

УДК 550.384+551.242

ПАЛЕОМАГНЕТИЗМ МЕЗОПРОТЕРОЗОЙСКИХ ГАББРО-ДОЛЕРИТОВ ОАЗИСА БАНГЕРА (ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА): КЛЮЧЕВОЕ ПАЛЕОМАГНИТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ТЕКТОНИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ¹

© 2021 г. В. Ю. Водовозов^{1,2,*}, Г. Л. Лейченков^{3,4}, М. С. Егоров⁵,
Н. А. Гонжуров⁵, Е. В. Михальский³

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет,
д. 1 Ленинские горы, 119991 Москва, Россия

²Геологический институт РАН, д. 7 Пыжевский пер., 119017 Москва, Россия

³ВНИИОкеангеология им. И.С. Грамберга, д. 1 Английский пр., 190121 Санкт-Петербург, Россия

⁴Санкт-Петербургский государственный университет – Институт наук о Земле,
д. 7–9 Университетская наб., 199034 Санкт-Петербург, Россия

⁵Полярная морская геологоразведочная экспедиция,
д. 24 ул. Победы, 198412 Санкт-Петербург, г. Ломоносов, Россия

*e-mail: vodo7474@yandex.ru

Поступила в редакцию 03.11.2020 г.

После доработки 22.01.2021 г.

Принята к публикации 25.01.2021 г.

В статье представлены результаты палеомагнитного анализа 276 образцов из 24 мезопротерозойских (1133 млн лет) посткинематических даек габбро-долеритов оазиса Бангера (Земля Королевы Мэри, Восточная Антарктида). Средние направления высокотемпературных компонент естественной остаточной намагниченности даек группируются на стереограмме в два антиподальных кластера, тест обращения положительный. Первичность выделенных компонент также подтверждается положительным тестом контакта с большой штокообразной интрузией метагабброидов комплекса Паз-Коув (1170 млн лет). Палеомагнитный полюс ($Plat = -21.6^\circ$, $Plong = 268.9^\circ$, $A95 = 5.8^\circ$, $N = 24$) совпадает с палеомагнитным определением, выполненным по сопоставимым по возрасту вулканитам Земли Котса (1112 млн лет), и близок к полюсу, полученному по базитам кратона Грюнехогна в Западной части Земли Королевы Мод (1130 млн лет). Наиболее вероятной интерпретацией всех имеющихся палеомагнитных данных является совместное передвижение в составе единого блока кратонов Моусон и блока Земли Котса, начиная с рубежа 1110 млн лет. Раскрытие и закрытие предполагаемых океанических бассейнов между этими блоками в более позднее время является гораздо менее вероятным событием, это возможно в случае совпадения палеомагнитного полюса и полюса вращения этих блоков. Жесткая тектоническая связь кратонов Моусон и Земли Котса с конца мезопротерозоя по настоящее время противоречит предположению о раскрытии и закрытии гипотетического палеоокеана Шеклтон, разделявшего эти кратоны, и подтверждает предположение о формировании Гондваны в результате коллизионных процессов куунгского времени (580–520 млн лет) при столкновении палеоконтинентов Конго–Индия–Земля Эндерби и Калахари–Моусон–Австралия. Полученные данные делают более обоснованными палеотектонические реконструкции Родинии с участием Восточной Антарктиды для рубежа 1110 млн лет и одновременно указывают на необходимость коррекции существующих моделей распада Родинии и амальгамации Гондваны в неопротерозое и раннем палеозое. Настоящий полюс является третьим надежным палеомагнитным определением по докембрию Восточной Антарктиды.

Ключевые слова: Восточная Антарктида, кратон Моусон, палеомагнетизм, ключевой палеомагнитный полюс, мезопротерозой, дайковый рой, габбро-долериты, палеотектонические реконструкции, суперконтинент Родиния

DOI: 10.31857/S0016853X21020107

ВВЕДЕНИЕ

Палеомагнитный метод позволяет количественно рассчитывать крупномасштабные горизонтальные перемещения тектонических блоков с

точностью примерно 500 км и определять взаимные положения различных структурных элементов литосферы в прошлом, задавая тем самым достаточно жесткое ограничение для палеотектонических реконструкций [3, 7]. Палеомагнитные данные служат важной основой для реконструкции истории становления и распада палеоконтинентов докембрия [29, 35, 38].

