

УДК 550.93

**ВОЗРАСТ И ЭВОЛЮЦИЯ ЛИТОСФЕРНОЙ МАНТИИ
ВОСТОЧНО-АНТАРКТИЧЕСКОГО КРАТОНА:
ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ ОСМИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
ЭЛЕМЕНТОВ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ В КСЕНОЛИТАХ
ШПИНЕЛЕВЫХ ЛЕРЦОЛИТОВ**

**Р. Ш. Крымский^{1,*}, А. В. Антонов¹, Б. В. Беляцкий¹,
Н. М. Сушевская², С. А. Сергеев^{1,3}**

Представлено академиком РАН А.В. Соболевым 30.12.2017 г.

Поступило 31.01.2017 г.

Изучены мантийные ксенолиты лерцолитового состава из мезозойских щелочно-ультраосновных диатрем оазиса Джетти, которые представляют разрез мантии Восточно-Антарктического кратона до глубин 60–80 км. Изотопный состав Os этих нодулей свидетельствует о начале формирования литосферной мантии 2400 млн лет назад, а отсутствие следов раннеархейской указывает на частичный распад литосферы на конвергентной границе плит в позднем архее, или на термальную эрозию архейской литосферы под воздействием глубинного плюма в мезозойское время при рифтогенезе.

Ключевые слова: литосферная мантия, мантийные нодули, рений-осмиевая изотопная систематика, ПГЭ, Восточно-Антарктический кратон.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524856726-731>

Re–Os-изотопная система мантийных ксенолитов в силу своих геохимических свойств занимает особое место в расшифровке мантийных процессов и оценке возраста мантийного протолита (гарцбургита) [1, 2]. При плавлении мантийного вещества Re проявляет себя как совместимый с базальтовым расплавом элемент, тогда как Os ведёт себя несовместимым и преимущественно накапливается в реститовом мантийном перидотите. Высокие содержания Os в мантии позволяют сохранить его первичный изотопный состав практически без изменений. С помощью Re–Os-изотопной системы было доказано существование архейской литосферной мантии под докембрийскими кратонами, синхронность основных этапов формирования и эволюции верхней мантии и коры, а также обнаружена эрозия древней сублитосферной мантии [2–5]. Содержание и соотношение элементов платиновой группы (ЭПГ) Os, Ir, Ru, Rh, Pt и Pd, их тугоплавкость и различная чувствительность к изменению окислительно-восстановительных условий, а также резко выраженные

сидерофильные и халькофильные свойства позволяют охарактеризовать геохимические процессы в мантии, не доступные для изучения с помощью других групп элементов-индикаторов [2–4].

Цель данной работы — установить возраст формирования мантийного субстрата в районе крупной региональной рифтовой системы ледника Ламберта—Эймери (восточная Антарктида). Для этого мы изучили состав ЭПГ и Re–Os-изотопную систематику (см. детали методики [6] и подписи под табл. 1) мантийных ксенолитов из мезозойских щелочно-ультраосновных тел дайково-диатремового комплекса оазиса Джетти в северной части ледника Ламберта [7]. Минералого-петрологическое изучение ксенолитов позволило выделить как минимум четыре последовательных процесса, связанных с эволюцией мантии: первичное обеднение базитовыми компонентами в результате частичного плавления мантии и формирование реститового перидотита; мантийный метасоматоз при взаимодействии с поднимающимися расплавами в предрифтовую стадию; деплетация и вторичное обогащение (рефертилизация) при взаимодействии с астеносферным плюмом [8–10].

Образцы изученных мантийных ксенолитов представляют собой разновидности шпинелевых лерцолитов, наиболее часто встречаемые в щелочно-ультраосновном теле “Южное” оазиса Джетти [8]: кли-

¹ *Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, Санкт-Петербург*

² *Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской Академии наук, Москва*

³ *Институт наук о Земле, Санкт-Петербург*

*E-mail: robert_krymsky@yahoo.com

Таблица 1. Содержание ЭПГ и Re–Os-изотопная систематика мантийных перидотитов Восточно-Антарктического щита (оазис Джетти)

