

УДК 551.71+ 54.027

<https://doi.org/10.26516/2541-9641.2026.1.115>

EDN: GVXFCU

Глобальная и региональная (сибирская) переработка литосферы 2.7 млрд лет назад: изотопные данные

С.В. Рассказов^{1,2}¹Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия²Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

Аннотация. Выполнен обзор радиоизотопных данных, свидетельствующий о существенной переработке литосферы около 2.7 млрд лет назад в глобальном и региональном (сибирском) масштабах. В это время начинается средняя геодинамическая эпоха эволюции мантии Азии, завершающаяся около 1.8 млрд лет назад. Средняя мантийная геодинамическая эпоха обозначает становление литосферы, получившей выражение в виде крупных континентальных обособлений Сибирского и других палеоконтинентов.

Ключевые слова: эволюция Земли, средний геодинамический этап, изотопные системы U/Pb, Sm/Nd, Re/Os

Global and Regional (Siberian) Processing of the Lithosphere 2.7 Byr ago: Isotopic Evidence

S.V. Rasskazov^{1,2}¹Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia²Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

Abstract. A review of radiogenic isotope data indicates significant processing of the lithosphere ca. 2.7 Byr ago on a global and regional (Siberian) scales. This time marks the beginning of the middle geodynamic epoch of Asian mantle evolution that ends ca. 1.8 Byr ago. The middle mantle geodynamic epoch corresponds to the lithosphere generation that resulted in large continental segregations of the Siberian and other paleocontinents.

Keywords: Earth's evolution, middle geodynamic stage, U/Pb, Sm/Nd, Re/Os isotope systems

Введение

В истории Земли неоднократно имели место поворотные рубежи в ее эволюции. Например, в середине мела магматизм широко проявился на всей Земле. Огромные масштабы вулканизма, сопоставимого с проявлениями траппов крупных магматических провинций породили гипотезу о связи глобальной среднемеловой вспышки

магматизма с глубинной активностью суперплюма (Larson, 1991). Аномально-горячее состояние нижней мантии моделировалось нарушением термального граничного слоя 660 км лавинным погружением слэбов, вызывавшим обратный поток с его проявлением на земной поверхности около 125 млн лет назад и повторным проявлением – около 60 млн лет назад (Machetel, Humpler, 2003).

Статья получена: 05.03.2026; исправлена: 14.03.2026; принята: 27.03.2026.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Рассказов С.В. Глобальная и региональная (сибирская) переработка литосферы 2.7 млрд лет назад: изотопные данные // Геология и окружающая среда. 2026. Т. 6, № 1. С. 115–125. DOI 10.26516/2541-9641.2026.1.115. EDN: GVXFCU

Article received: 05.03.2026; corrected: 14.03.2026; accepted: 27.03.2026.

FOR CITATION: Rasskazov S.V. Global and regional (Siberian) processing of the lithosphere 2.7 vyr ago: isotopic evidence // Geology and Environment. 2026. Vol. 6, No. 1. P. 115–125. DOI 10.26516/2541-9641.2026.1.115. EDN: GVXFCU

Аномальное состояние Земли в общем предшествовало и сопровождало начало новейшего геодинамического этапа, отчетливо проявившегося на территории Азии в последние 90 млн лет (Чувашова, Рассказов, 2025).

Реконструкции подобных процессов на более ранних этапах эволюции Земли затруднены из-за фрагментарности геологических данных во времени и пространстве. Тем не менее, выявляются некоторые закономерности, которые интерпретируются в контексте изменений в становлении литосферы. На рубеже архея-протерозоя имеет место фундаментальная смена мелкозернистых терригенных осадочных пород с резким возрастанием отношения Th/Sc, обусловленным увеличением концентрации Th и уменьшением концентрации Sc. Th является высоко несовместимым, а Sc – совместимым микроэлементом, поэтому возрастание отношения Th/Sc отражает переход от коры основного состава к коре среднего и кислого состава (Taylor, McLennan, 1985; Rudnick, 2017). Между тем, континентальная кора начинает генерироваться по ювенильному механизму несколько раньше. Существенная перестройка глубинных процессов Земли намечается по изменениям в Sm–Nd-изотопной системе около 2.7 млрд лет назад (Hofmann, 1997). Какая-либо иллюстрация значения этой перестройки в цитированной статье, однако, отсутствует.

В настоящей работе приводится обоснование глобального характера переработки литосферы на рубеже около 2.7 млрд лет назад. Цель исследования – подчеркнуть значение этого события в геологической эволюции Сибири.

Глобальное событие 2.7 млрд лет в U–Pb-изотопной систематике урановых минералов

Урановые минералы близкого возраста образования из архейских щитов пяти континентов аппроксимируются линией дискордии с верхней точкой пересечения около 2.7 млрд лет (рис. 1). Автор этого обобщения (Tilton, 1960) предположил, что урановые минералы подвергались непрерывной диффузионной потере свинца в течение геологического времени, которая на большей части своей длины похожа на прямую линию, изгибаясь вниз к точке пересечения в начале координат в случаях сильной поздней потери свинца. В качестве исходного материала для кристаллизации урановых минералов служил коровый протолит континентов возрастом 2.7 млрд лет. Следовательно, около 2.7 млрд лет

должно было произойти событие, которое привело к замыканию U–Pb изотопной системы урановых минералов в глобальном масштабе.

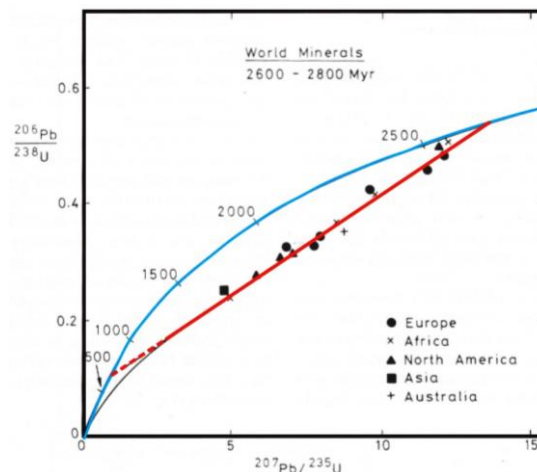


Рис. 1. Диаграмма архейских урановых минералов пяти континентов с общей дискордией (Tilton, 1960).

Fig. 1. Diagram of Archean U-rich minerals of the five continents with general discordia (Tilton, 1960).