¹ Дополнительная информация для этой статьи доступна по doi 10.31857/S0016853X21020107 для авторизованных пользователей.

Наиболее надежным способом для реконструкции взаимного положения тектонических блоков является построение и сравнение траекторий кажущейся миграции палеомагнитных полюсов (ТКМП). Главными критериями палеомагнитной надежности полюсов, по [9], являются:

- качественная полная магнитная чистка;
- достаточная статистика (количество образцов – более 24, кучность направлений не ниже 10, радиус круга доверия менее 16 градусов);
- полевые тесты, позволяющие датировать компоненты намагниченности относительно геологических процессов;
- надежно определенный возраст породы.

Для построения траекторий кажущейся миграции палеомагнитных полюсов необходимо наличие достаточного количества палеомагнитных определений, равномерно распределенных в интервале геологического времени, что является главным ограничением в применении этого способа при изучении докембрийской истории Земли.

Если для фанерозоя построены достаточно детальные ТКМП различных континентальных блоков, то для докембрия только для древних континентов Лаврентии и Балтики получено необходимое количество палеомагнитных полюсов для создания данных траекторий. В остальных докембрийских областях Мира определены несколько реперных (ключевых, по [12]) полюсов, которые позволяют использовать способ прямого сравнения одновозрастных определений, полученных для разных тектонических блоков. Из всех материков наименее изученным материком является Антарктида, на 99% закрытая ледяным покровом. Антарктида входила в состав всех древних суперконтинентов, но в большей мере ее положение изучено в структуре суперконтинентов Колумбия (Нуна) и Родиния, существовавших в палеопротерозое–мезопротерозое и мезопротерозое–неопротерозое соответственно [14, 40, 50, 56]. При этом для докембрия Антарктиды получено всего два надежных палеомагнитных полюса, что оставляет выполненные реконструкции суперконтинентов в значительной мере спекулятивными. В Восточной Антарктиде для докембрийского интервала было получено девять палеомагнитных определений, но семь из них не удовлетворяют современным требованиям палеомагнитной надежности [13, 48]. Только два определения, сделанные по кислым вулканитам Земли Котса с возрастом около 1110 млн лет [20] и базитам кратона Грюнехогна, расположенного на Земле Королевы Мод, с возрастом около 1130 млн лет [26] соответствуют современным методическим требованиям и могут быть использованы для палеотектонических реконструкций.

В 2018 г. опубликованы палеомагнитные результаты изучения долеритовых даек с возрастом

около 1130 млн лет, которые были изучены в оазисе Бангера на границе Земель Королевы Мэри и Уилкса [30]. Эта работа имеет рекогносцировочный характер – для палеомагнитного анализа авторами опубликованной работы Liu Y. et al. [30] было отобрано 36 образцов из 6 даек, что оказалось недостаточно для получения валидного результата. Средний полюс был получен только по трем дайкам и имеет большую ошибку определения ($A95 = 20^\circ$), что создает слишком широкий простор для возможных интерпретаций.

В 2019 году (январь–февраль) в рамках сезонных работ 64-й Российской антарктической экспедиции (РАЭ) были проведены полевые исследования и массовый отбор ориентированных образцов мезопротерозойских базитовых даек оазиса Бангера. Основная цель нашего исследования – получение надежного палеомагнитного определения и уточнение на его основе тектонической эволюции Восточной Антарктиды.

ТЕКТОНИКА ВОСТОЧНОЙ АНТАРКТИДЫ

В тектоническом отношении антарктический материк делится на две крупные области – Восточную Антарктиду, преимущественно сложенную докембрийскими комплексами кристаллического щита, частично перекрытыми платформенным чехлом, и Западную Антарктиду, где преобладают фанерозойские орогенные комплексы Тихоокеанского подвижного пояса (рис. 1). В надледных выходах фундамента, расположенных в прибрежной зоне Восточной Антарктиды, распознаются две главные категории докембрийских структур:

- архейские–палеопротерозойские ядра древней стабилизации земной коры (кратоны);
- мезопротерозойские–неопротерозойские подвижные пояса (орогены).

