > Tl > Ta > Pb > (Ba, U) > Th. Данных по ЭПГ в работе (Перельман, 1989) не приведено, но с учетом их химических свойств и современных данных об их распределении в ультраосновных и основных породах можно полагать, что они занимают место в начале этого ряда, близко к таким элементам, как Fe, Au, Ag.

Для проверки этого предположения было проведено сопоставление содержания ряда малых элементов в коматиитах и коматиитовых базальтах, для которых по литературным данным удалось создать представительные выборки. Породы были условно разделены на группы, связанные с более или менее перегретой мантией. Для сравнения были использованы порядка 2000 элементоопределений (Borming et al., 1982; Kuyumjian, Jost, 2006; Maarten et al., 1987; Manikyamba et al., 2004; Polat et al., 1999; Puchtel et al., 1993). Отчетливо видно, что коматиитовые серии, связанные с более перегретым мантийным источником, действительно обогащены в сравнении с аналогичными образованиями, связанными с менее перегретой мантией, элементами начала "ряда мантийности" – никелем, хромом, медью и обеднены элементами середины и конца ряда (табл. 2). Это могло определять большее количество и генетическое разнообразие типов месторождений элементов начала данного ряда в коматиитовых сериях, связанных с более горячими мантийными источниками.

Таблица 2. Сравнение среднего содержания некоторых малых элементов* (в г/т) в коматиитах и коматиитовых базальтах, генетически связанных с более (1) или менее (2) перегретой мантией

	Ni	Cr	V	Cu	P ₂ O ₅	Zr	Zn	Nb	Sr	Y	Rb	Ba
n**	54/182	55/185	55/182	26/79	63/185	63/185	26/52	42/164	63/79	63/185	63/79	63/56
1	979 ***	2010	189	58	500	27	60	1	40	11	4	20
2	643	1022	235	25	800	61	64	8	80	231	21	98

* элементы в таблице приведены в последовательности, соответствующей их положению в ряду мантийности.

** в числителе число анализов в 1 группе, в знаменателе – во второй.

*** жирным выделено большее содержание в паре 1-2.

Проведенное также на основе более 400 полных силикатных анализов, выбранных из вышеупомянутых литературных источников, сопоставление химического состава коматиитов зеленокаменных поясов Балтийского, Алданского и Канадского щитов, Африки, Австралии и Антарктиды, сгруппированных, с учетом их объемов в разрезах, по признаку формирования в условиях менее или более перегретой мантии того времени и для контроля дополненной информацией о содержании ряда малых элементов, показывает, что при переходе от первых ко вторым, кроме отмеченного ранее возрастания содержания Ni и Cr, наблюдается значимое увеличение совокупного содержания MgO.

Эти закономерности описываются трендом, представленным линейной функцией F₁ (табл. 3). Соответствующая этому фактору линейная функция имеет значимо большие по критерию Пури-Сена-Тамуры (Справочник..., 1987) средние значения (при уровне значимости α = 0.01) в породах, сформированных в условиях менее перегретой мантии. А именно, для более перегретой мантии медиана значений линейной функции равна Me = -0.367, а для менее перегретой – Me = 0.182. Необходимо отметить, что исходные данные были стандартизированы, что позволило избавиться от влияния различий уровней содержания элементов на интерпретацию полученного фактора. Найденный фактор частичного порядка F₁ полностью соответствует положению элементов в ряду мантийности: элементы, более характерные для середины и конца данного ряда, имеют положительные коэффициенты, то есть обогащают породы, сформированные в условиях менее перегретой мантии. Четко проявлено разделение магния и железа в породах, связанных с различной по температуре мантией.

Результаты наших исследований хорошо согласуются с выводами Ф.П. Митрофанова, отмечавшего более "симатическую" природу зеленокаменных поясов южных кратонов в целом, большее количество в них коматиитов и обогащение "металлами халькофильного ряда, дающими крупные месторождения никеля, меди, платиноидов, золота" (Митрофанов, 2001).