Диффузионная модель глобальных потерь Pb в урановых минералах (Tilton, 1960) отличается от диффузионной дискордии Вассербурга, которая характеризует отторжение обыкновенного Pb от U при кристаллизации рудных минералов, таких как галенит (Rasskazov et al., 2010). В сульфиде определяется начальное изотопное отношение Pb для изохроны U-содержащих вулканических пород (риолитов) 2.69 млрд лет на месторождении Норанда (Квабек) (рис. 2).

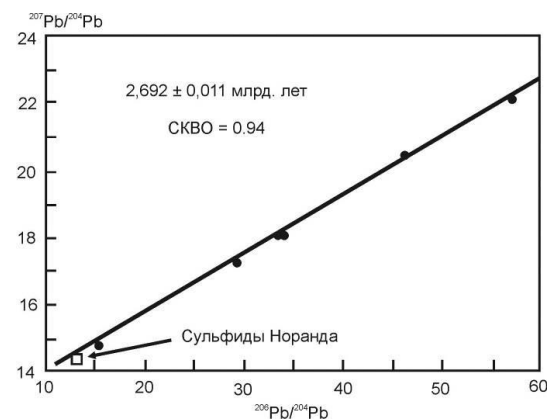


Рис. 2. Pb–Pb изохрона вулканических пород, вмещающих Cu–Zn сульфидное месторождение Норанда (Квабек). Из работы (White, 2000).

Fig. 2. Pb–Pb isochron of volcanic rocks hosting the Noranda (Quabec) Cu–Zn sulfide deposit. From (White, 2000).

Глобальное событие 2.7 млрд лет в изотопах пород коры и мантии

О генерации коры по ювенильному механизму свидетельствуют результаты исследований изотопов урана, свинца, гафния и кислорода в цирконах из пород фундамента южной части Западной Гренландии. Породы возрастом 3.9–3.5 млрд лет эволюционируют из источника–резервуара возрастом 3.9 млрд лет с хондритовым или слегка обедненным изотопным составом гафния. Породы, образовавшиеся после 3.2 млрд лет назад, впервые демонстрируют приток ювенильного обедненного материала (новой коры мантийного происхождения) и характеризуются резкими изменениями в соотношении изотопов гафния, аналогичными тем, которые наблюдаются в фанерозойских орогенах, связанных с субдукцией. Переход от древнего (3.9–3.5 млрд лет назад) режима эволюции коры, непохожего на современную тектонику плит, к геодинамической обстановке после 3.2 млрд лет назад, включавшей образование ювенильной коры процессами тектоники плит, устанавливается во временном интервале 3.5–3.2 млрд лет назад (Næraa et al., 2012).

События возрастом около 2.7 млрд лет назад широко представлены на разных континентах. Коматииты этого возраста, подобные по геохимическим характеристикам более древним коматиитам, обедненным глиноземом (возраст 3.5 млрд лет), известны в Нью-тонском и Бостонском районах и районе Онтарио в Канаде. Эти коматииты характеризуются более высокими отношениями $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ и Gd/Yb и более низким содержанием Al_2O_3 , чем большинство коматиитов типа Мунро (Herzberg, 1995). Около 2.7 млрд лет назад сформировались основные зеленокаменные пояса восточной части кратона Дхарвар, Индия (Anand, Balakrishnan, 2010). В провинции Супериор Канады известны адакитоподобные породы этого же возраста (Pollat, Kerrich, 2001). В это время образовался расслоенный комплекс Стиллиуотер (рис. 3).

По U–Pb датировкам цирконов магматических пород добавление ювенильной коры (а также магматическая активность в целом) в глобальном масштабе в интервале 2.45–2.2 млрд лет принимается как незначительное (Condie et al., 2009). При интерпретации U–Pb

и Hf-модельных датировок цирконов этот вывод оспаривается (Belousova et al., 2010).

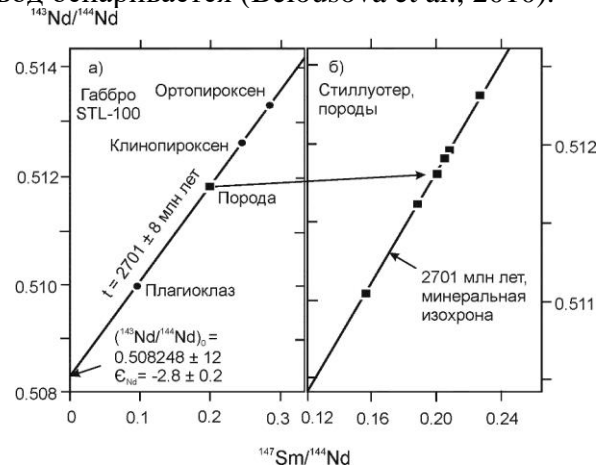


Рис. 3. Sm–Nd-изохронная диаграмма для пород и минералов из расслоенного базитового комплекса Стиллиуотер. *a* – внутренняя минеральная изохрона для габбро, *b* – внешняя изохрона для валовых составов пород. Из книги (Geyh, Schleicher, 1990).

Fig. 3. Sm–Nd isochron diagram for rocks and minerals from the Stillwater layered mafic complex. *a* – internal mineral isochron for gabbro, *b* – external isochron for bulk rock compositions. From (Geyh, Schleicher, 1990).

Статистический анализ ^{187}Re – ^{187}Os данных по породам верхней мантии дает максимумы ее истощения около 2.7, 1.9 и 1.2 млрд лет назад. Эти мантийные максимумы совпадают с максимумами образования континентальной коры и, таким образом, могут свидетельствовать о сопряженной, глобальной импульсной дифференциации мантийных и коровых процессов – росте континентальной коры посредством крупномасштабных событий плавления мантии (Pearson et al., 2007). Большинство перидотитовых ксенолитов из кимберлитов южной части западно-гренландского фрагмента Североатлантического кратона с модельными Re–Os-датировками обеднения T_{RD} от 3.1 до 2.7 млрд лет и 2.0 млрд лет имеют нормальное содержание FeO, что связывается с плавлением неглубокой мантии. Значительная часть перидотитовых ксенолитов с модельными датировками T_{RD} 2.3–2.6 млрд лет (которые не совпадают с конкретными магматическими событиями) обогащена FeO. В это время получил развитие метаморфизм гранулитовой фации. Предполагается, что мантийные ксенолиты территории отражают стабилизацию литосферы на

мезо-неоархейской границе, за которой последовала ее избирательное преобразование (Wittig et al., 2010).

