

ЭВОЛЮЦИЯ ПЛЮМА КАРУ-МОД И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ФОРМИРОВАНИЕ МЕЗОЗОЙСКИХ МАГМАТИЧЕСКИХ ПРОВИНЦИЙ В АНТАРКТИДЕ¹

© 2022 г. Н. М. Сушевская^a, *, Г. Л. Лейченков^b, **, Б. В. Беляцкий^d, ***, А. В. Жилкина^a

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

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

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

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

*e-mail: nadyas@geokhi.ru

**e-mail: german_l@mail.ru

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

Поступила в редакцию 18.02.2021 г.

После доработки 24.08.2021 г.

Принята к публикации 24.09.2021 г.

Проведено петролого-геохимическое сравнение трех мезозойских магматических провинций Южной Африки (провинция Кару) и восточной Антарктиды (Земля Королевы Мод (ЗКМ) и Феррар). Результаты подтверждают предполагаемую связь образования феррарской магматической провинции, протягивающейся более чем на 3000 км вдоль окраины восточной Антарктиды, с мезозойским плюмом Кару–Мод. Состав источника магматических расплавов во всех трех регионах характеризуется заметными отрицательными Nb и Ta аномалиями. Такими же особенностями обладают и магмы древних даек (позднепротерозойские и раннепалеозойские) в пределах мезозойской магматической провинции Феррар. Причиной указанного сходства составов является единый долгоживущий источник магм, которым в течение длительного времени являлась литосфера Восточно-Антарктического кратона. К особенностям феррарских магматитов относится и преимущественное распространение базальтов с пониженным содержанием титана, которые выплавляются из деплетированного (претерпевшего неоднократное плавление) сублитосферного мантийного источника, обогащенного в процессе палеосубдукции калием (флюидное обогащение). Образование магматической провинции Феррар происходило за счет латерального распространения материала плюма Кару–Мод (в виде мегаапофиза от основной области его проявления) при плавлении метасоматически измененной гондванской мантии вблизи тихоокеанской зоны палеосубдукции. Специфические условия образования под воздействием субдукционного флюида привели к обогащению первичных расплавов провинции Феррар крупноионными литофильными элементами, такими как U, Th, и Rb. Вариации изотопного состава этих расплавов образуют тренд смешения от мантийного источника, по составу близкого к обогащенным магмам провинций Кару и ЗКМ ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$: 0.708, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$: 0.5122, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 18.2, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 15.6, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 37.6), до источника с повышенными значениями $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 20.5, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 15.7, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 40.3 и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$: 0.716 и пониженными $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$: 0.5124, который может быть результатом проявления процесса флюидного обогащения мантийного вещества в зоне палеосубдукции. Определенный нами изотопный состав древних магм, территориально приуроченных к области распространения изверженной провинции Феррар, попадает в поле составов мезозойских магматических пород провинций Кару и ЗКМ.

Ключевые слова: плюм Кару–Мод, магматическая провинция Феррар, изотопный состав расплавов, геохимия литофильных элементов

DOI: 10.31857/S0016752522060097

ВВЕДЕНИЕ

Образование крупных изверженных (трапповых) провинций и их связь с мантийными плюма-

ми глубинного заложения продолжает оставаться предметом активных дебатов (Albarede, 1992; Anderson 1994; Anderson, Natland, 2005; Arndt, Christensen, 1992; Ernst, Buchan, 2001; Ernst et al., 2021; Farmer, 2003; Farnetani, Richards, 1994; Foulger et al., 2005; Peters, Day, 2017; Storey, Kyle, 1997 и др.).

¹ Дополнительная информация для этой статьи доступна по doi 10.31857/S0016752522060097 для авторизованных пользователей.

Многие исследователи связывают появление таких провинций с декомпрессионным плавлением нижележащей мантии в ходе плитотектонических процессов (Anderson, 2000, 2005; Foulger, Jurdy, 2007; King, Anderson, 1995; Natland, 1989; Elkins-Tanton, 2005). Тем не менее, очевидная причина появления крупных магматических провинций связана с термальной аномалией в субконтинентальной мантии (Coltice et al., 2007; Garfunkel, 2008; Johnston, Thorkelson, 2000; Richards et al., 1989; Thompson, Gibson, 2000; White, McKenzie, 1989). Внедрение мантийного плюма Кару–Мод в литосферу суперконтинента Гондвана около 180 млн лет назад привело к образованию крупных изверженных провинций на смежных территориях южной Африки (провинция Кару) и Антарктиды (восточная часть Земли Королевы Мод) и, возможно, к последующему распаду суперконтинента (Dalziel et al., 2000; Elliot, Fleming, 2000). Предполагается, что этот плюм способствовал так же формированию линейно вытянутых магматических провинций (Elliot, Fleming, 2004; Sushchevskaya et al., 2011; Сушевская и др., 2017), которые можно рассматривать в качестве мегаапофизов от основной, изометричной в проекции на земную поверхность, области проявления плюмового магматизма (рис. 1). Одна из них прослежена подо льдом и осадками шельфа вдоль побережья Земли Королевы Мод вплоть до Земли Эндерби и маркируется высокоинтенсивной линейной магнитной аномалией, а также моделируется на основании гравиметрических данных (Лейченко и др., 2003; Leitchenkov et al., 2008). Другая, известная как провинция Феррар (Elliot, Fleming, 2004, 2008, 2018), протягивается почти на 3500 км вдоль границы Восточной и Западной Антарктиды до юго-восточной оконечности Австралии, Тасмании и Новой Зеландии (рис. 1).

В настоящее время трапповый магматизм, связанный с плюмом Кару–Мод в пределах Антарктиды и Африки, охарактеризован как детальными геологическими, так и геохимическими, и изотопно-геохимическими исследованиями в разных районах проявления (Coetzee, Kisters, 2018; Duncan et al., 1997; Ellam, Cox, 1991; Ellam et al., 1992; Ellam, 2006; Jourdan et al., 2006, 2007; Nastie et al., 2014; Heinonen, Luttinen, 2010; Heinonen et al., 2010, 2013; Luttinen, Furnes, 2000; Luttinen et al., 2010, 2015; Neumann et al., 2011; Sushchevskaya et al., 2011; Svensen et al., 2012; Сушевская и др., 2019, 2021; и др.). В настоящей статье рассматриваются геохимические особенности мезозойского магматизма Антарктиды на основе детального изучения базальтоидных образований провинции Феррар. Не менее важным, на наш взгляд, является сравнение древних базальтоидов и мезозойских пород, распространенных, по существу, в одних и тех же районах; до сих пор из-за малочисленности данных по древним проявлени-

ям магматизма такое сравнение не проводилось. Особое внимание уделено описанию модели эволюции плюма Кару–Мод в пределах Антарктиды и места изверженной провинции Феррар в распространении мезозойского плюма.

Взаимодействие плюмовой тектоники и плитотектоники для палеоконтинента Гондвана (750–160 млн лет назад) изучены в недостаточной мере (Dalziel et al., 2000; Elliot, Fleming, 2000; Storey et al., 2013; Svensen et al., 2018). Мезозойские плюмы приурочены, главным образом, к окраинам современных континентов и их формирование происходило в краткий промежуток времени, но являются ли восходящие плюмы причиной раскола суперконтинента в мезозойское время, или горизонтальное перемещение тектонических плит, – остается до конца не ясным (Hole et al., 1995; Martin, 2007; Betts et al., 2012; Dalziel, 2013). Для объяснения причины формирования протяженных магматических провинций, может быть использована модель существования в субконтинентальной астеносферной мантии долгоживущих термальных аномалий (White, McKenzie, 1989; Thompson, Gibson, 2000; Sweeney et al., 1991; Coltice et al., 2007), описывающая возникновение и развитие крупных плюмов, либо модель декомпрессионного плавления мантии в процессе субгоризонтального перемещения плит (Anderson, 2000, 2005; Elkins-Tanton, Hager, 2000; Gallagher, Hawkesworth, 1992; Hole, 2015).

Главная цель данной статьи – провести петролого-геохимическое сравнение магматической провинции Феррар с одновозрастными крупными изверженными провинциями Кару (Южная Африка) и Земли Королевы Мод (ЗКМ) (Encarnacion et al., 1996; Duncan et al., 1997; Fleming et al., 1997; Minor, Mukasa, 1997; Riley, Knight, 2001) для выявления особенностей развития плюма Кару–Мод и определения его специфики. Исследование выполнено на основе геохимической базы данных магматических пород провинции Феррар, созданной по литературным источникам и отчетам Российских антарктических экспедиций, и с использованием международной базы GEOROC (Antonini, et al., 1999; Brewer et al., 1992, 1996; Brotzu et al., 1988; Compston et al., 1968; Demarchi et al., 2001; Elliot et al., 1995; 1999; Faure et al., 1974, 1982, 1991; Fleck et al., 1977; Fleming et al., 1992, 1995, 1997; Foland et al., 1993; Ford, Kistler, 1980; Gunn, 1966; Heimann et al., 1994; Hergt et al., 1989; Hoers et al., 1980, 1989; Hornig, 1993; Kyle, 1980; Melluso et al., 2014; Mensing et al., 1991, 1996; Molzahn et al., 1996; Riley et al., 2001; Semenov et al., 2014; Sidcrs, Elliot, 1985; Sung et al., 2019; Zavala et al., 2011; Zieg, Marsh, 2012). Дополнительно были изучены 28 образцов из коллекции ФГБУ “ВНИИОкеангеология” (табл. 1 и 2, приложение). Всего для геохимического сравнения использовано более 300 анализов образцов с установленным возрастом, из

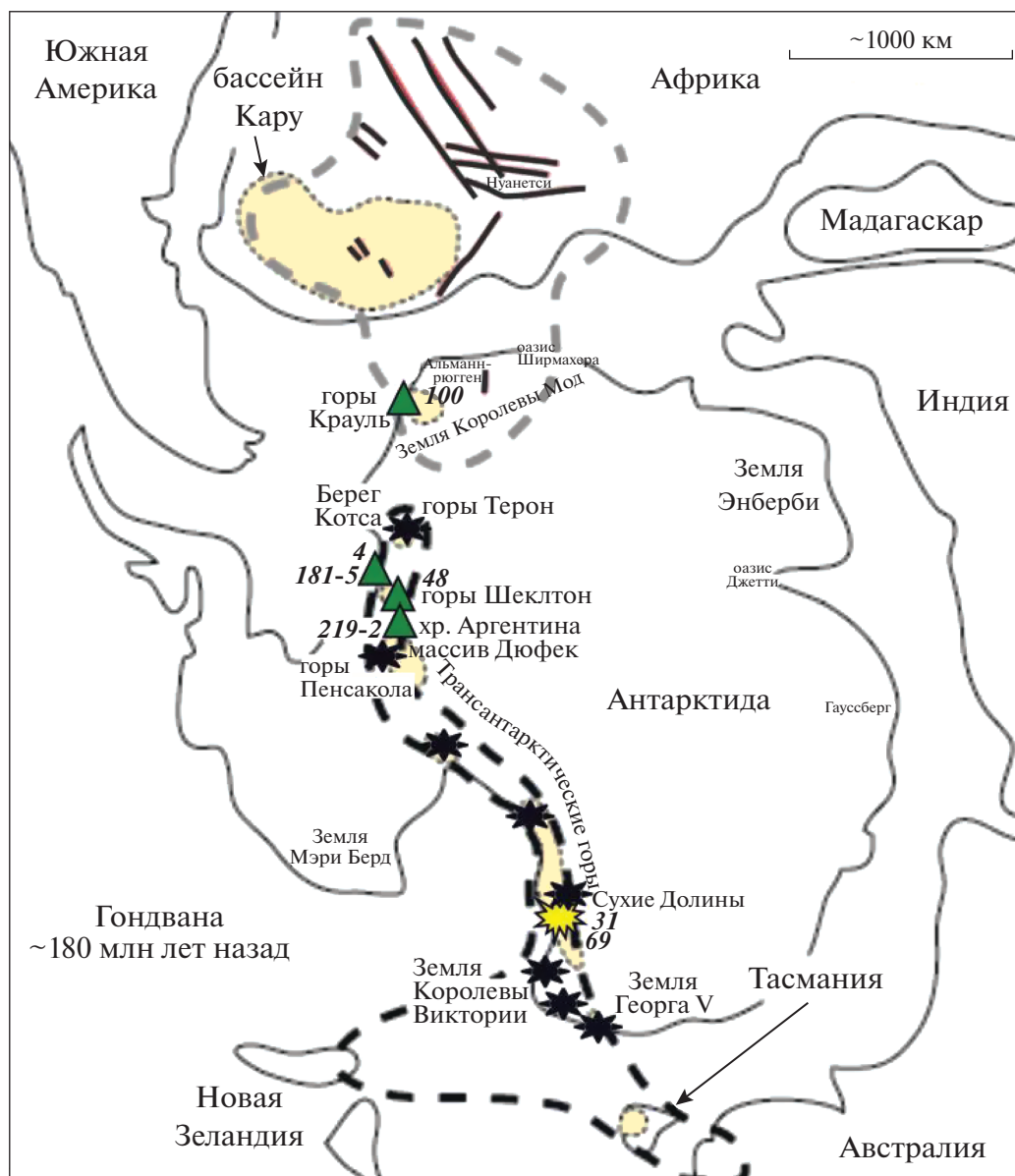


Рис. 1. Положение основных магматических проявлений крупной изверженной провинции Феррар на реконструкции древней Гондваны (по Encarnación et al., 1996) и изученных образцов. Серой штриховой линией показаны контуры магматической провинции Кару–Мод, черной – Феррар. Треугольники – древние дайки в пределах Феррарской провинции; звездочки – мезозойские породы; отрезки черного цвета – мезозойские дайки плюма Кару–Мод. Номера образцов соответствуют образцам табл. 1. Серым цветом залиты площади распространения пород девонской группы Бикон и их аналогов (включая осадки бассейна Кару, Африка).

