

Sr, Nd, Pb и Os ИЗОТОПНАЯ СИСТЕМАТИКА МЕЗОЗОЙСКИХ БАЗАЛЬТОВ АНТАРКТИДЫ, СВЯЗАННЫХ С ПЛЮМАМИ КАРУ-МОД И КЕРГЕЛЕН, КАК ОТРАЖЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ МАГМ И ИХ ИСТОЧНИКОВ

© 2023 г. Н. М. Сушевская^{a, *}, Б. В. Беляцкий^{b, ***},
Г. Л. Лейченко^{c, d, ****}, Р. Ш. Крымский^{b, **}

^aИнститут геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, ул. Косыгина, 19, Москва, 119991 Россия

^bВсероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, ФГБУ “ВСЕГЕИ”,
Средний пр., 74, Санкт-Петербург, 199106 Россия

^cСанкт-Петербургский государственный университет,
Университетская наб., 7–9, Санкт-Петербург, 199034 Россия

^dВсероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов
Мирового океана им. И.С. Грамберга, Английский пр., 1, Санкт-Петербург, 190121 Россия

*e-mail: nadyas@geokhi.ru

**e-mail: Robert_Krymsky@vsegei.ru

***e-mail: bbelyatsky@mail.ru

****e-mail: german_l@mail.ru

Поступила в редакцию 15.12.2021 г.

После доработки 01.06.2022 г.

Принята к публикации 08.06.2022 г.

На основании изучения Re–Os изотопной системы мезозойских магм Восточной Антарктиды и сопоставления с литературными данными по Sr–Nd–Pb–Os изотопной систематике базальтов выявлены главные особенности магматизма Антарктиды, связанного с плюмами Кару–Мод (провинции Земли Королевы Мод (ЗКМ), Кару (южная Африка), и Феррар) и Кергелен (рифтовая зона ледника Ламберта). Показано, что источником расплавов, производных плюма Кару–Мод 180 млн лет назад, могла быть обогащенная литосферная мантия. Вариации значения изотопного отношения $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ в пределах: от 0.1242 до 0.1426 характеризуют практически все типы расплавов провинций Кару и ЗКМ: как высоко- и низко-титанистые магмы, так и магнезиальные высоко-железистые, связанные с плавлением мантийных пироксенитов. Это наблюдение согласуется с ранее высказанным предположением о том, что магмы, производные пироксенитовой мантии начального этапа воздействия плюма, представляли собой расплавы глубинных фрагментов литосферы древнего палеоконтинента Гондвана, захваченных плюмом. При этом гетерогенность мантии, фиксируемая Nd–Pb–Sr изотопными составами базальтов, не проявляется в закономерных вариациях Re–Os изотопной системы. Изотопный состав осмия источника базальтов провинции Феррар по сравнению с источником базитов провинций Кару и ЗКМ характеризуется более широким интервалом вариаций значений отношения $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$: от 0.10 до 0.31, и пониженным содержанием осмия, при ограниченных вариациях других изотопных систем, указывая на примесь вещества обогащенного источника типа ЕМ-II. Это согласуется с предположением о субдукционном воздействии на мантию западной окраины Антарктиды (Сушевская и др., 2022). Для ультраосновных пикритовых магм района ледника Ламберта характерен радиогенный изотопный состав осмия: величина отношения $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ варьирует от 0.1582 до 0.2388. Источником этих магм могло быть вещество древней деплетированной мантии, которое впоследствии претерпело мантийный метасоматоз в ходе многостадийного взаимодействия с насыщенными флюидами расплавами. Пикритовые расплавы палеорифтовой зоны ледника Ламберта близки к источнику магм провинций Кару и ЗКМ по Sr–Nd изотопной систематике, но отличаются более радиогенным составом свинца.

Ключевые слова: изотопный состав Os, мезозойские магмы Восточной Антарктиды, плюм Кару–Мод, Кергелен-плюм

DOI: 10.31857/S0016752523010077, **EDN:** IAATYE

ВВЕДЕНИЕ

Парадигма мантийных плюмов, возникшая во второй половине двадцатого века на основании модельных геофизических построений и интерпретаций, соответствующих термических и плотностных аномалий в глубинной мантии, и с течением времени превратившаяся в доминирующую в современных геодинамических реконструкциях (Morgan, 1971; Burke, Dewey, 1973; Campbell, Griffiths, 1990; Hill et al., 1992; White, McKenzie, 1995; Storey, 1995; Dalziel et al., 2000; Jellinek, Manga, 2004; Li, Zhong, 2009; Kranendonk, 2010; Burke, 2011; Buiter, Torsvik, 2014; Gerya et al., 2015; Koptev et al., 2016; Heron, 2019; Baes et al., 2020; Hinsbergen et al., 2021; и др.), тем не менее, по-прежнему вызывает много споров и дискуссий (Kerr et al., 1995; Anderson, 2000; Foulger et al., 2005; Kerr, 2006, 2013; McNutt, 2006; Sleep, 1990, 2006; Campbell, Kerr, 2007; Ernst, 2007; Hofmann, Hart, 2007; Foulger, 2010; Niu, 2021; Lustrino et al., 2022; Niu, 2022). Однако для объяснения происхождения крупных изверженных провинций мира использование этой парадигмы представляется оправданным и позволяет связать глубинный разогрев мантии с синхронным проявлением магматизма на большой площади, а также с большим объемом *тепло-массо-переноса*, выраженном в обилии вулканических и интрузивных производных (Richards et al., 1989; Campbell, Griffiths, 1990; Carlson, 1991; Arndt, Christensen, 1992; Kent et al., 1992; Farnetani, Richards, 1994; Ernst, Buchanan, 2001, 2002, 2003; Segev, 2002; Campbell, 2005, 2007; Saunders et al., 2005; Korenaga, 2008; Lohmann et al., 2009; Herzberg et al., 2007; Hastie, Kerr, 2010; Sobolev et al., 2011; Austermann et al., 2014; Ernst et al., 2019; Fletcher et al., 2020 и др.).¹

Мантийные плюмы существенно повлияли на развитие Земли и во многом определили как геодинамическое развитие тектонических провинций, так и характер магматизма (White, McKenzie, 1989; Dalziel et al., 2000; Burke et al., 2008; Hassan et al., 2015; Пучков, 2009; Соболев и др., 2009; и др.). Особое место среди плюмов, сформировавших крупные изверженные провинции, занимает юрский плюм Кару–Мод, который внедрился ~180 млн лет назад в литосферу центральной части Гондваны. Возможно, именно воздействие



Рис. 1. Реконструкция палеоконтинента Гондвана на 130 млн лет назад и области проявления мантийных плюмов на поверхности континентов и раскрывающихся океанов. 1 – континенты, 2 – континентальные окраины и погруженные плато, 3 – зона субдукции, 4 – область проявления мантийных плюмов (указано название плюма и время начала магматизма в млн лет), 5 – центральная, наиболее горячая, часть плюма Кару–Мод, характеризующаяся распространением железистых магнезиальных расплавов, производных пикрокситовой мантии (Сушевская и др., 2019).

этого плюма привело к деструкции палеоконтинента, и в дальнейшем оказывало существенное воздействие на развитие Индийского и Атлантического океанов вплоть до настоящего времени (Лейченков и др., 2003; Torsvik et al., 2016). Анализ геолого-геофизических данных по Антарктике и Южному океану позволяет расшифровать механизмы плюмовой тектоники и эволюции мантийных расплавов, характер взаимодействия плюмов с континентальной литосферой и реконструировать условия развития океанических бассейнов от раскола Гондваны до современного спрединга морского дна (Ellam, Cox, 1989; Dalziel et al., 2000; Elliot, Fleming, 2000; Riley et al., 2005, 2020; Torsvik et al., 2006, 2016; Leitchenkov et al., 2008; Сушевская и др., 2009; Лейченков и др., 2003; Меланхолина, Сушевская, 2019; и многие другие). Уникальность плюма Кару–Мод проявилась также и в зональности распространения различных типов магм в пределах южной Африки и восточной Антарктиды относительно предполагаемого центра плюма, схематично отраженной на рис. 1 (Jourdan et al., 2007; Heinonen et al., 2016;

¹ Несмотря на существование противоположных гипотез происхождения крупных изверженных провинций, что часто является следствием неполноты данных глубинного сейсмозондирования и методов обработки (Korenaga et al., 2002; Korenaga, 2011), мы в своих статьях с 2008 г. при изучении магматизма Антарктики используем и развиваем модель глубинного мантийного плюма (Сушевская и др., 2009). За последние годы появились и дополнительные данные, обзор которых приведен в обобщающей статье Е.Н. Меланхолиной (2021), указывающие на определяющую роль мантийных плюмов в образовании крупных магматических провинций.

Ferraccioli et al., 2005; Luttinen, 2018; Меланхолина, Сушевская, 2019).

Плюмовый магматизм в пределах восточной Антарктиды, как считается (Coffin et al., 2002; Kent, 1991; Storey et al., 1992), представлен еще и меловыми базальтоидами повышенной щелочности, распространенными в зоне ледника Ламберта, но его связывают с магматической активностью Кергелен-плюма. Термальное воздействие последнего затронуло обширные районы восточной Индии и западной Австралии 130–110 млн лет назад (Chalapathi Rao et al., 2014; Ghatak, Basu, 2013; Ingle et al., 2002, 2004; Frey et al., 1996; Radhakrishna et al., 2017; Olierook et al., 2017), а сам он, по представлениям авторов настоящей статьи, является производным основного мантийного плюма Кару-Мод (Сушевская и др., 2017, 2018).

При изучении плюмового магматизма часто именно изотопный состав Sr, Nd и Pb базальтовых расплавов позволяет установить геохимические параметры основного мантийного источника, а также наличие в нем вещества, обладающего свойствами обогащенных (ЕМ-I, ЕМ-II, HIMU) или деплетированных (DM) модельных компонент (Hart, 1984; Ellam et al., 1992; Armienti, Longo, 2011). В представленной статье мы остановимся на особенностях изотопного состава плюмовых магм восточной Антарктиды, сравним их с составами синхронных магматитов южной Африки, определим отличительные характеристики и дадим возможную интерпретацию геодинамических условий формирования. Особое внимание при этом будет уделено изотопной систематике осмия ($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$).

Основной целью работы являлось изучение возможности приложения Re–Os изотопной систематики для характеристики источника мезозойских магм в различных провинциях восточной Антарктиды, связанных с магматической активностью плюмов Кару-Мод и Кергелен. Хорошо известно, что изотопный состав осмия ($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$) базальтов позволяет не только установить происхождение мантийного источника (Carlson, 2005; Day, 2013; Lorand et al., 2013), но и определить наличие, даже в незначительном количестве, корового материала в этом источнике (Widom, 2011). Отличие рений-осмиевой изотопной системы от традиционно используемых в изотопно-геохимических исследованиях (главным образом, изотопных систем литофильных элементов) определяется сидерофильными и халькофильными свойствами этих элементов (Shirey, Walker, 1998). В отличие от осмия, который при частичном плавлении мантии преимущественно концентрируется в мантийном рестите, рений является умеренно несовместимым элементом и накапливается в коре, определяя высокоррадиогенный состав осмия коровых пород, что и позволяет использовать изо-

топный состав последнего, как очень чувствительный индикатор процессов корово-мантийного взаимодействия (смешения) (Gannoun et al., 2016).

ОСОБЕННОСТИ МЕЗОЗОЙСКОГО МАГМАТИЗМА АНТАРКТИДЫ И КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИЗУЧЕННЫХ ОБРАЗЦОВ

Долериты Трансантарктических гор (силлы и дайки) образовались в результате распространения магматического материала плюма Кару на расстояние более 5000 км от основной области его проявления вдоль зоны растяжения литосферы, обусловленной тихоокеанской субдукцией (Kyle et al., 1981). Щелочные пикриты ледника Ламберта (в виде штокообразных тел и даек), также как базальты и лампрофиры магматической провинции Раджмахал на территории восточной Индии (Kumar et al., 2003; Ghatak, Basu, 2013), являются производными расплавами плюма Кергелен (Сушевская и др., 2017).

Большая изверженная провинция Феррар, протягивающаяся от Земли Котса через Трансантарктические горы до Новой Зеландии, сформировалась 183–182 млн лет назад, практически одновременно с формированием магматических провинций Кару и Земли Королевы Мод (Kyle et al., 1981; Elliot, Fleming, 2004, 2008, 2018; Hergt et al., 1989, 1991; Mortimer et al., 1995). Геохимические и петрологические исследования показали принципиальное сходство магматических производных различных районов вдоль вытянутой, более чем на 5000 км, провинции Феррар (Сушевская и др., 2022). Феррарские магматиты отличаются от мезозойских базальтов восточной Антарктики и южной Африки более низким содержанием титана и высоким содержанием калия (Сушевская и др., 2022). Состав источников мезозойских магм всех трех регионов (провинция Кару, ЗКМ, Феррар) характеризуется отрицательными Nb и Ta аномалиями. Такими же особенностями обладают и магмы древних (с возрастом 500–1000 млн лет) даек в пределах провинции Феррар, что указывает на существование долгоживущего источника мантийных расплавов, располагавшегося в гондванской литосфере от позднего протерозоя и до мезозоя (Сушевская и др., 2022). Ряд исследователей объясняет формирование протяженной феррарской магматической провинции, процессом древней субдукции океанической плиты под Гондвану (Rapela et al., 2005), с образованием обогащенной летучими мантии при глубинной дегидратации пород океанической коры (Hergt et al., 1991; Molzahn et al., 1996; Choi et al., 2019). Предполагается, что впоследствии, в мезозойское время, эта метасоматизированная мантия претерпела кратковременное плавление (Ivanov et al., 2017). Близость активной границы плит существенно сказывалась на

образовании низко-титанистых обогащенных магм провинции Феррар (Сушевская и др., 2022), но причиной плавления мантии могло быть, как плюмовое воздействие (Luttinen, 2018; Panter, Martin, 2021), так и образование протяженного рифта в задуговой области (Elliot, Fleming, 2021; Panter et al., 2022). Авторы настоящей статьи в качестве модели формирования феррарской трапповой формации (Сушевская и др., 2022) придерживаются ее плюмового происхождения и концепции развития плюма вблизи долгоживущей субдукционной зоны (Betts et al., 2012; Fletcher, Wyman, 2015; Choi et al., 2019; East et al., 2020; Hinsbergen et al., 2021).