Глобальные временные связи между кратонной мантией и вышележащей земной корой исследовались при сопоставлении U/Pb датировок детритовых цирконов из современных речных отложений и Re–Os T_{RD} -датировок перидотитов, мегакристаллов оливина и сульфидных включений из кратонов: Каапваальского, Слэйв и Североатлантического. Для T_{RD} -датировок мантийных пород кратонов определены максимумы: 2.7 млрд лет для кратона Каапвааль, 2.6 и 1.9 млрд лет – для Североатлантического кратона и 2.8, 1.8 и 1.4 млрд лет – для кратона Слэйв. Возрастные максимумы, выявленные в кратонной мантии, совпали с двумя максимумами глобальных U/Pb датировок детритовых цирконов 2.7 и 1.9 млрд лет. Совпадение возраста 2.7 ± 0.1 млрд лет мантии и коры интерпретировалось как свидетельство образования кратонной мантии в целом одновременно с кратонной корой, первоначально сформировавшейся в архее.

В интервале 2.7–2.2 млрд лет и близко к нему имеются оценки возраста протолитов в источниках позднефанерозойских вулканических пород Азии: Лндзю Северо-

Восточного Китая (2.57 млрд лет), Чангбай этой же территории (2.93 и 2.72 млрд лет), Чеунгок Южной Кореи (2.85 млрд лет), Южный Тибет (2.81 млрд лет), рифт Тапи на плато Декан (2.76 млрд лет) (Rasskazov et al., 2020). Ранняя мантийная геодинамическая эпоха Азии (Rasskazov et al., 2020) соответствует временному интервалу от образования Земли до 3.6 млрд лет назад, в течение которого в осадочных породах последовательно возрастала роль датированных детритовых цирконов (Condie, Aster, 2009). В эту эпоху суперконтиненты не образуются. Средняя мантийная геодинамическая эпоха Азии, охватывающая временной интервал от 2.9 до 1.8 млрд лет назад (Rasskazov et al., 2020), согласуется с наиболее высокими пиками датированных цирконов, в том числе из орогенных гранитоидов. Суперконтиненты образуются в начале и в конце этой геодинамической эпохи, а в середине суперконтиненты распадаются (Condie, Aster, 2009). Поздняя геодинамическая эпоха последних 700 млн лет (Rasskazov et al., 2020) в целом характеризуется снижением роли датированных цирконов. В это время суперконтиненты сначала собираются, а затем распадаются (Condie, Aster, 2009) (рис. 4).

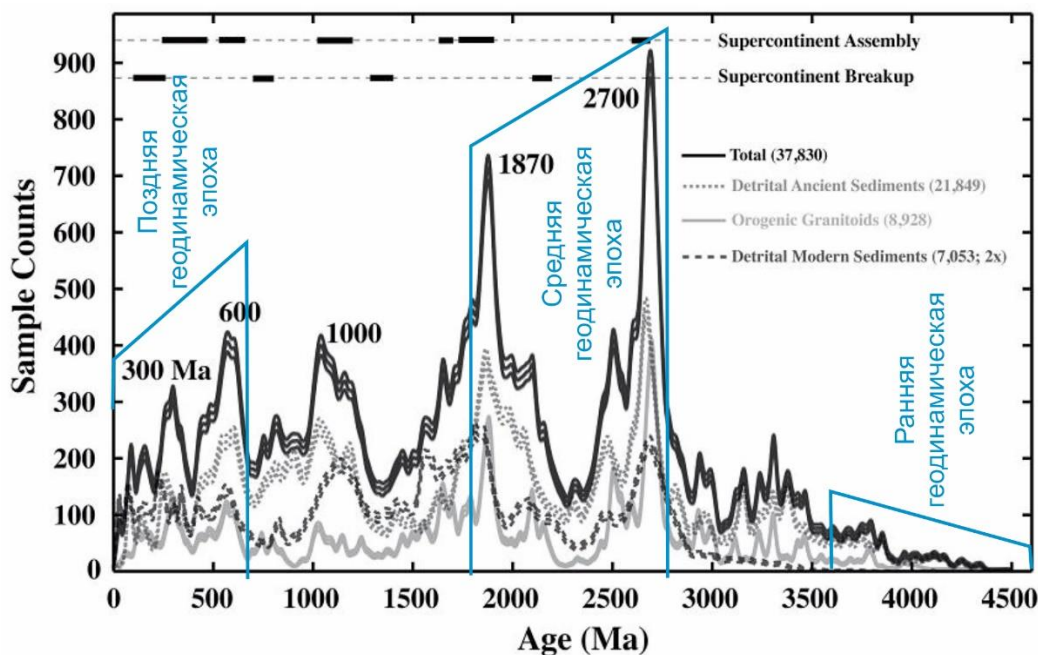


Рис. 4. Сопоставление возраста циркона по изотопам урана/свинца в орогенных гранитоидах и наборах данных по детритовому циркону за последние 4.5 миллиарда лет (Condie et al., 2009) с мантийными геодинамическими эпохами Азии (Rasskazov et al., 2020).

Fig. 4. Comparison of uranium/lead isotope ages of zircon in orogenic granitoids and detrital zircon datasets over the past 4.5 Byr (Condie et al., 2009) with mantle geodynamic epochs of Asia (Rasskazov et al., 2020).

Фигуративные точки третичных вулканических пород поля Абсарока и четвертичных пород Йеллоустоунского вулканического плато Северной Америки располагаются на диаграмме $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ вдоль вторичной изохроны, определяющей возраст пород источника около 2.8 млрд лет. Этот возраст соответствует возрасту пород фундамента кратона Вайоминг (Lipman, 1980). Породы плато Колорадо и вулканического поля Сан Хуан на диаграмме изотопов свинца дают вторичную изохрону с наклоном, соответствующим возрасту фундамента плато Колорадо 2.3 млрд лет (Alibert et al., 1986).