которых 46 имели полную информацию о составе как петрогенных, так и следовых элементов, и только 35 сопровождалась изотопным составом Sr, Nd и Pb. На рисунке 1 показаны районы распространения магматизма, связанного с плюмом Кару–Мод (183–180 млн лет назад), и положение основных ранее опробованных геологических объектов феррарской провинции – горы Терон (60 образцов), массив Дюфек (20 образцов), Сухие Долины и горы Принца Альберта (193 образца). В коллекцию дополнительно изученных об-

разцов магматических пород основного состава провинции Феррар были включены образцы древних (протерозойского и палеозойского возраста) долеритовых даек, развитых в пределах гор Шеклтон и Земли Котса (Marsh et al., 1984; Brewer et al., 1992; Gose et al., 1997; Spaeth et al., 1995; Krohne et al., 2018), для характеристики внутриплитного магматизма, предшествовавшего внедрению мезозойского плюма, и уточнения закономерностей эволюции верхнемантийных источников в пределах провинции на протяжении геологиче-

ского времени. Надо подчеркнуть, что принадлежность базитов к мезозойскому или более древнему магматизму не всегда очевидна, т.к. часто дайки и силлы залегают в одних и тех же структурах, а их взаимоотношения в полевых условиях невозможно установить. Так, в районе гор Шеклтон упомянутые палеозойские дайки встречены среди описанных находок долеритов мезозойского возраста (Hotten, 1993, 1995; Spaeth et al., 1995). Единственным доказательством принадлежности к феррарскому магматизму в этом случае остается независимое определение абсолютного возраста конкретного проявления базитов.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Валовые составы базальтов (табл. 1, приложение) определены рентгено-флюоресцентным методом в ГЕОХИ РАН на спектрометре AXIOS Advanced (PANalytical B.V.). Прибор оснащен рентгеновской трубкой с Rh анодом, мощностью 3 kW сканирующим каналом с кристаллами-анализаторами (PE-002-C, PX-1, GeIII-C, LIF-200, LIF-220) и детектирующим устройством. Пробы для анализа были изготовлены прессованием в таблетки диаметром 20 мм растертого до 200 меш исходного материала весом 300 мг с добавлением в качестве связывающего вещества полистирола в соотношении 5 : 1. Из отдельной навески определялась “потеря при прокаливании”.

Содержание литофильных элементов определялось в Центральной Аналитической Лаборатории ГЕОХИ РАН (Москва) по оригинальной методике разложения геологических проб массой 100 мг в открытой системе (Колотов и др., 2020). В работе использовали квадрупольный масс-спектрометр с индуктивно связанной плазмой XSeries II (Thermo Scientific) Для верификации процедуры анализа использовались стандартные образцы базальтов (BHVO-2, VIR-1, BCR-2). Долговременная воспроизводимость анализа для большинства элементов достигала 2–5%, для тугоплавких металлов (Mo, W, Ta), Cd и Cs 5–7%, редкоземельных элементов 5–10%.

Изотопный состав Sr, Nd и Pb в породах определялся в Центре изотопных исследований ФГБУ “ВСЕГЕИ” (С.-Петербург, табл. 4, приложение). Химическая сепарация элементов осуществлялась хроматографическим методом на ионообменных колонках. Бланки (холостой опыт) при проведении анализов не превышали 0.01 и 0.1 нг для Rb и Sr, и 0.02 нг для Sm, Nd, и 0.01 нг для Pb. Содержания элементов определялись методом изотопного разбавления с добавлением калиброванного изотопного трассера по ранее опубликованной методике (Лучицкая и др., 2017). Измерения изотопного состава элементов проводились на многоколлекторном твердофазном масс-спектрометре TRITON (Thermo Scientific) в статиче-

ском режиме регистрации масс-спектров. Для нормализации измеренных изотопных отношений использовались природные значения отношений $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 8.375209 и $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 0.7219. Изотопный состав международных стандартов в процессе аналитических сессий соответствовал: $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$: 0.512109 \pm 0.000006 (JNdi-1), $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$: 0.710225 \pm 12 (SRM-987), $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 16.913 \pm 0.001, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 15.451 \pm 0.001, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 36.594 \pm 0.001 (SRM-981).

Датирование единичных зерен бадделита из образца (48Г) долерита дайки гор Шеклтон (табл. 3, приложение) производилось локальным U-Th-Pb изотопным методом на вторично-ионном масс-спектрометре SHRIMP-II в ЦИИ ФГБУ “ВСЕГЕИ” по ранее разработанной и описанной методике (Rodionov et al., 2012). Интенсивность первичного пучка молекулярных отрицательно заряженных ионов кислорода составляла 4 нА, при этом диаметр аналитического пятна на поверхности зерен бадделита достигал 25 мкм. Обработка полученных данных осуществлялась в программе SQUID-1.0 (Ludwig, 2001), а построение графиков с конкордией — с применением ISOPLOT/EX (Ludwig, 2013). Измерения проводились относительно стандарта бадделита “Phalaborwa” с известным изотопным отношением $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ равным 0.37652, что соответствует возрасту 2060 млн лет. Коррекция измеренных изотопных отношений на состав и содержание нерадиогенного свинца производилась по измеренному ^{208}Pb изотопу и современному изотопному составу свинца согласно модели Стейси-Крампера (Stacey, Kramers, 1975).

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ПРОВИНЦИИ ФЕРРАР И ОСОБЕННОСТИ МАГМАТИЗМА

Магматическая провинция Феррар, в сегодняшних географических координатах протягивающаяся от Земли Котса через Трансантарктические горы до Земли Виктории и Земли Георга V и далее в Юго-Восточную Австралию и Новую Зеландию (Kyle, 1980; Kyle et al., 1981; Elliot, Fleming, 2004, 2008; Hergt et al., 1989, 1991; Mortimer et al., 1995), была сформирована 183 млн лет назад практически синхронно с проявлением магматизма в провинции Кару (Южная Африка) и на Земле Королевы Мод (Восточная Антарктида). Это позволяет связать эти события с воздействием крупного суперплюма Кару на юго-западную часть палеоконтинента Гондвана (Heimann et al., 1994; Encarnacion et al., 1996; Duncan et al., 1997; Fleming et al., 1997; Minor, Mukasa, 1997; Riley, Knight, 2001; Riley et al., 2005; 2006). При этом провинция Феррар пересекает регионы с различным тектоническим строением и возрастом земной коры. Так горы Терон и Шеклтон сложены

преимущественно архейскими и протерозойскими метаморфическими комплексами кристаллического щита Восточной Антарктиды (Leat et al., 2005; Will et al., 2009), тогда как Трансантарктические горы и юго-восточная Австралия комплексами раннепалеозойского подвижного пояса (Elliot, 2013).

Общий объем изверженных магм в пределах Антарктиды оценивается приблизительно в 200000 км³ (Leat, 2008; Dalziel, 2013). Магматическая провинция Феррар сформировалась практически одновременно, менее чем за 0.4 млн лет (средний возраст 182.7 млн лет, Burgess et al., 2015; Ivanov et al., 2017; Elliot, Fleming, 2018), на всей площади проявления и включает в свой состав эффузивные и интрузивные образования. Юрский магматизм Трансантарктических гор представлен силлами и дайками (долериты Феррар), внедренными в палеозойскую (платформенную) осадочную толщу (Riley, Knight, 2001; Elliot, Fleming, 2004), а также лавовыми потоками, и расслоенными интрузиями. Наиболее изученным и хорошо опробованным районом провинции Феррар является расслоенный интрузив горы Дюфек в горах Пенсакола, общая площадь которого составляет 34000 км² (Semenov et al., 2014). Другим представительным районом являются горы Терон на Земле Котса (Leat et al., 2005, рис. 1). Далее на юг магматизм распространяется вдоль Трансантарктических гор, образуя отдельные магматические провинции в районе Сухих Долин и на самом южном окончании – в районе Земли Королевы Виктории и Георга V. Остальные находки мезозойских пород единичны, хотя и важны для понимания характера распространения мезозойского магматизма в провинции Феррар. При отсутствии надежных данных о возрасте, говорить об их принадлежности к тому или иному проявлению плюмового магматизма преждевременно. Так, при детальном исследовании возраст даек долеритового состава гор Шеклтон (г. Гасс) оказался не мезозойским, как предполагалось ранее (Spraeth et al., 1995), а раннеордовикским, 500 млн лет (табл. 3, рис. приложение), что указывает на их образование в росскую орогению (Vogel, Miller, 2004).

Относительное положение изученных образцов провинции Феррар показано на рисунке 1, а результаты силикатного анализа и содержание редких элементов приведены в табл. 1 (приложение).

Ранее были установлены основные характерные черты магматизма провинции Феррар, в частности, широкое распространение двух типов магм – высоко- и низкокремнистых (Antonini et al., 1999; Kyle, 1980; Hergt, 2000). По возрасту и общему химическому составу они сходны с низкотитанистыми базальтами плюма Кару, развитыми на юге Африки и в горных системах Земли

Королевы Мод (Восточная Антарктида), но существенно отличаются изотопными характеристиками, прежде всего, радиогенным составом стронция (Compston et al., 1968; Elliot, Fleming, 2018; Encarnacion et al., 1996; Faure et al., 1991; Melusso et al., 2014; Riley et al., 2006; Storey et al., 2013).

Сравнение составов магм трех провинций: Земли Королевы Мод (ЗКМ), Кару и Феррар, связанных с плюмом, которое мы выполнили на основе общих выборок по литературным данным, показало, что все магмы близки по вариациям основных компонент (рис. 2). Вариации содержания MgO находятся в интервале 0.1–20 мас. % (рис. 2а), CaO: 2–13 мас. % (рис. 2б), FeO: 7–20 мас. % (образцы феррарских долеритов имеют и более низкие содержания до 4 мас. %, рис. 2г). В тоже время, как ранее и отмечалось (Ellam, Cox, 1991; Luttinen et al., 2010; Riley et al., 2005), для магматитов провинций Кару и ЗКМ существуют некоторые региональные особенности. Так, для провинции Кару типичным является проявление двух типов магм: высоко- и низкотитанистых (Jourdan et al., 2007; Hastie et al., 2014; Luttinen 2018; Меланхолина, Сушевская, 2019), что отражено на графиках рис. 2 (рис. 2а и 2б). При этом в районе ЗКМ расплавы высокотитанистых разновидностей распространены локально. Феррарские магматиты относятся к низко-Ti разновидностям. Причем их первичные расплавы, согласно трендам дифференциации рис. 2, по содержанию титана наиболее обедненные. Это может указывать на более деплетированный характер источника, испытавшего предшествующее плавление. В тоже время большая часть изученных образцов феррарских магматитов содержит повышенные количества калия по сравнению с мезозойскими базальтами восточной Антарктиды и южной Африки. Лишь незначительное количество образцов пород можно отнести к высококремнистым в пределах провинции Феррар, остальные представляют собой типичные толеиты с содержанием 50–55 мас. % SiO₂ (рис. 2в), как и расплавы провинций ЗКМ и Кару. Хорошо проявленный тренд фракционирования от толеитов до андезитов с увеличением SiO₂ свидетельствует о длительной кристаллизации в условиях промежуточных очагов.

На эти же графики, для сравнения и выявления особенностей, нанесены и составы древних базальтов провинции Феррар, из районов гор Крауль и Шеклтон (Spraeth et al., 1995), и таблицы 1 (приложение). Несмотря на то, что древние базальтоиды имеют возраст 500–1000 млн лет, даже по содержанию K₂O их составы незначительно отличаются от мезозойских магм. Они попадают в основное поле составов мезозойских магм провинций Кару – ЗКМ, что указывает на определенное сходство их источника и условий форми-

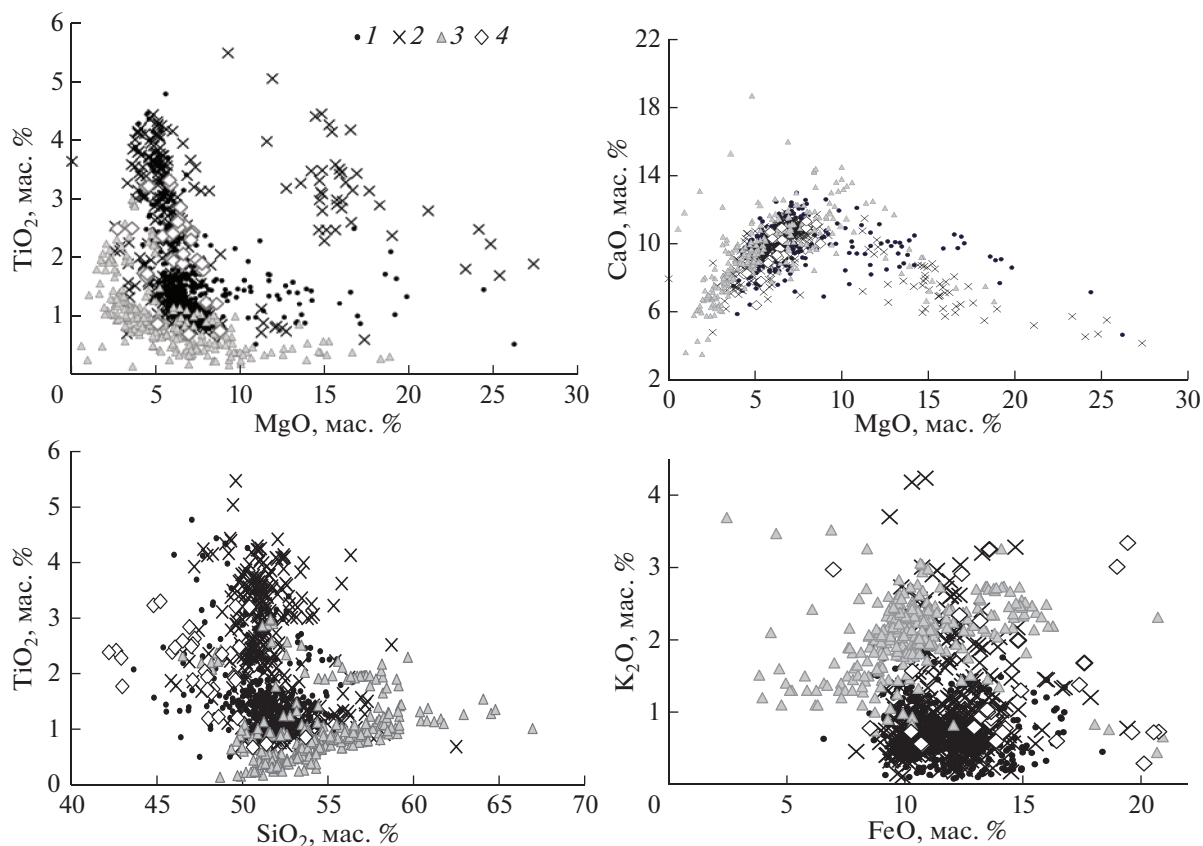


Рис. 2. Сравнительная характеристика магматизма провинции Кару (Южная Африка), Земли Королевы Мод и провинции Феррар (Восточная Антарктида), связанного с распространением мезозойского плюма Кару–Мод.

1 – магмы ЗКМ, 2 – провинции Кару, 3 – провинции Феррар, 4 – древние дайки. Составы даек, распространенных в пределах провинции Феррар, приведены по данным работ (Antonini, et al., 1999; Brewer et al., 1992, 1996; Brotzu et al., 1988; Compston et al., 1968; Demarchi et al., 2001; Elliot et al., 1995, 1999; Faure et al., 1974, 1982, 1991; Fleck et al., 1977; Fleming et al., 1992, 1995, 1997; Foland et al., 1993; Ford, Kistler, 1980; Gunn, 1966; Heimann et al., 1994; Hergt et al., 1989; Hoers et al., 1980, 1989; Hornig, 1993; Kyle, 1980; Melluso et al., 2014; Mensing et al., 1991, 1996; Molzahn et al., 1996; Riley et al., 2001; Semenov et al., 2014; Sidcers, Elliot, 1985; Sung et al., 2019; Zavala et al., 2011; Zieg, Marsh, 2012; Spaeth et al., 1993) и табл. 1 (приложение).