Полученные выводы свидетельствуют в пользу правомерности исходного разделения коматиитов на группы, связанные с различной по степени перегрева мантией. Тем не менее, авторы сочли необходимым проверить исходную гипотезу с привлечением дополнительных данных по иным структурам. Логика постановки такого исследования была следующей: если мантия в архее была зональна по температурному режиму, что повлияло на вариации состава коматиитов, это должно было найти отражение в составе и иных мантийных образований того времени. В качестве объекта

исследования были выбраны мантийные производные архейских высокобарных гранулитовых поясов, представляющих собой древние конвергентные зоны (Козлов и др., 1999; 2002).

Поскольку архейские коматииты, формирование которых связывается нами с более перегретой мантией, формируют зону вдоль сегодняшней приэкваториальной части Земли (рис. 1), при группировке пород был выдержан территориальный принцип, а именно, сопоставление производилось в структурах, расположенных на разном удалении от экваториальной зоны, сближенных в меридиональном направлении. Последнее позволяло избежать субмеридиональных вариаций вещественного состава.

Задача была сформулирована таким образом: описывают ли найденные закономерности отличия коматиитов, сформированных из более или менее перегретой мантии, также и различия состава мантийных производных древних конвергентных зон земной коры, расположенных ближе или дальше от экваториальной зоны, то есть также предположительно связанных с различным по температурным характеристикам источником. Для решения данной задачи были выбраны метабазиты, состав которых сопоставлялся в парах, как это показано на рис. 1:

- гранулиты Лапландского и Побужского пояса;
- гранулиты Анабарского щита и Ольхонской серии Прибайкалья;
- гранулиты Анабарского щита и южной Индии;
- гранулиты Олекмо-курултино-зверевского комплекса Алданского щита и Северокитайской плиты.

Всего для целей данного сопоставления было использовано 1062 силикатных анализа. Были найдены три фактора частичного порядка (F_2 , F_3 , F_4), описывающие отличия породных ассоциаций соответствующих пар (табл. 3), со структурой, соответствующей структуре фактора F_1 (структуры факторов считались соответствующими друг другу, если для каждого их компонента знаки совпадают). Линейные функции, определяемые этими факторами, описывают статистически значимо (при уровне значимости $\alpha = 0,01$) различия параметров химического состава объектов вышеуказанных пар. Полученный результат подтверждает закономерное изменение состава пород, имеющих первичный мантийный генезис, в зависимости от предполагаемой температуры мантийного источника.

Авторы понимают, что возрастные различия протолитов пород исследованных структур не позволяют исключить влияния "временного" фактора, но с учетом устойчивости выявленных различий, значимо проявленных во всех исследованных группах, вне зависимости от того, древнее ли более приближенные к экватору комплексы, как это наблюдалось в первой и третьей паре, моложе ли, что характерно для второй пары или близки по времени формирования протолитов (четвертая пара), полученные отличия в значительной мере отражают отличия, связанные с положением исследованных комплексов по отношению к экватору.

Таблица 3. Факторы частичного порядка, характеризующие изменчивость параметров химического состава

	F_1	F_2	F_3	F_4
SiO ₂	0.114	0.529	0.037	0.05
TiO ₂	0.077	0.004	0.006	0.316
Al ₂ O ₃	0.478	0.439	0.019	0.075
ΣFeO	0.074	0.009	0.427	0.003
MnO	0.0	0.334	0.014	0.937
MgO	-0.42	-0.038	-0.042	-0.011
CaO	0.134	0.374	0.028	0.118
Na ₂ O	0.315	0.276	0.113	0.024
K ₂ O	0.086	0.446	0.895	0.001
Ni	-0.319	–	–	–
Zr	0.193	–	–	–
V	0.272	–	–	–
Cr	-0.482	–	–	–

Примечание: при расчетах использовались стандартизированные данные.