Представления о тектоническом строении территории Восточной Антарктиды, находящейся под ледовым покровом, основаны на интерпретации геофизических данных, наиболее информативными из которых являются данные аэромагнитных съемок [10, 22]. Анализ магнитного поля показывает, что подвижные пояса характеризуются вытянутыми, часто линейными знакопеременными магнитными аномалиями, кратоны обладают мозаичным, относительно спокойным и слабо структурированным полем [10, 22]. По этим характеристикам основные тектонические элементы земной коры Восточной Антарктиды были прослежены от побережья вглубь материка [22, 27] (см. рис. 1). Анализ детритовых минералов, главным образом – зерен циркона, в моренах и осадочных толщах дополнил данные по строению закрытых льдом территорий [28, 55].

Наиболее обширный кратон, известный как кратон Моусон [11, 19, 37], предположительно

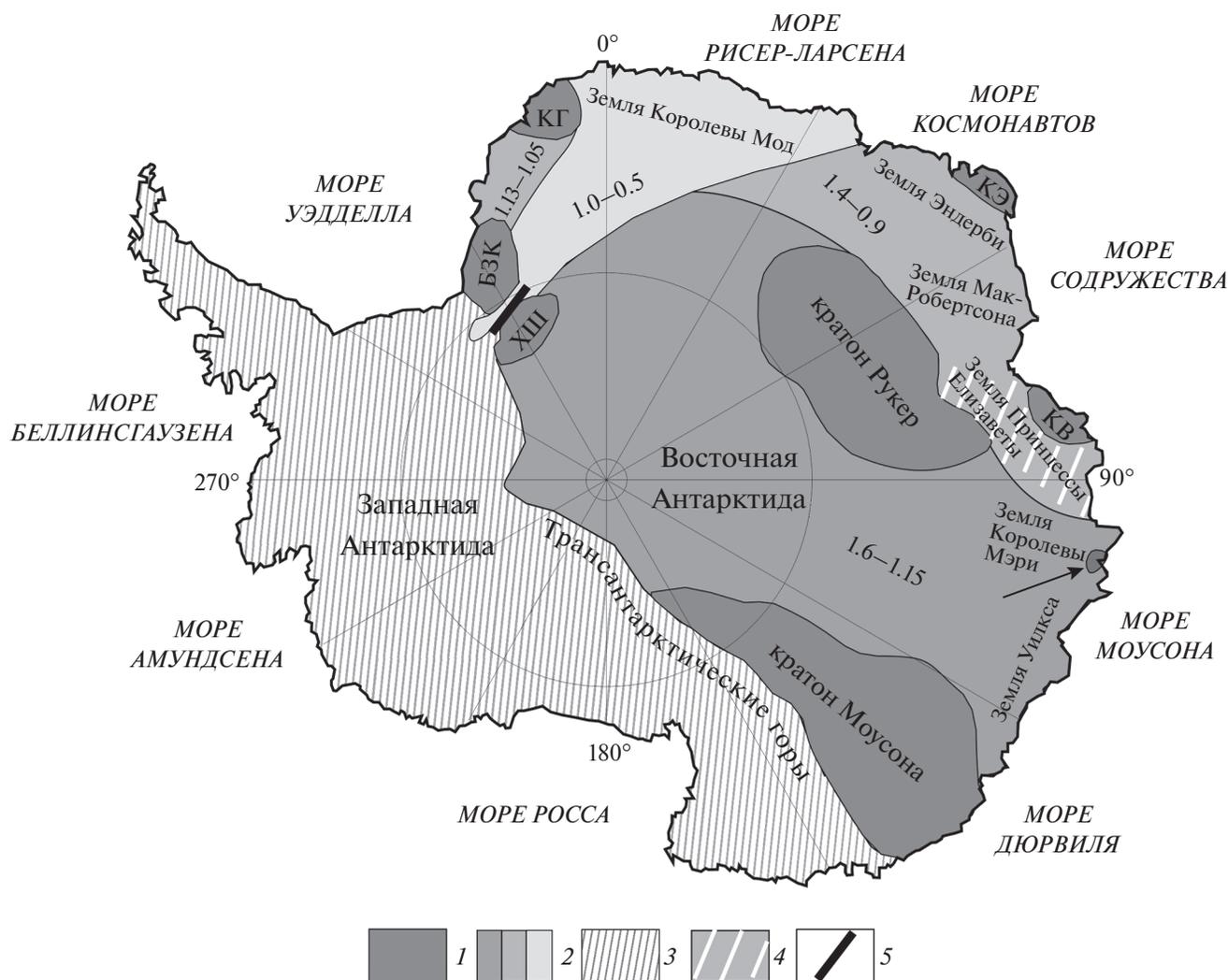


Рис. 1. Схема тектонического районирования Антарктиды (по [22, 28], с изменениями и дополнениями). Обозначено: БЗК – блок Земли Котса, КВ – кратон Вестфоль, КГ – кратон Грюгнеогна, КЭ – кратон Энтерби. Показан (стрелка) оазис Бангера.