рования. В то же время от мезозойских магм провинции Феррар древние расплавы отличаются более высокими содержаниями титана. Сходство составов древних и молодых долеритов в пределах этой провинции может свидетельствовать о близкой геодинамической обстановке формирования литосферной мантии после распада Родинии в условиях зарождения зоны субдукции на юго-восточной окраине Гондваны (Dalziel et al., 2013; Jordan, Becker, 2018).

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ФЕРРАРСКИХ МАГМ

Вариации нормированных к составу примитивной мантии содержаний литофильных элементов в изученных образцах из провинции Феррар на рис. 3 показаны в сравнении с аналогичными характеристиками базальтов провинций ЗКМ и Кару (Luttinen, 2018) На графике 3а приведены

спектры распределения элементов, как для мезозойских магматитов, так и для более древних, и хорошо видно принципиальное сходство этих распределений. Средняя величина нормированных отношений $(\text{Nb}/\text{Ta})_n$, $(\text{Nb}/\text{Th})_n$ и $(\text{La}/\text{Lu})_n$ для древних магматитов 0.6, 0.45, 3.72, а для мезозойских – 0.75, 0.23 и 3.37, соответственно. Такие же соотношения получены и для долеритов гор Шеклтон, где помимо протерозойских даек были изучены и мезозойские (Spaeth et al., 1995).

К особенностям спектров распределения элементов феррарских магм, как древних, так и мезозойских, можно отнести обогащение несовместимыми литофильными элементами: величина отношения $(\text{La}/\text{Lu})_n$ в среднем составляет 3.37 (127 анализов). Спецификой спектров является и отчетливая Nb–Ta отрицательная аномалия, характерная для пород трапповых формаций и субдукционных магм (Wang et al., 2016; Zheng et al., 2020). Надо подчеркнуть, что подоб-

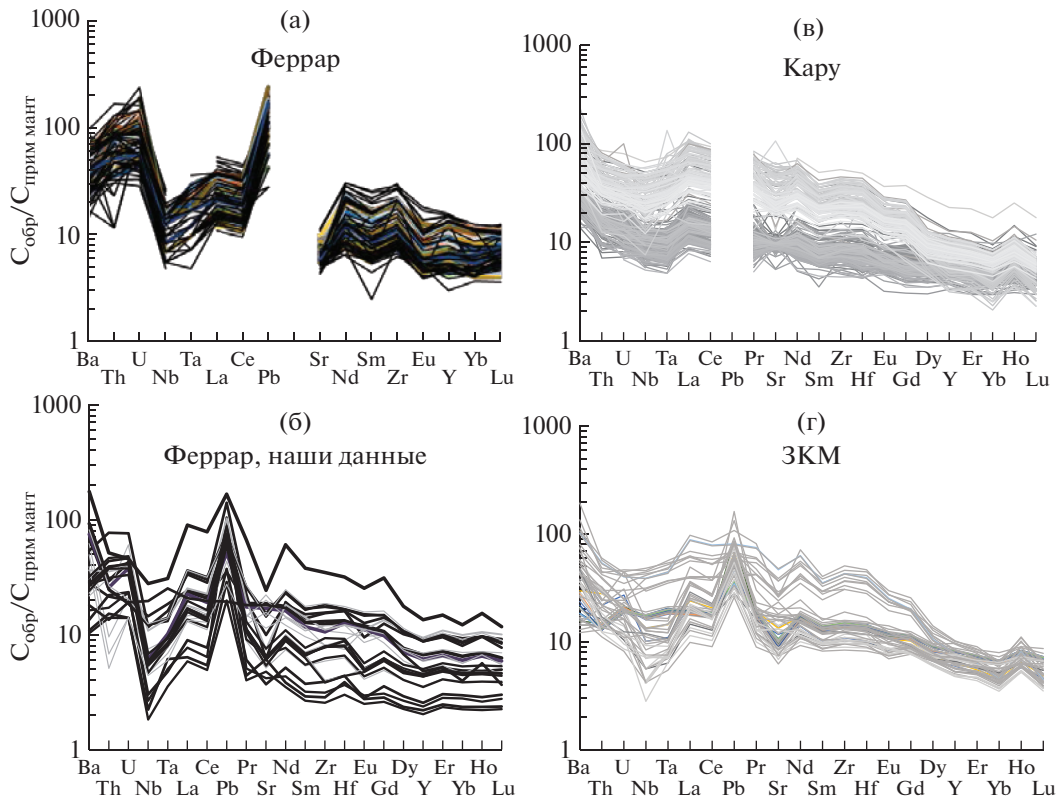


Рис. 3. Вариации содержания литофильных элементов, нормированных к составу примитивной мантии по (McDonough, Sun, 1995), в изученных образцах (табл. 1) в сравнении с составами базальтов ЗКМ и Кару. Составы базальтов провинции Феррар по литературным данным (а) и по данным табл. 1 (б). Более жирными линиями отмечены базальты мезозойского возраста. Составы базальтов провинций Кару (в) и ЗКМ (г) по (Luttinen, 2018).

ный характер распределения типичен и для состава большинства образцов базальтов провинций Кару (300 анализов) и ЗКМ (200 анализов) (рис. 3б и 3в). Средние значения нормированных отношений $(Nb/Ta)_n$, $(Nb/Th)_n$ и $(La/Lu)_n$ для выборки феррарских базальтов и базальтов провинции Кару и ЗКМ близки между собой: 0.63, 0.91, 7.01, и 0.89, 0.75, 5.89, соответственно (ср. феррарские: 0.75, 0.23, и 3.37). Возможно, тем не менее, плюмовые магмы провинций ЗКМ и Кару более обогащенные, так величины отношения $(La/Lu)_n$ в 1.5–2 раза превышают значения характерные для базальтов провинции Феррар. В тоже время среди мезозойских базитов ЗКМ встречены магмы с высокими значениями отношения Nb/Ta, которые не имеют подобной тенденции и отрицательной Nb–Ta аномалии (Luttinen, Furnes, 2000; Luttinen, 2018; Сушевская и др. 2019). Такие расплавы пространственно связывались с центральной областью плюма (Сушевская и др., 2021).

На рис. 4 приведены корреляционные диаграммы для отдельных элементов и характеристических отношений, которые позволяют оценить специфику источников первичных расплавов феррарских базальтов. Так, на диаграммах

типа Ce/Y–Zr/Nb, Ce/Pb–Ce, и La/Ba–La/Nb (рис. 4а, 4б, 4г) хорошо видно, что по содержанию Zr и Ce магмы всех трех провинций близки и образуют поле, вариации в пределах которого связаны с меняющейся степенью и глубиной плавления источника, и литосферной контаминацией (Ce/Y vs Zr/Nb и La/Ba vs La/Nb). На корреляционной диаграмме Ce/Pb–Ce (рис. 4б) составы всех магм находятся ниже области составов магм астеносферных источников (Hofmann, 1997) и попадают в поле магм, связанных с плавлением ниже- и верхнекоровых источников, что на графике в координатах La/Ba–La/Nb сопровождается более низкими значениями La/Ba и повышенными величинами отношения La/Nb (рис. 4г).

Основное геохимическое отличие мезозойских базальтов провинции Феррар – повышенные содержания U, что проявляется и на бинарном графике зависимости вариаций содержания U и Zr (рис. 4з), и пониженные величины отношения TiO_2/Yb (рис. 4ж). На диаграммах в координатах отношений элементов, типа Th/Yb–Nb/Yb и Nb/U–Nb (рис. 4в и 4е), эти особенности состава выражены особенно наглядно. Элементное отношение Nb к U было предложено использовать для

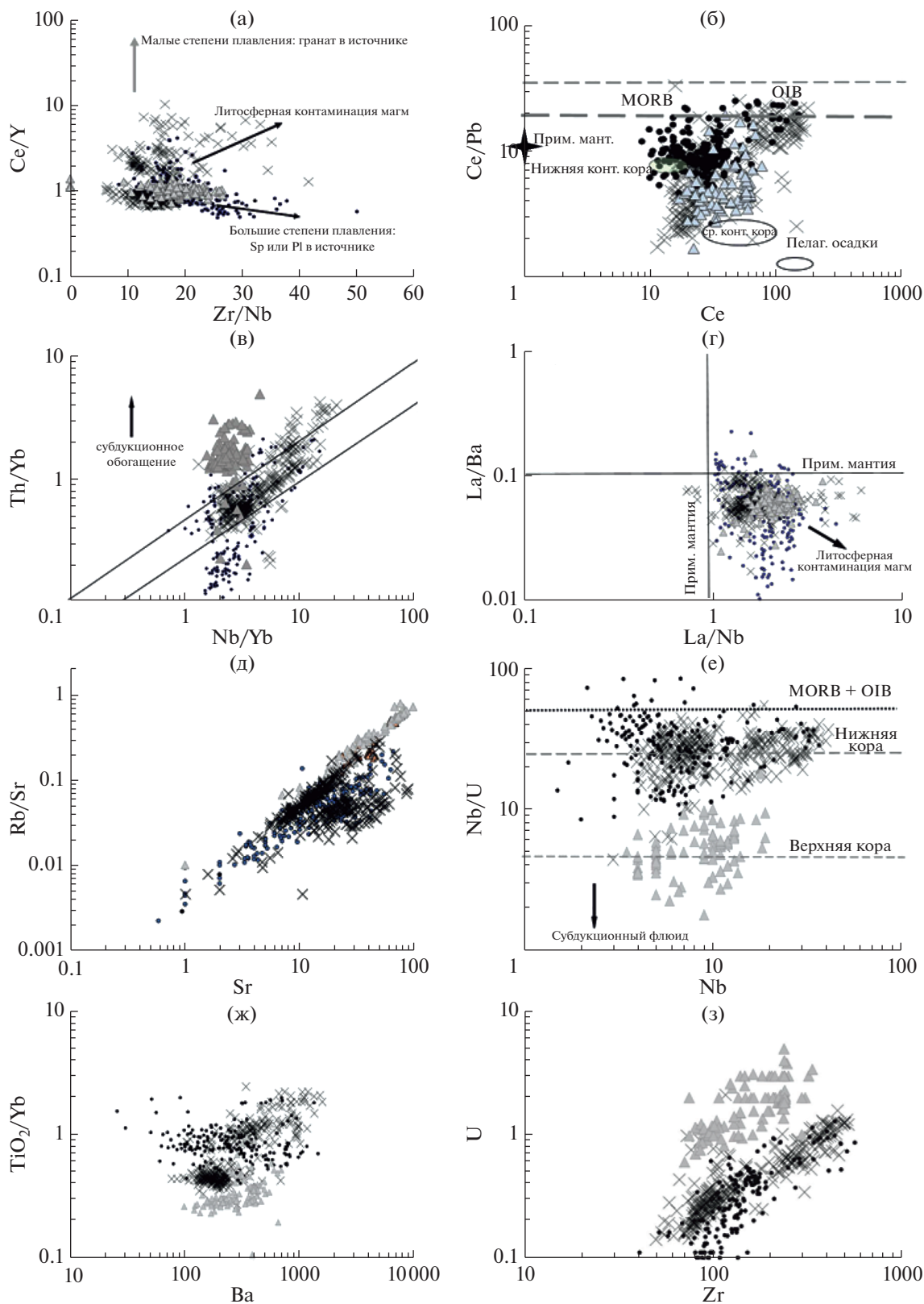


Рис. 4. Корреляционные зависимости характеристических отношений литофильных элементов, позволяющие идентифицировать обогащенный компонент в траповых магмах. Условные обозначения идентичны рис. 2.

характеристики источника расплавов (Hofmann, 2003), так как близость коэффициентов распределения этих элементов делает это отношение инертным к процессам кристаллизационного фракционирования расплавов (рис. 4е). Несмотря на возможные вторичные изменения, которые в пределах континентальных областей Антарктиды и Африки, так или иначе, проявлены, для траппов провинций Кару и ЗКМ величина отношения Nb/U в среднем около 25 и близка среднему значению для пород нижней коры (Rudnick, Gao, 2014). В то же время величина этого отношения для базальтов провинции Феррар варьирует от 2 до 10, что сопоставимо с различными оценками среднего состава верхней и континентальной коры в целом (8 – для континентальной коры, и 3–5 для верхней коры; Collerson, Kamber, 1999; Carpentier et al., 2013; McLennan, 2001; Rudnick, Gao, 2014), причем, чем более молодая кора, и более проявлено метасоматическое воздействие субдукционного флюида, тем эта величина меньше (Bebout, 2014; Bebout, Penniston-Dorland, 2016; Carpentier et al., 2013). Также о наличии субдукционного компонента свидетельствуют повышенные значения Th/Yb отношения при данных величинах Nb/Yb (рис. 4в). Аналогичные зависимости отмечаются и на диаграмме в координатах Rb/Sr vs Sr (рис. 4д), где повышенные содержания рубидия по сравнению со стронцием коррелируют с привнесом корового компонента (Hofmann, 2003; Keleman et al., 2014; Plank, 2014).

ИЗОТОПНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФЕРРАРСКИХ МАГМ

При сравнении изотопного состава Sr, Nd, и Pb мезозойских базитов, очевидно, что базальты провинции Феррар отличаются в целом от состава магм провинции Кару и ЗКМ (рис. 5 и 6) повышенными значениями отношений изотопов Pb и Sr, и пониженными Nd. Средние величины отношений, характеризующие изотопный состав магм провинции Феррар, следующие: $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$: 0.5124, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$: 0.712, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 18.5, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 15.6, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 38.5. Более того, вариации состава магм провинции Феррар образуют протяженное поле на диаграммах в координатах изотопных отношений, крайний компонент, которого имеет повышенные значения отношений изотопов $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 20.5, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 15.7, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 40.3, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$: 0.716 и пониженные $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$: 0.5122 (рис. 5 и 6а). Изотопный состав изученных нами образцов долеритов мезозойского возраста из района Сухих Долин (рис. 1; табл. 2, приложение) находится в центральной части поля изотопных составов феррарских магм. Наименее радиогенные составы магм провинции Феррар сравнимы с наиболее обогащенными составами базальтов провинций Кару–ЗКМ (рис. 5). Несмотря на

установленную изотопную гетерогенность магматизма провинций Кару и ЗКМ (Heinonen et al., 2010, 2014, 2016; Jourdan et al., 2007; Luttinen et al., 1998, 2015; Natali et al., 2017; Neumann et al., 2011; Riley et al., 2005; Сушевская и др., 2019, 2021), менее проявленную для последней, базальты Кару–Мод образуют более компактное поле вариаций состава по сравнению с составами мезозойских магм провинции Феррар. В изотопном составе ранее изученных в пределах северной части провинции Феррар магнезиальных лампрофиров (Riley et al., 2003) обнаружена изотопная метка глубинной метасоматизированной мантии, по составу близкая НМУ компоненту, которая отличает их от феррарских магм. Тренд на диаграмме в координатах $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, связанный с увеличением доли радиогенного Sr в расплавах и повышением величины изотопного отношения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, обусловлен увеличением доли флюидной составляющей в источнике, что не типично для источника расплавов лампрофиров (рис. 5а).