Надо подчеркнуть, что сама структура Трансantarктических гор формировалась в течение длительного времени от неопротерозоя до раннего палеозоя при сложных тектонических преобразованиях, связанных с образованием и трансформацией палеоконтинента Родиния в Гондвану. Все главные этапы развития Гондванского континента (формирование осадочных бассейнов, складчатых зон и орогенов), так или иначе, запечатлены в истории ее формирования (Goode, 2020). В раннем девоне формируется активная конвергентная окраина со стороны Тихого палеоокеана (Rapela et al., 2005), а в средней юре интенсивный магматизм в разных частях Трансantarктических гор привел к образованию феррарской изверженной провинции (Elliot, Fleming, 2021). Образцы 31К, 31Н и 69А, габбро-нориты и долериты, были отобраны из даек мезозойского возраста (Duncan et al., 1997) хребта Сан Джонс в районе Сухих Долин на южном окончании Трансantarктических гор, вблизи моря Росса (17 САЭ, Сушевская и др., 2022).

Распространение мелового плюмового магматизма (120–110 млн лет назад) приурочено к центральной части палеозойско-мезозойской рифтовой структуры ледника Ламберта (оазис Джетти, массивы Фишер и Мередит) (Лейченков и др., 2018). Внедрение щелочно-ультраосновных магм в оазисе Джетти маркирует субмеридиональную зону глубинных разрывных нарушений в восточном борту рифта (Андроников, 1987; Лайба и др., 1987; Лейченков и др., 2018). Среди магматических образований, главным образом, развиты высокомагнезиальные щелочные ассоциации, возникшие в результате плавления метасоматизированной континентальной мантии при температуре 1270° и на глубинах 130–140 км (Сушевская и др., 2017, 2018). Аналогичные по составу и возрасту магматические породы описаны в провинции Раджмахал в Индии (Chalapathi Rao et al., 2014). Наши предшествующие исследования показали, что мантийный источник высокомагнезиальных расплавов района ледника Ламберта отличался присутствием карбоната, биотита и летучих. А сами обогащенные щелочно-ультраосновные магмы

близки по характеру распределения литофильных элементов и изотопному составу Nd и Pb (Сушевская и др., 2017). Для анализа Re–Os изотопной системы были выбраны представительные образцы из различных районов ледника Ламберта: образец П-4 представляет собой оливковый меланефелинит из диатремового тела Плоское на юге оазиса Джетти; образец 49113-1 флогопит-оливиновый пикрит массива Мередит из центральной части ледника Ламберта, 34107 карбонатитовый кимберлит массива Фишер из центральной части ледника Ламберта, 34/9-5 – дайка пикритов платформ Каменистая на северном окончании оазиса Джетти (Сушевская и др., 2017).

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ Re, Os И ИЗОТОПНОГО ОТНОШЕНИЯ $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$

Концентрации рения и осмия определяли методом изотопного разбавления в Центре изотопных исследований ФГБУ “ВСЕГЕИ” (Санкт-Петербург). Для анализа использовали реагенты сверхчистой (Merk™) или трехкратной дистилляции лабораторного качества. К навеске истертого образца (2–5 г) в сосуде для разложения из кварцевого стекла объемом 100 мл добавляли 300 мг смешанного изотопного индикатора ^{185}Re – ^{190}Os . После добавления к смеси 3 мл 11N HCl сосуд замораживали при температуре –20°С в течение 30 мин. Разложение пробы производили в кварцевых сосудах в течение 2 ч при температуре 260°С и давлении 140 бар (инертный газ) в микроволновом реакторе высокого давления UltraCLAVE IV (Milestone™).

Сепарация осмия производилась с помощью жидкостной экстракции бромом и микродистилляцией по методике аналогичной описанной ранее (Birck et al., 1997). Оставшийся после экстракции бромом раствор пробы в смеси концентрированных кислот HCl–HNO₃ выпаривался и переводился в раствор 2 N HNO₃ и центрифугировался в 15 мл пробирке. Рений выделялся методом жидкостной экстракции с изоамиловым спиртом, 2 N HNO₃ и водой (Birck et al., 1997).

Измерение изотопного состава и определение концентрации Re производилось на одноколлекторном масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой ИСП-МС ELEMENT-2 (Thermo). Отношение изотопов рения $^{185}\text{Re}/^{187}\text{Re}$ измерялось на умножителе в динамическом режиме при вводе пробы источник масс-спектрометра в виде 3% азотнокислого раствора с помощью кварцевого небулайзера. Для ввода проб в прибор использовался перистaltический насос (4.5 об./мин), а также Ni конуса. Измерения осуществлялись при низком разрешении масс-спектрометра ($\Delta M = 300$). Параметры использованной аргонной плазмы:

Таблица 1. Содержания Re и Os и значения $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ в магмах провинции Феррар и района ледника Ламберта

Компонент	Сухие Долины			ледник Ламберта			
	долина Виктории	долина Виктории	хр. Сент-Джонс	пл. Каменистая	массив Меридит	тело Плоское	массив Фишер
Образец	31К габбро-норит	31Н габбро-норит	69А долерит	34/9-5 пикрит	49113-1-ол. пикрит	П-4 пикрит	34107 пикрит
Re нг/г	0.3089	0.6770	0.1261	1.92	3.022	1.399	3.451
Os нг/г	0.0612	0.0644	0.0335	0.0805	0.0610	0.1976	0.0789
$^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$	24.65	51.85	18.59	117.0	243.6	34.43	214.8
$\pm 2\sigma$, %	0.5	0.5	0.5	1	1	1	1
$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$	0.27364	0.35718	0.36726	0.21886	0.23880	0.15822	0.23351
$\pm 2\sigma$, %	0.25	0.22	0.45	0.34	0.16	0.24	0.53
$\pm 2\sigma$	0.00070	0.00080	0.00165	0.00075	0.00038	0.00039	0.00123
Возраст в млн лет	180	180	180	120	120	120	120
$(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_i$	0.1996	0.2014	0.3114	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.
$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	18.5983	18.5063	18.5787	18.7020	18.5580	18.6210	18.4460
$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	15.6359	15.6304	15.6462	15.5630	15.6180	15.5740	15.6234
$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	38.4135	38.4918	38.3985	39.2270	39.0680	38.8950	39.2921
$(^{87}\text{Sr}/^{88}\text{Sr})_i$	0.7105	0.7105	0.7108	0.7049	0.7058	0.7051	0.7049
$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	0.5122	0.5122	0.5121	0.5126	0.5124	0.5125	0.5124

Примечания. н. о. — не определено.

охлаждающий газ — 15.5 л/мин, газ образца — 1.03 л/мин, дополнительный газ — 1.02 л/мин, мощность плазмы 1031 Ватт. Для коррекции измеряемых изотопных отношений на приборное масс-фракционирование использовался метод “брекетирования” раствором Re стандарта. Результирующая точность измерения изотопных отношений $^{185}\text{Re}/^{187}\text{Re}$ была лучше 0.5%.

Изотопный состав осмия измерялся на твердофазном мультиколлекторном масс-спектрометре высокого разрешения Triton (Thermo) в отрицательно заряженных ионах в статическом режиме на коллекторах Фарадея или в динамическом режиме на ионном счетчике. Для стандартизации условий измерений во время аналитической сессии производилось измерение стандарта LOsST с изотопным отношением $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 0.106913 ± 0.000022 . Выделенная фракция осмия в форме бромидов наносилась на Pt-ленту испарителя совместно с 0.2 мкл эмиттера $\text{Ba}(\text{OH})_2 + \text{NaOH}$. Для повышения эффективности ионизации использовалась установка напуска кислорода ($P = 2 \times 10^{-7}$ бар) в камеру масс-спектрометра при вакууме 7×10^{-8} бар и охлаждение жидким азотом. Температура накала платиновой ленты при измерениях составляла 730–750°C. Измерялись ионные токи оксидов $^{185}\text{ReO}_3$, $^{186}\text{OsO}_3$, $^{187}\text{OsO}_3$, $^{188}\text{OsO}_3$, $^{190}\text{OsO}_3$, и $^{192}\text{OsO}_3$.

Общие химические бланки анализа (холостой опыт) составили: Re — 70 пкг, Os — 1 пкг. Результаты анализа стандарта UB-N (серпентинит): Re 0.2218 ± 0.0064 нг/г, Os 3.65 ± 0.12 нг/г, $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 0.292 ± 0.014 , $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 0.127176 ± 0.000091 хорошо согласуются с литературными данными (Meisel et al., 2003). Результаты изучения изотопного состава Os в базальтах Антарктиды и ранее определенных изотопных отношений Sr, Nd и Pb в них (Сушевская и др., 2018, 2021, 2022) приведены в табл. 1.

СОДЕРЖАНИЕ Re и Os, И ВАРИАЦИИ ОТНОШЕНИЯ $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ В ПОРОДАХ МАГМАТИЧЕСКИХ ПРОВИНЦИЙ АНТАРКТИДЫ

Надо отметить, что опубликованных данных о содержании рения и осмия в породах Антарктиды крайне мало, что связано как с трудоемкостью самой методики анализа, так и с малыми содержаниями этих элементов в базальтах, что приводит к необходимости анализа относительно больших навесок (1–5 г) предварительно гомогенизированного вещества. Нами определен изотопный состав Os и содержания рения и осмия габбро-долеритов южной части Трансантарктических гор (Сухие Долины) и щелочных пикритов района ледника Ламберта. На диаграмме рис. 2 показаны

содержания Re и Os в изученных долеритах из Сухих Долин и щелочно-ультраосновных породах из района ледника Ламберта в сравнении с известным содержанием этих элементов в магмах провинции Феррар (Molzahn et al., 1996; Choi et al., 2019), Кару (Ellam et al., 1992; Heinonen et al., 2014) и Земли Королевы Мод (Heinonen et al., 2010).

Как видно на рис. 2а, магмы провинции Феррар характеризуются относительно низкими концентрациями осмия (от 0.005 до 0.15 нг/г), что на порядок ниже, чем в магмах провинций ЗКМ и Кару (0.1–5 нг/г), при близких вариациях содержания рения (0.1–1 нг/г). Щелочные пикритовые магмы региона ледника Ламберта отличаются повышенными содержаниями рения (1–7 нг/г) и осмия по сравнению с базальтами феррарской провинции. Эти пикритовые магмы характеризуются и повышенными концентрациями летучих и легких литофильных элементов (Сушевская и др., 2017).

При выплавлении мантийных расплавов поведение осмия определяется его совместимостью с мантийными сульфидами и резко выраженной несовместимостью с силикатным расплавом (Brenan, 2008), тогда как Re, умеренно несовместимый, имеет свойства как литофильного, так и халькофильного элемента, и его поведение зависит, как от окислительно-восстановительных условий, так и от содержания серы в образующемся расплаве (Shirey, Walker, 1998; Richter, Nauri, 1998). В то же время, среди мантийных минералов, в целом, отмечается увеличение содержания Os и Re от оливина к ортопироксену и шпинели (Harvey et al., 2010, 2011). Но при частичном плавлении этих минеральных фаз обогащение осмием расплава будет незначительным, тогда как содержание Re в отсутствии сульфидных примесей контролируется именно соотношением основных минеральных фаз (Brenan, 2008). И частичное плавление мантии будет приводить к формированию расплавов, существенно обогащенных рением (Luguet, Reisberg, 2016). Наблюдаемое пониженное содержание осмия в магмах феррарской провинции может объясняться обеднением мантийного источника осмий-содержащими сульфидами, которые могли раствориться при флюидном воздействии субдуцированной плиты на ранних этапах эволюции. Альтернативой может быть плавление метасоматизированной мантии с участием летучих компонентов, которые обеспечивали вынос осмия при дегазации, например, в виде высоколетучего оксида OsO_4 (Lorand et al., 2003). Косвенным подтверждением этого является то, что наименее дифференцированные феррарские магмы, как было установлено по соотношению элементов платиновой группы (Choi et al., 2019), образовались из источника с водным флюидом, близкого по составу островодужному.

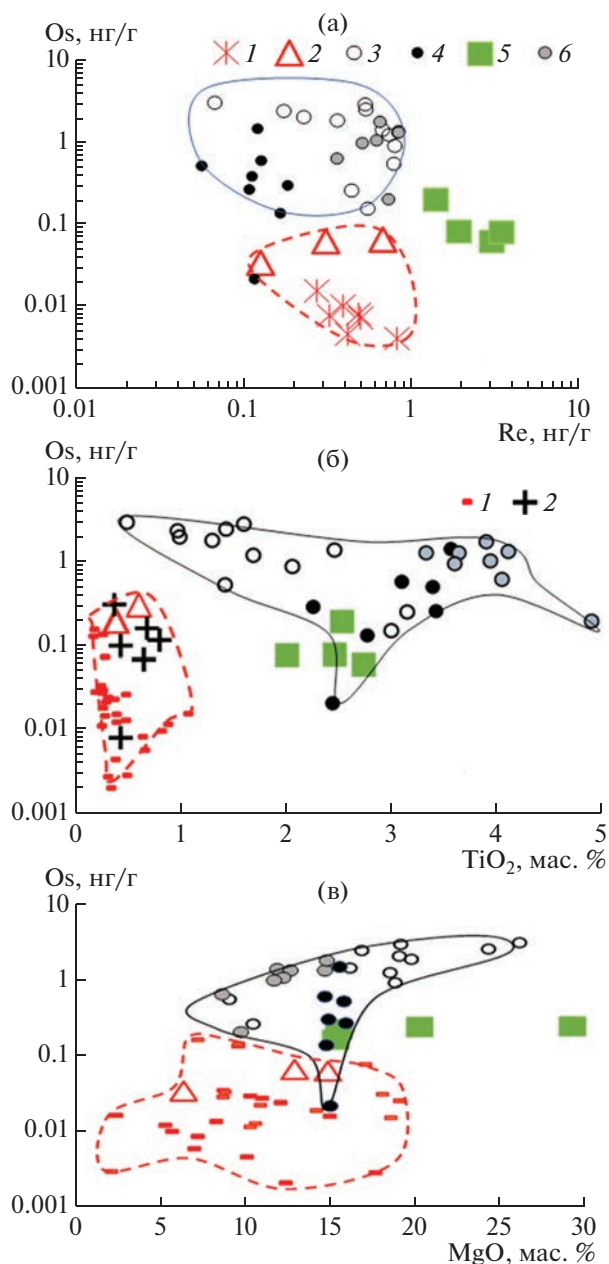


Рис. 2. Содержания Os и Re в мезозойских магмах восточной Антарктиды (провинции ЗКМ и Феррар) и провинции Кару (а), а также вариации Os в зависимости от концентрации TiO_2 (б) и MgO (в). Породы феррарской магматической провинции (1 и 2): 1 – базальты и андезито-базальты (Molzahn et al., 1996); 2 – габбро-долериты (табл. 1); 3 – базальты ЗКМ (Heinonen et al., 2014); 4 – магматические породы провинции Кару (Heinonen et al., 2010); 5 – щелочно-ультраосновные магмы из района ледника Ламберта (табл. 1); 6 – магмы провинции Кару, производные пироксенитового источника (Сушевская и др., 2021 и ссылки в ней). (б) 1 – габбро и габбро-нориты феррарской провинции (Choi et al., 2019); 2 – габброиды Тасмании. Остальные обозначения как на рис. 2а.

