

УДК 550.42 : 50.311

Е.В. БИБИКОВА

ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ РАННЕЙ КОРЫ ЗЕМЛИ

Проведен анализ изотопно-геохимических данных о ранней коре Земли, что позволяет установить определенные ограничения на время возникновения, масштабы и геохимические особенности первичной коры Земли. Наиболее информативными оказались короткоживущая $^{146}\text{Sm}/^{142}\text{Nd}$ система, изотопный состав свинца древнейших пород Гренландии и геохимические данные о древнейших цирконах возрастом до 4,4 млрд лет. Наличие аномалии ^{142}Nd в породах Западной Гренландии, свидетельствует о ранней дифференциации вещества Земли (25-75 млн лет после аккреции) на "обедненную" мантию и "обогащенную" (базальтовую) кору [1, 2]. Данные о поведении свинец-свинцовой изотопной системы в древнейших коровых образованиях Западной Гренландии и Лабрадора свидетельствуют о том, что ортогнейсы возрастом 3,85 млрд лет были выплавлены из "обогащенной" коры, имевшей базальтовый состав и высокое значение ($^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb} = 10,9$) [3]. Изотопно-геохимические особенности древнейших цирконов в позднеархейских зеленокаменных поясах блока Илгарн, Австралия свидетельствуют о существовании земной коры и воды на поверхности Земли уже 4,4 млрд лет назад [4].

ВВЕДЕНИЕ

Проблема эволюции Земли на самой ранней стадии ее формирования, разделения на оболочки и возникновения протокры, несмотря на огромный объем накопленных к настоящему времени данных и разнообразие предложенных гипотез, остается остродискуссионной. В решении этой проблемы ключевую роль играют методы изотопной геохимии, позволяющие реконструировать геохимический облик главных резервуаров, участвовавших в образовании первой коровой оболочки Земли, а также оценить длительность главных процессов корообразования в Хадее. Несомненно также, что геофизические и петрологические модели раннего корообразования Земли должны учитывать ограничения, следующие из комплекса данных по различным изотопным системам в древнейших породах Земли. Прогресс в этой области наук о Земле обеспечен значительными достижениями в развитии изотопных методов исследования как в плане вовлечения новых изотопных систем и в совершенствовании традиционных изотопных методов, так и в повышении чувствительности и точности сопутствующих аналитических процедур.

Для решения проблемы реконструкции основных этапов и процессов формирования оболочек Земли на ранних этапах ее эволюции используются как традиционные изотопные системы — $^{238,235}\text{U} - ^{232}\text{Th} - ^{206,207,208}\text{Pb}$, $^{147}\text{Sm} - ^{143}\text{Nd}$, $^{87}\text{Rb} - ^{87}\text{Sr}$, $^{176}\text{Lu} - ^{176}\text{Hf}$, $^{187}\text{Re} - ^{187}\text{Os}$, так и интенсивно изучаемые в последние годы короткоживущие изотопные системы — $^{146}\text{Sm} - ^{142}\text{Nd}$, $^{182}\text{Hf} - ^{182}\text{W}$, $^{129}\text{I} - ^{244}\text{Pu} - ^{129}\text{Xe}$. Так, применение $^{182}\text{Hf} - ^{182}\text{W}$ изотопной системы, период полураспада которой около 9 млн лет, позволило достаточно точно оценить время формирования металлического ядра Земли и постулировать окончание основных процессов формирования ядра в течение первых 30-50 млн лет (максимально до 100 млн лет) после аккумуляции основной массы вещества Земли [5-7]. Точные данные по короткоживущей изотопной системе $^{129}\text{I} - ^{244}\text{Pu} - ^{129}\text{Xe}$ получены и для времени образования атмосферы Земли, также оценивающей время формирования первой восстановленной атмосферы Земли в 50-100 млн лет [8].

Нами рассмотрены ограничения изотопных систем

для оценок возраста и геохимических особенностей древнейших пород Земли, относимых к Хадейскому зону истории Земли (4,50-3,8 млрд лет назад). Общеизвестно, что лучшим изотопным геохронометром служат акцессорные цирконы магматических пород. U-Th-Pb изотопная система цирконов магматического генезиса определяет время их кристаллизации. Самые древние, сохранившиеся коровые образования нашей планеты — кластогенные цирконы, обнаруженные в конгломератах и песчаниках зеленокаменного пояса Илгарн, Западная Австралия возрастом около 3,0 млрд лет. Возраст 10 % цирконов, выделенных из этих пород, по результатам анализа на ионном микрозонде SHRIMP, оказался выше 4,0 млрд лет, достигнув в единственном зерне 4,4 млрд лет [4]. Имеющиеся геохимические и изотопно-геохимические данные не исключают вероятности образования подобных цирконов в пределах коры как гранитного, так и базальтового состава. Наиболее интересны данные об изотопном составе гафния в цирконах. При исследовании изотопного состава гафния в древнейших породах Австралии возрастом более 4,0 млрд лет получены ценные сведения о характере ранней коры Земли, установлен недеплетированный характер источника этих пород [9, 13].