Древние долериты, начальные составы которых были пересчитаны на соответствующий возраст (образцы 48в и 48г горы Шеклтон – 510 млн лет (наши данные); 181-5 и 4з нунатаки Литлвуд и Бертраб, Земля Котса – 1000 млн лет (Gose et al., 1997; Kleinschmidt, Boger, 2009); 219-2 хребет Аргентина в горах Пенсакола – 510 млн лет (Rowell et al., 2001)) и нанесены на те же графики в координатах изотопных отношений, имеют изотопные характеристики близкие к низкотитанистым разновидностям магм Кару и отличаются по этим параметрам от большинства феррарских базальтов (рис. 5).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Пространственно-временные особенности феррарской изверженной провинции. Феррарская изверженная провинция отличается от других известных магматических провинций линейно вытянутой структурой, протягивающейся более чем на 3000 км, и отсутствием значительных дайковых полей, что может отражать специфику распространения плюма в пределах Антарктической окраины (Fleming et al., 1995; Elliot et al., 1999). Характерной особенностью магматизма, связанного с плюмом Кару–Мод, является относительная длительность его проявления: от 188 до 160 млн лет назад (Storey et al., 2013). При этом пик активности в Африканской области распространения плюма приходится на узкий интервал времени 183–182 млн лет назад, тогда как основная вулканическая активность в Антарктическом секторе охватывает значительно более широкий интервал времени: 184–178 млн лет назад (Duncan et al., 1997; Jourdan et al., 2007; Luttinen et al., 2015). Однако, комплексное прецезионное датирование циркона и бадделита (U–Pb метод) из габброидов силлов, внедрившихся в осадочный бассейн Кару в

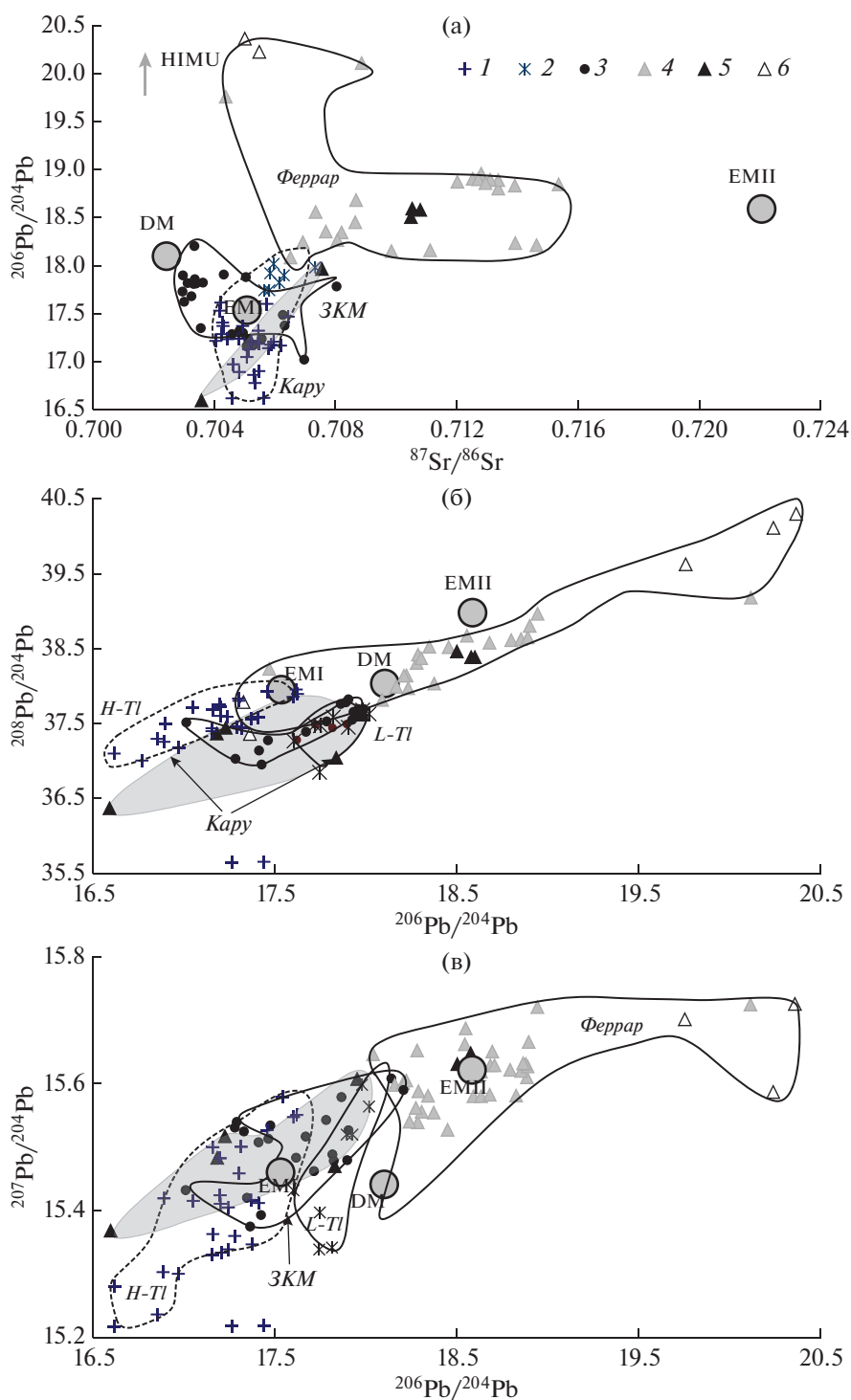


Рис. 5. Вариации изотопного состава Pb, Nd и Sr в магмах, связанных с плюмом Кару–Мод. Магматические породы провинции Кару: низко-титанистый тип магм (1), высоко-титанистый тип (2); Земли Королевы Мод (3); провинции Феррар: по литературным данным (4), по данным табл. 1 – (5); магнезиальные лампрофиды центральной части провинции (6) по (Riley et al., 2003). Серыми кружками показаны модельные мантийные источники по (Armienti, Longo, 2011). Полями показаны отдельные провинции. Серым полем очерчены изотопные значения древних даек феррарской провинции (табл. 1, 3, приложение). Данные пересчитаны на соответствующий возраст излияния.

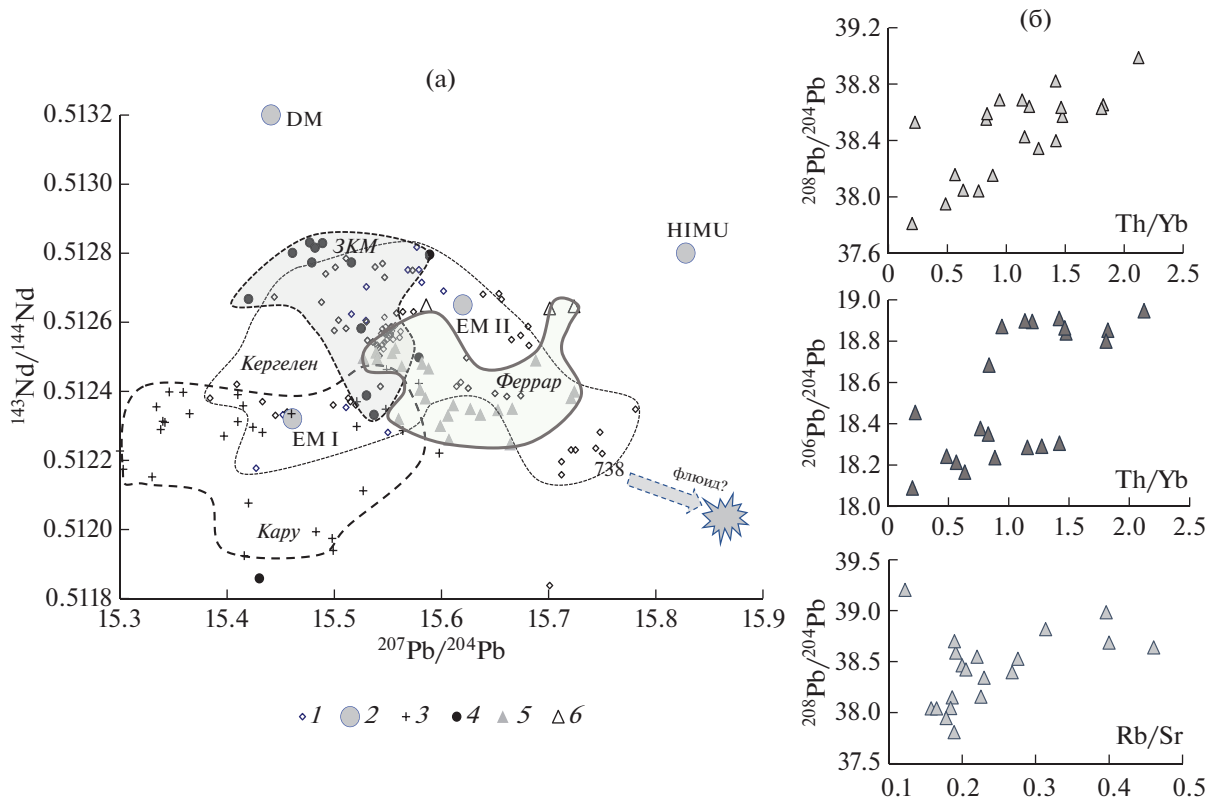


Рис. 6. Изотопная характеристика магм провинции Феррар. (а) вариации $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ в магмах провинции Кару, Земли Королевы Мод и Феррар; 1 – магматические породы, связанные с Кергелен-плюмом; 2 – модельные мантийные источники по (Armienti, Longo, 2011); магматические породы: связанные с плюмом Кару-Мод в пределах Африки (Кару) – 3, Земли Королевы Мод – 4, Феррар – 5; магнезиальные лампрофиры центральной части провинции Феррар по (Riley et al., 2003) – 6. Данные пересчитаны на соответствующий возраст их излияния. (б) корреляция $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и Th/Yb и Rb/Sr в феррарских базальтах, для оценки возможной примеси флюидного компонента в литосферном источнике магм.

южной части провинции (Лесото), при корреляции с наиболее точными возрастными данными ^{40}Ar – ^{39}Ar метода по плагиоклазу свидетельствует, что длительность основного магматического импульса в Южной Африке (образование комплекса силлов) не превышала 320 ± 180 тыс лет, а сама интрузия сформировалась между 183.4 и 183.0 млн лет назад (Greber et al., 2020). А это, в свою очередь, означает, что формирование магматической провинции Кару предшествовало (по крайней мере, на 460 тыс лет раньше) проявлению магматизма в провинции Феррар. Как уже и указывалось выше, феррарская магматическая провинция согласно U-Pb датированию по циркону и ^{40}Ar – ^{39}Ar по плагиоклазу (Encarnacion et al., 1996; Fleming et al., 1997; Minog and Mukasa, 1997), на всем своем протяжении сформировалась менее, чем за 350 тыс лет, 182.779 ± 0.045 млн лет назад (от расслоенной базитовой интрузии массива Дюфек на северо-западе: 182.65 ± 0.03 млн лет назад, до долеритовых силлов Тасмании на юго-востоке: 182.54 ± 0.06 млн лет Burgess et al., 2015; Elliot, Fleming, 2018; Ivanov et al.,

2017). Вместе с тем, необходимо отметить, что в обеих провинциях более кислый и щелочной магматизм поздних стадий развития плюма (например, сиенитовый плутон в регионе Мвенези, Южная Африка, или щелочной нефелин-сиенитовый комплекс массива Страумсвола, Свердрупфьелла, и секущие его базитовые дайки ЗКМ, или кремнистый магматизм Трансантарктических гор) датируется существенно меньшими возрастными: от 176.84 ± 0.06 до 176.6 ± 1.8 млн лет назад, что указывает на длительную плюмовую активность не менее 6.5 млн лет (Greber et al., 2020). Таким образом, синхронность формирования лав феррарской провинции, и совпадение по времени образования с главным этапом магматизма провинции Кару юго-восточной Африки и Земли Королевы Мод восточной Антарктиды (ЗКМ), подчеркивает уникальные особенности развития плюма Кару–Мод.

Геохимические особенности феррарской изверженной провинции. Как указывалось ранее, провинция Феррар пересекает регионы с различным

тектоническим строением и возрастом земной коры. И если горы Терон и Шеклтон сложены преимущественно архейскими и протерозойскими метаморфическими комплексами кристаллического щита Восточной Антарктиды (Leat et al., 2005; Will et al., 2009), то Трансантарктические горы, Тасмания и юго-восточная Австралия — комплексами раннепалеозойского подвижного пояса (Elliot, 2013). При этом каких-либо заметных различий в составе мезозойских базальтоидов не наблюдалось. Сравнительное изучение состава, характера распространения и возраста древних и мезозойских мафических даек было проведено ранее в районе гор Шеклтон (20°–30° з.д., 80°–81° ю.ш.) и позволило авторам (Hotten, 1993, 1995; Spaeth et al., 1995), несмотря на более широкое распространение даек возраста 500–1300 млн лет, обнаружить на севере провинции дайки мезозойского возраста, которые сопоставимы с возрастом и составом магматитов феррарской провинции. Изученные нами образцы долеритовых даек из этого района оказались более древними (510 млн лет), синхронными с возрастом Росского орогенеза (Spaeth et al., 1995), а генезис связан с плавлением древней литосферы Гондваны. Сравнение состава литофильных элементов и изотопных характеристик этих образцов и более древних базитов (таблицы приложения) с соответствующими характеристиками мезозойских долеритов позволило выявить отличия и специфику более позднего магматизма в пределах феррарской провинции.

Сравнение геохимических характеристик магматизма провинций Кару, ЗКМ и Феррар показало, что составы магматических расплавов, в целом, близки между собой, что может указывать на относительное сходство условий их образования и близкий состав магматического источника. Таким источником, вероятно, является метасоматизированная литосферная мантия восточной Гондваны. В то же время магматиты феррарской провинции характеризуются преимущественным распространением магм обедненных титаном и обогащенных калием по сравнению с базальтами провинций Кару и ЗКМ (рис. 2). Вариации нормированных к примитивной мантии литофильных элементов с отчетливыми отрицательными Nb и Ta аномалиями также близки для источников магм всех трех провинций, и различаются лишь степенью обогащения при дифференциации. Такими же особенностями обладают и магмы древних даек, образовавшиеся в пределах провинции Феррар 500–1000 млн лет назад, источником которых была древняя литосфера Гондваны.