F_1 – фактор отличия коматиитов зеленокаменных поясов Балтийского, Алданского и Канадского щитов, Африки, Австралии и Антарктиды, сгруппированных с учетом их объемов в разрезах по признаку формирования в условиях менее или более перегретой мантии того времени;

F_2 – фактор отличия основных гранулитов Лапландского и Побужского пояса;

F_3 – фактор отличия основных гранулитов в парах Анабарский щит – и Ольхонская серия Прибайкалья, а также Анабарский щит – южная Индия;

F_4 – фактор отличия основных гранулитов Олекмо-курултино-зверевского комплекса Алданского щита и Северокитайской плиты.



Рис. 1. Схематическое расположение территорий, в пределах которых исследовался состав архейских породных ассоциаций. Условные обозначения: 1 – континентальные плиты, 2-4 – архейские континентальные области, содержащие зеленокаменные пояса позднеархейского возраста: 2 – сформированные в условиях максимального перегрева вещества мантии, 3 – сформированные в условиях существования относительно более "холодной" мантии, 4 – неопределенного типа; 5 – районы, в которых исследовались высокобарические гранулиты основного состава. Цифрами на рисунке обозначены гранулиты Лапландского (1) и Побужского (2) поясов, Анабарского щита (3), Ольхонской серии Прибайкалья (4), южной Индии (5), олекмо-курултино-зверевского комплекса Алданского щита (6) и Северокитайской плиты (7), стрелками соединены пары поясов, в которых производилось сравнение состава основных гранулитов.

Приведенные выше закономерности находят свое объяснение в рамках концепции развития Земли в архее по механизму зонного плавления земного вещества (Сорохтин, Сорохтин, 2005). В палеоархее такая активность существовала только в узком экваториальном поясе, в мезоархее этот пояс расширился до умеренных широт, а к концу неоархее, после выделения земного ядра, тектоническая активность Земли охватила собой уже всю мантию Земли. По этой причине, по-видимому, в раннем архее ядра будущих континентальных массивов формировались только по периферии тектоноактивного пояса, а в его центре господствовали восходящие конвективные потоки, обедненные рудными элементами, переходившими в расплавы железа, подстилающие слой молодой конвектирующей мантии. В позднем же архее, особенно после начала процесса выделения земного ядра, бывшая сердцевина Земли, сложенная первичным земным веществом, существенно обогащенным рудными элементами, оказалась выжатой в верхнюю мантию.

При этом в ее недрах существовала тепловая конвекция, реализовавшаяся по принципу ячеек Бенара, над нисходящими потоками которой формировались ядра будущих континентов, образуя три субширотные группы: центральная – экваториальная группа континентов и две периферийные: северная и южная. Исследования закономерностей эволюции мантии Земли в архее показывает, что даже при интенсивном перемешивании ее вещества конвективными течениями, которые, несомненно, приводили и приводят к возникновению химически однородной среды, в ней могли возникать более разогретые участки и, как следствие, существенно обогащенные отдельными рудными компонентами.

Исходя из предлагаемой концепции, северная и южная высокоширотные периферийные группы микроконтинентов должны были формироваться в схожих и несколько менее перегретых тектоно-термальных условиях, нежели приэкваториальные, что соответствует нашим фактическим данным.

Исследования закономерностей эволюции мантии Земли в архее показывает, что даже при интенсивном перемешивании ее вещества конвективными течениями, которые, несомненно, приводили и приводят к возникновению химически однородной среды, в ней могли возникать более разогретые участки и, как следствие, существенно обогащенные отдельными рудными компонентами. На рис. 2 рассматривается модель развития мантии Земли в позднем архее, которая предполагает возникновение такого рода неоднородности при глубинной тектоно-магматической эрозии первичного вещества по бортам активного пояса конвектирующими мантийными расплавами.