Важные данные о генезисе циркона могут быть получены при изучении изотопного состава кислорода в этом минерале. Исследованиями последних лет установлен низкий коэффициент диффузии кислорода в цирконах, а локальные изотопные исследования кислорода продемонстрировали разный изотопный состав кислорода цирконов различного генезиса [10]. При изучении изотопного состава кислорода в цирконах детритового генезиса в конгломератах Мт Например установлено существование цирконов с величиной $\delta^{18}\text{O}$, превышающей 7 ‰, что указывает на существование континентальной коры и свободной воды, т. е. океана в момент образования пород возрастом 4,4 млрд лет [11, 12].

В данной статье мы ограничились рассмотрением поведения изотопных систем в породах в целом. Древнейшим сохранившимся останком архейской коры на нашей планете является Северо-Атлантический кратон, включающий высокометаморфизо-

ванные ортогнейсы Западной Гренландии и Лабрадора и древнейшие супракрустальные породы зеленокаменного пояса Исуса. Детальное изучение хорошо сохранившихся выходов этих пород проводится, начиная с 1970-х гг. [15]. Определения, полученные с помощью всех примененных изотопных систем для датирования гнейсов Амитсок дали значение возраста 3650 ± 100 млн лет, продемонстрировав сохранность этих изотопных систем, несмотря на наложение более поздних метаморфических процессов [16]. При изучении Sm-Nd и Lu-Hf изотопных систем в ортогнейсах (породы в целом) всех древнейших кратонов получены положительные величины $\epsilon_{Nd}(T)$ и $\epsilon_{Hf}(T)$, свидетельствующие о том, что источником родительских для их протолита расплавов служила деплетированная мантия [1]. Определенные значения ϵ невелики, так ϵ_{Nd} для всего архейского периода $-2 \div +1$, а ϵ_{Hf} - почти всегда в два раза выше из-за разницы в константах распада.

В последние годы в связи с разработкой и совершенствованием изотопных методов ортогнейсы Гренландии и Лабрадора, в также осадочные породы пояса Исуса подверглись новой волне изучения. Наиболее информативные данные были получены по свинец-свинцовой и ^{146}Sm - ^{142}Nd изотопным системам. Исключительный интерес представляет работа Б. Камбера с соавторами [3], которые исследовали изотопный состав свинца как в ортогнейсах, так и в полевых шпатах из пород Гренландии и Лабрадора. Древнейший гнейсовый комплекс Гренландии - Итсак, неоднороден как по возрасту, так и по изотопно-геохимическим характеристикам. Основной объем пород комплекса сформировался 3,6-3,7 млрд лет назад, но в последние годы была обнаружена более древняя часть комплекса, развитая к югу от зеленокаменного пояса Исуса и обозначаемая в публикациях как *SIGB (South Isua Greenstone Belt)* [17]. Возраст этих гнейсов более 3,8 млрд лет (древнейшее значение возраста цирконов - 3,81-3,82 млрд лет). По результатам исследования различных изотопных систем, и в первую очередь Sm-Nd, гнейсы комплекса сформировались 3,6-3,7 млрд лет назад из уже деплетированной мантии ($\epsilon_{Nd}(T) = +1,9 \pm 0,6$ (2σ)), что подтверждается и данными по изучению изотопного состава свинца. В то же время результаты нового изучения изотопного состава свинца [3] показали, что формирование протолита тоналитовых и мондиоритовых гнейсов *SIGB* возрастом более 3,8 млрд лет, возможно, происходило не из деплетированной мантии, а при плавлении дифференцированной древней "базальтовой" коры (возрастом $\sim 4,3$ млрд лет с более высоким значением μ ($^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$)). С помощью изотопных исследований установлено, что для древнейших кратонов нашей планеты характерны повышенные значения μ (*high* μ). Это кратоны Северо-Атлантический [3], Слейв [18], Зимбабве [19], Илгарн [25], Вайоминг [21] и, возможно, некоторые другие. С другой стороны, протолит ортогнейсов кратонов Пилбара и Каапвааль возрастом 3,6-3,7 млрд лет, судя по имеющимся данным, был сформирован из резервуара с низким значением μ .