Образец	Al ₂ O ₃	Yb	¹⁸⁷ Re/ ¹⁸⁸ Os	2s, %	¹⁸⁷ Os/ ¹⁸⁸ Os	2s, abs	Os	Ir	Ru	Pt	Pd	Re	T _{Ma}	T _{RD}
Негомогенный шпинелевый лерцолит (Срх-обогащенный): 72Ol + 14Orx + 12Срх + 2Sp; 1070–1090 °С, 18–20 кбар														
A14	2,53	0,234	0,3582	0,42	0,12454	0,00009	4,287	3,239	7,951	8,806	6,085	0,321	2464±26	694±12
ЮН1	2,40	0,330	0,3194	0,35	0,12372	0,00005	3,896	3,669	8,554	7,416	6,183	0,260	2004±14	805±8
ЮН2	2,31	0,218	0,2712	0,43	0,12230	0,00004	4,553	3,864	8,166	7,917	5,448	0,258	1902±2	998±6
Гомогенный шпинелевый лерцолит (Срх-обедненный): 79Ol + 12,5Orx + 5Срх + 3,5Sp; 1030–1040 °С, 19 кбар														
1/4	1,08	0,057	0,1418	0,44	0,11716	0,00009	3,349	3,085	7,362	6,098	4,217	0,099	2127±17	1690±13
Негомогенный шпинель-гранатовый лерцолит: 62Ol + 19Orx + 13,5Срх + 5Ga + 0,5Sp; 1100–1125 °С, 16–21 кбар														
N4	2,22	0,250	0,3812	0,45	0,12298	0,00007	3,002	3,485	6,340	7,828	3,896	0,239	но	906±9
DK	3,18	0,158	0,3807	0,63	0,12805	0,00011	3,482	3,442	7,517	6,687	6,614	0,277	но	но
Монофракция оливина: 99Ol														
A14	но	но	0,4459	0,70	0,12088	0,00010	0,579	0,366	1,079	1,259	1,130	0,054	но	1190±14
1/4	0,021	но	0,1486	0,38	0,11671	0,00007	1,941	1,762	5,474	3,493	3,326	0,060	2290±11	1750±9
N4	0,064	но	0,0545	0,51	0,11873	0,00013	2,684	0,981	3,133	1,249	2,059	0,031	1313±21	1480±17
DK	0,043	но	0,1221	0,71	0,11114	0,00028	0,045	0,029	3,879	0,647	3,662	0,0011	3255±50	2490±37

Примечание. Содержания ЭПГ и Re приведены в 10⁻⁹ г/г, Al₂O₃ — в мас.%, Yb в 10⁻⁶ г/г, 2s — ошибка определения изотопного состава относительная (¹⁸⁷Re/¹⁸⁸Os) или абсолютная (¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os), T_{Ma} и T_{RD} в млн лет — модельные возрасты, рассчитанные относительно состава верхней примитивной мантии (¹⁸⁷Re/¹⁸⁸Os = 0,3924, ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os = 0,1262 [5]) и рений-обеднённой мантии (¹⁸⁷Re/¹⁸⁸Os = 0,4356, ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os = 0,1296 [12]) соответственно. Но — не определено, для модельных возрастов — отрицательные величины или >5 млрд лет. Минеральный состав (об.%) образцов оценен на основании изучения шлифов в электронном сканирующем микроскопе (Ol — оливин, Orx — ортопироксен, Срх — клинопироксен, Sp — шпинель, Ga — гранат), равновесные температуры и давления приведены по [8]. Содержания Re и ЭПГ в образцах силикатных пород и оливина определялись методом изотопного разбавления в Центре изотопных исследований “ВСЕГЕИ” (С.-Петербург) измерением изотопных отношений в динамическом режиме на одноколлекторном масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой ELEMENT-2. Детали методики описаны в [6]. Общие химические бланки (холостой опыт) аналитической процедуры составляли: Re — 0,15; Os — 0,02; Ru — 0,07; Pd — 0,27; Ir — 0,05 и Pt — 0,06 нг. Для текущего контроля величины холостого загрязнения каждая порция анализов сопровождалась независимым холостым опытом. Воспроизводимость аналитической процедуры составила 1–6% при определении содержания Re и ЭПГ и 0,5–1% при измерении изотопного состава Os на твердофазном мультиколлекторном масс-спектрометре Triton TI (Thermo) в статическом режиме регистрации отрицательно заряженных ионов на коллекторах Фарадея. Коррекция измеренных отношений на приборное масс-фракционирование осуществлялась по отношению ¹⁹²Os/¹⁸⁸Os = 3,092016. Условия анализа контролировались измерением внутрилабораторного стандарта Mainz с ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os = 0,107002 ± 0,000020.