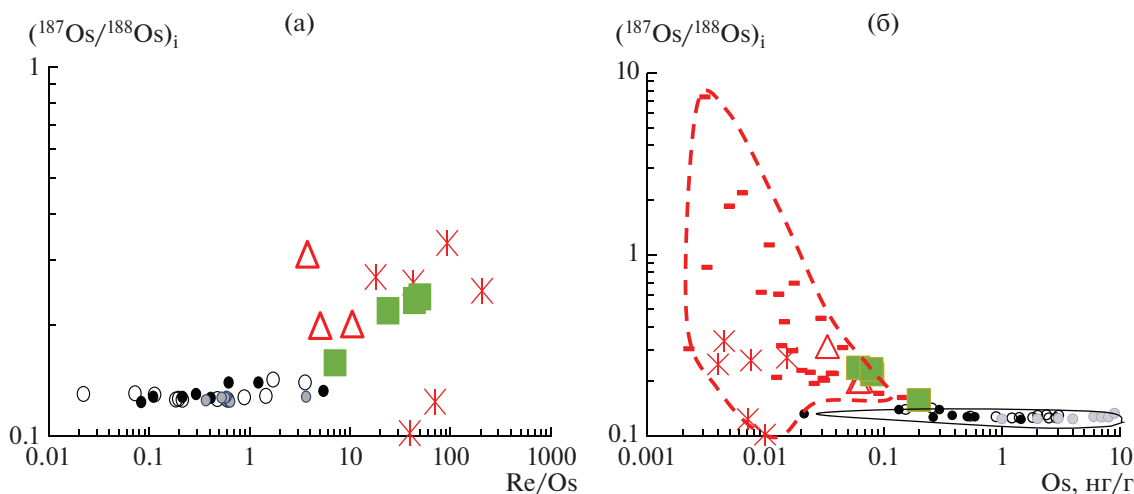


Рис. 3. Вариации отношения изотопов осмия $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ в мезозойских магмах провинций ЗКМ, Кару и района ледника Ламберта. Корреляция $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ с величиной отношения Re/Os (а) и содержанием Os (б). Обозначения см. на рис. 2.

Тренды фракционирования магм для изученных провинций сопровождаются соответствующими изменениями содержания осмия. Так при изменении содержания MgO от 4 до 19 мас. % концентрация Os изменяется в пять раз: от 0.03 до 0.15 (рис. 2). На рис. 2б и 2в показаны зависимости содержания осмия от TiO_2 (генетический тип магм) и MgO (степень дифференциации). Хорошо видно, что для феррарских магм корреляции нет, но для составов базальтов провинции ЗКМ она существует. Высокомагнезиальные магмы провинции ЗКМ, которые близки по составу первичным магмам, отличаются повышенными концентрациями Os и пониженными TiO_2 . В тоже время вариации содержания Os вне зависимости от MgO и TiO_2 могут свидетельствовать об изменении массовой доли и характера сульфидов в магмах (Mungall, Brenan, 2014), в том числе, при ликвации, а также степени вторичного их изменения (Waters et al., 2020).

К вариациям величины изотопного отношения $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ в магмах может приводить гетерогенность состава магматического источника, процессы смешения магм, а также ассимиляция вмещающего материала магмами по мере их перемещения и остывания (Chesley et al., 2004; Ganpoun et al., 2016). Высокие отношения Re/Os в источнике типичны для континентальной коры приводят к более радиогенным значениям $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$, а низкие значения $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$, наоборот, характеризуют мантийное деплетированное вещество. На рис. 3 показаны вариации изотопного $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ отношения, содержания Os (3б), и величины Re/Os отношения (3а) в мезозойских базальтах Антарктики.

Хорошо видно, что повышенные значения отношения Re/Os характеризуют магмы провинции Феррар и района ледника Ламберта (рис. 3а) и сопровождаются повышенными значениями $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ при более низких содержаниях Os (рис. 3б). В целом, все изотопные составы феррарских расплавов образуют на диаграмме единое поле, отличное от поля составов магм провинций ЗКМ и Кару. Можно отметить корреляцию величины $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ и содержания осмия для магм Трансantarктических гор и для щелочно-ультраосновных пород из района ледника Ламберта, которая отсутствует для различных типов магнезиальных магм провинции Кару–ЗКМ (рис. 3б). Повышенные значения отношения изотопов $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ могут быть связаны с несколькими причинами. Так для магм и включений мантийных перидотитов вблизи зон субдукции отмечаются повышенные значения $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ из-за более высоких Re/Os в островодужной коре, и субдуцирующем слэбе, что и приводит к повышенным изотопным отношениям при участии такого вещества в выплавлении магм (Chesley et al., 2004). Но повышенные величины отношения $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ могут быть вызваны и ассимиляцией коры при кристаллизации первичных магм (Suzuki et al., 2011), и высокими содержаниями магнетита в дифференцированных разностях (Senda et al., 2016). Как было показано в работе (Brauns et al., 2000), магнетиты из долеритов Тасмании (их составы указаны на рис. 4а) отличаются повышенными величинами отношения $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$. Кроме того, нельзя исключить и возможность изменения окислительно-восстановительных условий при кристаллизации магм, или в процессе их выплавления из мантийного источника, при этом в более окисленных

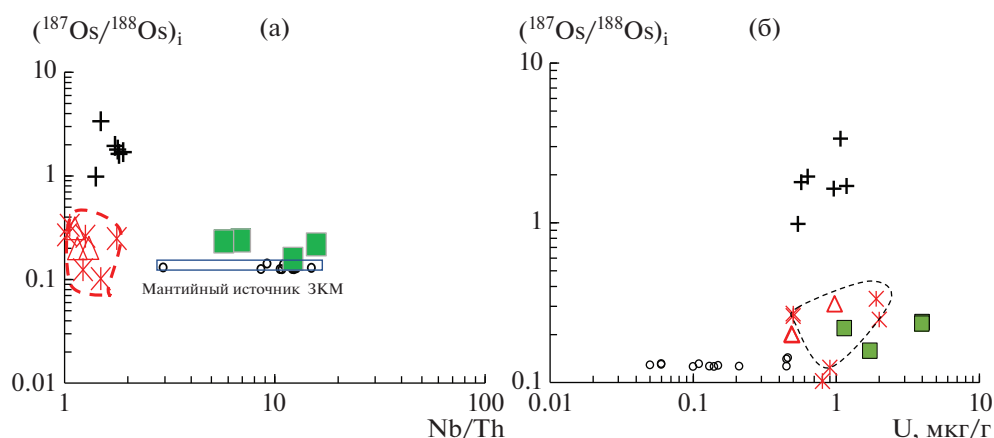


Рис. 4. Вариации величины отношения изотопов осмия $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ в зависимости от величины отношения Nb/Th (a) и содержания U (б). Условные обозначения, см. на рис. 2, крестики — магнетиты из долеритов Тасмании (Brauns et al., 2000).

условиях возможна генерация магм с более низкими содержаниями осмия (Mungall et al., 2006; Dale et al., 2012; Botcharnikov et al., 2013).

На рис. 4 показаны вариации изотопного состава осмия при изменении величины характеристических отношений, например, Nb/Th (Nb аномалия), и содержания урана (рис. 4), которые отражают степень обогащенности литофильными элементами магматических источников. Так примитивные магмы провинций ЗКМ и Кару отличаются по содержанию U и величине Nb/Th при близких значениях отношения изотопов $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$. Повышенные концентрации U, элемента несовместимого и подвижного в субдукционных условиях, в магмах феррарской провинции (рис. 4) предполагают обогащение ураном магматического источника, которое, возможно, происходило при флюидном воздействии на вещество мантии.

Изотопный состав осмия мантийного источника расплавов провинции ЗКМ характеризуется интервалом 0.125–0.143 ($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$). Для магм провинции Феррар интервал значений этого отношения 0.1–0.3, тогда как изотопный состав осмия изученных нами образцов более радиогенный: 0.2–0.3. Ранее выделенные типы магм, различающиеся по величине отношения Nb/Th, провинции ЗКМ (Luttinen, Furnes, 2000) или провинции Кару (Heinonen et al., 2014, 2018) не отличаются по величине отношения $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ (рис. 5). Выделяются лишь обогащенные ферропикриты и базальты (тип E-FP по Heinonen, Luttinen, 2008) с повышенными значениями отношения изотопов осмия 0.1401–0.1426. Остальные типы магм какой-либо спецификой изотопного состава осмия $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ не выделяются (рис. 5), включая и высокомагнезиальные железистые магмы (выделенные серым цветом на рис. 2, 3, 5) из центральной

части плюма, происхождение которых может быть связано с мантийным источником пироксенитового состава (Сушевская и др., 2019). Как показано в статье (Molzahn et al., 1996), субконтинентальная мантия Антарктиды деплетирована и характеризуется интервалом значений изотопного отношения $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$: 0.105–0.131, но некоторые мантийные ксенолиты имеют более радиогенный состав, вплоть до 0.138. Для деплетированной океанической мантии величина отношения $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ достигает 0.132–0.158, тогда как базальты горячих точек имеют больший интервал составов $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 0.12–0.15 (Day, 2013; Gannoun et al., 2016).

Таким образом, источник магматических расплавов провинций Кару и ЗКМ близок по величине изотопного отношения $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$, как к составу типичной литосферной мантии (0.115–0.135, Scott et al., 2021), так и к составу мантии под Антарктидой (Molzahn et al., 1996). Высоко-железистые магнезиальные магмы, образованные при плавлении фрагментов пироксенитовой мантии на начальных этапах воздействия плюма Кару, вероятно, являются производными той же литосферной мантии.

Как полученные нами результаты, так и литературные данные, указывают на отличие феррарских магм от других, также связанных с плюмом Кару, пониженным содержанием Os и более радиогенной величиной отношения $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$.

ИСТОЧНИКИ МАГМ ПРОВИНЦИЙ КАРУ И ВОСТОЧНОЙ АНТАРКТИДЫ: Nd–Sr–Pb ИЗОТОПНАЯ СИСТЕМАТИКА

Изотопно-геохимическая характеристика мезозойского магматизма в пределах восточной Антарктиды и южной части Африки, связанного с воздействием плюма Кару–Мод, позволила не

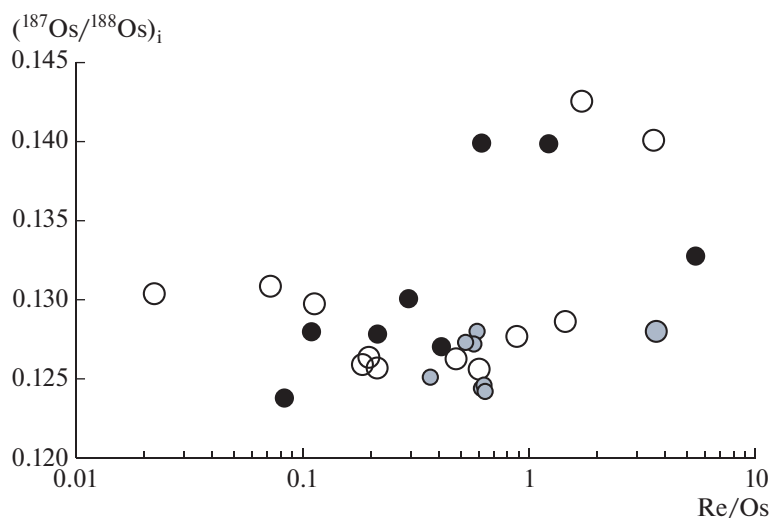


Рис. 5. Зависимость $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}_i$ от Re/Os в различных типах магм, близких к первичным выплавкам провинций ЗКМ (Антарктида) и Кару (Южная Африка) (Heinonen et al., 2010, 2014). Условные обозначения см. рис. 2.

только выделить отдельные типы расплавов, но и связать их происхождение с определенным магматическим источником или процессом. Несмотря на относительную ограниченность данных: не более 50 анализов изотопного состава Pb пород для всех провинций, на наш взгляд, были сделаны принципиальные выводы. Так было показано (Меланхолина, Сушевская, 2019 и ссылки в ней), что источником первичных расплавов для всех исследуемых нами районов плюмового магматизма (провинции Кару, Земли Королевы Мод, и Феррар) является древняя литосфера палеоконтинента Гондвана. В различных регионах она претерпевала неоднократное изменение в ранние этапы своего развития и в разной степени могла быть обогащена летучими и литофильными элементами. Повышенные величины отношения изотопов стронция $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ могут указывать как на исходно обогащенный литофильными элементами (и, прежде всего, рубидием) источник мантии, так и на существенную примесь корового материала в изученных расплавах (Сушевская и др., 2019). Увеличение отношения U/Pb при метасоматическом преобразовании мантии также могло приводить к образованию источника, обогащенного радиогенным Pb. Магматизм в пределах Индийского океана, связанный с активным воздействием Кергелен-плюма, также обладает геохимическими метками характерными для литосферы Антарктиды (Сушевская и др., 2017).

Изучение магматических производных плюма Кару–Мод позволило установить уникальную геохимическую зональность плюма, отражающую его эволюцию (Heinonen et al., 2010, 2018; Natali et al., 2017; Luttinen et al., 2010; Luttinen, 2018; Сушевская и др., 2021). По периферии про-

винции преобладают базальты низко-титанистой группы, для состава которых типичны повышенные отношения Nb/Y по сравнению с составами базальтов центрального района при одинаковых величинах Zr/Y отношения. Происхождение высоко- и низко-титанистых разностей связано с глубиной их генерации из мантии перидотитового состава, при этом высоко-титанистые типы образуются на больших глубинах при плавлении мантийного источника, в составе которого присутствует гранат (Jourdan et al., 2007). Это приводит к тому, что высоко-титанистые базальты имеют более высокие значения Sm/Y , чем низко-Ti магмы, образующиеся из менее глубинного источника в присутствии шпинели (Jourdan et al., 2007). Для провинции Кару эти магмы отличаются и изотопными характеристиками — высоко-титанистые разности характеризуются пониженными величинами отношения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$. На диаграмме в координатах $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ наблюдался тренд изменения состава расплавов за счет увеличения доли вещества мантийного компонента EM-I в составе источника (Сушевская и др., 2021).