Другой важный источник информации о времени формирования ранней коры Земли - поведение короткоживущей изотопной системы ^{146}Sm - ^{142}Nd в древнейших земных породах [22, 23]. Период полураспада изотопа ^{146}Sm составляет всего 103 млн лет,

поэтому на современном уровне исследований эта изотопная система может обнаружить эффект Sm-Nd фракционирования, если оно имело место до 4,2 млрд лет назад. Аномалии ^{142}Nd в архейской мантии были ничтожно малы и не могли превышать 30 ppm из-за низкой распространенности ^{146}Sm в Солнечной системе и очень низкого значения ^{143}Nd ($+1 \div +3$) в архейских породах. Для проведения исследований требовался исключительно высокий уровень аналитических исследований. Разработав высокочувствительные и точные методы анализа, Каро с коллегами [1] проанализировали более 20 древнейших пород из Западной Гренландии, провинции Слейв (Канада), блока Илгарн (Зап. Австралия) и Барбертона (Ю. Африка). Коллекция древнейших коровых образований Западной Гренландии включала следующие породы. Терригенные осадки ЗП Исуса; их возраст, согласно Sm-Nd изохроне - 3744 ± 46 млн лет при первичной величине $\epsilon_{^{143}\text{Nd}} = +1,9 \pm 0,6$. Метаморфизованные базальты из ЗП Исуса. Ортогнейсы комплекса Итсак возрастом 3640 ± 120 млн лет (Sm-Nd изохрона, $\epsilon_{^{143}\text{Nd}} = 0,9 \pm 1,4$ ϵ). Образец ортогнейса *SIGB* возрастом 3812 ± 12 млн лет [3]. В коллекцию входили также образцы гнейсов Акасты (Канада), возраст которых по Sm-Nd изохроне - 3371 ± 59 млн лет с $\epsilon_{^{143}\text{Nd}} = -5,6 \pm 0,7$ [24], содержащие цирконы возрастом до 4,2 млрд лет [25]. Были изучены также четыре образца коматиитов из ЗП Барбертон (Ю. Африка), возраст которых по Sm-Nd изохроне составлял 3540 ± 30 млн лет (*Hamilton et al.*, 1979).

В результате прецизионного аналитического изучения этой коллекции было установлено, что аномалии ^{142}Nd наблюдаются только во всех образцах, отобранных в Западной Гренландии. Вариации указанных аномалий содержания ^{142}Nd составили от $7,6 \pm 2,7$ до $15,2 \pm 2,3$ ppm (2σ) от содержания этого изотопа в породах Земли и еще на 20 ppm больше, чем в хондритах.

Поскольку эффективность радиоактивного распада ^{146}Sm после 4,2 млрд лет ничтожно мала, нельзя ожидать ощутимой аномалии $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ в коровых объектах, образованных позже этого времени. Наличие положительной аномалии ^{142}Nd в раннеархейской мантии свидетельствует о том, что мантия Земли испытала Sm-Nd фракционирование на самой ранней стадии своей эволюции. Отсутствие аномалий в более молодых породах и в *MORB* предполагает полную гомогенизацию магмогенерирующей мантийной оболочки Земли в течение последних 4 млрд лет, не оставившую в современной мантии памяти о раннем фракционировании. Из всех пород Западной Гренландии максимальные аномалии ^{142}Nd были обнаружены в терригенных осадках ($7,6 \pm 2,7 - 5,4$ ppm (2σ)). Такой разброс измеренных содержаний ^{142}Nd может быть связан с различиями в составе пород, служивших источниками вещества для протолита метаосадков [23]. В метаморфизованных базальтах ЗП Исуса установленные аномалии ^{142}Nd составляют около $10,7 \pm 0,3$ ppm (2σ), в ортогнейсах комплекса Итсак несколько ниже - $7,9 \pm 1,5$ ppm (2σ). По мнению авторов цитируемой работы, в формировании протолита этих ортогнейсов наряду с мантийной могла участвовать и коровая компонента. Ни в коматиитах Барбертона ($\epsilon_{^{142}\text{Nd}} = -1,1 \pm 2,4$ ppm), ни в ортогнейсах Акасты ($\epsilon_{^{142}\text{Nd}} = 0,9 \pm 1,3$ ppm), ни в кластогенных цирконах возрастом более 4,0 млрд