Событие 2.7 млрд лет назад и последующее становление литосферы Сибири

Подобно Западной Гренландии эволюция КМП и мантии кратона Вайоминг может служить для возрастных корреляций с процессами становления КМП и подстилающей мантии под Слюдянским метаморфическим субтеррейном. В Тункинской долине слои КМП и подстилающей мантии служат автохтоном для перекрывающего слоя аллохтона слюдянского кристаллического комплекса с раннепалеозойским возрастом синколлизонного метаморфизма. Аллохтон обнажен на поверхности, автохтон опробуется в источниках излившихся расплавов и в глубинных включениях. По результатам геохимических исследований протолитов источников позднекайнозойских вулканических пород и древних субвулканических тел основного-среднего состава в эволюции тектоносферы Гарганской зоны выявляются события ранней, средней и поздней геодинамических эпох эволюции Земли (Чувашова и др., 2022; Рассказов и др., 2022, 2024):

1) в раннюю геодинамическую эпоху тектоносфера Гарганской зоны генерировалась импактными телами в последовательности сверху вниз: сначала, 4.31 млрд лет назад, – во внешней оболочке Земли, затем, 3.85 млрд лет назад, – в области коромантийного перехода, и, наконец, 3.72 млрд лет назад, – в области литосферной мантии;

2) в среднюю геодинамическую эпоху рудогенерирующие процессы развивались во внешней оболочке Земли в связи с событием Великого окисления 2.4–2.2 млрд лет назад;

3) в позднюю геодинамическую эпоху проявились процессы тектонической и магматической активизации тектоносферы Гарганской зоны в связи с ее интеграцией в фундамент Тувино-Монгольского микроконтинента, начиная приблизительно с 1 млрд лет назад или несколько раньше.

Гарганские события ранней геодинамической эпохи 4.31, 3.85 и 3.72 млрд лет назад не отражаются в протолитах источников кайнозойских вулканических пород Тункинской долины, но отчетливо проявляются события средней и поздней геодинамических эпох.

Основание метаморфического комплекса Гарганского блока, сложенное тоналитами и трондьемитами, амфиболитами и ультраметаморфическими гранитоидами, характеризуется интервалом датировок 2.71–2.61 млрд лет (Левицкий и др., 2014). Гарганская зона проявляет геологическую индивидуальность в изотопном составе обыкновенного свинца галенита из рудных месторождений. Галенит содержит свинец В-типа (Barberton). По сопряженной модели накопления радиогенных изотопов Pb Холмса–Хаутерманса и диффузионной дискордии Вассербурга для протолита коры Гарганской зоны по галениту рассчитывается возраст T около 4.31 млрд лет при значении $\mu = 11$ и возраст отторжения t в основном в интервале 2.4–2.2 млрд лет (Rasskazov et al., 2010). Этот временной интервал основного рудообразования в Гарганском блоке соответствует развитию процессов метасоматического преобразования пород КМП и подстилающей мантии в источниках, вовлеченных в плавление под районом Тункинской впадины (возраст 4.44 млрд лет) и под вулканами Метео и Култукским (возраст около 2.3–2.2 млрд лет). Генетическая связь рудообразующих процессов Гарганского блока и метасоматических процессов в породах слоя КМП подтверждается находками в ксенолитах метасоматитов из трахибазальтов Карьерного вулкана Fe–Si

включений, подобных железистым кварцитам (BIF) Великого Окислительного События 2.45–2.2 млрд лет назад (Аило и др., 2021).

Приблизительно одновременно с основанием Гарганского блока формируется метаморфический комплекс Бирюсинского блока в Восточном Саяне, который прорван гранитоидами с модельным T(DM) возрастом 2.7–2.6 млрд лет (Туркина и др., 2003).

Коровые протолиты Западного Забайкалья характеризуются интервалом Sm–Nd модельных датировок 2.6–0.6 млрд лет (Ярмолук и др., 1999). Следовательно, генерация гранитоидов ограничивается рубежом около 2.7 млрд лет назад. Гранитоидный магматизм возобновляется в течение всего временного интервала, обозначенного в протолитах источников вулканических пород Тункинской долины.

От 2.7 млрд лет назад к интервалам 2.4–2.2 и 1.6–0.66 млрд лет назад характер КМП и нижележащей мантии меняется. В позднем архее, 2.7 млрд лет назад, глубинные литосферные породы демонстрируют обогащенные характеристики: повышенные концентрации легких РЗЭ относительно тяжелых РЗЭ в ксенолитах и клинопироксенах и смещение точек данных по ксенолитам выше мантийного направления на диаграмме Th/Yb–Ta/Yb. После 2.7 млрд лет назад глубинные литосферные породы показывают относительно обогащенные и обедненные характеристики, которые обозначаются вторичными изохронами, простирающимися на диаграмме $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ в области не только более радиогенных изотопных составов свинца (относительно общего компонента), но и менее радиогенных составов. В это время периодически создаются условия для извлечения низкоплавкого материала из мантии, который формирует кору в рамках орогенного сценария. Последнее событие этого сценария имело место около 0.66 млрд лет назад. За

этим следуют многочисленные магматические активизации, сопровождающиеся переработкой ранее сформировавшихся коровых протолитов. Примером такой эволюции является последовательность источников гранитоидной магмы в юго-восточной части Восточных Саян в период от 512 до 261 миллионов лет назад (Рассказов и др., 2013).

На Сибирском палеоконтиненте в рассматриваемом временном интервале сначала была определена изохронная Re–Os-изотопная датировка 2.9 ± 0.4 млрд лет для валовых составов эклогитов из трубки Удачная (Якутия). Повышенное начальное изотопное отношение осмия изохроны отразило историю корового материала до его включения в литосферную мантию (Pearson et al., 1995). Этот возраст в пределах погрешности определений сопоставляется с Pb–Pb-изохронным возрастом 2.57 ± 0.2 млрд лет, полученным по монофракциям клинопироксена из эклогитов этой же кимберлитовой трубки (Jacob, Foley, 1999). Близкие Pb-изохронные датировки определяются по клинопироксенам ксенолитов из кимберлитовой трубки Робертс Виктор (Южная Африка). Составы клинопироксенов из протомантийных гранатовых лерцолитов Береинского вулканического центра лежат на тренде клинопироксенов эклогитов из трубки Удачная, тогда как точки клинопироксенов из ксенолитов трубки Робертс Виктор смещаются выше этого тренда (рис. 5). Клинопироксены, включенные в алмазы эклогитов трубки Удачная, имеют спектры РЗЭ, слабо обедненные легкими членами ряда, либо спектры без признаков обеднения, частично с положительной Eu-аномалией. Концентрация TiO_2 в этих клинопироксенах находится в интервале от 0.3 до 0.9 мас. % (0.18–0.54 мас. % Ti), а в клинопироксенах других эклогитов концентрация TiO_2 снижается до 0.1 мас. % (0.06 мас. % Ti) (Taylor, Anand, 2004).