1 – архейско-палеопротерозойские кратоны; 2 – мезопротерозойские-раннепалеозойские подвижные пояса: диапазон возрастов их развития, млрд лет; 3 – неопротерозойский-фанерозойский тихоокеанский подвижный пояс; 4 – раннепалеозойская тектоно-термальная активизация; 5 – раннепалеозойская шовная зона

протягивается от Земли Адели на юг вглубь материка до хребта Миллер в Трансантарктических горах и, возможно, далее до хребта Шеклтона, где обнажаются палеопротерозойские метаморфические комплексы (см. рис. 1). Другие древние кратоны выявлены на Земле Принцессы Елизаветы (кратон Вестфоль), в южной части Гор Принс-Чарльз (кратон Рукер), на Земле Энтерби (кратон Энтерби) и на Земле Королевы Мод (кратон Грюгнеогна). Небольшие выходы архейских и палеопротерозойских комплексов есть на Земле Королевы Мэри, но определить площадь их подледного распространения пока не удалось.

Докембрийские подвижные пояса на побережье Восточной Антарктиды имеют различный возраст развития (аккреции коры) и стабилиза-

ции (завершения стадии развития океанов и коллизии), этот возраст уменьшается с востока на запад (см. рис. 1). На Земле Уилкса и Земле Королевы Мэри орогенические процессы продолжались от 1.5 до 1.15 млрд лет, после чего значительная часть Восточной Антарктиды, включая приполюсный регион до хребта Шеклтона (в том числе, возможно, и кратон Рукер), сложилась в крупную, тектонически стабильную область земной коры – мезопротерозойский Восточно-Антарктический кратон [11, 28], который вместе с южной Австралией в мезопротерозое составлял еще более крупную континентальную область. Подвижный пояс, занимающий центральный сектор Восточной Антарктиды (от Земли Королевы Мэри до Земли Энтерби), завершил свое развитие в неопротеро-