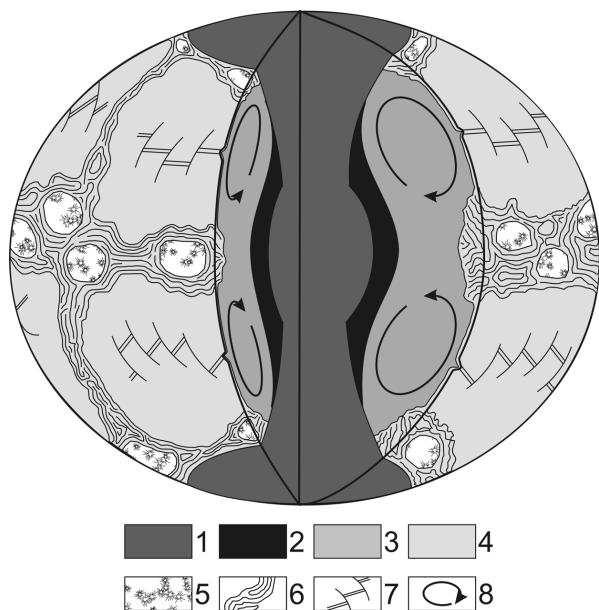


Рис. 2. Объемная модель строения Земли в архее

1. первичное земное вещество;
2. расплавы железа и его окислов (ядерное вещество);
3. деплетированная мантия, обедненная железом, его окислами и сидерофильными элементами;
4. кора протоокеанического типа;
5. континентальная кора;
6. области скучивания протоокеанической коры и зарождения коры континентального типа, образовавшие впоследствии гранит-зеленокаменные области;
7. срединно-океанические хребты;
8. направление конвективных течений в мантии.

С одной стороны, обогащение мантии сидерофильными и халькофильными элементами закономерно происходило на периферии, постоянно расширяющейся мантийной линзы Земли, т.к. именно там существовал непосредственный контакт двух сред. Но это неизбежно приводило и к относительному охлаждению среды, т.к. переход первичного вещества в расплав сопровождался эндотермическими процессами. С другой стороны, более разогретые области, расположенные в зоне, близкой к "протоэкваториальной", должны были иметь большие кларки элементов протокристаллизации. Это, в свою очередь, должно было, при всех прочих равных условиях, определять их более низкие кларки концентраций, а следовательно, большее количество и генетическое разнообразие типов их месторождений в данных областях.

Анализируя полученные данные, можно сделать очень важный геодинамический вывод о том, что, по крайней мере, с позднего архея сформированные континентальные литосферные плиты закономерно перемещались по сфере Земли и сохранили свое относительно-стабильное положение вокруг центров их аккреции (рис. 1). Микроконтиненты, сформированные, по нашим данным, в условиях аномального перегрева вещества мантии в позднем архее, так и занимают сегодня приэкваториальную область, тогда как остальные обрамляют их по периферии и закономерно отражают условия относительного охлаждения мантийной астеносферы Земли того времени.

Представляется логичным определить, а как соотносится это утверждение с нашими знаниями об истории дрейфа континентов в постархейское время и о том, какое положение занимали выделенные нами домены континентальной коры в структуре суперконтинентов. Для этого мы воспользовались наиболее достоверными данными палеогеодинамических реконструкций В.Е. Хаина (2001), В.Е. Хаина и Н.В. Божко (1988), О.Г. Сорохтина (2007), Л.П. Зоненшайна и др. (1990), А.Г. Смита и Д.С. Брайдена (Smith, Briden, 1977) и ряда других авторов. Здесь следует отметить, что рассматриваемые палеорекострукции суперконтинентов в истории Земли тем достовернее, чем меньше их возраст. Всего известно о четырех суперконтинентах, сформированных в интервале времени от 2,6 до 0,2 млрд лет. Три из них: Пангея (0,23 млрд лет), Мезогейя (Родиния) (1,05 млрд лет) и Мегегейя (1,84 млрд лет) построены с использованием палеомагнитных и геологических данных, а самый древний – Моногейя (Пангея 0 по Хаину) (~2,6 млрд лет) только по геологическим данным.