В то же время, составы низко-титанистых магм образуют тренд, определяемый примесью вещества обогащенного компонента EM-II типа (рис. 6). Обогащенное мантийное вещество EM-II типа соответствует в изотопно-геохимических параметрах обогащенной литосферной мантии палеоконтинента Гондвана, и также проявляется в более молодых плюмовых магмах (130 млн лет назад) провинции Этендека (юго-западная Африка, мантийный плюм Тристан (Меланхолина, Сушевская, 2018).

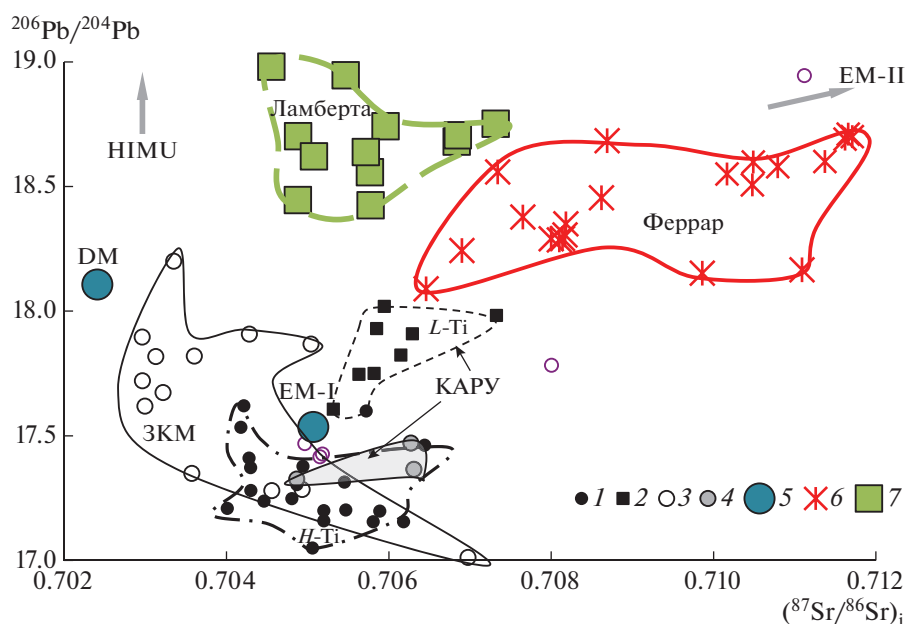


Рис. 6. Изотопный состав Sr и Pb в магмах, связанных с плюмами Кару–Мод и Кергелен. Магматические породы провинции Кару: (1) низко-титанистый тип магм, (2) высоко-титанистый тип; (3) магматические породы Земли Королевы Мод (ЗКМ); (4) магнезиальные железистые пикриты центральной части плюма Кару; (5) составы модельных мантийных источников (Argenti, Longo, 2011); (6) магмы провинции Феррар; (7) щелочные пикриты из рифтовой зоны ледника Ламберта. Полями выделены вариации состава отдельных провинций. Изотопный состав пересчитан на соответствующий возраст излияния. Составлено по (Сущевская и др., 2018, 2022; Heinonen et al., 2010, 2014)

Для магм провинции ЗКМ подобных изотопно-геохимических закономерностей не наблюдается, и различные по величине отношения Nb/Th породы (Luttinen, Furnes, 2000) образуют единый тренд от деплетированного источника к обогащенному, с низкими значениями отношения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, но высокими величинами $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ отношения (рис. 6). Исходя из Nd–Sr–Pb изотопной систематики этих базитов, предполагается, что подобный источник мог образоваться за счет смешения вещества двух компонент контрастно-го состава: (1) вещества, характеризующегося пониженными величинами элементных отношений U/Pb и Sm/Nd, и повышенными Rb/Sr в сравнении с составом типично деплетированной мантии, и (2) обогащенного, с характеристиками мантийного компонента EM-II типа (Сущевская и др., 2019).

Высоко-титанистые ферропикриты в пределах магматических провинций Кару (Африка) и ЗКМ (Альманрюгген, Антарктида), обогащенные Ti, Fe и Mg, из центральной части плюма являются результатом плавления пироксенитового источника (Сущевская и др., 2021, и ссылки в ней). Вариации изотопного состава этого источника сопоставимы с вариациями состава высоко-титанистых разностей магм провинции Кару (Сущевская и др., 2021). Это отражено на диаграмме в координатах $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (рис. 6). В целом, изотопный состав пироксенитового источника отличался

умеренно обогащенными характеристиками: эписилон неодима +1.6, отношение урана к свинцу ~7.7 и величина изотопного отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ~ 0.7049 (Сущевская и др., 2019).

Предполагается, что возраст этого компонента составляет не менее 2.6–2.3 млрд лет (Сущевская и др., 2019). Это могли быть фрагменты древней литосферы, или древний рециклированный коровый материал, содержащийся в поднимающемся плюме, который начинал плавиться на глубине 170–150 км, образуя расплавы андезитового состава. За счет взаимодействия этих андезитовых расплавов с перидотитовым субстратом мантии образовывался реакционный пироксенит. Затем, на глубинах 150–120 км, плавление реакционного пироксенита приводило к образованию магнезиальных высоко-железистых расплавов (Соболев и др., 2009). Эти расплавы при благоприятных условиях, например, когда литосфера подвержена ранней деструкции с образованием глубинных разломов и сдвигов, могли достигать земной поверхности. По изотопному составу Sr и Pb магмы пироксенитового происхождения: магнезиальные, высоко-железистые, близки габбро-долеритам провинций ЗКМ и Кару, что хорошо видно на диаграмме в координатах изотопных отношений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (рис. 6). По мере эволюции восходящего плюма доля пироксенитов уменьшалась, и расплавы приобретали харак-

теристика плавающей литосферной мантии с преобладанием вещества обогащенного мантийного компонента типа ЕМ-II.

Для провинции ЗКМ выявлены магнезиальные, деплетированные высоко-титанистые магмы, которые редко фиксируются среди плюмовых магм. Их происхождение связано с перидотитовым мантийным источником, состав которого близок составу современного слабообогатленного источника океанического магматизма (Armienti, Longo, 2011) с изотопными характеристиками: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \sim 0.70296$ (0.70241 DMM), $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \sim 0.51282$ (0.5132), $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \sim 15.48$ (15.44), $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \sim 37.5$ (38.04), $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \sim 18.1$ или около 17.75 (18.106), согласно средней величине наиболее деплетированных составов (Сушевская и др., 2022).

Формирование феррарского магматизма в зоне палеосубдукции сопровождалось интенсивным взаимодействием поднимающегося плюма Кару–Мод (Betts et al., 2012; Choi et al., 2019) с литосферным веществом, что и отразилось на составе первичных расплавов – обогащением крупноионными литофильными элементами, такими как U, Th, и Rb, под воздействием мантийного флюида (East et al., 2020). Результатом этого процесса стало формирование расплавов, источник которых в различной степени обогащен компонентом с характеристиками обогащенной мантии ЕМ-II: $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \sim 0.5124$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \sim 0.716$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \sim 20.5$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \sim 15.7$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \sim 40$. Отличием изотопного состава этого обогащенного компонента от состава источника расплавов провинций Кару и ЗКМ (Jourdan et al., 2007; Neumann et al., 2011; Luttinen et al., 2015; Luttinen, 2018; Сушевская и др., 2022) является высокорациогенный состав Sr и Pb (рис. 6).

Другим примером глубинных магм, связанных с активностью мантийного плюма в пределах восточной Антарктиды, являются высоко-магнезиальные, существенно обогащенные летучими и щелочами, магмы из района ледника Ламберта. Их происхождение связано с глубинной мантийной конвекцией под центральной Гондваной (Hassan et al., 2015). Мы полагаем, что плюм Кару–Мод распространялся в восточном и западном направлении в течение 40–50 млн лет (рис. 1), и более молодые (начало магматической активности 130–120 млн лет), производные плюмы вызвали образование крупных магматических провинций плато Кергелен (южная часть Индийского океана) и Парана–Этендека (Южная Америка – юго-западная Африка) (Сушевская и др., 2014). Меловой магматизм (120–110 млн лет назад) распространен в северном окончании ледника Ламберта, рифтовой зоны древнего заложения (Куринин и др., 1988). Изотопный состав Sr, Nd и Pb этих магм указывает на присутствие в мантий-

ном источнике обогащенного вещества, аналогичного по составу модельным компонентам ЕМ-II и НМУ типа (Сушевская и др., 2018). Влияние вещества с подобными характеристиками, как уже указывалось выше, отмечалось и для источника низко-титанистых магм из периферических частей провинций Кару–Мод. Усредненные характеристики изотопного состава щелочно-ультраосновных базитов района ледника Ламберта: $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512485$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70637$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.671$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.391$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.409$ (Сушевская и др., 2018) от обогащенных расплавов феррарской провинции отличаются повышенными величинами отношений изотопов $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (Сушевская и др., 2018), но пониженными $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (рис. 6). При этом величины отношений $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ для магм обеих провинций близки. В целом, изотопный состав пикритовых расплавов палеорифтовой зоны ледника Ламберта близок составу источника магм провинций Кару и ЗКМ, что отражает деплетированный характер литосферной мантии Гондваны. Но, этот источник отличается повышенными значениями отношений $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$.

Различия в составе мантийных источников для магм феррарской провинции и пикритовых расплавов ледника Ламберта связаны с флюидным воздействием на мантию. Причем сам флюид, по видимому, имел разный состав: для феррарской провинции – это обогащенный H_2O и Cl, и более окисленный флюид (Giacomoni et al., 2020; Elliot, Fleming, 2021; Panter, Martin, 2022), а для района ледника Ламберта – флюид с преобладанием CO_2 , P и K (Andronikov, Sheraton, 1996; Буйкин и др., 2014; Соловова и др., 2015). В последнем случае воздействие такого флюида привело к образованию обогащенной мантии с присутствием сульфидов и карбонатов и сопровождалось привнесением радиогенного свинца или избытка урана (Andronikov et al., 2021; Foley et al., 2021; Сушевская и др., 2018). Для феррарских магм с метасоматически измененным мантийным источником и с привнесением мобильных элементов U, Th, Rb и Pb из субдущиванной плиты формируются более радиогенные изотопные составы Sr и Pb (повышенные величины отношений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) по сравнению с составом магматических производных провинций Кару и Земли Королевы Мод (Сушевская и др., 2022). Генерация щелочно-ультраосновных магм при глубинном плавлении метасоматизированной, обогащенной летучими компонентами (в частности, CO_2 (Сушевская и др., 2017)) перидотитовой мантии в районе ледника Ламберта согласуется с представлением о формировании аналогичных по составу расплавов из мантийных источников, содержащих амфибол–флогопит–апатитовые про-

жилки, как следствие многостадийного взаимодействия мантии с насыщенными флюидами расплавами (Ionov et al., 1997; Deplech et al., 2012).

Re—Os СИСТЕМАТИКА И ОЦЕНКА СОСТАВА ИСТОЧНИКА ПЛЮМОВОГО МАГМАТИЗМА ВОСТОЧНОЙ АНТАРКТИДЫ

Отличие изотопной Re—Os систематики от наиболее часто используемых для характеристики вулканитов изотопных систем литофильных элементов: Rb—Sr, Sm—Nd, U—Th—Pb, заключается в геохимических свойствах и высокой совместимостью с расплавами литофильных элементов (как родительских, так и дочерних). Осмий является высокосовместимым элементом и поэтому при частичном плавлении обогащает мантийный рестит (Burton et al., 2002; Brenan, 2008; Mungall, Brenan, 2014). Рений — менее совместимый элемент, что приводит к обогащению им образующихся расплавов. Эти свойства делают данную систематику чувствительной к эволюции мантийного вещества, и источника магм (Dale et al., 2007; Lorand et al., 2013). Однако необходимо отметить, что свойства этих элементов существенно отличаются и при изменении окислительно-восстановительных условий мантийных процессов (Brenan, 2008). Так, экспериментальные работы показали, что рений является умеренно совместимым элементом с ортопироксеном и клинопироксеном при образовании расплавов в восстановительных условиях, но несовместимым при увеличении активности кислорода (Mallman, O'Neill, 2007; Righter, Nauri, 1998; Liu, Brenan, 2015). И если мантийная матрица содержит незначительную примесь сульфидов, то при плавлении в восстановительных условиях формирующиеся расплавы могут быть обеднены рением (Fonseca et al., 2007). Все это вызывает необходимость изучения не только мантийных выплавов для определенных регионов распространения магматизма, но и собственно образцов исходного мантийного вещества. Мантийная матрица может содержать первичные сульфиды, потенциальный источник осмия и рения, плавление которых обогащает серой расплавы ранних стадий (Harvey et al., 2011). Такие сульфо-содержащие силикатные расплавы встречаются в ликвидусных оливинах в качестве расплавных включений (Norman et al., 2002). Сама мантия может быть метасоматически изменена в течение длительного периода своей эволюции, да и сам характер изменения может быть чрезвычайно разнообразным (Dale et al., 2007; Liu et al., 2010; He et al., 2020; Reisberg, 2021). Поэтому мы попытались использовать комплексную характеристику изотопного состава магм в пределах Антарктиды и южной Африки, связанных с магматической активностью плюма Кару—Мод, предшествовавшей раско-

лу Гондваны. Эволюция плюма, а также магматизма достаточно хорошо изучены, что позволяет, хоть и на ограниченном по количеству анализов материале, сделать предварительные выводы о мантийном источнике и его Re—Os изотопной системе.