нопироксен (Срх)-обогащённые, клинопироксен (Срх)-обеднённые и шпинель-гранатовые (табл. 1). Сульфиды встречаются как в виде включений в оливине и пироксене (первичные сульфиды Fe–Ni–Cu), так и в виде Cu–Ni-образований неправильной формы на границе зёрен (рис. 1). Последние связаны с метасоматическими преобразованиями мантийного вещества [4, 11].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изученные мантийные лерцолиты оазиса Джетти характеризуются относительно высоким и постоянным содержанием осмия (3,0–4,6) · 10⁻⁹ г/г в сравнении с мантийными перидотитами других архейских кратонов [3]. В среднем (3,82 · 10⁻⁹ г/г) это несколько выше содержания, предполагаемого для неистощённой верхней мантии (3,4 · 10⁻⁹ г/г), но ниже содержания Os в орогенных перидотитах (4,0 · 10⁻⁹ г/г) и мантийных ксенолитах из кимбер-

литов (4,2 · 10⁻⁹ г/г) [12]. Вариации в содержании Re более значительны ((0,1–0,32) · 10⁻⁹ г/г), но в целом сопоставимы с известными оценками для неистощённой верхней мантии или примитивной (0,26 · 10⁻⁹ г/г [12] и 0,35 · 10⁻⁹ г/г [3] соответственно) и коррелируют с химическим составом изученных лерцолитов, что отражает несовместимый характер поведения Re при плавлении мантии. Изотопные отношения ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os лерцолитов оазиса Джетти (0,11716–0,12454) отличаются существенно более радиогенными значениями, чем это типично для мантийных перидотитов архейских кратонов (обычно 0,10–0,11) [3]. В то же время эти величины существенно ниже (за исключением образца DK с ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 0,12805) оценок изотопного состава верхней примитивной мантии и мантии хондритового состава (0,1296 и 0,1262 соответственно [1, 2]).

Вариации Re–Os-изотопного состава шпинелевых лерцолитов оазиса Джетти образуют линейные тренды на диаграммах как в изохронных координа-