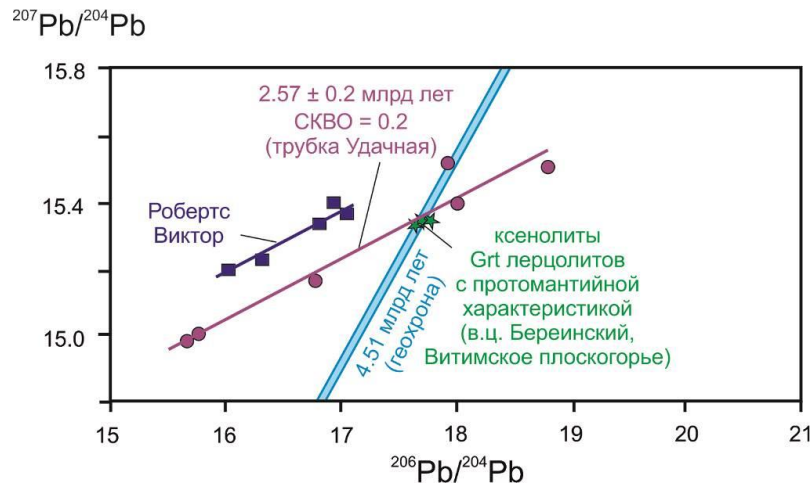


Рис. 5. Диаграмма $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ клинопироксенов эклогитовых ксенолитов из кимберлита трубки Удачная в сопоставлении с клинопироксенами ксенолитов из кимберлитовой трубки Робертс Виктор. Линия регрессии проходит вблизи точек клинопироксенов, выделенных из эклогитов кимберлитовой трубки Удачная, которые определяют Pb–Pb изохронный возраст 2.57 ± 0.2 млрд лет (Jacob, Foley, 1999). Состав изотопов Pb ксенолитов из пород Береинского вулканического центра (в.ц.) приводится по данным (Глебовицкий и др., 2007).

Fig. 5. $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ versus $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ isotope compositions of eclogite xenolith clinopyroxenes from the Udachnaya kimberlite pipe in comparison with those from the Roberts Victor kimberlite pipe. The regression line passes close to those of clinopyroxene separates from eclogites of the Udachnaya kimberlite pipe that define a Pb–Pb isochron age of 2.57 ± 0.2 Ga (Jacob, Foley, 1999). The Pb isotope composition of xenoliths from rocks of the Bereya volcanic center is plotted after (Glebovitsky et al., 2007).

Предполагалось, что кратон под трубкой Удачная может быть в целом моложе других кратонов (Doucet et al., 2015). Группа обогащенных кальцием (2.0–3.2 мас.% CaO) перидотитовых ксенолитов из трубки Обнаженная кратонной литосферы Сибирского палеоконтинента дала, однако, сравнительно древние модельные Re–Os датировки (T_{RD} в среднем 2.8 млрд лет). Перидотиты с Al_2O_3 от низкого до умеренного (<2 %) и высоким магнезиальным числом ($\text{Mg}\# \geq 0.91$), в том числе гарцбургиты с низким содержанием Ca, показали более низкие модельные Re–Os датировки (T_{RD} в среднем 1.9 млрд лет), что интерпретировалось как показатель двухэтапного формирования сибирской литосферной мантии (Ionov et al., 2015). Таким образом, предположение о более молодом возрасте Сибирского кратона не подтвердилось. Для кратонной мантии Сибирского палеоконтинента позднеархейская Re–Os возрастная оценка обеднения согласуется с подобными процессами под другими кратонами мира.

Под трубкой Удачная были выявлены также архейские породы верхней и средней частей коры с возрастом около 2.7 млрд лет, определенным по цирконам из ксенолитов с

H_2O -содержащими минералами (амфиболитов и роговообманковых тоналитов) (Moуеп et al., 2017). Протолит источника магнезиальных траппов Гудчихи на севере Сибирской трапповой провинции имеет Pb–Pb возраст 2.61 млрд лет (Rasskazov et al., 2020).

Заключение

Выполненный обзор радиоизотопных данных свидетельствует о существенной переработке литосферы около 2.7 млрд лет назад, имеющей значение в глобальном и региональном (сибирском) масштабах. В это время начинается средний геодинамический этап эволюции мантии Азии, завершающийся около 1.8 млрд лет назад (Rasskazov et al., 2020). Средний мантийный геодинамический этап обозначает становление литосферы, получившее выражение в виде крупных континентальных обособлений, в том числе Сибирского палеоконтинента.

Благодарности

Событие существенной переработки литосферы Земли 2.7 млрд лет назад рассматривается в рамках разработки учебного курса

магистратуры геологического факультета ИГУ «Современные проблемы геологии».

Литература

Аило Ю., Рассказов С.В., Ясныгина Т.А., Чувашова И.С. Находка Fe–Si включений в глубинных нодулях из трахибазальтов вулкана Карьерный (Тункинская долина Байкальской рифтовой системы) и ее значение для понимания происхождения железистых кварцитов события Великого Окисления // XIII Всероссийское петрографическое совещание (с участием зарубежных ученых) «Петрология и геодинамика геологических процессов». 06–13 сентября. Иркутск: ИГХ СО РАН и ИЗК СО РАН, 2021. С. 18–23.

Глебовицкий В.А., Никитина Л.П., Салтыкова А.К., Пушкарев Ю.Д., Овчинников Н.О., Бабушкина М.С., Ащепков И.В. Термальная и химическая неоднородность верхней мантии Байкало-Монгольского региона // Петрология. 2007. Т. 15, № 1. С. 61–92

Левицкий И.В., Левицкий В.И., Ефремов С.В. Петрология и геохимия пород фундамента Гарганской глыбы (Восточный Саян) // Известия Сибирского отделения. Серия наук о Земле РАЕН. 2014. № 4 (47). С. 43–55.

Рассказов С.В., Чувашова И.С. Вулканизм и трансенсия на северо-востоке Байкальской рифтовой системы. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2018. 384 с. doi: 10.21782/B978-5-6041446-3-3.

Рассказов С.В., Аило Ю., Чувашова И.С., Ясныгина Т.А. Соотношения петрологического коро-мантийного перехода и сейсмического раздела Мохо под гранулитовыми террейнами: признаки преобразований корневой части Восточно-Тункинского блока в глубинных нодулях из позднекайнозойских вулканических пород // Геология и окружающая среда. 2022. Т. 2, № 2. С. 91–127. doi: 10.26516/2541-9641.2022.2.91

Рассказов С.В., Меньшагин Ю.В., Ясныгина Т.А., Ильясова А.М., Саранина Е.В., Скопинцев В.Г. Хушагольский полихронный массив: гетерогенность источников палеозойских щелочных сиенитов и гранитов в Восточном Саяне, Юг Сибири // Литосфера. 2013. № 4. С. 88–109.