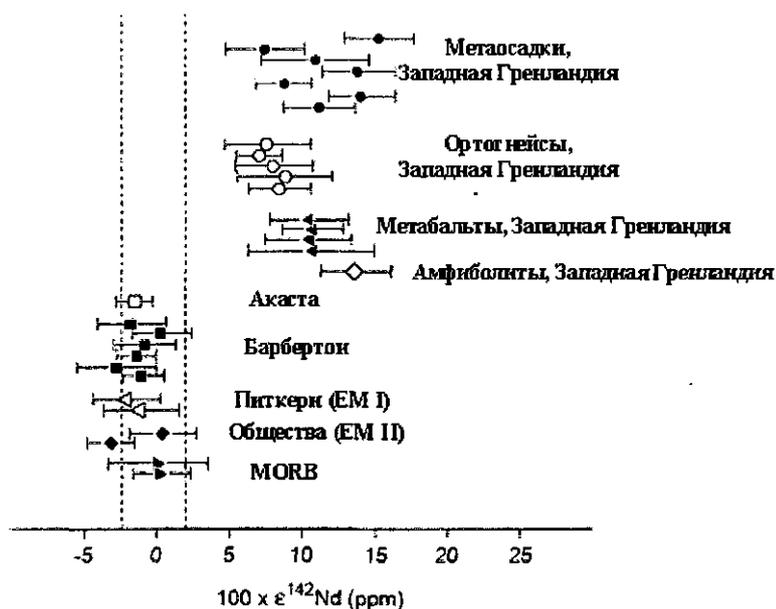


Рис. 1. Вариации ^{142}Nd в архейских породах Западной Гренландии, Барбертона, Акасты и в современных океанических базальтах по [1]. Только в образцах Западной Гренландии имеется избыток $\epsilon^{142}\text{Nd}$

лет из кварцитов блока Илгарн, Зап. Австралия [27], аномалий ^{142}Nd обнаружено не было. (рис. 1).

Используя совместно два неодиимовых хронометра - ^{147}Sm - ^{143}Nd и ^{146}Sm - ^{142}Nd и приняв для времени 3744 ± 46 млрд лет $^{143}\text{Nd} = 1,9 \pm 0,6$ ppm (оценка по Kamber et al., 1998), а также предположив, что 100 ^{142}Nd деплетированной мантии варьирует в интервале 7,6 и 15, Каро и Бенетт с коллегами [1,2] получили модельный возраст дифференциации мантии Земли, который составил 4,50-4,53 млрд лет. Эти данные ограничивают время дифференциации Земли на мантию и кору в течение первых 30-75 млн лет после аккреции Земли с величиной отношения $^{147}\text{Sm}/^{143}\text{Nd} = 0,21-0,23$ (рис. 2).

Отсутствие аномалии ^{142}Nd в современных океанических базальтах предполагает, что первичная гетерогенность была уничтожена последующим конвективным перемешиванием. В то же время отсутствие аномалии ^{142}Nd в современных MORB и кома-

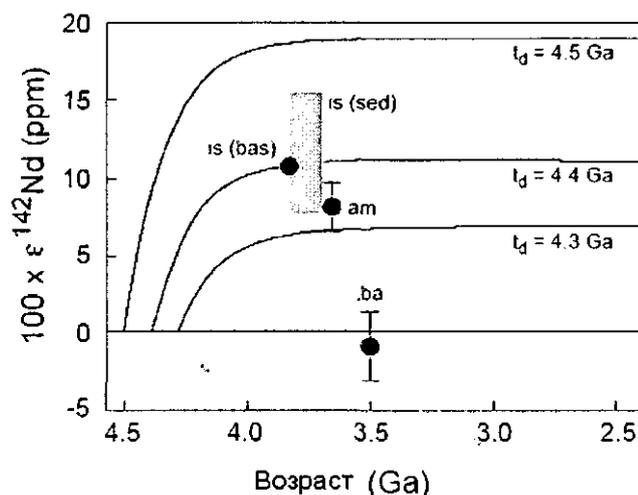


Рис. 2. Эволюция ^{142}Nd в деплетированной мантии при непрерывной дифференциации 4,3; 4,4, и 4,5 млрд лет назад по (Caro et al., 2003): ba - коматииты Барбертона; is (bas) - metabазальты Исуа; is (sed) - метаосадки Исуа; am - ортогнейсы Амитсок (3,65 Ga)

титах Барбертона возрастом в 3,5 млрд лет может говорить либо о резком уменьшении скорости роста коры, либо о соизмеримых скоростях рециклирования материала коры.