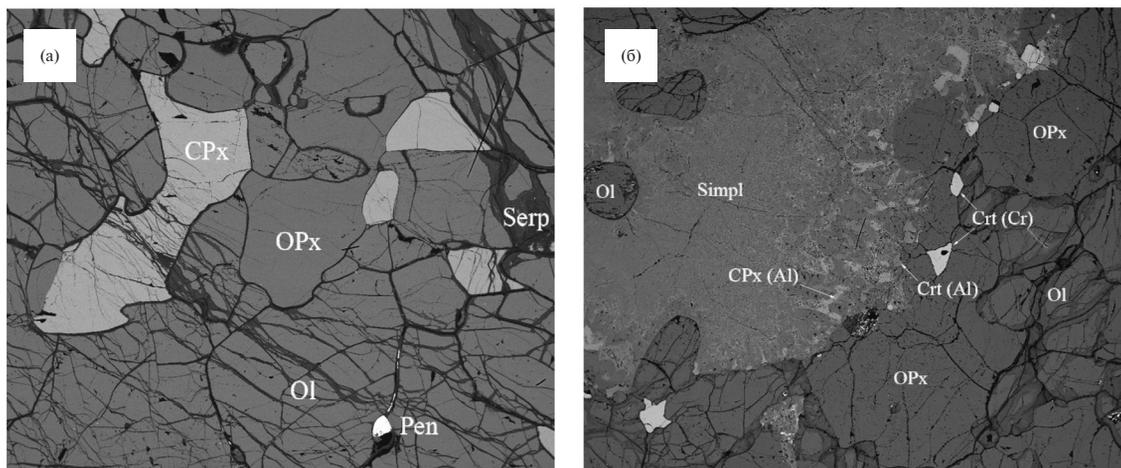


Рис. 1. Микрофотографии в обратно-отражённых электронах СРх-обеднённого гомогенного шпинелевого лерцолита 1/4 (а) и СРх-обогащённого негомогенного шпинель-гранатового лерцолита N4 (б), который характеризуется присутствием крупных зональных кристаллов оливина, пироксена и граната, иногда полностью замещённого келифитовым агрегатом (симплектит), и новообразованных мелких неомласт клинопироксена, Al-шпинели и оливина по границам первичного ортопироксена. Ol — оливин, ОРх — ортопироксен, СРх — клинопироксен, Serp — серпентин по оливину, Pen — пентландит, Crt (Cr, Al) — Cr-шпинель (хромит) и Al-шпинель соответственно, Simpl — симплектит (келифитовый агрегат) по гранату, СРх (Al) — Al-обогащённый клинопироксен по гранату.

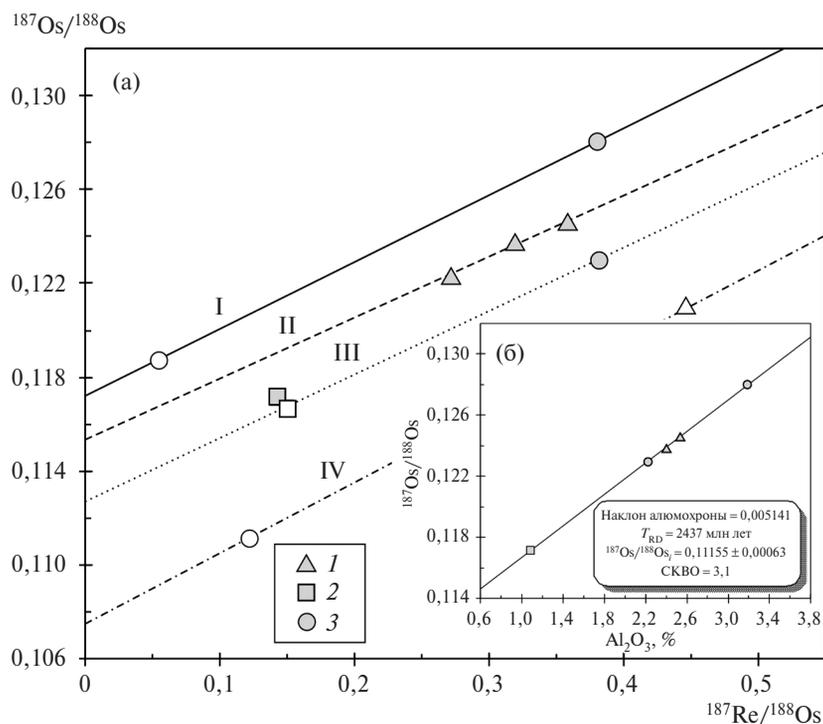


Рис. 2. Re—Os-изохронная диаграмма для ксенолитов мантийных лерцолитов оазиса Джетти (Восточная Антарктида) (а) и алюмохроны (зависимость изотопного состава осмия от степени истощения базитовыми компонентами (Al_2O_3) лерцолитов) (б). 1 — СРх-обогащённый шпинелевый лерцолит; 2 — СРх-обеднённый шпинелевый лерцолит; 3 — негомогенный шпинель-гранатовый лерцолит. Незалитые символы соответствуют изотопному составу оливина, соответствующего ксенолита (табл. 1). Двух- и трёхточечные линейные тренды: II — по валовым пробам СРх-обогащённых шпинелевых лерцолитов: $T = 1539 \pm 100$ млн лет, СКВО = 18, $(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_i = 0,1153$; III — по валовым пробам СРх-обеднённого и шпинель-гранатового лерцолитов: $T = 1596 \pm 27$ млн лет, $(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_i = 0,1153$; по мономинеральным фракциям оливина: I — $T = 1691 \pm 32$ млн лет, $(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_i = 0,1172$; IV — $T = 1779 \pm 55$ млн лет, $(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_i = 0,1075$. Алюмохроны (б) соответствует времени первичной деплетации мантии 2437 ± 50 млн лет назад при $(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_i = 0,1116$.