Кроме того, ранее было установлено, что с плавлением вещества древней литосферы Гондваны связан и магматизм трапповых провинций восточной Индии, Антарктиды, Австралии, образованных 130 млн лет назад, и магматизм подводных поднятий восточной части Индийского океана, обуслов-

ленный проявлением Кергелен—плюма в пределах открывающегося Индийского океана (Frey et al., 2000; Olierook et al., 2016; Сушевская и др., 2017). Вариации изотопных составов, показанные на рис. 6а в координатах начальных (скорректированных на возраст) $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ отношений, магм, связанных с магматической активностью плюмов Кару—Мод и Кергелен, позволяют выявить некоторые особенности формирования магматических провинций. Так для провинции Кару в составе магм отчетливо проявляется влияние древнего источника ЕМ1, тогда как для состава расплавов провинции ЗКМ характерно участие вещества более деплетированного источника, а для магм Кергелен—плюма (оазис Джетти, Восточная Антарктида, провинция Бамбери, Западная Австралия, подводные поднятия Индийского океана — Афанасия Никитина, плато Натуралист) отмечается присутствие разнообразных обогащенных источников (Frey et al., 2000; Olierook et al., 2016; Сушевская и др., 2017). Особое положение на диаграмме занимают базальты глубоководной скважины 738, пробуренной в южной части плато Кергелен, и базальты древних океанических поднятий Натуралист и Брокен, составы которых характеризуются низкими величинами отношения $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (0.5122) при повышенных значениях $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (15.75–15.8) (рис. 6а). Для этих магм предполагается присутствие в родоначальном расплаве вещества специфического обогащенного компонента, образованного при плавлении метасоматически измененной древней мантии в пределах плато Кергелен (Сушевская и др., 2017). Изотопный состав базальтов провинции Феррар попадает в поле составов магм Кергелен—плюма, что, возможно, также отражает их связь с плавлением континентальной метасоматизированной мантии Гондваны. Это предположение согласуется и с установленными соотношениями литофильных элементов (рис. 4). В то же время влияние флюида, возможно, субдукционного происхождения, особенно заметно в составе источника расплавов именно феррарской изверженной провинции (Choi et al., 2019). При этом корреляция изотопного состава свинца и величины соотношений Th/Yb и Rb/Sr, свидетельствует, что флюид был обогащен Pb и Yb (рис. 6б), а также, возможно, U и Rb. В процессе субдукции мантия существенно обогащалась по сравнению с деплетированной океанической мантией элементами растворимыми в водосодержащем флюиде: Cs, Rb, U, Sr и Pb, радиогенный состав Pb и Sr которых определялся относительной древностью субдуцируемого материала (Zheng, 2019). Надо отметить, что изотопный состав древних магм, территориально приуроченных к области распространения изверженной провинции Феррар, попадает в поле составов мезозойских вулканитов Кару—ЗКМ, а не феррарских магматитов, т.е.

влияние палеосубдукции на состав формирующихся расплавов ограничивалось предельным временем начала этого процесса 570–530 млн лет назад (Boger, Miller, 2004; Sawood, 2005) и для древних расплавов было незначительным.

Изучение магматических производных плюма Кару–Мод позволило установить геохимическую зональность плюма, отражающую его эволюцию (Heinonen et al., 2010, 2018; Luttinen et al., 2010; Luttinen, 2018; Natali et al., 2017; Сушевская и др., 2021). Пространственная геохимическая зональность платобазальтов определяется, в частности, распространением низко- и высокотитанистых разностей, так низкотитанистые базальты широко представлены в обрамлении провинции. Тогда как высокотитанистые разности и группа высокотитанистых ферропикритов служит маркером центральной, более высокотемпературной части плюма, внедрявшегося в литосферу в районах Нуанетси (Африка) и Альманнрюгген (Земля Королевы Мод, Антарктида) (рис. 7). Подобные высокотитанистые ферропикриты, обогащенные Ti, Fe, и Mg, связаны с плавлением пироксенитового источника и скорее всего фиксируют проникновение поднимающегося (гетерогенного) плюма в верхнекоровые горизонты. Образование пироксенитов в нем могло происходить либо при подъеме собственно гетерогенного плюма, как указывалось в работах (Sobolev et al., 2007; Соболев и др., 2009; Yang et al., 2016) либо при взаимодействии с основанием литосферы. Многочисленные экспериментальные работы показывают возможность присутствия таких расплавов в различных пропорциях в родоначальных магмах (Lambart et al., 2012; Matzen et al., 2017; Søager et al., 2015; Yang et al., 2016). Появление подобных магм на начальных стадиях активности плюма отражает именно вещественный состав поднимающейся расплавленной плюмовой магмы. Эксперименты по плавлению пироксенитов при давлениях 20–25 кбар показали возможность существования близких по составу к изученным нами образцам расплавов (Lambart et al., 2013, 2016). Причиной возникновения гетерогенности плюмовых магм может быть, как ассимиляция разнообразных коровых пород, так и деляминация корневых частей литосферы при плюмовом воздействии, плавление малых степеней глубинных частей литосферы и последующее смешение различных типов магм в различных пропорциях. Выделить какой-либо один предпочтительный или преобладающий механизм достаточно трудно. Однако детальное изучение магматизма Гавайского архипелага (гавайский плюм развивался и продолжает развиваться в условиях утоненной океанической литосферы) и Сибирских траппов (проявление плюма в условиях утолщенной литосферы) показало, что мантийные плюмы могут нести большое количество фрагментов пироксенитов, плавление которых

фиксируется по геохимическим меткам ликвидусных оливинов (Sobolev et al., 2007; Соболев и др., 2009; Yang et al., 2016). Образование теплового пограничного слоя между относительно холодной истощенной литосферой и горячим ядром мантийной струи не позволяет литосфере прогреться до температуры струи даже в течение 10 млн лет и обеспечить плавление литосферной мантии. Поэтому пироксенит литосферы не может являться источником расплавов массива Альманнрюгген. Более вероятным представляется, что восходящий мантийный плюм уже содержал примесь фрагментов плотной рециклированной океанической коры (Stroncik, Devey, 2011; Day et al., 2009). Появление расплавов, обогащенных Ti, Fe, и Mg, связано с плавлением пироксенитового источника, что должно происходить на ранней стадии внедрения плюма, в противном случае эти расплавы смешивались бы с расплавами, производными перидотитовой мантии.

Прямое наблюдение таких расплавов является редкой возможностью, поскольку внедрившиеся плюмовые магмы обычно представляют собой производные плавления литосферной мантии, измененной и метасоматизированной (Меланхолина, Сушевская, 2019). В образовании плюмовых магм в пределах Антарктиды и Африки участвуют близкие по составам главных и редких компонентов литосферные источники. Различия в составе их производных — низко- и высоко-Ti магмах, в пределах провинции Кару связаны с глубиной и степенью плавления этих источников (Heinonen et al., 2013; Jourdan et al., 2007; Riley et al., 2005). Геохимические отличия источников расплавов провинции Феррар связаны, прежде всего, с тем, что литосфера Восточной Антарктиды вдоль Трансантарктических гор испытывала интенсивное воздействие процессов субдукции одновременно с влиянием плюма Кару–Мод, формирующим провинцию 183–182 млн лет назад (Choi et al., 2019; Leat, 2013).

Источником мезозойских плюмов Гондваны и современных горячих точек в южной части Индийского и Атлантического океанов предположительно является горячая область на границе внешнего ядра и мантии, оконтуренная по пониженным скоростям поперечных волн и известная в литературе, как “крупная провинция низких скоростей поперечных волн — Large Low-Shear-Velocity Province, LLSVP” (Burke et al., 2008; Davaille, Romanowicz, 2020; Torsvik, Cocks, 2013). Африканская низкоскоростная провинция (“Тузоз”) характеризуется неправильными очертаниями в плане и чрезвычайно неровной конусообразной в кровле, а скорости поперечных волн во внутренних ее частях отклоняются от средних значений до 2.9%, что может указывать на разогретое состояние материала (Burke et al., 2008; Torsvik et al., 2006). Палеомагнитные данные и,

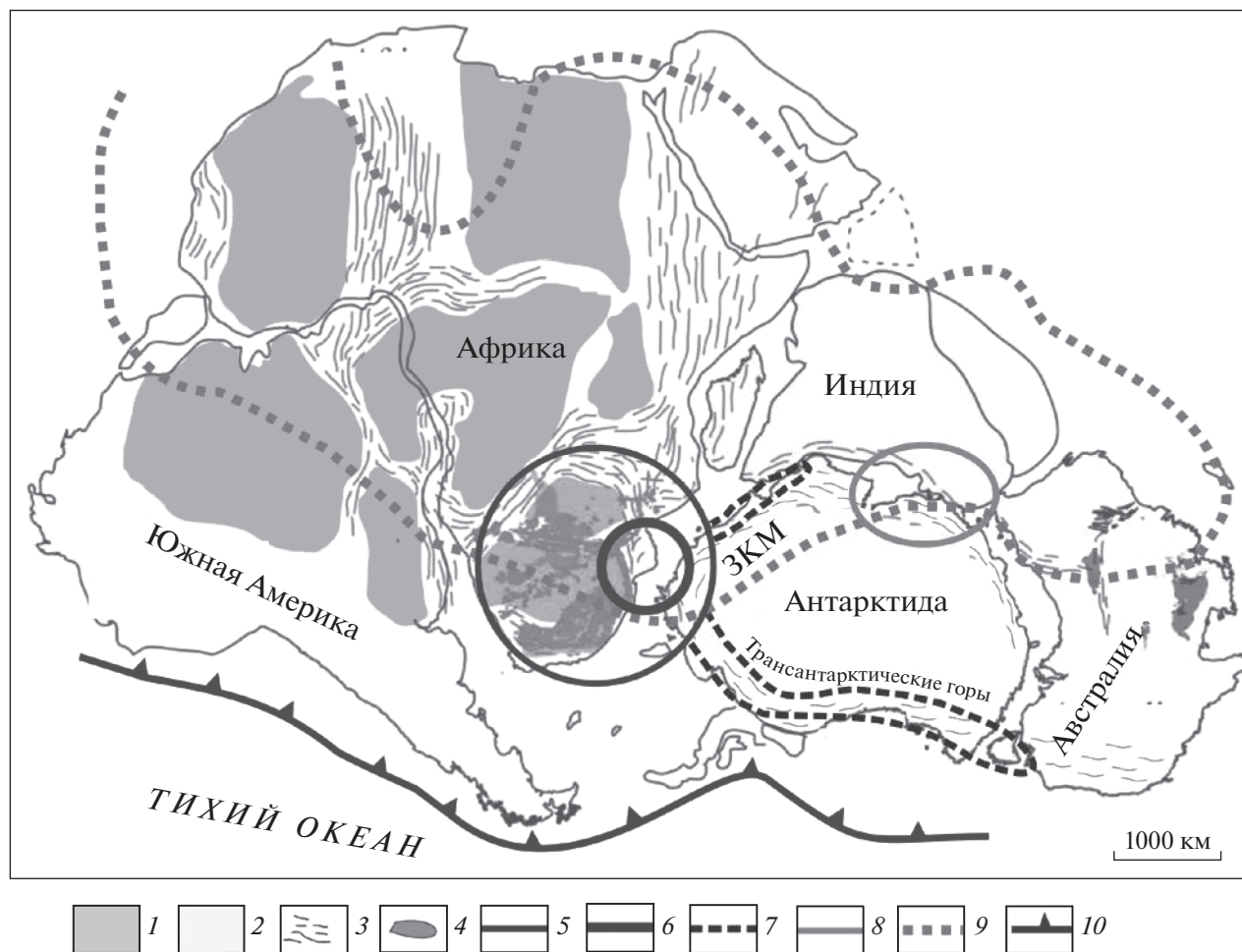


Рис. 7. Реконструкция Гондваны по (Gray et al., 2008 с изменениями и дополнениями) и развитие мезозойских мантийных плюмов 180–110 млн лет назад

1–2 – архейско–мезопротерозойские кратоны Западной Гондваны (1) и Восточной Гондваны (2), 3 – мезопротерозойские – раннепалеозойские орогены, 4 – магматические комплексы провинции Кару, 5 – область проявления мантийного плюма Кару–Мод (183–170 млн лет назад), 6 – центральная (наиболее горячая) часть плюма Кару–Мод, 7 – мегаапофизы, связанные с внедрением плюма Кару–Мод; 8 – область проявления мантийного плюма Кергелен (136 – 110 млн лет назад), 9 – проекция на поверхность крупной провинции низких скоростей поперечных волн в нижней мантии, 10 – зона палеосубдукции. ЗКМ – Земля Королевы Мод.

расчитанные на их основе палеорекострукции, указывают, что как мезо–кайнозойские, так и палеозойские крупные изверженные провинции проецируются радиально вниз на низкоскоростные участки в зоне D", образуя кольцо по их краям (Torsvik, Cocks, 2013). При этом мезозойские провинции располагаются над южной и центральной частями Африканской LLSVP, а палеозойские – почти исключительно на севере (Burke et al., 2008; Torsvik et al., 2006, 2016). Считается, что внедрение мезозойских плюмов и, соответственно, связанный с ними магматизм (в том числе, кимберлитовый) приурочены к краям этой провинции (горячей области нижней мантии (Torsvik, Cocks, 2013); рис. 7). Над центральной частью Африканской LLSVP на протяжении 200 млн лет сохранялось стационарное положение

Африканского континента (Burke et al., 2008). Важным представляется, что вблизи Африканской LLSVP фиксируется наличие высокоскоростных субдуцированных пластин и их фрагментов, образующих, так называемые, “кладбища плит” (slab graveyard, Van der Meer et al., 2018). Существование области LLSVP Тузо под Африкой в течение длительного интервала времени может являться главным фактором термальной, магматической и структурной эволюции южной части Гондваны и последующего образования океанических областей (Меланхолина, 2021; Torsvik, Cocks, 2013). Существенную роль при образовании плюмовых магм провинции Феррар играла и долгоживущая тихоокеанская палеосубдукционная зона (Sawood, 2005; Choi et al., 2019). Как отмечалось, магматическая провинция Феррар

пространственно развивалась субпараллельно древней тихоокеанской окраине Гондваны (Hergt et al., 1991), по мнению многих исследователей, сопоставимой с кембрий-ордовикским орогеном Росса (Storey et al., 2013; Hagen-Peter, Cottle, 2016). Практически линейно вытянутая структура магматической провинции Феррар (мегапапофиз), сформированная под воздействием мантийного плюма, отличается от мегапапофиза, протянувшегося вдоль побережья Земли Королевы Мод в восточном направлении и распространявшегося 183–170 млн лет назад от центра плюма до района оазиса Ширмахера (Sushchevskaya, Belyatsky, 2011). При этом очевидно, что на палеореконструкциях на момент формирования провинции Феррар Гондвана находится на фланге горячей области нижней мантии (Тузо) и не имеет с ней прямой связи. Вероятно, образование подобной протяженной магматической провинции, в большей степени может быть обусловлено условиями растяжения, которые возникли в задуговой обстановке тихоокеанской зоны палеосубдукции (Buitter, Torsvik, 2014; Elliot, Fleming, 2004).