Здесь следует оговориться и учесть тот факт, что палеомагнитные данные горных пород архейского периода жизни Земли очень недостоверны и противоречивы. По-видимому, это связано с тем, что до сих пор не ясен характер самого магнитного поля Земли на ранних стадиях ее развития, которое, скорее всего, было в то время тороидальным, а не дипольным. Однако мы знаем, что в интервале 2,5-2,4 млрд лет назад поверхность континентов была скована покровным оледенением, известным в литературе, как Гуронское. Следовательно, если в это время существовал суперконтинент, то его центральные области должны были быть перекрыты ледниковыми образованиями. Находки тиллитов и тиллоидов этого времени помогают восстановить конфигурацию искомого суперконтинента. Кроме этого, граница архея и протерозоя отмечена мощнейшими коллизионными взаимоотношениями доменов коры, которые привели к формированию мозаичного облика древних образований, что также было использовано при реконструировании Моногеи. Полученные результаты отражены на рис. 3-6.

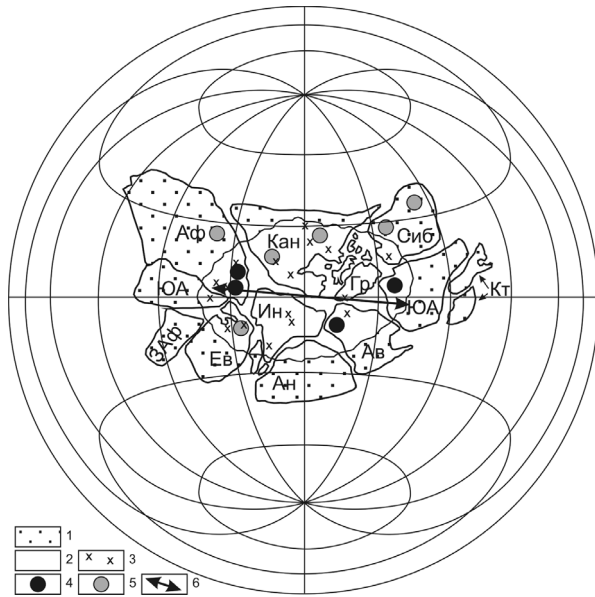


Рис. 3. Суперконтинент Моногея
2,5-2,4 млрд лет назад по (Сорохтин, 2007)
с дополнениями.

1. области континентальной коры,
2. область покрытия Гуронским оледенением,
3. находки тиллитов и тиллоидов этого времени,
4. области коры, сформированные в условиях большего перегрева мантии,
5. области коры, сформированные в условиях меньшего перегрева мантии,
6. линия реконструкции экватора палеоархейского времени (3,0-2,8 млрд лет).

АФ – Африка, ЮА – Южная Америка,
ЗАФ – Западная Африка, Ев – Европа,
Ин – Индостан, Кан – Канада, Гр – Гренландия,
Ан – Антарктида, Ав – Австралия, Кт – Китай,
Сиб – Сибирь.

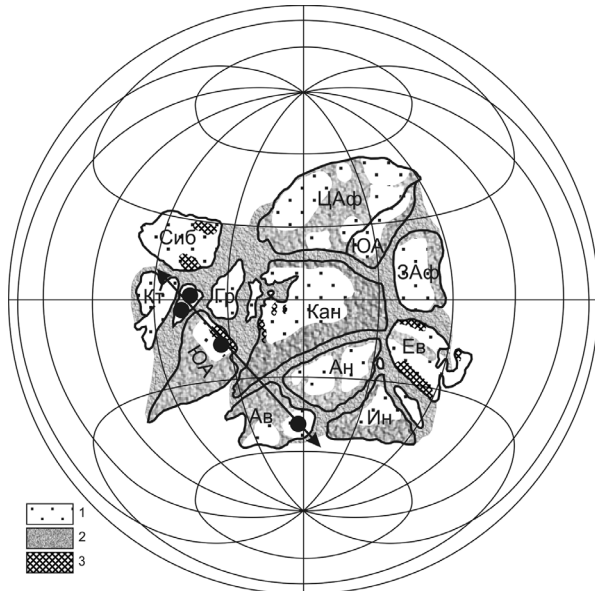


Рис. 4. Суперконтинент Мегагея
1,8 млрд лет назад по (Сорохтин, 2007)
с дополнениями.