тах (рис. 2), где наклон трендов для валовых проб соответствует возрасту 1539–1596 млн лет, так и в координатах $Al_2O_3-^{187}Os/^{188}Os$, в которых возраст первичной деплетации при формировании сиалической коры и образовании реститового мантийного гарцбургита определяется как 2437 ± 50 млн лет (СКВО = 3,1). Модельный возраст мантийных нодулей, рассчитанный относительно состава примитивной верхней мантии (PUM [1]), варьируется в пределах 2000–2500 млн лет и также указывает на относительную молодость литосферной мантии данного региона Восточно-Антарктического кратона (табл. 1). Однако в изученном мантийном материале присутствует значительная доля Re ($(0,1-0,32) \cdot 10^{-9}$ г/г), и если она имеет более позднее происхождение, то оценка минимального возраста Re деплетации мантии для образцов неистощённых лерцолитов составит 700–1000 млн лет, а для СРх-обеднённых шпинелевых лерцолитов — 1690–1750 млн лет (T_{RD} , табл. 1). В этом случае появление Re в реститовых мантийных перидотитах может быть связано с процессом вторичного обогащения (рефертилизации), который может маркироваться новообразованием клинопироксена и оливина. Этот процесс проявлен в той или иной мере во всех изученных нами образцах (рис. 1). Время этого процесса можно рассчитать по наклону линейного тренда в Re–Os-изохронных координатах, и в пер-

вом приближении оно может соответствовать 1550 млн лет (средняя величина по трендам II и III, рис. 2). Отсутствие модельных датировок древнее 2500 млн лет для изученных мантийных ксенолитов может служить указанием на отсутствие архейской мантии комплиментарной в данном регионе ранне-архейской коре Восточно-Антарктического щита. Альтернативным объяснением может быть и отсутствие прямого соответствия корообразующих процессов и этапов преобразования литосферной мантии.

Необходимо отметить, что вариации состава ЭПГ изученных ксенолитов (рис. 3) находятся в пределах характеристик наименее обеднённых мантийных ксенолитов из других докембрийских кратонов [3, 5, 12]. При этом СРх-обогащённые шпинелевые лерцолиты (ЮН1, ЮН2, А14) наиболее близки модельному составу ЭПГ примитивной верхней мантии, рассчитанному по средним составам массивов орогенных лерцолитов [3]. Более того, отмечается закономерное изменение спектра ЭПГ при сравнении состава истощённых СРх-обеднённых шпинелевых лерцолитов и неистощённых шпинель-гранатовых и шпинелевых лерцолитов (Pt_N/Ru_N от 0,5 до 0,9 соответственно), что указывает на образование истощённых лерцолитов в результате выплавления базитового расплава и мантийной дифференциации вещества. А сходство характера распределения ЭПГ