Рассказов С.В., Ясныгина Т.А., Чувашова И.С., Саранина Е.В., Ильясова А.М., Скопинцев В.Г. Гарганский тип континентальной тектоносферы: Рb-изотопные оценки возраста событий ранней, средней и поздней геодинамических эпох Земли в слоях внешней оболочки, коромантийного перехода и литосферной мантии // Геология

и окружающая среда. 2024. Т. 4, № 3. С. 7–32. doi: 10.26516/2541-9641.2024.3.7

Туркина О.М., Бибикина Е.В., Ножкин А.Д. Этапы и геодинамические обстановки раннепротерозойского гранитообразования на юго-западной окраине Сибирского кратона // Доклады академии наук. 2003. Т. 388, № 6. С. 779–783.

Чувашова И.С., Рассказов С.В. Новейший геодинамический этап Азии в контексте эволюции Земли // Геология и окружающая среда. 2025. Т. 5, № 4. С. 7–49. doi: 10.26516/2541-9641.2025.4.7.

Чувашова И.С., Рассказов С.В., Саранина Е.В. ²⁰⁷Pb–²⁰⁶Pb возраст источников позднекайнозойских вулканических пород коро-мантийного перехода в соотношении с возрастом офиолитов и древних блоков, экспонированных на поверхности коры: трансект Китой–Байдраг Байкало-Монгольского региона // Геология и окружающая среда. 2022. Т. 2, № 2. С. 61–90. doi: 10.26516/2541-9641.2022.2.61

Ярмолук В.В., Коваленко В.И., Ковач В.П. и др. Nd-изотопная систематика коровых магматических протолитов Западного Забайкалья и проблема рифейского корообразования в Центральной Азии // Геотектоника. 1999. № 4. С. 3–20.

Alibert C., Michard A., Albarede F. Isotope and trace element geochemistry of Colorado Plateau volcanics // Geochim. Cosmochim. Acta. 1986. V. 50. P. 2735–2750.

Anand R., Balakrishnan S. Pb, Sr and Nd isotope systematics of metavolcanic rocks of the Hutti greenstone belt, Eastern Dharwar craton: Constraints on age, duration of volcanism and evolution of mantle sources during Late Archean // Journal of Asian Earth Sciences. 2010. V. 39. P. 1–11

Belousova E.A., Kostitsyn Y.A., Griffin W.L., Begg G.C., O'Reilly S.Y., Pearson N.J. The growth of the continental crust: constraints from zircon Hf-isotope data // Lithos. 2010. Vol. 119. P. 457–466. doi:10.1016/j.lithos.2010.07.024

Condie K.C., Aster R.C. Zircon age episodicity and growth of continental crust // EOS. Vol. 90, No. 41, 13, 2009. P. 364.

Condie K.C., O'Neill C., Aster R.C. Evidence and implications for a widespread magmatic shutdown for 250 My on Earth // Earth and Planetary Science Letters. 2009. Vol. 282. P. 294–298.

Doucet L.S., Ionov D.A., Golovin A.V. Paleoproterozoic formation age for the Siberian cratonic mantle: Hf and Nd isotope data on refractory peridotite xenoliths from the Udachnaya kimberlite // Chemical Geology. 2015. Vol. 391. P. 42–55. doi: 10.1016/j.chemgeo.2014.10.018

Geyh M.A., Schleicher H. Absolute age determination. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1990. 503 p.

Herzberg C., Asimow P.D., Arndt N., Niu Y., Leshner C.M., Fitton J.G., Cheadle M.J., Saunders A.D. Temperatures in ambient mantle and plumes: Constraints from basalts, picrites, and komatiites // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2007. Vol. 8: Q02006. doi:10.1029/2006GC001390.

Hofmann A.W. Mantle geochemistry: the message from oceanic volcanism // *Nature*. 1997. Vol. 385. P. 219–229.

Ionov D.A., Carlson R.W., Doucet L.S., Golovin A.V., Oleinikov O.B. The age and history of the lithospheric mantle of the Siberian craton: Re–Os and PGE study of peridotite xenoliths from the Obnazhennaya kimberlite // *Earth and Planetary Science Letters*. 2015. Vol. 428. P. 108–119. doi:10.1016/j.epsl.2015.07.007

Jacob D.E., Foley S.F. Evidence for Archean ocean crust with low high field strength element signature from diamondiferous eclogite xenoliths // *Lithos*. 1999. Vol. 48. P. 317–336.

Larson R.L. Latest pulse of Earth: Evidence for a mid-Cretaceous superplume // *Geology*. 1991. V. 19. P. 547–550.

Lipman P.W. Cenozoic volcanism in the Western United States: implications for continental tectonic // *Continental tectonics*. Washington: National Academy of Sciences, 1980. P. 161–174.

Machel P., Humler E. High mantle temperature during Cretaceous avalanche // *Earth Planet Sci. Letters*. 2003. Vol. 208. P. 125–133.

Moyen J.-F., Paquette J.-L., Ionov D.A., Gannoun A., Korsakov A.V., Golovin A.V., Moine B.N. Paleoproterozoic rejuvenation and replacement of Archaean lithosphere: Evidence from zircon U–Pb dating and Hf isotopes in crustal xenoliths at Udachnaya, Siberian craton // *Earth and Planetary Science Letters*. 2017. Vol. 457. P. 149–159.

Næraa T., Scherste A., Rosing M.T., Kemp A.I.S., Hoffmann J.E., Kokfelt T.F., Whitehouse M.J. Hafnium isotope evidence for a transition in the dynamics of continental growth 3.2 Gyr ago // 2012. *Nature*. Vol. 485: 627. doi: 10.1038/nature11140

Pearson D.G., Parman S.W., Nowell G.M. A link between large mantle melting events and continent growth seen in osmium isotopes // *Nature*. 2007. Vol. 449: 202.

Pearson D.G., Snyder G.A., Shirey S.B., Taylor L.A., Carlson R.W., Sobolev N.V. Archaean Re–Os age for Siberian eclogites and constraints on Archaean tectonics // *Nature*. 1995. Vol. 374. P. 711–713.