На бинарных диаграммах рис. 7 в координатах изотопных отношений $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ и $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ показаны составы магм провинций Кару, ЗКМ, и Феррар, и района ледника Ламберта. Хорошо видно отсутствие какой-либо корреляции изотопных составов. Так, магмы различных петрогенетических типов, выделенных для провинций ЗКМ и Кару (Luttinen, Furnes, 2000; Heinonen, Luttinen, 2008), имеют большую дисперсию величин изотопных отношений $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, но при этом характеризуются достаточно узким интервалом значений отношения $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$: 0.1235—0.1242 (для большинства составов). Такой изотопный состав осмия характерен для состава литосферной мантии (Meisel et al., 2001). Изотопный состав Sr литосферного мантийного источника расплавов провинции ЗКМ варьирует от деплетированного ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \sim 0.7028$) до обогащенного ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \sim 0.707$), что хорошо коррелирует с величинами отношения $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$. Вариации изотопного состава Pb магм провинций ЗКМ и Кару указывают на существование нескольких независимых обогащенных мантийных источников расплавов, сходных по составу с мантийными модельными компонентами EM-I, EM-II и, возможно, HIMU типа (Hart, 1984). Обогащенный компонент EM-I отличается, главным образом, более радиогенными значениями $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ (Roy-Barman, Allègre, 1995), тогда как источник EM-II с низкими значениями $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ может образоваться при смешении субдуцированных осадков с мантийными перидотитами (Dale et al., 2007; He et al., 2020; Cai et al., 2021). Поэтому, однозначно определить состав обогащенного примесного мантийного компонента, участвующего в плавлении, не всегда возможно, т. к. формирование литосферного мантийного источника часто отличается многоэтапным характером (Liu et al., 2010; Deplech et al., 2012; Reisberg, 2021; Сушевская и др., 2019).

Магмы пироксенитового источника по величине отношения изотопов $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ не отличаются от других расплавов и находятся в едином тренде вариаций: 0.1242—0.128 (рис. 5). Если бы в состав этого источника входило вещество древних субдуцированных эклогитов с радиогенным изотопным составом осмия, то источник характеризовался бы повышенными значениями отношения $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ (Melchiorre et al., 2011).

Мантийный источник расплавов провинции Феррар отличается значительными вариациями

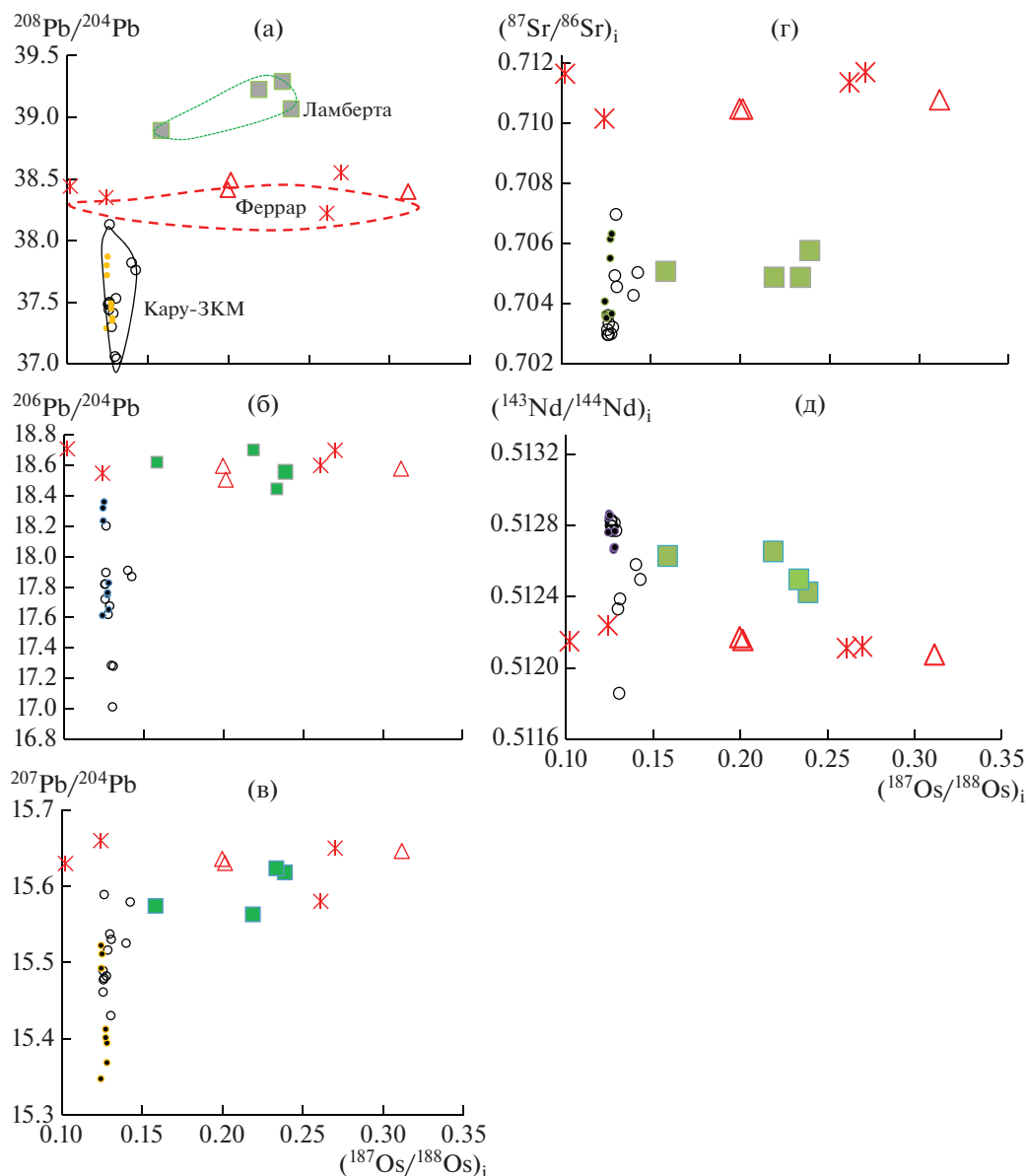


Рис. 7. Вариации изотопного состава Sr, Pb, Nd, и Os в изученных магмах провинций Феррар, Кару–ЗКМ и рифтовой зоны ледника Ламберта. (а) $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ – $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, (б) $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, (в) $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ – $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, (г) $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ – $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, (д) $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ – $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$. Обозначения см. на рис. 2.

величины отношения $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$: 0.102–0.311 согласно нашим данным и (Molzahn et al., 1996), но эти вариации могут достигать и больших значений: от 0.167 до 0.67 согласно (Choi et al., 2019) (рис. 3). Как указывалось ранее, изотопные характеристики изученных магм феррарской провинции близки изотопному составу модельного мантийного компонента ЕМ-II (радиогенный состав Pb и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$: 0.710–0.713). Источник расплавов с такими характеристиками мог образоваться в мантии как результат плавления субдукционно измененной литосферной мантии, что и предпо-

лагалось ранее для источника магматизма феррарской провинции (Hergt et al., 1991; Hagen-Peter, Cottle, 2016). Субдукционная обстановка, подтверждаемая соотношением литофильных элементов и Pb–Sr–Nd изотопной систематикой (Сушевская и др., 2022 и ссылки в ней), способствовала обеднению осмием магматического источника, что привело к высоким Re/Os соотношениям (9–400) и варьирующей величине изотопного отношения $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$. Метасоматически измененная мантия, существенно обедненная титаном по сравнению с мантией района Кару и ЗКМ, претер-

плавшая неоднократно плавление на ранних этапах (Сушевская и др., 2022), также была обеднена Os. По причине, например, обеднения источника сульфидами, которые растворились при неоднократном плавлении или флюидном воздействии субдущиванной плиты. Такая трансформация вещества магматического источника сопровождалась привнесом радиогенных Pb и Sr (рис. 7).

Другим объяснением появления обогащенных радиогенным осмием магм может быть присутствие и плавление экологитовых пород. Так, комплексное изучение изотопного состава Os, Sr, Nd, и Hf клинопироксена и сульфидов мантийных ксенолитов в северной части Земли Виктории показало, что литосферная мантия Трансантарктических гор претерпела многостадийное изменение (сопровождавшееся обеднением рением 3.0–3.3, 2.3, 1.3–1.4, 0.9–1.1 млрд лет назад, 580–620 и 120 млн лет назад) с формированием экологитовых резервуаров в процессе эволюции (Melchiorre et al., 2011). Плавление такой субконтинентальной мантии могло привести к образованию магм с повышенными величинами изотопного отношения $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$.

Мантия района ледника Ламберта также претерпела многостадийную эволюцию. На основании изучения мантийных включений, выносимых щелочно-ультраосновными магмами, установлена идентичность изотопных составов Nd, Sr, и Pb расплавов и мантийных ксенолитов (Сушевская и др., 2018). Вероятно, эти характеристики отражают состав древнего, обогащенного летучими компонентами, мантийного источника (Сушевская и др., 2018). Изотопный состав осмия в лерцолитовых мантийных ксенолитах из оазиса Джетти более радиогенный: $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 0.117–0.128, чем в типичных мантийных перидотитах архейских кратонов (Крымский и др., 2011). В то же время интервал вариаций изотопных отношений $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ в магнезиальных щелочно-ультраосновных породах дайково-диатремового комплекса шире, а сами значения выше, от 0.1582 до 0.2388. Формирование мантии в пределах ледника Ламберта происходило не позднее 2.5–2.4 млрд лет назад, о чем свидетельствует изотопный состав Nd и Os в мантийных ксенолитах (Беляцкий, Андроников, 2009; Крымский и др., 2019). Впоследствии литосферная мантия этого региона испытала неоднократные изменения вплоть до коллизии континентов (Индии и Восточной Антарктики) при формировании палеоконтинента Родиния (Foley et al., 2006, 2022). Термальное воздействие Кергелен-плюма 130–120 млн лет назад на окраины раздвигающихся континентальных блоков Индии и восточной Антарктиды привело к плавлению глубинных частей обогащенной летучими метасоматизированной на ранних этапах воздействия плюма мантии (Deplech et al., 2012; Сушевская и др., 2018).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение изотопного состава Sr, Pb, Nd, и Os в мезозойских магматических породах Восточной Антарктиды, связанного с термальным воздействием 180 млн лет назад плюма Кару, сформировавшим магматические провинции Кару (южная Африка), ЗКМ и Феррар (восточная Антарктида), а также с воздействием 120 млн лет назад на окраину Антарктиды в районе ледника Ламберта плюма Кергелен, показало, что во всех случаях источником магм была древняя мантия палеоконтинента Гондвана. Сформированная на ранних этапах развития земной коры региона, литосферная мантия длительное время не испытывала значительных изменений (по крайней мере, с 2.4 до 1.1 млрд лет назад, Крымский и др., 2011). Но, к моменту термального воздействия плюма Кару–Мод на литосферу Гондваны мантия была существенно преобразована под влиянием различных процессов, специфических для разных регионов. Наиболее сильное изменение она претерпела при субдукционном воздействии на западной окраине восточной Антарктиды, что привело к образованию вытянутой, ослабленной зоны (рис. 1), в пределах которой, одновременно с провинциями Кару и Мод, развивался низко-титанистый, обогащенный литофильными элементами магматизм. Вариации изотопного отношения $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ отражают степень метасоматического изменения мантии при выплавлении расплавов.

Многостадийная эволюция субконтинентальной мантии могла привести к формированию экологитоподобных резервуаров (Melchiorre et al., 2011), примесь вещества которых при глубинном плавлении формировала магмы с повышенными величинами изотопного отношения $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$, обогащенные литофильными элементами, летучими и радиогенными изотопами Pb. Подобный механизм может отвечать за выплавление щелочно-ультраосновных пикритовых магм с повышенными значениями отношения изотопов $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ (0.1582–0.2388) района ледника Ламберта.

Мантийный источник мезозойского плюмового магматизма южной Африки и восточной Антарктиды, от центральной области до периферии его распространения, достаточно-однороден по изотопному составу осмия — $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$: 0.1242–0.1426, и близок среднему составу литосферной мантии. Этот источник, согласно вариациям изотопного отношения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, представляет собой смесь вещества древней мантии с характеристиками модельного компонента EM-I и других, древних фрагментов мантии, обогащенных радиогенными изотопами Pb и Sr, образование которых предшествовало расколу палеоконтинента Гондвана (Сушевская и др., 2022). Nd–Pb–Sr изотопные составы расплавов свидетельствуют, что гетерогенность мантии была обусловлена

процессами ранней эволюции Гондваны. Однако эти процессы не привели к существенной гетерогенности Re—Os изотопной системы.

Литосферный магматический источник всех типов расплавов: высоко- и низкотитанистых магм, магнезиальных высокожелезистых, связанных с плавлением пироксенитов, в пределах восточной Антарктиды и южной части Африки имеет сходную величину отношения $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$. Возможно, это является результатом того, что магмы начального этапа воздействия плюма Кару-Мод, являющиеся производными пироксенитовой мантии, представляли собой расплавы глубоких частей литосферы Гондваны.

Изотопный состав Nd, Pb, и Sr в источнике базальтов магматической провинции Феррар отличается от состава мантийного источника базитов провинций Кару и ЗКМ. Магмы этой провинции характеризуются значительными вариациями величины отношения $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ (от 0.1 до 0.31) и пониженными содержаниями осмия, при ограниченных вариациях Nd—Pb—Sr изотопных систем, указывая на примесь вещества обогащенного мантийного компонента ЕМ-II типа. Такие характеристики магматического источника согласуются с предположением о субдукционном воздействии на мантию района западной окраины восточной Антарктиды.

Авторы выражают искреннюю благодарность с. н. с. ИГГД РАН к. г.-м. н. В.М. Саватенкову и анонимному рецензенту за внимательное рецензирование рукописи и ценные замечания, которые способствовали улучшению статьи, а также А.И. Буйкину за редактирование статьи.