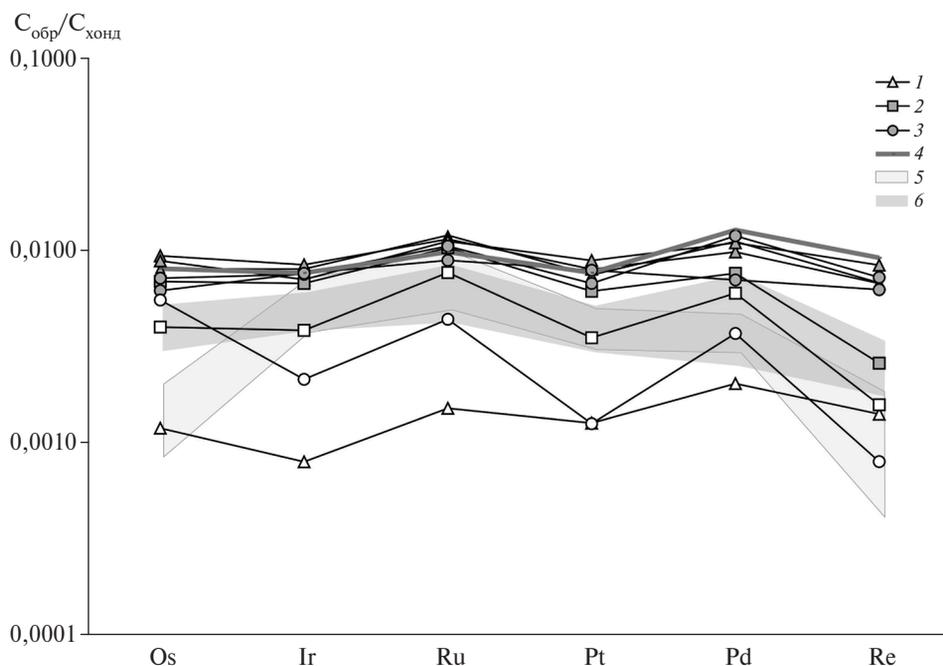


Рис. 3. Нормированное распределение ЭПГ и Re в мантийных перидотитах оазиса Джетти. 1 — СРх-обогащённый шпинелевый лерцолит; 2 — СРх-обеднённый шпинелевый лерцолит; 3 — негомогенный шпинель-гранатовый лерцолит; незалитые символы соответствуют составу оливина; 4 — модельный состав верхней примитивной мантии (PUM [1]); 5 — вариации составов ЭПГ мантийных ксенолитов лерцолитового состава Витима [5]; 6 — состав ЭПГ лерцолитовых ксенолитов Восточно-Африканского рифта [12].

валовой пробы и оливина из образца СРх-обеднённого лерцолита 1/4 (рис. 3, табл. 1) свидетельствует об отсутствии влияния сульфидов и метасоматических включений на состав ЭПГ [3, 4, 11], что позволяет предполагать первичный характер наблюдаемого распределения ЭПГ и присутствие вещества примитивной верхней мантии в данном регионе Восточно-Антарктического кратона. Относительно малая глубина источника (60–80 км) и большая флюидонасыщенность мезозойских щелочных пикритов обеспечили быструю доставку мантийных ксенолитов к поверхности и отсутствие метасоматического воздействия щелочных расплавов на них [8, 10].

Наименее фракционированный характер распределения ЭПГ и минимальный возраст Re деплетации 900 млн лет имеет образец шпинель-гранатового лерцолита N4 (рис. 3, табл. 1). Особенности минерального и химического составов этого ксенолита свидетельствуют о том, что изначально этот образец представлял наиболее глубинную опробованную часть литосферной мантии региона (21,5 кбар, 1130 °С), образование которой могло происходить во время коллизии Антарктического и Индийских щитов [8, 10]. Масштабность этого события отражается не только в повсеместном проявлении коллизионного магматизма гренвильского возраста (1200–1000 млн лет назад) в северной части гор Принс-Чарльз и заливе Прюдс, но и регионально проявленном метаморфизме высоких ступеней [7, 9], что говорит о реорганизации всей литосферы региона во время этого события. Косвенным подтверждением возможности формирования литосферной мантии на этом рубеже являются мантийные Sm–Nd-изохроны (910–1180 млн лет), полученные при изучении ксенолитов из этих же щелочно-ультраосновных тел [13]. Присутствие избыточного количества Re в этом образце (табл. 1, максимальная величина отношения $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$) может быть связано не только с новообразованием необласт клинопироксена и оливина (рис. 2), но и с процессом распада и замещения граната келифитовой ассоциацией при переуравновешивании шпинель-гранатового лерцолита в условиях пониженных давлений и температур [8]. Подвижность Os в этих условиях неизвестна, но отсутствие видимых новообразований сульфидов (рис. 1) и наиболее низкие концентрации осмия по сравнению с остальными изученными образцами позволяют предполагать отсутствие привноса радиогенного Os и, как следствие, сохранность первичных изотопных меток и распределения ЭПГ для данного ксенолита.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наиболее важным результатом проведённого исследования является свидетельство рений-осмиевой изотопной систематики мантийных нодулей о начале формирования литосферной мантии в данном регионе Восточно-Антарктического кратона не позднее 2400 млн лет назад. Нефракционированный характер распределения ЭПГ ксенолитов мантийных перидотитов оазиса Джетти и определённое сходство с модельным распределением ЭПГ для верхней примитивной мантии указывают на возможность сохранения первичных геохимических характеристик. Отсутствие следов более древней литосферной мантии, комплементарной раннеархейской континентальной коры, может являться результатом частичной деляминации литосферы на конвергентной границе плит в позднем архее либо на термальную эрозию глубинной архейской литосферы под воздействием восходящего плюма в мезозойское время при рифтогенезе [10].