Установленные в древнейших породах архея изотопные характеристики Nd и согласование данных по $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ изотопной системе требуют длительной изоляции хадейской протокры от магмагенерирующих мантийных резервуаров [1], которая в случае базальтов Западной Гренландии могла составлять ~ 700-800 млн лет. Такая длительная изоляция протокры Земли могла осуществляться по двум альтернативным геодинамическим сценариям: находится в виде коровой оболочки на поверхности Земли [28], либо в виде рециклированной коры на границе ядро - мантия [29]. Имея в виду последний сценарий, следует заметить, что существуют серьезные изотопные ограничения на распространение субдукционного механизма эволюции литосферы на период Хадея. Эти ограничения связаны с отсутствием изотопных данных о существовании обогащенных в геохимическом отношении мантийных резервуаров в интервале времени 4,5-4,0 млрд лет назад (исключение составляет протолит тоналитов к югу от Исуа (Гренландия) [3]. В обоих указанных выше сценариях [28, 29] первая кора в истории Земли должна была быть мафической (базальтовой) по составу вследствие следующих причин: а) в архейских осадках отсутствует значительное количество детритовой компоненты древнее 4,0 млрд лет [32]; б) в самых древних архейских комплексах пород отсутствуют гранитоиды корового происхождения. Комплементарная древней деплетированной мантии хадейская базальтовая кора по разным оценкам могла иметь мощность порядка 35 км [30, 23]. Таким образом, из анализа приведенных данных по поведению используемых в настоящее время изотопных систем в древнейших коровых объектах Земли, следует допустить, что формирование первой сиалической коры произошло не ранее 4,0 млрд лет назад, а первая кора хадейской Земли имела преимущественно базальтовый состав [31, 28].

Одна из распространенных моделей эволюции верхних оболочек Земли - быстрое образование мафического слоя вскоре после формирования Земли путем сегрегации расплава при кристаллизации магматического океана [33, 34] (Caro, 2005). Именно эта модель формирования коры лучше всего удовлетворяет данным по наличию аномалии ^{142}Nd в мантии, обсуждаемым в [23].

ВЫВОДЫ

Резюмируя приведенный выше обзор современных изотопно-геохимических и геохронологических данных для древнейших пород Земли, можно сформулировать следующие ограничения, которые необходимо учитывать при реконструкции геохимической природы резервуаров, участвовавших в образовании первой коры Земли, а также длительности и характера хадейских корообразующих процессов:

1. Наличие аномалии ^{142}Nd , продукта распада ко-

роткоживущего изотопа ^{146}Sm (период полураспада 103 млн лет), в базальтах, ортогнейсах и кластических осадках Западной Гренландии, свидетельствует о ранней дифференциации вещества Земли (50-75 млн лет после аккреции) на "обедненную" мантию и "обогащенную" (базальтовую) кору [23, 27].

2. Данные о поведении свинец-свинцовой изотопной системы в древнейших коровых образованиях Западной Гренландии и Лабрадора свидетельствуют о том, что протолит этих пород имел возраст около 4,3 млрд лет, а ортогнейсы возрастом 3,81 млрд лет были выплавлены из "обогащенной" коры с базальтовым составом и высоким значением μ ($^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb} = 10,9$) [3].

3. Изверженные породы древнейших кратонов Земли характеризуются высоким значением (high- μ - кратоны). К этим кратонам относятся Северо-Атлантический, Слейв, Илгарн и Зимбабве. Кратоны Пилбара и Каапвааль, в которых не обнаружены образования древнее 3,65 млрд лет, формировались при более низком значении μ .

4. Литосферная мантия под кратонами формировалась одновременно с формированием сиалической коры. Возраст субконтинентальной литосферной мантии под кратоном Зимбабве, согласно Re-Os изотопным данным в хромитах архейских ультраосновных пород, - древнее 3,8 млрд лет [35].

5. Совместное рассмотрение $^{146,147}\text{Sm}$ - $^{142,143}\text{Nd}$ изотопных систем в породах Западной Гренландии свидетельствует о длительной изоляции мафической "обогащенной" протокры мощностью около 35 км от деплетированной мантии на протяжении, по крайней мере, 500 млн лет до образования древнейших пород, содержащих аномалию ^{142}Nd . При этом, "обогащенный" коровый резервуар мог находиться как на поверхности Земли, так и на границе ядро - мантия.