В процессе распространения плюма Кару–Мод на восток формировались магматические провинции Антарктиды в районе оазиса Ширмахер (около 170 млн лет назад), ледника и трога Ламберта (130–110 млн лет назад) и в районе горы Гауссберг (50 тыс. лет назад) (Sushchevskaya et al., 2011; Сушевская и др., 2014). Последние провинции связаны уже с активизацией Кергелен–плюма (рис. 7). Возможно, спустя 40–50 млн лет глубинная мантийная конвекция, проявленная под центральной Гондваной (Hassan et al., 2016), распространилась в восточном и западном направлении, образовав крупные, более молодые (130–120 млн лет назад) магматические провинции плато Кергелен (южная часть Индийского океана) и Этендека–Парана (юго-западная Африка, Южная Америка) (Сушевская и др., 2014).

На основании изотопных характеристик и соотношения литофильных элементов было показано (Меланхолина, Сушевская, 2019, и ссылки в ней) – источником первичных расплавов для всех районов проявления плюмового магматизма (провинции Кару, Земли Королевы Мод, и Феррар) является древняя литосфера Гондваны. В различных регионах она претерпела неоднократное изменение в ранние этапы своего развития и в разной степени была обогащена летучими, литофильными элементами и радиогенными изотопами Sr и Pb. Магматизм, проявленный в пределах Индийского океана и связанный с активным воздействием Кергелен–плюма, также обладает геохимическими метками, характерными для литосферы Антарктиды (Сушевская и др., 2017).

Вместе с тем, образование источников магматических расплавов провинции Феррар происхо-

дило при плавлении метасоматически измененной гондванской мантии вблизи тихоокеанской зоны палеосубдукции, которая окружала южную часть Гондваны. Формирование феррарского магматизма сопровождалось интенсивным взаимодействием зоны субдукции и поднимающегося плюма Кару–Мод (Betts et al., 2012), что и отразилось на составе первичных расплавов провинции Феррар – обогащением крупноионными литофильными элементами, такими как U, Th, и Rb, под действием мантийного флюида (East et al., 2020). На диаграмме в координатах изотопных отношений это проявилось в формировании протяженного поля изменения изотопных составов расплавов, которое значимо отличается от вариаций изотопных отношений $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ для источника расплавов провинций Кару и ЗКМ (Jourdan et al., 2007; Luttinen et al., 2015; Luttinen, 2018; Neumann et al., 2011). В отличие от источника магм ЗКМ это поле определяется присутствием вещества обогащенного компонента с повышенной долей радиогенного Sr и Pb. Магмы с близкими характеристиками обогащенного компонента были выявлены в пределах тройного сочленения Буве (южная Атлантика), образованного при расколе Гондваны под воздействием плюма Кару–Мод и дальнейшего отделения Африки от Антарктиды (Сушевская и др., 2003). В процессе неоднократных геодинамических перестроек под регионом южной Атлантики сформировалась (не в один этап) метасоматизированная, обогащенная субокеаническая мантия с геохимическими характеристиками обогащенных источников типа модельных HIMU и EMII (Hagen-Peter, Cottle, 2016), которая характерна и для источников расплавов большей части островов западной Антарктиды (Panter et al., 2006; Phillips et al., 2018). При образовании неустойчивых спрединговых зон в их пределах могли оставаться мелкие плиты и блоки, часто в виде континентальных отторженцев, плавление которых приводило к образованию обогащенных толеитовых магм (Дубинин и др., 1999; Сушевская и др., 2003). Влияние плюма Кару–Мод и близость долгоживущей субдукционной зоны способствовало образованию специфической обогащенной субокеанической мантии под большей частью западной Антарктиды (Bull et al., 2014) с геохимическими чертами, присущими магматическим расплавам провинции Феррар, связанной с распространением плюма Кару–Мод вдоль обрамления Восточной Антарктиды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Крупная изверженная провинция Феррар сформировалась 183–182 млн лет назад в течение 0.4 млн лет на всем своем протяжении субсин-

хронно с формированием магматических провинций Кару и Земли Королевы Мод. Каких-либо региональных геохимических отличий расплавов, распространенных вдоль вытянутой на 3000 км провинции Феррар, не обнаружено. Феррарские магматиты представлены преимущественно низко-Ti разностями. Они характеризуются наиболее низкими содержаниями титана, что отражает более деплетированный характер сублитосферного мантийного источника, ранее претерпевшего неоднократное плавление. В то же время базальтовые расплавы провинции Феррар отличаются и повышенными содержаниями калия по сравнению с мезозойскими базальтами восточной Антарктики и южной Африки.

Состав источников магм всех трех регионов (Кару, ЗКМ, Феррар), связанных с плюмом Кару–Мод, характеризуется отрицательными Nb и Ta аномалиями. Такими же особенностями обладают и магмы древних (500–1000 млн лет) даек в пределах провинции Феррар, что указывает на древнюю литосферу Гондваны как на возможный источник для тех и других.

Магматизм провинции Феррар формировался в условиях плавления метасоматически измененной мантии вблизи зоны палеосубдукции, окружавшей южную часть Гондваны и достаточно активной во время воздействия плюма Кару–Мод. Это привело к обогащению первичных расплавов U, Th, Rb и Pb, элементами из метасоматически измененного под действием флюида мантийного источника, и существенным вариациям изотопного состава Sr и Pb ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 0.705–0.716, 18.1–20.4, 15.52–15.72, 37.8–40.3, соответственно) в отличие от характерных незначительных колебаний для первичных расплавов мезозойских магматитов провинций Кару и Земли Королевы Мод.

Авторы выражают искреннюю благодарность с. н. с. ИГГД РАН к. г.-м. н. В.М. Саватенкову и с. н. с. ИГМ СО РАН к. г.-м. н. В.В. Шарыгину за рецензирование рукописи и ценные замечания, которые способствовали улучшению статьи.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 16-17-10139) и частично в рамках государственного задания (тема № 0137-2019-0012 Н.М. Сушевская).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Дубинин Е.П., Сушевская Н.М., Грохольский А.Л. (1999) История развития спрединговых хребтов Южной Атлантики и пространственно-временное положение тройного сочленения Буве. *Российский журнал наук о земле* **1**(5), 423–435.

Колотов В.П., Жилкина А.В., Широкова В.И., Догадкин Н.Н., Громяк И.Н., Догадкин Д.Н., Зыбинский А.М., Тюрин Д.А. (2020) Новый подход к минерализации об-

разцов в открытой системе для анализа геологических образцов методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой с улучшенными метрологическими характеристиками. *Журнал Аналитической Химии* **75** (5), 394.

Лейченко Г.Л., Сушевская Н.М., Беляцкий Б.В. (2003) Геодинамика атлантического и индийского секторов Южного океана. *ДАН* **391** (5), 675–678.

Луцицкая М.В., Беляцкий Б.В., Белоусова Е.А., Натапов Л.М. (2017) Особенности состава и геодинамическая обстановка позднепалеозойского гранитоидного магматизма Чукотки. *Геохимия* (8), 685–714.

Luchitskaya M.V., Belyatsky B.V., Belousova E.A., Nataпов L.M. Composition and geodynamic setting of Late Paleozoic magmatism of Chukotka (2017) *Geochemistry International* **55** (8), 683–710.

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) Вопросы соотношения поверхностной и глубинной тектоники. Пример Африканского региона. *Геотектоника* (в печати).

Соболев А.В., Криволицкая Н.А., Кузьмин Д.В. (2009) Петрология родоначальных расплавов и мантийных источников магм Сибирской трапповой провинции. *Петрология* **17**(3), 276–310.

Сушевская Н.М., Мигдисова Н.А., Беляцкий Б.В., Пейве А.А. (2003) Образование обогащенных толеитовых магм в пределах западной части Африкано-Антарктического хребта (Южная Атлантика). *Геохимия* (1), 3–24.

Sushchevskaya N.M., Migdisova N.A., Belyatskii B.V., Peyve A.A. (2003) Genesis of Enriched Tholeiitic Magmas in the Western Segment of the Southwest Indian Ridge, South Atlantic Ocean (2021), *Geochemistry International* **41** (1), 1.

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 (восточная 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. Geochemical Features of the Quaternary Lamproitic Lavas of Gaussberg Volcano, East Antarctica: Result of the Impact of the Kerguelen Plume (2014), *Geochemistry International* **55** (12), 1030.

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. *Geochemistry International* **55**, (9), 775.

- Сушевская Н.М., Беляцкий Б.В., Лейченко Г.Л., Батанова В.Г., Соболев А.В. (2019) Изотопная характеристика юрского плюмового магматизма в провинции Альманнррюген (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 расплаво 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. Role of Pyroxenite Mantle in the Formation of the Mesozoic Karoo Plume Melts: Evidence from the Western Queen Maud Land, East Antarctica (2021), *Geochemistry International* **59**, (4), 357-376. © Pleiades Publishing, Ltd.
- Airoldi G.M., Muirhead J.D., Long S.M., Zanella E., White J.D.L. (2016) Flow dynamics in mid-Jurassic dikes and sills of the Ferrar large igneous province and implications for long-distance magma transport. *Tectonophysics* **683**, 182-199.
- Albarede F. (1992) How deep do common basaltic magmas form and differentiate? *Journal of Geophysical Research* **97**, 10997-11009.
- Anderson D.L. (1994) Superplumes or supercontinents? *Geology* **22**, 39-42.
- Anderson D.L. (2000) The thermal state of the upper mantle: no role for mantle plumes. *Geophysical Research Letters* **27**, 3623-3626.
- Anderson D.L. (2005) Large igneous provinces, delamination, and fertile mantle. *Elements* **1**, 271-275.
- Anderson D.L., Natland J.H. (2005) A brief history of the plume hypothesis and its competitors: concept and controversy. In: Foulger G.R., Jurdy, D.M. (eds) *Plates, plumes and planetary processes*. *Geological Society of America, Special Papers* **430**, 119-145.
- Antonini P., Picciurillo E.M., Petrini R., Civetta L., D'Antonio M., Orsi G. (1999) Enriched mantle-Dupal signature in the genesis of the Jurassic Ferrar tholeiites from Prince Albert Mountains (Victoria Land, Antarctica). *Contributions to Mineralogy and Petrology* **136** (1), 1-19.
- Arndt N.T., Christensen U. (1992) The role of lithospheric mantle in continental flood volcanism: thermal and geochemical constraints. *J. Geophysical Research* **97**(B7), 10967-10981.
<https://doi.org/10.1029/92JB00564>
- Bebout G.E. (2014) 4.20 Chemical and isotopic cycling in subduction zones. *Treatise on Geochemistry* **4**, 703-747.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00322-3>
- Bebout G.E., Penniston-Dorland S.C. (2016) Fluid and mass transfer at subduction interfaces – the field metamorphic record. *Lithos* **240–243**, 228-258.
- 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.
- Boger S.D., Miller J.McL. (2004) Terminal suturing of Gondwana and the onset of the Ross-Delamerian Orogeny: the cause and effect of an Early Cambrian reconfiguration of plate motions. *Earth and Planetary Science Letters* **219**, 35-48.
- Brewer T.S. (1989) Mesozoic dolerites from Whichaway Nunataks. *Antarctic Science* **1**, 151-155.
- Brewer T.S., Hergt J.M., Hawkesworth C.J., Rex D., Storey B.C. (1992) Coats Land dolerites and the generation of Antarctic continental flood basalts. *The Geological Society of London, Special Publication* **68**, 185-208.
- Brewer T.S., Rex D., Guise P.G., Hawkesworth C.J. (1996) Geochronology of mesozoic tholeiitic magmatism in Antarctica: implications for the development of the failed Weddell Sea Rift system. *The Geological Society of London, Special Publication* **108**, 45-61.
- Brotzu P., Capaldi G., Civetta L., Melluso L., Orsi G. (1988) Jurassic Ferrar Dolerites and Kirkpatrick Basalts in northern Victoria Land (Antarctica): stratigraphy, geochronology and petrology. *Memorie della Società Geologica Italiana* **43**, 97-116.
- Buiter S.J.H., Torsvik T.H. (2014) A review of Wilson Cycle plate margins: a role of mantle plumes in continental breakup along sutures? *Gondwana Research* **26**, 627-653.
- Bull A.L., Domier M., Torsvik T.H. (2014) The effect of plate motion history on the longevity of deep mantle heterogeneities *Earth and Planetary Science Letters* **401**, 172-182.
- 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 and Planetary Science Letters* **415**, 90-99.
<https://doi.org/10.1016/2j.epsl.2015.01.037>
- 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 and Planetary Science Letters* **265**, 49-60.
- Carpentier M., Weis D., Chauvel C. (2013) Large U loss during weathering of upper continental crust: the sedimentary record. *Chemical Geology* **340**, 91-104.
- Cawood P.A. Terra Australis Orogen: Rodinia breakup and development of the Pacific and Iapetus margins of Gondwana during the Neoproterozoic and Paleozoic. *Earth-Science Reviews* **69**, 249-279.
- Choi S.H., Mukasa S.B., Ravizza G., Fleming Th.H., Marsh B.D., Bedard 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 and Planetary Science Letters* **506**, 507-519.
- Coetzee A., Kisters A.F.M. (2018) The elusive feeders of the Karoo Large Igneous Province and their structural controls. *Tectonophysics* **747–748**, 146-162.
- Collerson K.D., Kamber B.S. (1999) Evolution of the continents and the atmosphere inferred from Th-U-Nb systematics of the depleted mantle. *Science* **283**, 1519-1522.
- Coltice N., Phillips B.R., Bertrand H., Ricard Y., Rey P. (2007) Global warming of the mantle at the origin of flood basalts over supercontinents. *Geology* **35**, 391-394.