Работа выполнена по Госзаданию ГЕОХИ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андроников А.В. (1987) *Минералы глубинного происхождения из щелочно-ультраосновных пород Восточной Антарктиды*. В сб.: *Геолого-геофизические исследования в Антарктике*. Л.: ПГО Севморгеология, 48–53.
- Беляцкий Б.В., Андроников А.В. (2009) Возраст верхней мантии района озера Бивер (Восточная Антарктика): Sm–Nd изотопная систематика мантийных ксенолитов. *Проблемы Арктики и Антарктики*. **78**(4), 146–169.
- Буйкин А.И., Соловова И.П., Верховский А.Б., Когарко Л.Н., Аверин А.А. (2014) PVT — параметры флюидных включений и изотопный состав C, O, N, Ar в ксенолите гранатового лерцолита из района Оазиса Джетти, Восточная Антарктида. *Геохимия*. (10), 867–884.
- Buikin A.I., Solovova I.P., Verchovsky A.B., Kogarko L.N., Averin A.A. (2014) PVT-parameters of fluid inclusions and the C, O, N, and Ar isotopic composition in a garnet lherzolite xenolith from the Oasis Jetty, East Antarctica. *Geochem. Int.* **52**(10), 805–821.
- Крымский Р.Ш., Сергеев Д.С., Брюгманн Г.Э., Шевченко С.С., Антонов А.В., Беляцкий Б.В., Сергеев С.А. (2011) Опыт изучения изотопного состава осмия и распределение элементов платиновой группы в перидотитах литосферной мантии восточной Антарктиды. *Региональная геология и металлогения*. (46), 51–60.
- Крымский Р.Ш., Антонов А.В., Беляцкий Б.В., Сушевская Н.М., Сергеев С.А. (2019) Возраст и эволюция литосферной мантии Восточно-Антарктического кратона: изотопный состав осмия и распределение элементов платиновой группы в ксенолитах шпинелевых лерцолитов. *ДАН*. **48** (6), 726–731.
- Куринин Р.Г., Гринсон А.С., Дун Цзунь Ин (1988) Рифтовая зона ледника Ламберта как возможная щелочно-ультраосновная провинция в Восточной Антарктиде. *ДАН СССР*. **299**, 944–947.
- Лайба А.А., Андроников А.В., Егоров Л.С., Федоров Л.В. (1987) *Штокообразные и дайковые тела щелочно-ультраосновного состава в Оазисе Джетти (горы Принс-Чарльз, Восточная Антарктида)*. В сб.: *Геолого-геофизические исследования в Антарктике*. Л.: ПГО Севморгеология, 35–46.
- Лейченко Г.Л., Сушевская Н.М., Беляцкий Б.В. (2003) Геодинамика атлантического и индийского секторов Южного океана. *ДАН*. **391**(5), 675–678.
- Лейченко Г.Л., Дубинин Е.П., Грохольский А.Л., Агранов Г.Д. (2018) Формирование и эволюция микроконтинентов плато Кергелен, южная часть Индийского океана. *Геотектоника*. (5), 3–21.
- Меланхолина Е.Н., Сушевская Н.М. (2018) Тектономагматическое развитие континентальных окраин южной Атлантики и раскрытие Океана. *Геотектоника*. (2), 20–41.
- Меланхолина Е.Н., Сушевская Н.М. (2019) Тектоника пассивных окраин Южного Океана в регионе Африки — Восточной Антарктиды. *Геотектоника*. (4), 25–42.
- Меланхолина Е.Н. (2021) Соотношение поверхностной и глубинной тектоники в пределах африканского региона (по геолого-геофизическим данным). *Геотектоника*. (6), 98–108.
- Пучков В.Н. (2009) “Великая дискуссия” о плюмах: так кто же все-таки прав? *Геотектоника*. (1), 3–22.
- Соболев А.В., Криволуцкая Н.А., Кузьмин Д.В. (2009) Петрология родоначальных расплавов и мантийных источников магм Сибирской трапповой провинции. *Петрология*. **17**(3), 276–310.
- Соловова И.П., Когарко Л.Н., Аверин А.А. (2015) Условия образования сульфидов в метасоматизированной мантии под Восточной Антарктидой. *Петрология*. **23**(6), 563–588.
- Сушевская Н.М., Беляцкий Б.В., Лейченко Г.Л., Лайба А.А. (2009) Эволюция мантийного плюма Кару-Мод в Антарктике и его влияние на магматизм ранних стадий раскрытия Индийского океана. *Геохимия*. (1), 3–20.
- Sushchevskaya N.M., Belyatsky B.V., Leichenkov G.L., Laiba A.A. (2009) Evolution of the Karoo–Maud mantle plume in Antarctica and its influence on the magmatism of the early stages of Indian Ocean opening. *Geochem. Int.* **47**(1), 1–17.
- Сушевская Н.М., Мигдисова Н.А., Антонов А.В., Крымский Р.Ш., Беляцкий Б.В., Кузьмин Д.В., Бычкова Я.В. (2014) Геохимические особенности лампроитовых лав четвертичного вулкана Гауссберг (восточ-

ная Антарктида) — результат влияния мантийного плюма Кергелен. *Геохимия*. (12), 1077–1098.

Sushchevskaya N.M., Migdisova N.A., Antonov A.V., Krymsky R.Sh., Belyatsky B.V., Kuzmin D.V., Bychkova Ya.V. (2014) Geochemical features of the Quaternary lamproitic lavas of Gaussberg volcano, East Antarctica: result of the impact of the Kerguelen plume. *Geochem. Int.* **52**(12), 1030–1048.

Сушевская Н.М., Беляцкий Б.В., Дубинин Е.П., Левченко О.В. (2017) Эволюция плюма Кергелен и его влияние на магматизм континентальных и океанических областей восточной Антарктиды. *Геохимия*. (9), 782–799.

Sushchevskaya N.M., Belyatsky B.V., Dubinin E.P., Levchenko O.V. (2017) Evolution of the Kerguelen plume and its impact upon the continental and oceanic magmatism of East Antarctica. *Geochem. Int.* **55**(9), 775–791.

Сушевская Н.М., Беляцкий Б.В., Ткачева Д.А., Лейченко Г.Л., Кузьмин Д.В., Жилкина А.В. (2018) Ранне меловой щелочной магматизм восточной Антарктиды (специфика, условия формирования, взаимосвязь с плюмом Кергелен). *Геохимия*. (11), 1005–1025.

Sushchevskaya N.M., Belyatsky B.V., Tkacheva D.A., Leitchenkov G.L., Kuzmin D.V., Zhilkina A.V. (2018) Early Cretaceous alkaline magmatism of East Antarctica: peculiarities, conditions of formation, and relationship with the Kerguelen plume. *Geochem. Int.* **56**(11), 1051–1070.

Сушевская Н.М., Беляцкий Б.В., Лейченко Г.Л., Батанова В.Г., Соболев А.В. (2019) Изотопная характеристика юрского плюмового магматизма в провинции Альманнррюгген (Земля Королевы Мод, Восточная Антарктида). *ДАН*. **486**(1), 97–101.

Сушевская Н.М., Соболев А.В., Лейченко Г.Л., Батанова В.Г., Беляцкий Б.В., Жилкина А.В. (2021) Роль пироксенитовой мантии в формировании расплавов мезозойского плюма Кару (по результатам изучения магматических пород западной части Земли Королевы Мод). *Геохимия*. **66**(4), 308–328.

Sushchevskaya N.M., Sobolev A.V., Leitchenkov G.L., Batanova V.G., Belyatsky B.V., Zhilkina A.V. (2021) Role of pyroxenite mantle in the formation of the Mesozoic Karoo plume melts: evidence from the Western Queen Maud Land, East Antarctica. *Geochem. Int.* **59**(4), 357–376.

Сушевская Н.М., Лейченко Г.Л., Беляцкий Б.В., Жилкина А.В. (2022) Эволюция плюма Кару-Мод и его влияние на формирование мезозойских магматических провинций в Антарктиде. *Геохимия*. **67**(6), 503–525.

Sushchevskaya N.M., Leitchenkov G.L., Belyatsky B.V., Zhilkina A.V. (2022) Evolution of the Karoo-Maud plume and formation of Mesozoic igneous provinces in Antarctica. *Geochem. Int.* **60**(6), 509–529.

Anderson D.L. (2000) The thermal state of the upper mantle; no role for mantle plumes. *Geophys. Res. Lett.* **27**, 3623–3626.

Andronikov A.V., Sheraton J.W. (1996) The redox state of the lithospheric upper mantle beneath the East Antarctic Shield. *Terra Antarct.* **3**, 39–48.

Andronikov A.V., Andronikova I.E., Sidorinova T. (2021) Trace-element geochemistry of sulfides in upper mantle lherzolite xenoliths from East Antarctica. *Minerals*. **11**, 773. <https://doi.org/10.3390/min1107077>

Armienti P., Longo P. (2011) Three-dimensional representation of geochemical data from a multidimensional compositional space. *Inter. J. Geosci.* **2**, 231–239.

Arndt N.T., Christensen U. (1992) The role of lithospheric mantle in continental flood volcanism: thermal and geochemical constraints. *J. Geophys. Res.* **97**(B7), 10967–10981.

Austermann J., Kaye B.T., Mitrovica J.X., Huybers P. (2014) A statistical analysis of the correlation between large igneous provinces and lower mantle seismic structure. *Geophys. J. Inter.* **197**, 1–9.

Baes M., Sobolev S., Gerya T., Brune S. (2020) Plume-induced subduction initiation: single-slab or multi-slab subduction? *Geochem. Geophys. Geosyst.* **21**, e2019GC008663. <https://doi.org/10.1029/2019GC008663>

Betts P.G., Mason W.G., Moresi L. (2012) The influence of a mantle plume head on the dynamics of a retreating subduction zone. *Geology* **40**(8), 739–742.

Birck J.L., Barman M.R., Capmas F. (1997) Re-Os isotopic measurements at the femtomole level in natural samples. *Geostand. Newslett.* **20**, 19–27.

Botcharnikov R.E., Holtz H., Mungall J.E., Beermann O., Linnen R.L., Garbe-Schönberg D. (2013) Behavior of gold in a magma at sulfide-sulfate transition: revisited. *Am. Mineral.* **98**, 1459–1464.

Brauns C.M., Hergt J.M., Woodhead J.D., Maas R. (2000) Os isotopes and the origin of the Tasmanian dolerites. *J. Petrol.* **41**, 905–918.

Brenan J.M. (2008) Re–Os fractionation by sulfide melt-silicate melt partitioning: a new spin. *Chem. Geol.* **248**, 140–165.

Buiter S.J.H., Torsvik T.H. (2014) A review of Wilson cycle plate margins: a role for mantle plumes in continental break-up along sutures? *Gondwana Res.* **26**, 627–653.

Burgess S.D., Bowring S.A., Fleming T.H., Elliot D.H. (2015) High-precision geochronology links the Ferrar large igneous province with early-Jurassic anoxia and biotic crisis. *Earth Planet. Sci. Lett.* **415**, 90–99.

Burke K. (2011) Plate tectonics, the Wilson cycle, and mantle plumes: geodynamics from the top. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* **39**, 1–29.

Burke K., Dewey J.F. (1973) Plume-generated triple junctions: key indicators in applying plate tectonics to old rocks. *J. Geol.* **81**, 406–433.

Burke K., Steinberger B., Torsvik T.H., Smethurst M.A. (2008) Plume generation zones at the margins of large low shear velocity provinces on the core–mantle boundary. *Earth Planet. Sci. Lett.* **265**, 49–60.

Burton K.W., Gannoun A., Birck J.-L., Allegre C.-J., Schiano P., Clocchiatti R., Alard O. (2002) The compatibility of rhenium and osmium in natural olivine and their behavior during mantle melting and basalt genesis. *Earth Planet. Sci. Lett.* **198**, 63–76.

Cai R., Liu J., Pearson D.G., Li D., Xu Y., Liu S.-A., Chu Z., Chen L.-H., Li Sh. (2021) Oxidation of the deep big mantle wedge by recycled carbonates: constraints from highly siderophile elements and osmium isotopes. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **295**, 207–223.

Campbell I.H. (2005) Large igneous provinces and the mantle plume hypothesis. *Elements*. **1**, 265–269.

Campbell I.H. (2007) Testing the plume theory. *Chem. Geol.* **241**, 153–176.