6. Отсутствие аномалии ^{142}Nd в коматигитах Барбертона (Ю. Африка) возрастом 3540 млн лет свидетельствует о том, что к этому времени имело место перемешивание материала "обогащенного" корового и "обедненного" мантийного резервуаров.

7. Отсутствие сиалического корового вещества в кластических породах архея свидетельствует о мафическом составе ранней коры, о ее неустойчивос-

ти и о сохранности лишь в ограниченном количестве древних кратонов.

8. Самая масштабная эпоха формирования ранней сиалической коры соответствует интервалу времени 3,8-3,5 млрд лет назад. Одновременно с формированием тоналитовой коры формировались и литосферные корни, что приводило к оформлению древнейших кратонов (рис. 3).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Caro G., Bourdon B., Birck J.-L., Moorbath S.* High-precision $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ measurements in terrestrial rocks: Constraints on the early differentiation of the Earth's mantle // *Geochim. et cosmochim. acta.* - 2006. - 70. - P. 164-191.

2. *Bennett V.C., Brandon A.D., Nutman A.P.* Coupled ^{142}Nd - ^{143}Nd Isotopic Evidence for Hadean Mantle Dynamics // *Science.* - 2007. - 318. - P. 21.

3. *Kamber B.S., Kennedy J., Collerson D. et al.* Inheritance of early Archaean Pb-isotope variability from long-lived Hadean protocrust // *Contribs Mineral. and Petrol.* - 2003. - 145. - P. 25-46.

4. *Wilde S., Valley J.W., Peck W.H., Grahams C.M.* Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago // *Nature.* - 2001. - 409. - P. 175-178.

5. *Brandon A.D., Walker R.J.* The debate over core-mantle interaction // *Earth and Planet. Sci. Lett.* - 2005. - 232. - P. 211-225.

6. *Wood B.J., Halliday A.N.* Cooling of the Earth and core formation after the giant impact // *Nature.* - 2005. - 437. - P. 1345-1348.

7. *Jacobsen S.B.* The Hf-W isotopic system and the origin of the Earth and Moon // *Ann. Rev. Earth. Planet. Sci.* - 2005. - 33. - P. 531-570.

8. *Ozima M., Podosek F.A.* Formation age of the Earth from $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ and $^{244}\text{Pu}/^{238}\text{U}$ systematics and the missing Xe // *J. Geophys. Res.* - 1999. - 104 (B11). - P. 25493-25499.

9. *Amelin Yu., Lee D.-C., Halliday A.N., Pidgeon R.T.* Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons // *Nature.* - 1999. - 399. - P. 252-255.

10. *Peck W.H., Valley J.W., Wilde S.A., Graham C.M.* Oxygen isotope ratios and rare earth elements in 3.3-4.4 zircons: ion microprobe evidence for high $\delta^{18}\text{O}$ continental crust and oceans in the Early Archean // *Geochim. et cosmochim. acta.* - 2001. - 65, No 22. - P. 4215-4229.

11. *Mojzsis S.J., Harrison T.M., Pidgeon R.T.* Oxygen-isotope evidence from ancient zircons for liquid water at the Earth's surface 4.3 Myr ago // *Nature.* - 2001. - 409. - P. 178-181.

12. *Nemchin A.A., Pidgeon R.T., Whitehouse M.J.* Re-evaluation of the origin and evolution of > 4.2 Ga zircons from the Jack Hills metasedimentary rocks // *Earth and Planet. Sci. Lett.* - 2006. - 244. - P. 218-233.

13. *Valley J.W., Cavosie A.J., Fu B. et al.* Comment on "Heterogeneous Hadean Hafnium: evidence of continental crust at 4.4, to 4.5 Ga" // *Science.* - 2006. - 312. - P. 1139-1140.

14. *Coogan L.A., Hinton R.W.* Do the trace element compositions of detrital zircons require Hadean continental crust? // *Geology.* - 2006. - 34. - P. 633-636.