- Compston W., McDougall I., Heier K.S. (1968) Geochemical comparison of the Mesozoic basaltic rocks of Antarctica, South Africa, South America and Tasmania. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **32**, 129-149.
- Dalziel I.W.D., Lawver L.A., Murphy J.B. (2000) Plumes, orogenesis, and supercontinental fragmentation. *Earth and Planetary Science Letters* **178**, 1-11.
- Dalziel I.W.D. (2013) Antarctica and supercontinental evolution: clues and puzzles. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh* **104**, 3-16.
- Davaille A., Romanowicz B. (2020) Deflating the LLSVPs: bundles of mantle thermochemical plumes rather than thick stagnant "piles". *Tectonics* **39**, e2020TC006265. <https://doi.org/10.1029/2020TC006265>
- Day J.M., Pearson D.G., Macpherson C.G., Lowry D., Carracedo J.C. (2009) Pyroxenite-rich mantle formed by recycled oceanic lithosphere: oxygen-osmium isotope evidence from Canary Island lavas. *Geology* **37**(6), 555-558.
- Demarchi G., Antonini P., Piccirillo E.M., Orsi G., Civetta L., D'Antonio M. (2001) Significance of orthopyroxene and major element constraints on the petrogenesis of Ferrar tholeiites from southern Prince Albert Mountains, Victoria Land, Antarctica. *Contributions to Mineralogy and Petrology* **142**, 127-146.
- 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. Geophysical Research* **102**, 18 127-18 138.
- 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 Research* **79**, 125-139.
- Elkins-Tanton L.T., Hager B.H. (2000) Melt intrusion as a trigger for lithospheric foundering and the eruption of the Siberian flood basalt. *Geophysical Research Letters* **27**, 3937-3940.
- Elkins-Tanton L.T. (2005) Continental magmatism caused by lithospheric delamination. In: Foulger G.R., Natland J.H., Presnall D.C., Anderson D.L. (eds) *Plates, plumes, and paradigms. Geological Society of America Special Paper* **388**, 449-461.
- Ellam R.M., Cox K.G. (1991) An interpretation of Karoo picrite basalts in terms of interaction between asthenospheric magmas and the mantle lithosphere. *Earth and Planetary Science Letters* **105**, 330-342.
- 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**, 718-721.
- Ellam R.M. (2006) New constraints on the petrogenesis of the Nuanetsi picrite basalts from Pb and Hf isotope data. *Earth and Planetary Science Letters* **245**, 153-161.
- Elliot D.H., Fleming T.H., Haban M.A., Siders M.A. (1995) Petrology and mineralogy of the Kirkpatrick Basalt and Ferrar Dolerite, Mesa Range region, north Victoria Land, Antarctica. In: Elliot D.H., Blaisdell G.L. (eds) *Contributions to Antarctic Research IV*. AGU, Antarctic Research Series. 103-141.
- 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 Research* **7**, 223-237.
- Elliot D.H., Fleming T.H. (2008) Physical volcanology and geological relationships of the Jurassic Ferrar Large Igneous Province, Antarctica. *J. Volcanology and Geothermal Research* **172**, 20-37. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.02.016>
- 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. *The Geological Society of London, Special Publications*, **463**, 41-58.
- Elliot D.H., Fleming T.H., Kyle P.R., Foland K.A. (1999) Long-distance transport of magmas in the Jurassic Ferrar Large Igneous Province, Antarctica. *Earth and Planetary Science Letters* **167**, 89-104.
- Encarnación J., Fleming T.H., Elliot D.H., Eales H.V. (1996) Synchronous emplacement of Ferrar and Karoo dolerites and the early breakup of Gondwana. *Geology* **24**, 535-538.
- Ernst R.E., Buchan K.L. (2001) *Mantle plumes: their identification through time. Geological Society of America, Special Papers* **352**, 1-593.
- Ernst R.E., Bond D.P.G., Zhang Sh.-H., Buchan K.L., Grasby S.E., Youbi N., El Bilali H., Bekker A., Doucet L.S. (2021) Large igneous province record through time and implications for secular environmental changes and geological time-scale boundaries. In: Ernst R.E., Dickson A.J., Bekker A. (eds) *Large Igneous Provinces: a driver of global environmental and biotic changes. Geophysical Monograph* **255**, 4-29. <https://doi.org/10.1002/9781119507444.ch1>
- Farmer G.L. (2003) Continental basaltic rocks. In: Rudnick L.R. (ed.) *Treatise on Geochemistry* **3**, The Crust. Oxford: Elsevier-Pergamon, 85-121.
- Farnetani C.G., Richards M.A. (1994) Numerical investigations of the mantle plume initiation model for flood basalt events. *Journal of Geophysical Research* **99**, 13813-13834.
- Faure G., Bowman J.R., Elliot D.H., Jones L.M. (1974) Strontium isotope composition and petrogenesis of the Kirkpatrick Basalt, Queen Alexandra Range, Antarctica. *Contributions to Mineralogy and Petrology* **48**, 153-169.
- Faure G., Mensing T., Jones L.M., Hoers J., Kibler E.M. (1991) Isotopic and geochemical studies of Ferrar Dolerite sills in the Transantarctic Mountains. In: Ulbrich H., Rocha Campos A.C. (eds) *Gondwana Seven Proceedings*. Univ Sao Paulo, Sao Paulo, 669-683.
- Faure G., Pace K.K., Elliot D.H. (1982) Systematic variations of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and major element concentrations in the Kirkpatrick Basalt of Mount Falla, Queen Alexandra Range, Transantarctic Mountains. In: Craddock C (ed) *Antarctic Geoscience*. University of Wisconsin Press, Madison, Wisconsin, 715-723.

- Ferris J.K., Storey B.C., Vaughan A.P.M., Kyle P.R., Jones P.C. (2003) The Dufek and Forrester intrusions, Antarctica: a centre for Ferrar Large Igneous Province dike emplacement? *Geophysical Research Letters* **30**, 1348.
- Fleck R.J., Sutter J.F., Elliot D.H. (1977) Interpretation of discordant $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age spectra of mesozoic tholeiites from Antarctica. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **41**, 15-32.
- Fleming T.H., Elliot D.H., Jones J.M., Bowman J.R., Siders M.A. (1992) Chemical and isotopic variations in an iron-rich lava flow from the Kirkpatrick Basalt, north Victoria Land, Antarctica: implication for low-temperature alteration. *Contributions to Mineralogy and Petrology* **111**, 440-457.
- Fleming T.H., Foland K.A., Elliot D.H. (1995) Isotopic and chemical constraints on the crustal evolution and source signature of Ferrar magmas, north Victoria Land, Antarctica. *Contributions to Mineralogy and Petrology* **121**, 217-236.
- Fleming T.N., Heimann A., Foland K.A., Elliot D.H. (1997) $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of Ferrar Dolerite sills from the Transantarctic Mountains, Antarctica: implications for the age and origin of the Ferrar magmatic province. *Geological Society of America Bulletin* **109** (5), 533-546.
- Foland K.A., Fleming T.H., Heimann A., Elliot D.H. (1993) Potassium-argon dating of fine-grained basalts with massive Ar loss: application of the technique to plagioclase and glass from the Kirkpatrick Basalt, Antarctica. *Chemical Geology* **107** (1-2), 173-190.
- Ford A.B., Kistler R.W. (1980) K-Ar age, composition, and origin of Mesozoic mafic rocks related to Ferrar group, Pensacola Mountains, Antarctica. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics* **23**, 371-390.
- Foulger G.R., Natland J.H., Presnall D.C., Anderson D.L. (2005) Plates, plumes and paradigms. *The Geological Society of America, Special Papers* **388**, 1-881.
- Foulger G.R., Jurdy D.M. (2007) Plates, plumes and planetary processes. *The Geological Society of America, Special Papers* **430**, 1-997.
- Frey F.A., Coffin M.F., Wallace P.J. (2000) Origin and evolution of a submarine large igneous province: the Kerguelen Plateau and Broken Ridge, southern Indian ocean. *Earth and Planetary Science Letters* **176**, 73-89.
- Gallagher K., Hawkesworth C. (1992) Dehydration melting and the generation of continental flood basalts. *Nature* **358**, 57-59.
- Garfunkel Z. (2008) Formation of continental flood volcanism – the perspective of setting of melting. *Lithos* **100**, 49-65.
- GEOROC – открытая база данных Института Химии им. Макс-Планка по геохимии магматических пород. <http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/>
- Gose W.A., Helper M.A., Connelly J.N., Hutson F.E., Dalziel I.W.D. (1997) Paleomagnetic data and U-Pb isotopic age determinations from Coats Land, Antarctica: implications for late Proterozoic plate reconstructions. *Journal of Geophysical Research* **102** (B4), 7887-7902.
- Gray D.R., Foster D.A., Meert J.G., Goscombe B.D., Armstrong R., Trouw R.A.J., Passchier C.W. (2008) A Damara orogen perspective on the assembly of southwestern Gondwana. In: West Gondwana: pre-Cenozoic correlations across the South Atlantic region (eds Pankhurst R.J., Trouw R.A.J., Brito Neves B.B., de Wit M.J.). *The Geological Society of London, Special Publications* **294**, 257-278.
- Greber N.D., Davies J.H.F.L., Gaynor S.P., Jourdan F., Bertrand H., Schaltegger U. (2020) New high precision U-Pb ages and Hf isotope data from the Karoo large igneous province; implications for pulsed magmatism and early Toarcian environmental perturbations. *Results in Geochemistry* **1**, 100005. <https://doi.org/10.1016/j.ringeo.2020.100005>
- Gunn B.M. (1966) Model and element variation in Antarctic tholeiites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **30**, 881-920.
- 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.
- Hassan R., Flament N., Gurnis M., Bower D.J., Müller D. (2015) Provenance of plumes in global convection models. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* **16**, 1465-1489. <https://doi.org/10.1002/2015GC005751>
- Hastie W.W., Watkeys M.K., Aubourg C. (2014) Magma flow in dyke swarms of the Karoo LIP: implications for the mantle plume hypothesis. *Gondwana Research* **25**, 736-755.
- Heimann A., Fleming T.N., Elliot D.H., Foland K.A. (1994) A short interval of Jurassic continental flood basalt volcanism in Antarctica as demonstrated by $\text{Ar}^{40}/\text{Ar}^{39}$ geochronology. *Earth and Planetary Science Letters* **121** (1-2), 19-41.
- Heinonen J.S., Luttinen A.V. (2010) Mineral chemical evidence for extremely magnesian subalkaline melts from the Antarctic extension of the Karoo large igneous province. *Mineralogy and Petrology* **99**, 201-217. <https://doi.org/10.1007/s00710-010-0115-9>
- 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? *Chemical Geology* **277**, 227-244.
- Heinonen J.S., Luttinen A.V., Riley T.R., Michallik R.M. (2013) Mixed pyroxenite-peridotite sources for mafic and ultramafic dikes from the Antarctic segment of the Karoo continental flood basalt province. *Lithos* **177**, 366-380.
- 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 and Planetary Science Letters* **394**, 229-241.
- Heinonen J.S., Luttinen A.V., Bohrsen W.A. (2016) Enriched continental flood basalts from depleted mantle melts: modeling lithospheric contamination of Karoo lavas from Antarctica. *Contributions to Mineralogy and Petrology* **171**, 9. <https://doi.org/10.1007/s00410-015-1214-8>
- Heinonen J.S., Luttinen A.V., Bohrsen W.A. (2018) Enrichment of ^{18}O in the mantle sources of the Antarctic portion of the Karoo large igneous province. *Contributions to*

- Mineralogy and Petrology* **173**(3), 21.
<https://doi.org/10.1007/s00410-018-1447-4>
- Hergt J.M. (2000) Comment on: “Enriched mantle – Dupal signature in the genesis of the Jurassic Ferrar tholeiites from Prince Albert Mountains (Victoria Land, Antarctica)” by Antonini et al. (*Contributions to Mineralogy and Petrology* **136**, 1–19). *Contributions to Mineralogy and Petrology* **139**, 240–244.
- Hergt J.M., Chappell B.W., Faure G., Mensing T.M. (1989) The geochemistry of Jurassic dolerites from Portal Peak, Antarctica. *Contributions to Mineralogy and Petrology* **102**, 298–305.
- 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. *Journal of Petrology* **30**, 841–883.
- Hergt J.M., Peate D.W., Hawkesworth C.J. (1991) The petrogenesis of mesozoic Gondwana low-Ti flood basalts. *Earth and Planetary Science Letters* **105**, 134–148.
- Hoers J., Faure G., Elliot D.H. (1980) Correlation of $\delta^{18}\text{O}$ and initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios in Kirkpatrick Basalt on Mt. Ealla, Transantarctic Mountains. *Contributions to Mineralogy and Petrology* **75**, 199–203.
- Hofmann A.W. (1997) Mantle geochemistry: the message from oceanic volcanism. *Nature* **385**, 219–226.
- Hofmann A.W. (2003) Sampling mantle heterogeneity through oceanic basalts: isotopes and trace elements. *Treatise on Geochemistry* **2**, 61–101.
<https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/02123-X>
- Hole M.J., Saunders A.D., Rogers G., Sykes M.A. (1995) The relationships between alkaline magmatism, lithospheric extension and slab window formation along continental destructive plate margins. *The Geological Society of London, Special Publications* **81**, 265–285.
- Hole M.J. (2015) The generation of continental flood basalts by decompression melting of internally heated mantle. *Geology* **43**, 311–314.
- Hornig I. (1993) High-Ti and Low-Ti tholeiites in the Jurassic Ferrar Group, Antarctica. *Geologisches Jahrbuch* **E47**, 335–369.
- Hotten R. (1995) Palaeomagnetic studies on mafic dykes of the Shackleton Range, Antarctica, and their geotectonic relevance. *Polarforschung* **63** (2/3), 123–151.
- Hotten R. (1993) Die mafischen Gänge der Shackleton Range/Antarktika: Petrographie, Geochemie, Isotopengeochemie und Paläomagnetik. *Berichte Polarforschung* **118**, 1–225.
- Ivanov A.V., Meffre S., Thompson J., Corfu F., Kamenetsky V.S., Kamenetsky M.B., Demonerova 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. *Chemical Geology* **455**, 32–43.
- Johnston S.T., Thorkelson D.J. (2000) Continental flood basalts: episodic magmatism above long-lived hotspots. *Earth and Planetary Science Letters* **175**, 247–256.
- Jourdan F., Féraud G., Bertrand H., Watkeys M.K., Kampunzu A.B., Le Gall B. (2006) Basement control on dyke distribution in Large Igneous Provinces: case study of the Karoo triple junction. *Earth and Planetary Science Letters* **241**, 307–322.
- Jourdan F., Bertrand H., Schärer U., Blichert-Toft J., Féraud G., Kampunzu A.B. (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. *Journal of Petrology* **48**, 1043–1077.
- Jordan T.A., Becker D. (2018) Investigating the distribution of magmatism at the onset of Gondwana breakup with novel strapdown gravity and aeromagnetic data. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **282**, 77–88.
- Kelemen P.B., Hanghej K., Greene A.R. (2014) One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs, with an emphasis on primitive andesite and lower crust. *Treatise on Geochemistry* **4**, 749–807.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00323-5>
- King S.D., Anderson D.L. (1995) An alternative mechanism of flood basalt formation. *Earth and Planetary Science Letters* **136**, 269–279.
- Krohne N., Lisker F., Kleinschmidt G., Klügel A., Läufer A., Estrada S., Spiegel C. (2018) The Shackleton Range (East Antarctica): an alien block at the rim of Gondwana? *Geological Magazine* **155** (4), 841–864.
- Kyle P.R. (1980) Development of heterogeneities in the subcontinental mantle: evidence from the Ferrar Group, Antarctica. *Contributions to Mineralogy and Petrology* **73**, 89–104.
- 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: Cresswell M.M., Vella P. (eds) *Gondwana Five: Proceedings of the Fifth Gondwana Symposium*, Wellington, New Zealand, Rotterdam: A.A. Balkema, 283–287.
- Lambart S., Laporte D., Provost A., Schiano P. (2012) Fate of pyroxenite-derived melts in the peridotitic mantle: thermodynamic and experimental constraints. *J. Petrology* **53**, 451–476.
- Lambart S., Laporte D., Schiano P. (2013) Markers of the pyroxenite contribution in the major-element compositions of oceanic basalts: Review of the experimental constraints. *Lithos* **160–161**, 14–36.
- Lambart S., Baker M.B., Stöpler E.M. (2016) The role of pyroxenite in basalt genesis: melt-PX, a melting parameterization for mantle pyroxenites between 0.9 and 5 GPa. *J. Geophysical Research*
<https://doi.org/10.1002/2015JB012762>
- Leat P.T. (2008) On the long-distance transport of ferrar magmas. In: Structure and emplacement of high-level magmatic systems (eds Thomson K., Petford N. *The Geological Society of London, Special Publications* **302**, 45–61.
- Leat P.T. (2013) The geological and tectonic evolution of the Transantarctic Mountains: a review. In: Antarctic palaeoenvironments and Earth-surface processes (eds Thambrey M.J., Barker P.F., Barrett P.J., Bowman V., Davies B., Smellie J.L., Tranter M. *The Geological Society of London, Special Publications* **381**, 7–35.