Pollat A., Kerrich R. Magnesian andesites, Nb-enriched basalt-andesites, and adakites from late-Archean 2.7 Ga Wawa greenstone belts, Superior Province, Canada: implications for late Archean subduction zone petrogenesis processes // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2001. Vol. 141. P. 36–52.

Rasskazov S.V., Brandt S.B., Brandt I.S. Radiogenic isotopes in geologic processes. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer, 2010. 306 p. doi:10.1007/978-90-481-2999-7

Rasskazov S., Chuvashova I., Yasnygina T., Saranina E. Mantle evolution of Asia inferred from Pb isotopic signatures of sources for Late Phanerozoic volcanic rocks // *Minerals* 2020. Vol. 10, No. 9: 739; doi:10.3390/min10090739

Rudnick R.L. Earth's continental crust / W.M. White (ed.), *Encyclopedia of Geochemistry*, Springer International Publishing AG 2017. doi: 10.1007/978-3-319-39193-9_277-1

Taylor L.A., Anand M. Diamonds: time capsules from the Siberian Mantle // *Chemie der Erde*. 2004. Vol. 64. P. 1–74.

Taylor S.R., McLennan S.M. The continental crust: its composition and evolution. Oxford–London–Edinburgh–Boston–Palo Alto–Melbourne: Blackwell Scientific Publications, 1985. 312 p.

Tilton G.R. Volume diffusion as a mechanism for discordant lead ages // *J. Geophys. Res.* 1960. Vol. 65. P. 2933–2945.

White W.M. Isotope geochemistry. *Geol.* 656. 2000. 281 p.

Wittig N., Webb M., Pearson D.G., Dale C.W., Ottley C.J., Hutchison M., Jensen S.M., Luguët A. Formation of the North Atlantic Craton: Timing and mechanisms constrained from Re–Os isotope and PGE data of peridotite xenoliths from S.W. Greenland // *Chem Geol.* 2010. Vol. 276. P. 166–187.

References

Ailow Yu., Rasskazov S.V., Yasnygina T.A., Chuvashova I.S. Finding of Fe–Si inclusions in deep nodules from trachybasalts of Karyer volcano (Tunka Valley of the Baikal Rift System) and its significance for understanding the origin of ferruginous quartzites of the Great Oxidation Event // XIII All-Russian Petrographic Meeting (with the participation of foreign scientists) “Petrology and Geodynamics of Geological Processes”. September 6–13. Irkutsk: IGC SB RAS and IZK SB RAS, 2021. P. 18–23.

Alibert C., Michard A., Albarede F. Isotope and trace element geochemistry of Colorado Plateau volcanics // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1986. V. 50. P. 2735–2750.

Anand R., Balakrishnan S. Pb, Sr and Nd isotope systematics of metavolcanic rocks of the Hutti

greenstone belt, Eastern Dharwar craton: Constraints on age, duration of volcanism and evolution of mantle sources during Late Archean // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2010. V. 39. P. 1–11

Belousova E.A., Kostitsyn Y.A., Griffin W.L., Begg G.C., O'Reilly S.Y., Pearson N.J. The growth of the continental crust: constraints from zircon Hf-isotope data // *Lithos*. 2010. Vol. 119. P. 457–466. doi:10.1016/j.lithos.2010.07.024

Chuvashova I.S., Rasskazov S.V. The latest geodynamic stage of Asia in the context of Earth's evolution // *Geology and Environment*. 2025. Vol. 5, No. 4. P. 7–49. doi: 10.26516/2541-9641.2025.4.7.

Chuvashova I.S., Rasskazov S.V., Saranina E.V. ^{207}Pb – ^{206}Pb age of sources of Late Cenozoic volcanic rocks of the crust-mantle transition in relation to the age of ophiolites and ancient blocks exposed on the surface of the crust: transect Kitoi–Baydrag of the Baikal-Mongolian region // *Geology and Environment*. 2022. Vol. 2, No. 2. P. 61–90. doi: 10.26516/2541-9641.2022.2.61

Condie K.C., Aster R.C. Zircon age episodicity and growth of continental crust // *EOS*. Vol. 90, No. 41, 13, 2009. P. 364.

Condie K.C., O'Neill C., Aster R.C. Evidence and implications for a widespread magmatic shutdown for 250 My on Earth // *Earth and Planetary Science Letters*. 2009. Vol. 282. P. 294–298.

Doucet L.S., Ionov D.A., Golovin A.V. Paleoproterozoic formation age for the Siberian cratonic mantle: Hf and Nd isotope data on refractory peridotite xenoliths from the Udachnaya kimberlite // *Chemical Geology*. 2015. Vol. 391. P. 42–55. doi: 10.1016/j.chemgeo.2014.10.018

Geyh M.A., Schleicher H. Absolute age determination. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1990. 503 p.

Glebovitsky V.A., Nikitina L.P., Saltykova A.K., Pushkarev Yu.D., Ovchinnikov N.O., Babushkina M.S., Ashchepkov I.V. Thermal and chemical heterogeneity of the upper mantle of the Baikal-Mongolian region // *Petrology*. 2007. Vol. 15, No. 1. P. 61–92.

Herzberg C., Asimow P.D., Arndt N., Niu Y., Leshner C.M., Fitton J.G., Cheddle M.J., Saunders A.D. Temperatures in ambient mantle and plumes: Constraints from basalts, picrites, and komatiites // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2007. Vol. 8: Q02006. doi:10.1029/2006GC001390.

Hofmann A.W. Mantle geochemistry: the message from oceanic volcanism // *Nature*. 1997. Vol. 385. P. 219–229.

Ionov D.A., Carlson R.W., Doucet L.S., Golovin A.V., Oleinikov O.B. The age and history of the lithospheric mantle of the Siberian craton: Re–Os and PGE study of peridotite xenoliths from the Obnazhennaya kimberlite // *Earth and Planetary Science Letters*. 2015. Vol. 428. P. 108–119. doi: 10.1016/j.epsl.2015.07.007

Jacob D.E., Foley S.F. Evidence for Archean ocean crust with low high field strength element signature from diamondiferous eclogite xenoliths // *Lithos*. 1999. Vol. 48. P. 317–336.

Larson R.L. Latest pulse of Earth: Evidence for a mid-Cretaceous superplume // *Geology*. 1991. V. 19. P. 547–550.