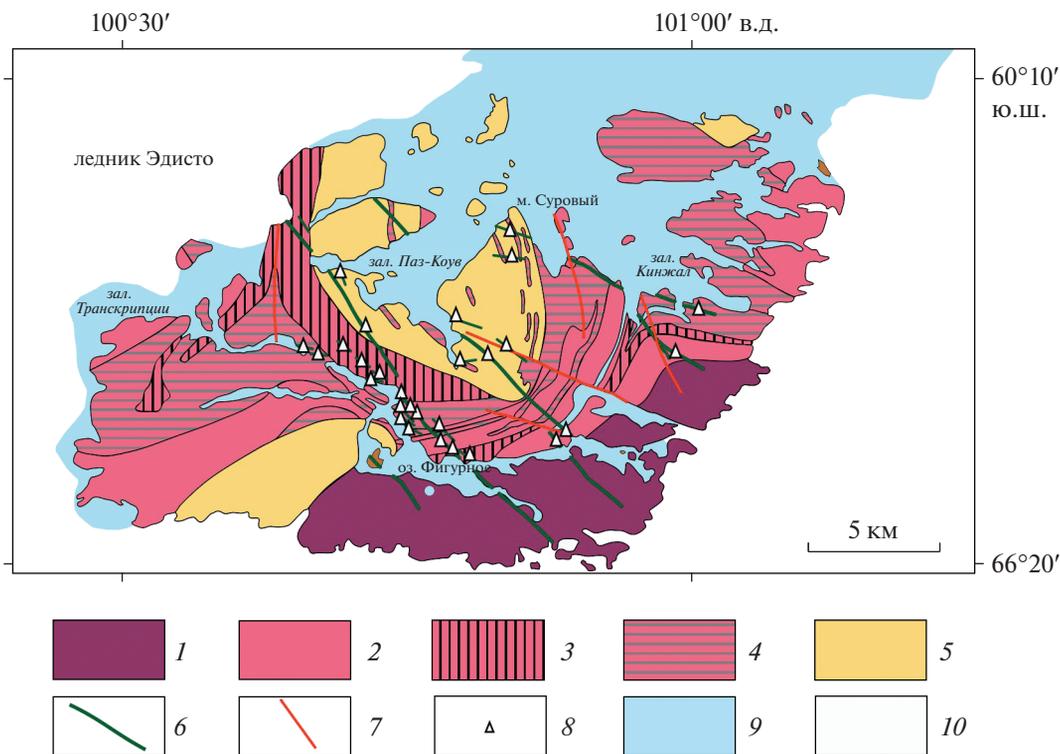


Рис. 2. Геологическая карта-схема континентальной части оазиса Бангера (по [51], с изменениями и дополнениями). 1 – неоархей: перемежающиеся мафические гранулиты и фельзические ортогнейсы; 2–4 – поздний палеопротерозой–ранний мезопротерозой: 2 – гранито-гнейсы, 3 – метапелитовые парагнейсы мигматизированные, 4 – перемежающиеся пара- и ортогнейсы; 5 – габбро-монзонит-гранитовая (чарнокитовая) ассоциация (1200–1150 млн лет); 6 – базитовые дайки (1130 млн лет); 7 – тектонические нарушения; 8 – места отбора образцов; 9 – озера и морские заливы; 10 – ледники

зое (около 0.9 млрд лет назад) амальгамацией кратона Индия с мезопротерозойским Восточно-Антарктическим кратоном как части суперконтинента Родиния. Развитие западного подвижного пояса, протянувшегося от Земли Эндерби до Земли Котса, завершилось в раннем палеозое (0.6–0.5 млрд лет назад), когда сформировалась значительная часть суперконтинента Гондваны.

Кратон Грюнехогна и блок Земли Котса, где были выполнены палеомагнитные исследования [20, 25] по разновозрастным с оазисом Бангера породам, по [16], окончательно вошли в состав Восточной Антарктиды в раннем палеозое. В мезопротерозое кратон Грюнехогна являлся частью более крупного южноафриканского кратона Протокалахари и не входил в состав суперконтинента Родиния, являясь отдельным микроконтинентом [16]. Земля Котса выделяется в отдельный террейн, его положение по отношению к Восточной Антарктиде с позднего мезопротерозоя до раннего палеозоя является неопределенным [16, 20, 31]. Предполагается, что блок Земли Котса также сочленялся с кратоном Протокалахари в позднем мезопротерозое [16, 20].

В раннем палеозое произошло окончательное становление палеоконтинента Гондвана [11, 34, 35]. В районе Земли Королевы Мод и Земли Котса в это время предполагается закрытие Мозамбикского палеоокеана и коллизия палеоконтинента Африки с Восточной Антарктидой. На Земле Королевы Мод выявлены только косвенные признаки этих процессов – гранулитовый метаморфизм и чарнокит-анортозитовой магматизм в интервале 650–500 млн лет, но западнее, на хребте Шеклтона, коллизионная обстановка надежно задокументирована и проявлена надвигообразованием, развитием фрагментов офиолитов и метаморфизмом высоких давлений с возрастом около 500 млн лет [46].

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

В геологическом строении оазиса Бангера принимают участие метаморфические и магматические породы [6, 44, 51] (рис. 2). Формирование протолитов метаморфических пород происходило в неоархее (2800–2700 млн лет) и позднем палеопротерозое–раннем мезопротерозое (1800–1500 млн лет). Возраст метаморфизма гранулитовой фации оценивается в 1190 ± 15 млн лет [44],