15. *Black L.P., Gale N.H., Moorbath S. et al.* Isotopic dating of the very early Precambrian amphibolite

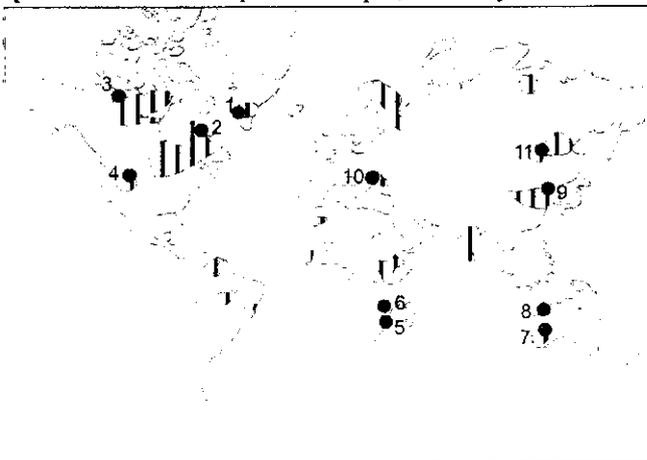


Рис. 3. Распространенность архейских (древнее 2,5 млрд лет) кратонов (заштрихованные области) на поверхности Земли: 1, 2 - Северо-Атлантический кратон (1 - Зап. Гренландия, Итсак, Исуа; 2 - Лабрадор, Уйвак); 3 - Слэйв (Акаста); 4 - Вайоминг; 5 - Каапвааль; 6 - Зимбабве; 7 - Илгарн; 8 - Пилбара; 9 - Северо-Китайский; 10 - Украинский; 11 - Алданский

- gneisses from the Godhaab district, West Greenland // Earth and Planet. Sci. Lett. - 1971. - 12. - P. 245-249.
16. *Moorbath S., Taylor P.N., Johnes N.W.* Dating of oldest terrestrial rocks - fact and fiction // Chemical geology. - 1986. - 57. - P. 63-86.
17. *Nutman A.P., Bennett V.C., Friend C.R.L., Norman M.D.* Meta-igneous (non-gneissic) tonalities and quartz-diorite from an extensive ca. 3800 Ma terrain south of the Isua supracrustal belt, southern West Greenland: constraints on early crust formation // Contribs Mineral. and Petrol. - 1999. - 137. - P. 364-388.
18. *Bowring S.A., Williams I.S., Compston W.* 3.96 Ga gneisses from the Slave Province, Northwest Territories, Canada // Geology. - 1989. - 17. - P. 971-975.
19. *Taylor P.N., Kramers J.D., Moorbath S. et al.* Pb/Pb, Sm-Nd and Rb-Sr geochronology in the Archean Craton of Zimbabwe // Chem. Geol. - 1991. - 87. - P. 175-196.
20. *Fletcher I.R., Rosman K.J.R., Libby W.G.* Sm-Nd, Pb-Pb and Rb-Sr geochronology of the Manfred Complex, Mount Narryer, Western Australia // Precamb. Res. - 1988. - 38. - P. 343-354.
21. *Wooden J.L., Mueller P.A.* Pb, Sr, and Nd isotopic compositions of a suite of late Archean igneous rocks, eastern Beartooth Mountains-implications for crust-mantle evolution // Earth and Planet. Sci. Lett. - 1988. - 87. - P. 59-72.
22. *Bennett V., Brandon A., Heiss J., Nutman A.* Crust-mantle dynamics in the early Earth: the $^{142-143}\text{Nd}$ and ^{176}Hf isotopic perspective // Abstr. Vol. of Goldschmidt Conf. - 2007. - A79.
23. *Caro G., Bourdon B., Birck J.-L., Moorbath S.* High-precision $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ measurements in terrestrial rocks: Constraints on the early differentiation of the Earth's mantle // Geochim. et Cosmochim. acta. - 2006. - 70. - P. 164-191.
24. *Moorbath S., Whitehouse M.J., Kamber B.S.* Extreme Nd-isotope heterogeneity in the early Archean - fact or fiction? Case histories from Northern Canada and West Greenland // Chem. Geol. - 1997. - 135. - P. 213-231.
25. *Bowring S.A., Williams I.S.* Priscoan (4.00-4.03 Ga) orthogneisses from northwestern Canada // Contribs Mineral. and Petrol. - 1999. - 134. - P. 3-16.
26. *Hamilton P.J., O'Nions R.K., Bridgwater D., Nutman A.P.* Sm-Nd studies of Archaean metasediments and metavolcanics from West Greenland and their implications for the Earth's early history // Earth and Planet. Sci. Lett. - 1983. - 62. - P. 263-272.
27. *Caro G., Benett V.C., Bourdon B. et al.* Application of precise $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ analysis of small samples to inclusions in diamonds (Finsch, South Africa and Hadean zircons (Jack Hills, Western Australia) // Chem. Geol. - 2008. - 247. - P. 253-265.
28. *Galer S.J.G., Goldstein S.L.* Early mantle differentiation and its thermal consequences // Geochim. et cosmochim. acta. - 1991. - 55. - P. 227-239.
29. *Tolstikhin I., Hofmann A.W.* Early crust on top of the Earth's core // Phys. Earth Planet. Int. - 2005. - 148. - P. 109-130.
30. *Van Thienen P., Van den Berg A.P., Vlaar N.* Production and recycling of oceanic crust in the early Earth // Tectonophysics. - 2004. - 386. - P. 41-65.
31. *Chase C.G., Patchett P.J.* Stored mafic/ultramafic crust and early Archean mantle depletion // Earth and Planet. Sci. Lett. - 1988. - 91. - P. 66-72.
32. *Stevenson R.K., Patchett P.J.* Implications for the