1. области континентальной коры,
2. области складчатости
3. области формирования краснецветов.

Остальные условные обозначения см. на рис. 3.



Рис. 5. Суперконтинент Мезогея (Родиния)
1,0 млрд лет назад по (Сорохтин, 2007)
с дополнениями.

Условные обозначения см. на рис. 3, 4.

сКт – северный Китай, юКт – южный Китай,
Кз – Казахстан, Тш – Тяньшанский блок,
Ас – Алтае-Саянский блок, Ик – Индокитай,
зЕв – западная Европа.



Рис. 6. Суперконтинент Пангея 0,2 млрд лет назад. Реконструкция Смита и Брайдена (Smith, Briden, 1977). Условные обозначения см. на рис. 3-5

Анализ полученных палеогеодинамических реконструкций позволяет говорить о том, что современное положение континентальных областей, сформированных в условиях большего разогрева мантии Земли, отражает положение палеоэкватора архейского времени (см. рис. 1, 3).

3. Выводы

1. Исследования показали, что современное деление континентов на две условные группы – Гондвана и Лавразия – отражает историю литосферных плит в фанерозое, тогда как в позднем архее расположение протоцинов было более сложным. Можно выделить три основные группы протоконтинентов: протоэкваториальную, протосеверную и протояжную, среди которых две последних формировались в условиях относительно меньшего перегрева мантии. Можно полагать, что современное местонахождение микроконтинентов, сформированных в условиях большего перегрева мантии, совпадает с местом их формирования в позднеархейское время, что вполне согласуется с палеогеодинамическими реконструкциями перемещения литосферных плит в ходе эволюции Земли.

2. Зеленокаменные пояса позднего архея по составу и относительной распространенности вулканогенных пород могут быть подразделены на два типа: для первого характерно изобилие лавкоматиитовых и высокомагнезиальных базальтов, в то время как для второго более типичны ассоциации толеитовых базальтов, андезитов и риолитов при незначительной роли или полном отсутствии коматиитов, что связывается нами с формированием первых в условиях большего перегрева позднеархейской мантии. Данные по геохимии основных метавулканитов древних конвергентных зон подтверждают это предположение.

3. Коматиитовые магмы зеленокаменных поясов позднего архея, сформированные в условиях большего перегрева мантии Земли, были обогащены Ni, Cr, Mg, Co, Au, ЭПГ, что обеспечило формирование связанных с ними крупных месторождений золота, никеля и, вероятно, платиноидов. Более разогретые области, расположенные в зоне, близкой к экваториальной, должны были иметь большие кларки элементов протокристаллизации. Это, в свою очередь, должно было, при всех прочих равных условиях, определять их более низкие кларки концентраций, а, следовательно, большее количество и генетическое разнообразие типов их месторождений в данных областях.

Работа выполнена по гранту ОНЗ РАН "Эволюция геологических формаций континентальной коры Гондваны и Лавразии в докембрии и их металлогения".

Авторы выражают признательность академикам РАН Д.В. Рундквисту и Ф.П. Митрофанову за постоянное внимание к данным исследованиям и полезные дискуссии и консультации во время работы и при написании данной статьи.

Литература

Borming Jahn, Gruau G., Glikson A.Y. Komatiites of the Onverwacht Group, S. Africa: REE geochemistry, Sm/Nd age and mantle evolution. *Contrib Mineral. Petrol.*, v.80, p.25-40, 1982.