Levitsky I.V., Levitsky V.I., Efremov S.V. Petrology and geochemistry of basement rocks of the Gargan Block (Eastern Sayan) // *Bulletin of the Siberian Branch. Earth Sciences Series of the Russian Academy of Natural Sciences*. 2014. No. 4 (47). P. 43–55.

Lipman P.W. Cenozoic volcanism in the Western United States: implications for continental tectonic // *Continental tectonics*. Washington: National Academy of Sciences, 1980. P. 161–174.

Machel P., Humler E. High mantle temperature during Cretaceous avalanche // *Earth Planet Sci. Letters*. 2003. Vol. 208. P. 125–133.

Moyen J.-F., Paquette J.-L., Ionov D.A., Gannoun A., Korsakov A.V., Golovin A.V., Moine B.N. Paleoproterozoic rejuvenation and replacement of Archean lithosphere: Evidence from zircon U–Pb dating and Hf isotopes in crustal xenoliths at Udachnaya, Siberian craton // *Earth and Planetary Science Letters*. 2017. Vol. 457. P. 149–159.

Næraa T., Scherste A., Rosing M.T., Kemp A.I.S., Hoffmann J.E., Kokfelt T.F., Whitehouse M.J. Hafnium isotope evidence for a transition in the dynamics of continental growth 3.2 Gyr ago // *Nature*. 2012. Vol. 485: 627. doi: 10.1038/nature11140

Pearson D.G., Parman S.W., Nowell G.M. A link between large mantle melting events and continent growth seen in osmium isotopes // *Nature*. 2007. Vol. 449: 202.

Pearson D.G., Snyder G.A., Shirey S.B., Taylor L.A., Carlson R.W., Sobolev N.V. Archean Re–Os age for Siberian eclogites and constraints on Archean tectonics // *Nature*. 1995. Vol. 374. P. 711–713.

Pollat A., Kerrich R. Magnesian andesites, Nb-enriched basalt-andesites, and adakites from late-Archean 2.7 Ga Wawa greenstone belts, Superior Province, Canada: implications for late Archean subduction zone petrogenesis processes // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2001. Vol. 141. P. 36–52.

Rasskazov S.V., Ailow Yu., Chuvashova I.S., Yasnygina T.A. Relationship between petrological core-mantle transition and the seismic Moho discontinuity below granulite terranes: evidence on trans-formation of a root part beneath the eastern Tunka block in deep-seated nodules from late Cenozoic volcanic rocks // *Geology and Environment*. 2022. Vol. 2, No. 2. P. 91–127. doi: 10.26516/2541-9641.2022.2.91)

Rasskazov S.V., Brandt S.B., Brandt I.S. Radiogenic isotopes in geologic processes. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer, 2010. 306 p. doi:10.1007/978-90-481-2999-7

Rasskazov S., Chuvashova I., Yasnygina T., Saranina E. Mantle evolution of Asia inferred from Pb isotopic signatures of sources for Late Phanerozoic volcanic rocks // Minerals 2020a. Vol. 10, No. 9: 739; doi:10.3390/min10090739

Rasskazov S.V., Menshagin Yu.V., Yasnygina T.A., Ilyasova A.M., Saranina E.V., Skopintsev V.G. Khushagol polychronic massif: heterogeneity of sources for Paleozoic alkaline syenites and granites in the Eastern Sayan, Southern Siberia // Lithosphere. 2013. No. 4. P. 88–109.

Rasskazov S.V., Yasnygina T.A., Chuvashova I.S., Saranina E.V., Ilyasova A.M., Skopintsev V.G. The Gargan-Type continental tectonosphere: Pb-isotope age estimates for events of the early, middle, and late geodynamic epochs of the Earth in layers of outer shell, crust-mantle transition, and lithospheric mantle // Geology and Environment. 2024b. Vol. 4, No. 3. P. 7–32. doi: 10.26516/2541-9641.2024.3.7)

Rudnick R.L. Earth's continental crust / W.M. White (ed.), Encyclopedia of Geochemistry, Springer International Publishing AG 2017. doi: 10.1007/978-3-319-39193-9_277-1

Tatsumoto, M. (1988). U, Th and Pb abundances in Hawaiian xenoliths. Conf. Origin of the Earth. Lunar & Planetary Institute, pp. 89–90.

Taylor L.A., Anand M. Diamonds: time capsules from the Siberian Mantle // Chemie der Erde. 2004. Vol. 64. P. 1–74.

Taylor S.R., McLennan S.M. The continental crust: its composition and evolution. Oxford–London–Edinburgh–Boston–Palo Alto–Melbourne: Blackwell Scientific Publications, 1985. 312 p.

Tilton G.R. Volume diffusion as a mechanism for discordant lead ages // J. Geophys. Res. 1960. Vol. 65. P. 2933–2945.

Turkina O.M., Bibikova E.V., Nozhkin A.D. Stages and geodynamic settings of Early Proterozoic granite formation on the southwestern margin of the Siberian craton // Doklady Earth Sciences. 2003. Vol. 389, No. 2. P. 159–163.

Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I., Kovach V.P. et al. Nd-Isotope systematics of crustal igneous protoliths of Western Transbaikalia and the problem of Riphean crust formation in Central Asia // Geotectonics. 1999. No. 4. P. 3–20.

White W.M. Isotope geochemistry. Geol. 656. 2000. 281 p.

Wittig N., Webb M., Pearson D.G., Dale C.W., Ottley C.J., Hutchison M., Jensen S.M., Luguet A. Formation of the North Atlantic Craton: Timing and mechanisms constrained from Re–Os isotope and PGE data of peridotite xenoliths from S.W. Greenland // Chem Geol. 2010. Vol. 276. P. 166–187.

Рассказов Сергей Васильевич,

доктор геолого-минералогических наук, профессор,

664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3,

Иркутский государственный университет, геологический факультет,

заведующий кафедрой динамической геологии

664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,

Институт земной коры СО РАН,

заведующий лабораторией изотопии и геохронологии,

тел.: (3952) 51–16–59,

email: rassk@crust.irk.ru

Rasskazov Sergei Vasilevich,

doctor of geological and mineralogical sciences, professor,

664003 Irkutsk, st. Lenina, 3,

Irkutsk State University, Faculty of Geology,

Head of Dynamic Geology Char,

664033 Irkutsk, st. Lermontova, 128,

Institute of the Earth's Crust SB RAS,

Head of the Laboratory for Isotopic and Geochronological Studies,

tel.: (3952) 51–16–59,

email: rassk@crust.irk.ru