evolution of continental crust from Hf isotope systematics of Archean detrital zircons // Geochim. et cosmochim. acta. - 1990. - 54. - P. 1683-1697.

33. *Solomatov V.S., Stevenson D.J.* Non-fractional crystallization of a terrestrial magma ocean // J. Geophys. Res. - 1993. - 98 (E3). - P. 5391-5406.

34. *Solomatov V.S.* Fluid dynamics of a terrestrial magma ocean // Eds. R.M. Canup, K. Righter. Origin of the Earth and Moon. - The Univ. of Arizona Press. - 2000. - P. 323-338.

35. *Nägler Th.F., Kramers J.D., Kamber B.S. et al.* Growth of subcontinental lithospheric mantle beneath Zimbabwe started at or before 3.8 Ga: Re-Os study on chromites // Geology. - 1997. - 25, No 11. - P. 983-986.

РЕЗЮМЕ

Проведено аналіз ізотопно-геохімічних даних щодо ранньої кори Землі, що дозволяє встановити певні обмеження на час виникнення, масштаби і геохімічні особливості первинної кори Землі. Найінформативнішою виявилась короткоіснуюча $^{146}\text{Sm}/^{142}\text{Nd}$ система, ізотопний склад свинцю найдавніших порід Гренландії і геохімічні дані про найдавніші циркони віком до 4,4 млрд рр. Наявність аномалії ^{142}Nd в породах Західної Гренландії, свідчить про ранню диференціацію речовини Землі (25-75 млн рр. після акреції) на "збіднену мантію" і на "збагачену" (базальтову кору) (Caro et al., 2006; Benett et al., 2007). Дані про поведінку свинцев-свинцевої ізотопної системи у найдавніших корових утвореннях Західної Гренландії і Лабрадору свідчать, що ортогнейси віком 3,85 млрд рр. були виплавлені зі "збагаченої" кори, яка мала базальтовий склад і високе значення μ ($^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb} = 10,9$) (Kamber et al., 2003). Ізотопно-геохімічні особливості найдавніших цирконів у пізньоархейських зеленокам'яних поясах блоку Ілгарн (Австралія) свідчать про існування земної кори і води на поверхні Землі вже 4,4 млрд рр. тому назад (Wilde et al., 2001).

SUMMARY

The analysis of isotopic-geochemical data of the early of Earth's crust is carried out, that allows to establish definite limitations on the time of formation, scales and geochemical features of primary Earth's crust. Most informative are turned to be short-lived $^{146}\text{Sm}/^{142}\text{Nd}$ system, isotopic composition of lead of the most ancient rocks of Greenland and geochemical data on the most ancient zircons at the age of 4.4 Ga. The ^{142}Nd anomaly found in the rocks of Western Greenland, testifies to early differentiation of Earth matter (25-75 mln years after the accretion) on "depleted" and "enriched" (basaltic) crust (Caro et al., 2006; Benett et al., 2007). Data on the behaviour of lead-lead isotopic system in the most ancient crustal formations of Western Greenland and Labrador testify for the fact that orthogneiss of 3.85 Ga in age was formed by melting from the "enriched" crust of basaltic composition and high μ value ($^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb} = 10.9$) (Kamber et al., 2003). Isotopic-geochemical features of the most ancient zircons in the late Archean greenstone belts of the Yilgarn block, Australia testify to the existence of the crust and water at the surface the Earth by the time of 4.4 Ga (Wilde et al., 2001).

Институт геохимии и аналитической химии
им. В.И. Вернадского РАН, г. Москва
e-mail: bibikova@geokhi.ru