- Kuyumjian R.S., Jost H.** Low- and high-alumina komatiites of Goias, Central Brazil. *J. of South Amer. Earth Sci.*, v.20, p.315-326, 2006.
- Maarten J. de Wit, Roger A. Hart, Rodjer J. Hart.** The Jamestown Ophiolite Complex, Barberton Mountain Belt: A section through 3.5 Ga oceanic crust. *Journal of African Earth Sci. Lett.*, v.6, N 5, p.681-730, 1987.
- Manikyamba C., Kerrich R., Nagvi S.M., Ram Mohan M.** Geochemical systematics of tholeiitic basalts from the 2.7 Ga Ramagiri-Hungund composite greenstone belt, Dharwar craton. *Precambrian Res.*, v.134, p.21-39, 2004.
- Polat A., Kerrich R., Wyman D.A.** Geochemical diversity in oceanic komatiites and basalts from the late Archean Wawa greenstone belts, Superior province, Canada: Trace elements and Nd isotope evidence for a heterogeneous mantle. *Precambrian Res.*, v.94, p.139-173, 1999.
- Puchtel I.S., Zhuravlev D.Z., Samsonov A.V., Arndt N.T.** Petrology and geochemistry of metamorphosed komatiites and basalts from Tungurcha greenstone belt, Aldan Shield. *Precambrian Res.*, v.62, p.399-417, 1993.
- Smith A.G., Briden J.C.** Mesozoic and Cenozoic Paleogeographic Maps. *Lond.; N.Y.; Melb.; Cambridge Univ. press.*, 63 p., 1977.
- Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М.** Тектоника литосферных плит территории СССР. *М., Недра*, кн. 1, 328 с., кн. 2, 234 с., 1990.
- Козлов Н.Е., Мартынов Е.В., Иванов А.А.** Черты петрогеохимических различий основных пород энсиалических и энсиматических комплексов (сравнительный анализ фанерозоя и докембрия). *Геохимия*, № 6, с.582-588, 1999.
- Козлов Н.Е., Мартынов Е.В., Козлова Н.Е., Иванов А.А., Смирнов Ю.П., Колодкина А.В.** Геолого-геохимические особенности и метаморфизм архейских пород северо-восточного обрамления Печенги как критерий выбора их в качестве гомологов глубинных пород разреза СГ-3. *Вестник МГТУ*, т.5, № 1, с.75-84, 2002.
- Конди К.** Архейские зеленокаменные пояса. *М., Мир*, 390 с., 1983.
- Митрофанов Ф.П.** Современные проблемы и некоторые решения докембрийской геологии кратонов. *Литосфера*, № 1, с.5-14, 2001.
- Перельман А.И.** Геохимия. *М., Высшая шк.*, 423 с., 1989.
- Светов С.А.** Магматические системы зоны перехода океан-континент в архее восточной части Фенноскандинавского щита. *Петрозаводск, Карельский НЦ РАН*, 230 с., 2005.
- Смолькин В.Ф.** Коматиитовый и пикритовый магматизм раннего докембрия Балтийского щита. *СПб., Наука*, 272 с., 1992.
- Сорохтин О.Г.** Жизнь Земли. *М.-Ижевск, Изд-во НИЦ "Институт компьютерных исследований"*, 327 с., 2007.
- Сорохтин О.Г., Сорохтин Н.О.** Выделение земного ядра – главный планетарный процесс, управляющий геологическим развитием Земли. *Известия секции наук о Земле РАН*, вып. 13, с.99-116, 2005.
- Справочник по математическим методам в геологии. *М., Недра*, с.76-77, 1987.
- Хаин В.Е.** Тектоника континентов и океанов. *М., Научный мир*, 606 с., 2001.
- Хаин В.Е., Божко Н.А.** Историческая геотектоника, докембрий. *М., Недра*, 382 с., 1988.