- Leat P.T., Luttinen A.V., Storey B.C., Millar I.L. (2005) Sills of the Theron Mountains, Antarctica evidence for long distance transport of mafic magmas during Gondwana break-up. In *Dyke Swarms – Time Markers of Crustal Evolution* (eds) Hanski E., Mertanen S., Ramo T., Vuollo J., Taylor & Francis, 183-99.
- 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 Geophysical Researches* **29**(2), 135-158. <https://doi.org/10.1007/s11001-008-9051-z>
- Ludwig K.R. (2001) SQUID 1.00. User's manual. *BGC Special Publication* **2**, 2455 Ridge Road, Berkeley, CA 94709, USA. 54 p.
- Ludwig K.R. (2012) User's manual for Isoplot 3.75. A geochronological toolkit for Microsoft Excel. *BGC Special Publication* **4**, 2455 Ridge Road, Berkeley, CA 94709, USA. 141 p.
- Luttinen A.V. (2018) Bilateral geochemical asymmetry in the Karoo large igneous province. *Scientific Reports* **8**, 5223-5234.
- Luttinen A.V., Furnes H. (2000) Flood basalts of Vestfjella: Jurassic magmatism across an Archaean-Proterozoic lithospheric boundary in Dronning Maud Land, Antarctica. *J. Petrology* **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. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* **198**, 1-18. doi: . 2010.07.011. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores>
- Luttinen A.V., Heinonen J.S., Kurhila M., Jourdan F., Mänttari I., Vuori S.K., Huhma H. (2015) Depleted mantle-sourced CFB magmatism in the Jurassic Africa-Antarctica rift: petrology and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and U/Pb chronology of the Vestfjella dyke swarm, Dronning Maud Land, Antarctica. *Journal of Petrology* **56**, 919-952. <https://doi.org/10.1093/petrology/egv022>
- Luttinen A.V., Siivola J.U. (1997) Geochemical characteristics of Mesozoic lavas and dikes from Vestfjella, Dronning Maud Land: recognition of three distinct chemical types. In: Ricci C.A. (ed) *The Antarctic region: geological evolution and processes* **7**. Terra Antarctica Publications, Siena, 495-503.
- Luttinen A.V., Rämö O.T., Huhma H. (1998) Neodymium and strontium isotopic and trace element composition of a Mesozoic CFB suite from Dronning Maud Land, Antarctica: implications for lithosphere and asthenosphere contributions to Karoo magmatism. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **62**, 2701-2714.
- Marsh P.D., Thomson J.W. (1984) Location and geology of nunataks in north-western Coats Land. *British Antarctic Survey Bulletin* **65**, 33-39.
- Martin A.K. (2007) Gondwana breakup via double-saloon-door rifting and seafloor spreading in a backarc basin during subduction rollback. *Tectonophysics* **445** (3-4), 245-272.
- Matzen A.K., Wood B.J., Baker M.B., Stolper E.M. (2017) The roles of pyroxenite and peridotite in the mantle sources of oceanic basalts. *Nature Geoscience* **10**, 530-535.
- McDonough W., Sun S.S. (1995) The composition of the Earth. *Chemical Geology* **120** (3-4), 223-253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
- McLennan S.M. (2001) Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* **2**, (2000GC000109)
- Melluso L., Hergt J.M., Zanetti A. (2014) The late crystallization stages of low-Ti, low-Fe tholeiitic magmas: insights from evolved Antarctic and Tasmanian rocks. *Lithos* **188**, 72-83.
- Mensing T.M., Faure G., Jones L.M., Hoefs J. (1991) Stratigraphic correlation and magma evolution of the Kirkpatrick Basalt in the Mesa Range, northern Victoria Land, Antarctica. In: Ulbrich H., Rocha Campos A.C. (eds) *Gondwana Seven Proceedings*, Univ Sao Paulo, Sao Paulo, 653-667.
- Mensing T.M., Faure G. (1996) Cretaceous alteration of volcanic rocks, Pain Mesa, northern Victoria Land, Antarctica. *Chemical Geology* **129**, 153-161.
- Minor D.R., Mukasa S.B. (1997) Zircon U-Pb and hornblende ^{40}Ar - ^{39}Ar ages for the Dufek layered mafic intrusion, Antarctica: implications for the age of the Ferrar large igneous province *Geochimica et Cosmochimica Acta* **61** (12), 2497-2504.
- Molzahn M., Reisberg L., Worrner 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 and Planetary Science Letters* **144**, 529-546.
- 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**, 185-88.
- 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. *The Geological Society of America, Special Papers* **526**, 191-215. [https://doi.org/10.1130/2017.2526\(10\)](https://doi.org/10.1130/2017.2526(10))
- Natland J.H. (1989) Partial melting of a lithologically heterogeneous mantle. In: Saunders, A.D., Norry M.J. (eds) *Magmatism in the ocean basins. The Geological Society of London, Special Publications* **42**, 41-77.
- 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. Petrology* **52**, 959-984.
- Olierook H.K.H., Jourdan F., Merle R.E., Timms N.E., Kusznir N., Muhling J.R. (2016) Bunbury Basalt: Gondwana breakup products or earliest vestiges of the Kerguelen mantle plume? *Earth and Planetary Science Letters* **440**, 20-32.
- Panter K.S., Blusztajn J., Hart S.R., Kyle P.R., Esser R., McIntosh W.C. (2006) The origin of HIMU in the SW Pa-

- cific: evidence from intraplate volcanism in southern New Zealand and subantarctic islands. *Journal of Petrology* **47**(9), 1673-1704.
- Phillips E.H., Sims K.W.W., Blichert-Toft J., Richard C. Aster R.C., Gaetani G.A., Kyle P.R., Wallace P.J., Rasmussen D.J. (2018) The nature and evolution of mantle upwelling at Ross Island, Antarctica, with implications for the source of HIMU lavas. *Earth and Planetary Science Letters* **498**, 38-53.
- Plank T. (2014) 4.17 The chemical composition of subducting sediments. *Treatise on Geochemistry* **4**, 607-635. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00319-3>
- Richards M.A., Duncan R.A., Courtillot V.E. (1989) Flood basalts and hot-spot tracks: plume heads and tails. *Science* **246**, 103-107.
- Riley T.R., Knight K.B. (2001) Review age of pre-break-up Gondwana magmatism. *Antarctic Science* **13** (2), 99-110.
- Riley T.R., Leat Ph.T., Storey B.C., Parkinson I.J., Millar I.L. (2003) Ultramafic lamprophyres of the Ferrar large igneous province: evidence for a HIMU mantle component. *Lithos* **66**, 63-76.
- 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. *Journal of Petrology* **46**, 1489-1524.
- Riley T.R., Curtis M.L., Leat P.T., Watkeys M.K., Duncan R.A., Millar I.L., Owens W.H. (2006) Overlap of Karoo and Ferrar magma types in KwaZulu–Natal, South Africa. *J. Petrology* **47**, 541-556.
- 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 Research* **79**, 185-196.
- Rodionov N.V., Belyatsky B.V., Antonov A.V., Kapitonov I.N., Sergeev S.A. (2012) Comparative in-situ U–Th–Pb geochronology and trace element composition of baddeleyite and low-U zircon from carbonatites of the Palaeozoic Kovdor alkaline–ultramafic complex, Kola Peninsula, Russia. *Gondwana Research* **21**(4), 728-744. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.10.005>
- Rudnick R.L., Gao S. (2014) 4.1 Composition of the continental crust. *Treatise on Geochemistry* **4**, 1-51. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6>
- Semenov V.S., Mikhailov V.M., Koptev-Dvornikov E.V., Ford A.B., Shulyatin O.G., Semenov S.V., Tkacheva D.A. (2014) Layered Jurassic intrusions in Antarctica. *Petrology* **22**, 547-573.
- Siders M.A., Elliot D.H. (1985) Major and trace element geochemistry of the Kirkpatrick Basalt, Mesa Range, Antarctica. *Earth and Planetary Science Letters* **72**, 54-64.
- Sobolev A.V., Hofmann A.W., Kuzmin D.V., Yaxley G.M., Arndt N.T., Chung S., Danyushevsky L.V., Elliott T., Frey F.A., Garcia M.O., Gurenko A.A., Kamenetsky V.S., Kerr A.C., Krivolutskaya N.A., Matvienkov V.V., Nikogosian I.K., Rocholl A., Sigurdsson I.A., Sushchevskaya N.M., Teklay M. (2007) The amount of recycled crust in sources of mantle-derived melts. *Science* **316**, 412-417. <https://doi.org/10.1126/science.1138113>
- Søager N., Portnyagin M., Hoernle K., Holm P.M., Hauff F., Garbe-Schönberg D. (2015) Olivine major and trace element compositions in southern Payenia basalts, Argentina: evidence for pyroxenite–peridotite melt mixing in a back-arc setting. *Journal of Petrology* **56** (8), 1495-1518.
- Spaeth G., Hotten R., Peters M., Techmer K. (1995) Mafic dykes in the Shackleton Range, Antarctica. *Polarforschung* **63**(2/3), 101-121.
- Storey B.C., Vaughan A.P.M., Riley T.R. (2013) The links between large igneous provinces, continental break-up and environmental change: evidence reviewed from Antarctica. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh* **104**, 1-14.
- Stroncik N.A., Devey C.W. (2011) Recycled gabbro signature in hotspot magmas unveiled by plume–ridge interactions. *Nature Geoscience* **4**, 39-397.
- Sushchevskaya N., Belyatsky B. (2011) Geochemical and petrological characteristics of Mesozoic dykes from Schirmacher Oasis (East Antarctica). In: *Dyke Swarms: Keys for Geodynamic Interpretation* (ed. Srivastava R.K.). Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 3-18. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12496-9_1
- 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
- Svensen H., Corfu F., Polteau S., Hammer Ø., Planke S. (2012) Rapid magma emplacement in the Karoo Large Igneous Province. *Earth and Planetary Science Letters* **325–326**, 1-9.
- Svensen H.H., Torsvik T.H., Callegaro S., Augland L., Heimdal T.H., Jerram D.A., Planke S., Pereira E. (2018) Gondwana Large Igneous Provinces: plate reconstructions, volcanic basins and sill volumes. *The Geological Society of London, Special Publications* **463**, 17-40. <https://doi.org/10.1144/SP463.7>
- Sweeney R.J., Falloon T.J., Green D.H., Tatsuni Y. (1991) The mantle origins of Karoo picrites. *Earth and Planetary Science Letters* **107**, 256-271.
- Thompson, R.N., Gibson S.A. (2000) Transient high temperatures in mantle plume heads inferred from magnesian olivines in Phanerozoic picrites. *Nature* **407**, 502-506.
- 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. *Geophysical J. International* **167**, 1447-1460.
- Torsvik T.H., Cocks L.R.M. (2013) Gondwana from top to base in space and time. *Gondwana Research* **24**, 999-1030.
- Torsvik T.H., Steinberger B., Ashwal L.D., Doubrovine P.V., Tronnes R.C. (2016) Earth evolution and dynamics – a tribute to Kevin Burke. *Canadian J. Earth Sciences* **53**, 1073-1087. <https://doi.org/10.1139/cjes-2015-0228>
- Van der Meer D.G., van Hinsbergen D.J.J., Spakman W. (2018) Atlas of the underworld: slab remnants in the mantle,

- their sinking history, and a new outlook on lower mantle viscosity. *Tectonophysics* **723**, 309-448.
- Wang X.-C., Wilde S.A., Xu B., Pang Ch.-J. (2016) Origin of arc-like continental basalts: implications for deep-Earth fluid cycling and tectonic discrimination. *Lithos* **261**, 5-45.
- Will T.M., Zeh A., Gerdes A., Frimmel H.E., Millar I.L., Schmädicke E. (2009) Palaeoproterozoic to Palaeozoic magmatic and metamorphic events in the Shackleton Range, East Antarctica: Constraints from zircon and monazite dating, and implications for the amalgamation of Gondwana. *Precambrian Research* **172**, 25-45.
- White R.S., McKenzie D.P. (1989) Magmatism at rift zones: the generation of volcanic continental margins and flood basalts. *J. Geophysical Research: Solid Earth* **94(B6)**, 7685-7729.
- Yang Z.F., Li J., Liang W.F., Luo Z.H. (2016) On the chemical markers of pyroxenite contributions in continental basalts in Eastern China: implications for source lithology and the origin of basalts. *Earth-Science Reviews* **157**, 18-31.
- Zavala K., Leitch A.M., Fisher G.W. (2011) Silicic segregations of the Ferrar dolerite sills, Antarctica. *J. Petrology* **52**, 1927-1964.
- Zheng Y.-F. (2019). Subduction zone geochemistry. *Geoscience Frontiers* **10**, 1223-1254.
- Zheng Y.-F., Xu Zh., Chen L., dai L.-Q., Zhao Z.-F. (2020) Chemical geodynamics of mafic magmatism above subduction zones. *J. Asian Earth Sciences* **194**, 104185. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.104185>
- Zieg M.J., Marsh B.D. (2012) Multiple reinjections and crystal – mush compaction in beacon sill, McMurdo Dry Valleys, Antarctica. *J. Petrology* **53**, 2567-2591.