- Campbell I.H., Griffiths R.W. (1990) Implications of mantle plumes for the evolution of flood basalts. *Earth Planet. Sci. Lett.* **99**, 79–93.
- Campbell I.H., Kerr A.C. (2007) The great plume debate: testing the plume theory. *Chem. Geol.* **241**(3–4), 149–152.
- Carlson R.W. (1991) Physical and chemical evidence on the cause and source characteristics of flood basalt volcanism. *Australian J. Earth Sci.* **38**, 525–544.
- Carlson R.W. (2005) Application of the Pt–Re–Os isotopic systems to mantle geochemistry and geochronology. *Lithos.* **82**, 249–272.
- Chalapathi Rao N.V., Srivastava R.K., Sinha A.K., Ravikant V. (2014) Petrogenesis of Kerguelen mantle plume linked Early Cretaceous ultrapotassic intrusive rocks from the Gondwana sedimentary basins, Damodar Valley, Eastern India. *Earth-Sci. Rev.* **136**, 96–120.
- Chesley J., Richter K., Ruiz J. (2004) Large-scale mantle metasomatism: a Re–Os perspective. *Earth Planet. Sci. Lett.* **219**, 49–60.
- Choi S.H., Mukasa S.B., Ravizza G., Fleming T.H., Marsh B.D., Bédard J.H.J. (2019) Fossil subduction zone origin for magmas in the Ferrar Large Igneous Province, Antarctica: evidence from PGE and Os isotope systematics in the Basement Sill of the McMurdo Dry Valleys. *Earth Planet. Sci. Lett.* **506**, 507–519.
- Coffin M.F., Pringle M.S., Duncan R.A., Gladezenko T.P., Storey M., Muller R.D., Gahagan L.A. (2002) Kerguelen hotspot magma output since 130 Ma. *J. Petrol.* **43**, 1121–1139.
- Dale C.W., Gannoun A., Burton K.W., Argles T.W., Parkinson I.J. (2007) Rhenium–osmium isotope and elemental behavior during subduction of oceanic crust and the implications for mantle recycling. *Earth Planet. Sci. Lett.* **253**, 211–225.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.10.029>
- Dale C.W., Macpherson C.G., Pearson D.G., Hammond S.J., Arculus R.J. (2012) Inter-element fractionation of highly siderophile elements in the Tonga arc due to flux melting of a depleted source. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **89**, 202–225.
- Dalziel I.W.D., Lawver L.A., Murphy J.B. (2000) Plumes, orogenesis, and supercontinental fragmentation. *Earth Planet. Sci. Lett.* **178**, 1–11.
- Day J.M.D. (2013) Hotspot volcanism and highly siderophile elements. *Chem. Geol.* **341**, 50–74.
- Deplech G., Lorand J.-P., Gregoire M., Cottin J.-Y., O'Reilly S. (2012) In-situ geochemistry of sulfides in highly metasomatized mantle xenoliths from Kerguelen, southern Indian Ocean. *Lithos.* **154**, 296–314.
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.07.018>
- Duncan R.A., Hooper P.R., Rehacek J., Mash J.S., Duncan A.R. (1997) The timing and duration of the Karoo igneous event, southern Gondwana. *J. Geophys. Res., Solid Earth.* **102**, 18127–18138.
- East M., Müller R.D., Williams S., Zahirovic S. (2020) Subduction history reveals Cretaceous superflux as a possible cause for the mid-Cretaceous plume pulse and supeswell events. *Gondwana Res.* **79**, 125–139.
- Ellam R.M., Cox K.G. (1989) A Proterozoic lithospheric source for Karoo magmatism: evidence from the Nuanetsi picrites. *Earth Planet. Sci. Lett.* **92**, 207–218.
- Ellam R.M., Carlson R.W., Shirey S.B. (1992) Evidence from Re–Os isotopes for plume–lithosphere mixing in Karoo flood basalt genesis. *Nature.* **359**(6397), 718–721.
- Elliot D.H., Fleming T.H. (2000) Weddell triple junction: the principal focus of Ferrar and Karoo magmatism during initial breakup of Gondwana. *Geology.* **28**, 539–542.
- Elliot D.H., Fleming T.H. (2004) Occurrence and dispersal of magmas in the Jurassic Ferrar large igneous province, Antarctica. *Gondwana Res.* **7**, 223–237.
- Elliot D.H., Fleming T.H. (2008) Physical volcanology and geological relationships of the Jurassic Ferrar Large Igneous Province, Antarctica. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* **172**, 20–37.
- Elliot D.H., Fleming T.H. (2018) The Ferrar Large Igneous Province: field and geochemical constraints on supra-crustal (high-level) emplacement of the magmatic system. *GSL Spec. Publ.* **463**, 41–58.
- Elliot D.H., Fleming T.H. (2021) Ferrar Large Igneous Province: petrology. *GSL Memoirs.* **55**, 93–119.
<https://doi.org/10.1144/M55-2018-39>
- Ernst W.G. (2007) Speculations on evolution of the terrestrial lithosphere–asthenosphere system — plumes and plates. *Gondwana Res.* **11**, 38–49.
- Ernst R.E., Buchan K.L. (2001) Large mafic magmatic events through time and links to mantle–plume heads. *GSA Spec. Paper.* **352**, 483–575.
- Ernst R.E., Buchan K.L. (2002) Maximum size and distribution in time and space of mantle plumes: evidence from large igneous provinces. *J. Geodynamics.* **34**, 309–342.
- Ernst R.E., Buchan K.L. (2003) Recognizing mantle plumes in the geological record. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* **31**, 469–523.
- Ernst R.E., Liikane D.A., Jowitt S.M., Buchan K.L., Blanchard J.A. (2019) A new plumbing system framework for mantle plume-related continental large igneous provinces and their mafic-ultramafic intrusions. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* **384**, 75–84.
- Farnetani C.G., Richards M.A. (1994) Numerical investigations of the mantle plume initiation model for flood basalt events. *J. Geophys. Res.* **99**(B7), 13813–13833.
- Ferraccioli F., Jones P.C., Curtis M.L., Leat P.T., Riley T.R. (2005) Tectonic and magmatic patterns in the Jutulstraumen rift (?) region, East Antarctica, as imaged by high-resolution aeromagnetic data. *Earth Planet. Space.* **57**, 767–780.
- Fletcher M., Wyman D.A., Zahirovic S. (2020) Mantle plumes, triple junctions and transforms: a reinterpretation of Pacific Cretaceous–Tertiary LIPs and the Laramide connection. *Geosci. Front.* **11**, 1133–1144.
- Foley S.F., Andronikov A.V., Jacob D.E., Melzer S. (2006) Evidence from Antarctic mantle peridotite xenoliths for changes in mineralogy, geochemistry and geothermal gradients beneath a developing rift. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **70**, 3096–3120.
- Foley S.F., Andronikov A.V., Halpin J.A., Daczko N.R., Jacob D.E. (2021) Mantle rocks in East Antarctica. *GSL Memoirs.* **56**.
<https://doi.org/10.1144/M56-2020-8>
- Fonseca R.O.C., Mallmann G., O'Neill HSt.C.O., Campbell I.H. (2007) How chalcophile is rhenium? An experimental study of the solubility of Re in sulphide mattes. *Earth Planet. Sci. Lett.* **260**, 537–548.

- Foulger G.R. (2010) *Plates vs plumes: a geological controversy*. Wiley-Blackwell, Chichester UK, 364 p.
- Foulger G.R., Natland J.H., Presnell D.C., Anderson D.L. (2005) Plates, Plumes, and Paradigms. *GSA Spec. Paper*. **388**, 881 p.
- Frey F.A., McNaughton N.J., Nelson D.R., de Laeter J.R., Duncan R.A. (1996) Petrogenesis of the Bunbury Basalt, Western Australia: interaction between the Kerguelen plume and Gondwana lithosphere. *Earth Planet. Sci. Lett.* **144**, 163–183.
- Gannoun A., Burton K.W., Day J.M.D., Harvey J., Schiano P., Parkinson I. (2016) Highly siderophile element and Os isotope systematics of volcanic rocks at divergent and convergent plate boundaries and in intraplate settings. *Rev. Mineral. Geochem.* **81**, 651–724.
- Ghatak A., Basu A.R. (2013) Isotopic and trace element geochemistry of alkalic-mafic-ultramafic-carbonatitic complexes and flood basalts in NE India: origin in a heterogeneous Kerguelen plume. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **115**, 46–72.
- Gerya T.V., Stern R.J., Baes M., Sobolev S.V., Whattam S.A. (2015) Plate tectonics on the Earth triggered by plume-induced subduction initiation. *Nature*. **527**, 221–225.
- Giacomoni P.P., Bonadiman C., Casetta F., Faccini B., Ferlito C., Ottolini L., Zanetti A., Coltorti M. (2020) Long-term storage of subduction-related volatiles in Northern Victoria Land lithospheric mantle: insight from olivine-hosted melt inclusions from McMurdo basic lavas (Antarctica). *Lithos*. **378–379**, 105826. <https://doi.org/j.lithos.2020.105826>
- Goodge J.W. (2020) Geological and tectonic evolution of the Transantarctic Mountains, from ancient craton to recent enigma. *Gondwana Res.* **80**, 50–122. <https://doi.org/10.1016/j.jgr.2019.11.001>
- Hagen-Peter G., Cottle J.M. (2016) Synchronous alkaline and subalkaline magmatism during the late Neoproterozoic-early Paleozoic Ross orogeny, Antarctica: insights into magmatic sources and processes within a continental arc. *Lithos*. **262**, 677–698.
- Hart S.R. (1984) A large-scale isotope anomaly in the southern hemisphere mantle. *Nature*. **309**, 753–757.
- Harvey J., Gannoun A., Burton K.W., Rogers N.W., Schiano P., Alard O. (2010) Unravelling the effects of melt depletion and secondary infiltration on mantle Re–Os isotopes beneath the French Massif Central. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **74**, 293–320.
- Harvey J., Dale C.W., Gannoun A., Burton K.W. (2011) Osmium mass balance in peridotite and the effects of mantle-derived sulphides on basalt petrogenesis. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **75**, 5574–5596.
- Hassan R., Flament N., Gurnis M., Bower D.J., Müller D. (2015) Provenance of plumes in global convection models. *Geochim. Geophys. Geosyst.* **16**, 1465–1489. <https://doi.org/10.1002/2015GC005751>
- Hastie A.R., Kerr A.C. (2010) Mantle plume or slab window?: physical and geochemical constraints on the origin of the Caribbean oceanic plateau. *Earth-Sci. Rev.* **98**, 283–293. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.11.001>
- He D., Liu Y., Moynier F., Foley S.F., Chen Ch. (2020) Platinum group element mobilization in the mantle enhanced by recycled sedimentary carbonate. *Earth Planet. Sci. Lett.* **541**, 116262. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116262>
- Heinonen J.S., Luttinen A.V. (2008) Jurassic dikes of Vestfjella, western Dronning Maud Land, Antarctica: geochemical tracing of ferropicrite sources. *Lithos* **105**(3–4), 347–364.
- Heinonen J.S., Carlson R.W., Luttinen A.V. (2010) Isotopic (Sr, Nd, Pb, and Os) composition of highly magnesian dikes of Vestfjella, western Dronning Maud Land, Antarctica: a key to the origins of the Jurassic Karoo large igneous province? *Chem. Geol.* **277**, 227–244.
- Heinonen J.S., Carlson R.W., Riley T.R., Luttinen A.V., Horan M.F. (2014) Subduction-modified oceanic crust mixed with a depleted mantle reservoir in the sources of the Karoo continental flood basalt province. *Earth Planet. Sci. Lett.* **394**, 229–241.
- Heinonen J.S., Carlson R.W., Luttinen A.V., Bohrson W.A. (2016) Enriched continental flood basalts from depleted mantle melts: modeling lithospheric contamination of Karoo lavas from Antarctica. *Contrib. Mineral. Petrol.* **171**, 121–129.
- Heinonen J.S., Luttinen A.V., Whitehouse M.J. (2018) Enrichment of ^{18}O in the mantle sources of the Antarctic portion of the Karoo large igneous province. *Contrib. Mineral. Petrol.* **173**, 21–37. <https://doi.org/10.1007/s00410-018-1447-4>
- Hergt J.M., Chappell B.W., McCulloch M.T., McDougall I., Chivas A.R. (1989) Geochemical and isotopic constraints on the origin of the Jurassic dolerites of Tasmania. *J. Petrol.* **30**, 841–883.
- Hergt J.M., Peate D.W., Hawkesworth C.J. (1991) The petrogenesis of mesozoic Gondwana low-Ti flood basalts. *Earth Planet. Sci. Lett.* **105**, 134–148.
- Heron P.J. (2019) Mantle plumes and mantle dynamics in the Wilson cycle. *GSL Spec. Publ.* **470**, 87–103. <https://doi.org/10.1144/SP470-2018-97>
- Herzberg C., Asimow P.D., Arndt N., Niu Y., Leshner C.M., Fitton J.G., Cheadle M.J., Saunders A.D. (2007) Temperatures in ambient mantle and plumes: constraints from basalts, picrites, and komatiites. *Geochim. Geophys. Geosyst.* **8**(2), Q02006, 1–34. <https://doi.org/10.1029/2006GC001390>
- Hill R.I., Campbell I.H., Davies G.F., Griffiths R.W. (1992) Mantle plumes and continental tectonics. *Science*. **256**(5054), 186–193.
- Hinsbergen van D.J.J., Steinberger B., Guilmette C., Maffione M., Gurer D., Peters K., Plunder A., McPhee P.J., Gaina C., Advokaat E.L., Vissers R.L.M., Spakman W. (2021) A record of plume-induced plate rotation triggering subduction initiation. *Nature Geosci.* **14**, 626–630. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00780-7>
- Hofmann A.W., Hart S.R. (2007) Another nail in which coffin? *Science*. **315**, 39–40.
- Ingle S., Weis D., Scoates J.S., Frey F.A. (2002) Relationship between the earlier Kerguelen plume and continental flood basalts of the paleo-eastern Gondwanan margins. *Earth Planet. Sci. Lett.* **197**, 35–50.
- Ingle S., Scoates J.S., Weis D., Brüggemann G., Kent R.W. (2004) Origin of Cretaceous continental tholeiites in southwestern Australia and eastern India: insights from Hf and Os isotopes. *Chem. Geol.* **209**, 83–106.

- Ionov D.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y. (1997) Volatile-bearing minerals and lithophile trace elements in the upper mantle. *Chem. Geol.* **141**, 153-184.
- Ivanov A.V., Meffre S., Thompson J., Corfu F., Kamenetsky V.S., Kamenetsky M.B., Demonterova E.I. (2017) Timing and genesis of the Karoo-Ferrar large igneous province: new high precision U-Pb data for Tasmania confirm short duration of the major magmatic pulse. *Chem. Geol.* **455**, 32-43.
- Jellinek A.M., Manga M. (2004) Links between long-lived hot spots, mantle plumes, D", and plate tectonics. *Rev. Geophys.* **42**, 1-35, RG3002.
<https://doi.org/10.1029/2003RG000144>
- Jourdan F., Bertrand H., Sharer U., Blichert-Toft J., Feraud G., Kampunzu A.B., Le Gall B., Watkeys M.K. (2007) Major and trace element and Sr, Nd, Hf, and Pb isotope compositions of the Karoo Large Igneous Province, Botswana-Zimbabwe: lithosphere vs mantle plume contribution. *J. Petrol.* **48**, 1043-1077.
- Kent R. (1991) Lithospheric uplift in eastern Gondwana: evidence for a long-lived mantle plume system? *Geology*. **19**, 19-23.
- Kent R.W., Storey M., Saunders A.D. (1992) Large igneous provinces: sites of plume impact or plume incubation? *Geology*. **20**, 891-894.
- Kerr R.A. (2006) Rising plumes in Earth's mantle: phantom or real? *Science*. **313**, 726.
- Kerr R.A. (2013) The deep Earth machine is coming together. *Science*. **340**, 22-24.
<https://doi.org/10.1126/science.340.6128.22>
- Kerr A.C., Saunders A.D., Tarney J., Berry N.H., Hards V.L. (1995) Depleted mantle-plume geochemical signatures: no paradox for plume theories. *Geology*. **23**(9), 843-846.
- Koptev A., Burov E., Calais E., Leroy S., Gerya T., Guillou-Frottier L., Cloetingh S. (2016) Contrasted continental rifting via plume-craton interaction: applications to Central East African Rift. *Geosci. Front.* **7**, 221-236.
<https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.11.002>
- Korenaga J. (2008) Plate tectonics, flood basalts and the evolution of Earth's oceans. *Terra Nova*. **20**, 419-439.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2008.00843.x>
- Korenaga J. (2011) Velocity-depth ambiguity and the seismic structure of large igneous province: a case study from the Ontong Java Plateau. *Geophys. J. Int.* **185**, 1022-1036.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.04999.x>
- Korenaga J., Kelemen P.B., Holbrook W.S. (2002) Methods for resolving the origin of large igneous provinces from crustal seismology. *J. Geophys. Res.* **107**(B9), 2178.
<https://doi.org/10.1029/2001JB001030>
- Kranendonk M.J. (2010) Two types of Archean continental crust: plume and plate tectonics on early Earth. *Am. J. Sci.* **310**, 1187-1209.
<https://doi.org/10.2475/10.2010.01>
- Kumar A., Dayal A.M., Padmakumari V.M. (2003) Kimberlite from Rajmahal magmatic province: Sr-Nd-Pb isotopic evidence for Kerguelen plume derived magmas. *Geophys. Res. Lett.* **30**(20), 2053.
<https://doi.org/10.1029/2003GL018462>
- Kyle P.R., Elliot D.H., Sutter J.F. (1981) Jurassic Ferrar Supergroup tholeiites from the Transantarctic Mountains, Antarctica, and their relation to the initial fragmentation of Gondwana. In: Cresswall M.M., Vella P. (eds) *Gondwana Five: Proceedings of the Fifth Gondwana Symposium*, Wellington, New Zealand, Rotterdam: A.A. Balkema, 283-287.
- Leitchenkov G., Guseva J., Gandyukhin V., Grikurov G., Kristoffersen Y., Sand M., Golynsky A., Aleshkova N. (2008) Crustal structure and tectonic provinces of the Riiser-Larsen Sea area (East Antarctica): results of geophysical studies. *Marine Geophys. Res.* **29**, 135-158.
- Li Zh.-X., Zhong Sh. (2009) Supercontinent-superplume coupling, true polar wander and plume mobility: plate dominance in whole-mantle tectonics. *Phys. Earth Planet. Inter.* **176**, 143-156.
<https://doi.org/10.1016/j.pepi.2009.05.004>
- Liu J., Rudnick R.L., Walker R.J., Gao Sh., Wu F., Piccoli Ph.M. (2010) Processes controlling highly siderophile element fractionations in xenolithic peridotites and their influence on Os isotopes. *Earth Planet. Sci. Lett.* **297**, 287-297.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.06.030>
- Lohmann F.C., Hort M., Morgan J.Ph. (2009) Flood basalts and ocean island basalts: a deep source or shallow entrainment? *Earth Planet. Sci. Lett.* **284**, 553-563.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.05.025>
- Lorand J.-P., Alard O., Luguet A., Keays R.R. (2003) Sulfur and selenium systematics of the subcontinental lithospheric mantle: inferences from the Massif Central xenolith suite (France). *Geochim. Cosmochim. Acta.* **67**, 4137-4151.
- Lorand J.-P., Luguet A., Alard O. (2013) Platinum-group element systematics and petrogenetic processing of the continental upper mantle: a review. *Lithos.* **164-167**, 2-21.
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.08.017>
- Luguet A., Reisberg L. (2016) Highly siderophile element and ¹⁸⁷Os signatures in non-cratonic basalt-hosted peridotite xenoliths: unraveling the origin and evolution of the post-Archean lithospheric mantle. *Rev. Mineral. Geochem.* **81**, 305-367.
- Lustrino M., Foulger G.R., Hole M., Natland J.H. (2022) Constraints on the formation of basaltic magmas. Comment on "Lithosphere thickness controls the extent of mantle melting, depth of melt extraction and basalt compositions in all tectonic settings on Earth – a review and new perspectives" by Yaoling Niu. *Earth-Sci. Rev.*
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.103942>
- Luttinen A.V. (2018) Bilateral geochemical asymmetry in the Karoo large igneous province. *Sci. Rep.* **8**, 5223-5234.
- Luttinen A.V., Furnes H. (2000) Flood basalts of Vestfjella: Jurassic magmatism across an Archean-Proterozoic lithospheric boundary in Dronning Maud Land, Antarctica. *J. Petrol.* **41**, 1271-1305.
<https://doi.org/10.1093/petrology/41.8.1271>
- Luttinen A.V., Leat P.T., Furnes H. (2010) Björnnutane and Sembberget basalt lavas and the geochemical provinciality of Karoo magmatism in western Dronning Maud Land, Antarctica. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* **198**, 1-18.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.07.011>
- Luttinen A.V., Heinonen J.S., Kurhila M., Jourdan F., Mänttäri I., Vuori S.K., Huhma H. (2015) Depleted mantle-sourced CFB magmatism in the Jurassic Africa-Antarctica Rift: petrology and ⁴⁰Ar/³⁹Ar and U/Pb chronology of the Vestfjella dyke swarm, Dronning Maud Land, Antarctica. *J. Petrol.* **56**, 919-952.
<https://doi.org/10.1093/petrology/egv022>
- Mallmann G., O'Neill H.St.C. (2007) The effect of oxygen fugacity on the partitioning of Re between crystals and sili-