Благодарности. Образцы антарктических ксенолитов для исследования предоставлены участниками САЭ А.В. Андрониковым и А.А. Лайбой, которым авторы выражают свою признательность. Авторы хотели бы выразить отдельную благодарность доктору Герхарду Брюгманну (Institut fuer Geowissenschaften, University of Mainz, Germany) за методическую помощь в освоении тонкостей метода изотопного анализа ЭПГ и Re–Os-систематики, а также предоставленный стандарт Mainz, без использования которого невозможно было бы получить столь точные и надёжные результаты.

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 15–05–02086),

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Meisel Th., Walker R.J., Irving A.J., Lorand J.P. // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 2001. V. 65. P. 1311–1323.
2. Carlson R.W. // *Lithos*. 2005. V. 82. P. 249–272.
3. Becker H., Horan M.F., Walker R.J., Gao S., Lorand J.P., Rudnick R.L. // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 2006. V. 70. P. 4528–4550.
4. Lorand J.P., Luguet A., Alard O. // *Lithos*. 2013. V. 164–167. P. 2–21.
5. Ionov D.A., Shirey S.B., Weiss D., Brugmann G. // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2006. V. 241. P. 47–64.
6. Крымский П.Ш., Сергеев Д.С., Брюгманн Г.Э., Шевченко С.С., Антонов А.В., Беяцкий Б.В., Сергеев С.А. // *Регион. геология и металлогения*. 2011. № 46. С. 51–60.

7. Михальский Е.В., Лайба А.А., Сурина Н.П. // Петрология. 1998. Т. 6. № 5. С. 512–527.
8. Foley S.F., Andronikov A.V., Jacob D.E., Melzer S. // Geochim. et Cosmochim. Acta. 2006. V. 70. P. 3096–3120.
9. Беляцкий Б.В., Андроников А.В. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2009. Т. 82 (2). С. 118–138.
10. Foley S.F. // Nature Geosci. 2008. V. 1. P. 503–510.
11. Ferraris C., Lorand J.-P. // Earth and Planet. Sci. Lett. 2008. V. 276. P. 167–174.
12. Reisberg L., Lorand J.-P., Bedini R.M. // Chem. Geol. 2004. V. 208. P. 119–140.
13. Andronikov A.V., Beliatsky B.V. // Terra Antarctica. 1995. V. 2. P. 103–110.

**THE AGE AND EVOLUTION OF THE LITHOSPHERIC MANTLE
IN THE EAST ANTARCTIC CRATON: OSMIUM ISOTOPE COMPOSITION
AND THE DISTRIBUTION OF THE PLATINUM GROUP ELEMENTS
IN SPINEL LHERZOLITE NODULES**

R. Sh. Krymsky¹, A. V. Antonov¹, B. V. Belyatsky², N. M. Sushchevskaya², S. A. Sergeev^{1,3}

¹*A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI), Saint-Petersburg, Russian Federation*

²*V.I. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation*

³*Institute of Earth Sciences, Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russian Federation*

Presented by Academician of the RAS A.V. Sobolev December 30, 2019

Received January 31, 2017

The mantle xenoliths of lherzolite composition from Mesozoic alkaline–ultrabasic diatremes of the Jetty Oasis were studied. The studied xenoliths represent the mantle section of the East Antarctic Craton down to depths of 60–80 km. The osmium isotope composition of these nodules testifies to the beginning of the formation of the lithospheric mantle in the considered region at about 2400 Ma. The absence of any signs of Early Archean lithosphere points either to partial destruction of the lithosphere at the convergent boundary of the plates in the Late Archean or to thermal erosion of the Archean lithosphere under the deep-seated plume impact at the Mesozoic time during rift propagation.

Keywords: lithospheric mantle, mantle nodules, Re–Os isotope systematics, PGE, East-Antarctic Craton.