- cate melt during mantle melting. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **71**, 2837–2857.
- McNutt M.K. (2006) Another nail in the plume coffin? *Science*. **313**, 394–396.
- Meisel Th., Walker R.J., Irving A.J., Lorand J.-P. (2001) Osmium isotopic compositions of mantle xenoliths: a global perspective. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **65**, 1311–1323.
- Meisel Th., Reisberg L., Moser J., Carignan J., Melcher F., Brüggmann G. (2003) Re–Os systematics of UB-N, a serpentinized peridotite reference material. *Chem. Geol.* **201**, 161–179.
- Melchiorre M., Coltorti M., Bonadiman C., Faccini B., O'Reilly S.Y., Pearson N.J. (2011) The role of eclogite in the rift-related metasomatism and Cenozoic magmatism of Northern Victoria Land, Antarctica. *Lithos*. **124**, 319–330.
- Molzahn M., Reisberg L., Worner G. (1996) Os, Sr, Nd, Pb, O isotope and trace element data from the Ferrar flood basalts, Antarctica: evidence for an enriched subcontinental lithospheric source. *Earth Planet. Sci. Lett.* **144**, 529–546.
- Morgan W.J. (1971) Convective plumes in the lower mantle. *Nature*. **230**, 42–44.
- Mortimer N., Parkinson D., Raine J.I., Adams C.J., Graham I.J., Oliver P.J., Palmer K. (1995) Ferrar magmatic province rocks discovered in New Zealand: implications for Mesozoic Gondwana geology. *Geology*. **23**, 185–188.
- Mungall J.E., Hanley J.J., Arndt N.T., Debecdelievre A. (2006) Evidence from meimechites and other low-degree mantle melts for redox controls on mantle-crust fractionation of platinum group elements. *PNAS*. **103**, 12695–12700.
- Mungall J.E., Brenan J.M. (2014) Partitioning of platinum-group elements and Au between sulfide liquid and basalt and the origins of mantle-crust fractionation of the chalcophile elements. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **125**, 265–289.
- Natali C., Beccaluva L., Bianchini G., Siena F. (2017) Comparison among Ethiopia-Yemen, Deccan, and Karoo continental flood basalts of central Gondwana: insights on lithosphere versus asthenosphere contributions in compositionally zoned magmatic provinces. *GSA Spec. Paper*. **526**, 191–215.
[https://doi.org/10.1130/2017.2526\(10\)](https://doi.org/10.1130/2017.2526(10))
- Neumann E.-R., Svensen H., Galerne C.Y., Planke S. (2011) Multistage evolution of dolerites in the Karoo Large Igneous Province, Central South Africa. *J. Petrol.* **52**, 959–984.
- Niu Y.L. (2021) Lithosphere thickness controls the extent of mantle melting, depth of melt extraction and basalt compositions in all tectonic settings on Earth – a review and new perspectives. *Earth-Sci. Rev.* **217**, 103614.
- Niu Y.L. (2022) Paradigm shift for controls on basalt magmatism: discussion with Lustrino et al. on the paper I recently published in Earth-Science Reviews. *Earth-Sci. Rev.* <https://doi.org/10.1016/j.earthscirev.2022.103943>
- Norman M.D., Garcia M.O., Kamenetsky V.S., Roger L., Nielsen R.L. (2002) Olivine-hosted melt inclusions in Hawaiian picrites: equilibration, melting, and plume source characteristics. *Chem. Geol.* **183**, 143–168.
- Olierook H.K.H., Merle R.E., Jourdan F. (2017) Toward a Greater Kerguelen large igneous province: evolving mantle source contributions in and around the Indian Ocean. *Lithos*. **282–283**, 163–172.
- Panter K.S., Martin A.P. (2021) West Antarctic mantle deduced from mafic magmatism. *GSL Memoirs*. **56**, 1–17.
<https://doi.org/10.1144/M56-2021-10>
- Panter K.S., Li Y., Smellie J.L., Blusztajn J., Reindel J., Odegard K., Spicuzza M.J., Hart S. (2022) Mantle sources and melting processes beneath East Antarctica: geochemical and isotopic (Sr, Nd, Pb, O) characteristics of alkaline and tholeiite basalt from the Earth's southernmost (87° S) volcanoes. *Contrib. Mineral. Petrol.* **177**, 51.
<https://doi.org/10.1007/s00410-022-01914-9>
- Pernet-Fisher J.F., Howarth G.H., Pearson D.G., Woodland S., Barry P.H., Pokhilenko N.P., Pokhilenko L.N., Agashev A.M., Taylor L.A. (2015) Plume impingement on the Siberian SCLM: evidence from Re–Os isotope systematics. *Lithos*. **218–219**, 141–154.
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.01.010>
- Radhakrishna T., Soumya G.S., Satyanarayana K.V.V. (2017) Palaeomagnetism of the Cretaceous lamproites from Gondwana basin of the Damodar Valley in India and migration of the Kerguelen plume in the Southeast Indian Ocean. *J. Geodynamics*. **109**, 1–9.
- Rapela C.W., Pankhurst R.J., Fanning C.M., Herve F. (2005) Pacific subduction coeval with the Karoo mantle plume: the early Jurassic subcordilleran belt of northwestern Patagonia. *GSL Spec. Publ.* **246**, 217–239.
- Reisberg L. (2021) Osmium isotope constraints on formation and refertilization of the non-cratonic continental mantle lithosphere. *Chem. Geol.* **574**, 120245.
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120245>
- Richards M.A., Duncan R.A., Courtillot V.E. (1989) Flood basalts and hot-spot tracks: plume heads and tails. *Science*. **246**, 103–107.
- Righter K., Hauri E.K. (1998) Compatibility of rhenium in garnet during mantle melting and magma genesis. *Science*. **280**, 1737–1741.
- Riley T.R., Jordan T.A., Leat P.T., Curtis M.L., Millar I.L. (2020) Magmatism of the Weddell Sea rift system in Antarctica: implications for the age and mechanism of rifting and early stage of the Gondwana breakup. *Gondwana Res.* **79**, 185–196.
- Riley T.R., Leat P.T., Curtis M.L., Millar I.L., Duncan R.A., Fazel A. (2005) Early–Middle Jurassic dolerite dykes from western Dronning Maud Land (Antarctica): identifying mantle sources in the Karoo Large Igneous Province. *J. Petrol.* **46**, 1489–1524.
- Roy-Barman M., Allegre C.J. (1995) ¹⁸⁷Os/¹⁸⁶Os in oceanic island basalts: tracing oceanic crust recycling in the mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.* **129**, 145–161.
- Saunders A.D., England R.W., Reichow M.K., White R.V. (2005) A mantle plume origin for the Siberian traps: uplift and extension in the West Siberian Basin, Russia. *Lithos*. **79**, 407–424.
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.09.010>
- Scott J.M., Pearson D.G., Liu J., Auer A., Cooper A.F., Li D., Palmer M.C., Read S.E., Reid M.R., Woodland S.J. (2021) Osmium isotopes in peridotite xenoliths reveal major mid-Proterozoic lithosphere formation under the Transantarctic Mountains. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **312**, 25–43.
<https://doi.org/10.1016/j.gca.2021.08.009>
- Segev A. (2002) Flood basalts, continental breakup and the dispersal of Gondwana: evidence for periodic migration of upwelling mantle flows (plumes). *EGU Stephean Muller Spec. Publ. Ser.* **2**, 171–191.
- Senda R., Shimizu K., Suzuki K. (2016) Ancient depleted mantle as a source of boninites in the Izu-Bonin-Mariana

- arc: evidence from Os isotopes in Cr-spinel and magnetite. *Chem. Geol.* **439**, 110–119.
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.06.018>
- Shirey S.B., Walker R.J. (1998) The Re–Os isotope system in cosmochemistry and high temperature geochemistry. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* **26**, 423–500.
- Sleep N.H. (1990) Hotspots and mantle plumes – some phenomenology. *J. Geophys. Res. Solid Earth.* **95(B5)**, 6715–6736.
- Sleep N.H. (2006) Mantle plumes from top to bottom. *Earth-Sci. Rev.* **77**, 231–271.
- Smellie J.L., Panter K.S., Geyer A. (2021) Introduction to volcanism in Antarctica: 200 million years of subduction, rifting and continental break-up. *GSL Memoirs.* **55**, 1–6.
<https://doi.org/10.1144/M55-2020-14>
- Sobolev S.V., Sobolev A.V., Kuzmin D.V., Krivolutsкая N.A., Petrunin A.G., Arndt N.T., Radko V.A., Vasiliev Y.R. (2011) Linking mantle plumes, large igneous provinces and environmental catastrophes. *Nature.* **477**, 312–316.
<https://doi.org/10.1038/nature10385>
- Storey B.C. (1995) The role of mantle plumes in continental breakup: case histories from Gondwanaland. *Nature.* **377**, 301–308.
<https://doi.org/10.1038/377301a0>
- Storey M., Kent R.W., Saunders A.D., Salters V.J., Hergt J., Whitechurch H., Seigney J.H., Thirlwall M.F., Leat P., Ghose N.C., Gifford M. (1992) Lower Cretaceous volcanic rocks on continental margins and their relationship to the Kerguelen Plateau. *Proc. Ocean Drill. Prog. Sci. Results.* **120**, 33–53.
- Sushchevskaya N.M., Belyatsky B.V., Laiba A.V. (2011) Origin, distribution and evolution of plume magmatism in East Antarctica. In: *Volcanology* (ed. Fr. Stoppa), INTECH, Rijeka, Croatia, 3–29. ISBN: 978-953-307-434-4.
- Suzuki K., Senda R., Shimizu K. (2011) Osmium behavior in a subduction system elucidated from chromian spinel in Bonin Island beach sands. *Geology.* **39**, 999–1002.
- Torsvik T.H., Smethurst M.A., Burke K., Steinberger B. (2006) Large igneous provinces generated from the margins of the large low-velocity provinces in the deep mantle. *Geophys. J. Int.* **167**, 1447–1460.
- Torsvik T.H., Steinberger B., Ashwal L.D., Doubrovine P.V., Tronnes R.G. (2016) Earth evolution and dynamics – A tribute to Kevin Burke. *Canadian J. Earth Sci.* **53(11)**, 1073–1087.
- Waters C.L., Day J.M.D., Watanabe S., Sayit K., Zanon V., Olson K.M., Hanan B.B., Widom E. (2020) Sulfide mantle source heterogeneity recorded in basaltic lavas from the Azores. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **268**, 422–445.
<https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.10.012>
- White R.S., McKenzie D.P. (1989) Magmatism at rift zones: the generation of volcanic continental margins and flood basalts. *J. Geophys. Res. Solid Earth.* **94(B6)**, 7685–7729.
- White R.S., McKenzie D.P. (1995) Mantle plumes and flood basalts. *J. Geophys. Res.* **100**, 17543–17585.
- Widom E. (2011) Recognizing recycled osmium. *Geology.* **39**, 1087–1088.