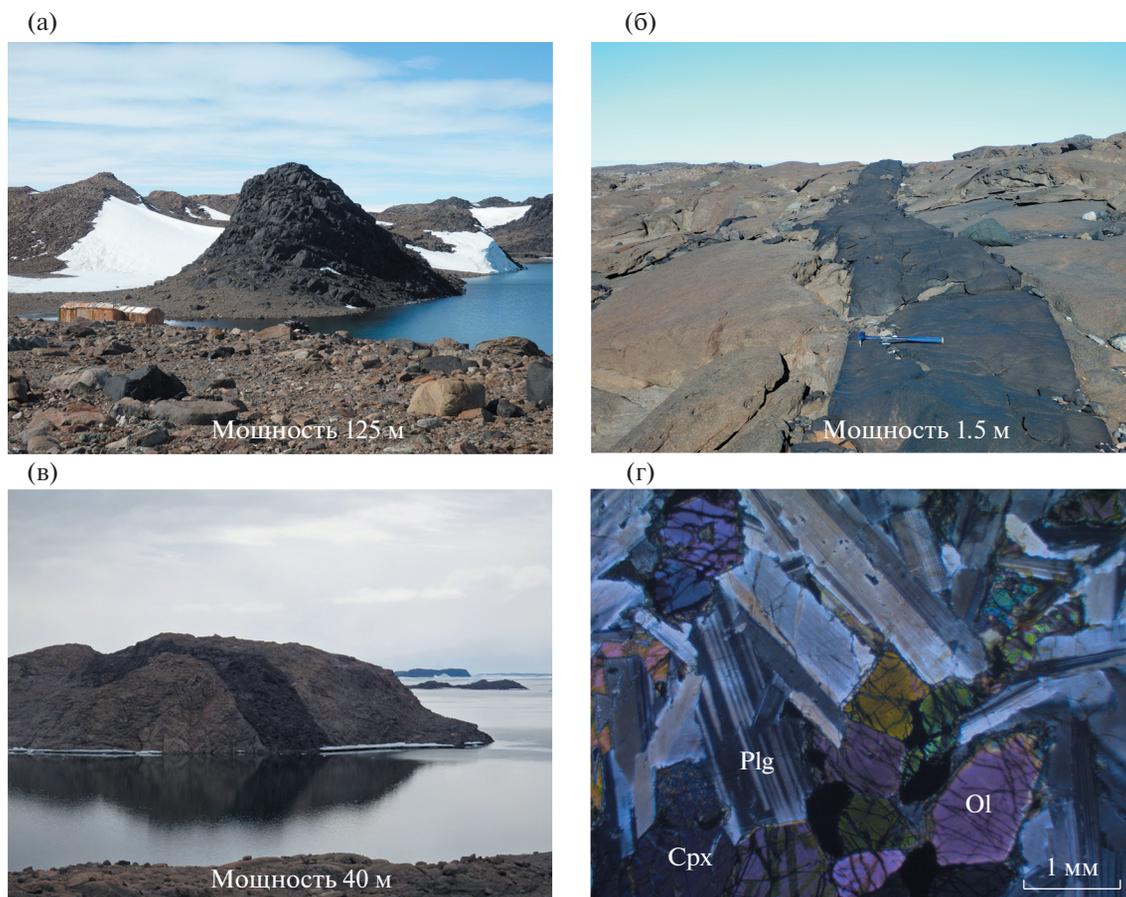


Рис. 3. Фотографии мезопротерозойских даек габбро-долеритов.

- (а) – район полевой базы “Оазис Бангера”, северный берег озера Фигурное;
 (б) – восточное побережье залива Паз-Коув, к югу от мыса Суровый;
 (в) – южный берег залива Кинжал;
 (г) – микрофотография оливинового габбро-долерита (никели скрещены) дайки А-19.

но возможно, что условия высокотемпературного метаморфизма сохранились в интервале 1220–1180 млн лет [52]. Магматические образования представлены син- и постметаморфическими плутонами габбро-монцонит-гранитового (чарнокитового) состава, датированные интервалом 1200–1150 млн лет [44, 51], в том числе метаморфизованными габбро-монцонитами комплекса Паз-Коув (1170 ± 4 млн лет) [44], а также разнообразными, преимущественно постметаморфическими мафическими дайками [42, 45].

Приоритетным объектом палеомагнитного исследования нами был выбран дайковый комплекс габбро-долеритов, надежно датированный U–Pb методом по циркону и бадделейту возрастом 1134 ± 9 и 1131 ± 16 млн лет соответственно и имеющий ясную геодинамическую позицию, которая связана с завершением орогении и кратонизацией крупных областей Австралии и Антарктиды [45]. Дайки внедрялись после становления основной структуры, т.е. являются посткинematicкими, что исключает необходимость вво-

дить поправку за изменение первичного положения, и не метаморфизованы. Изученные дайки имеют преимущественно северо-западное простирание и крутое падение (Приложение 1, ч. 1). Их мощность колеблется от десятков сантиметров до 125 м (рис. 3), а количество исчисляется десятками. Породы представлены оливиновыми габбро-долеритами или оливиновыми габбро, они практически неизменные, структура офитовая, определяемая крупными идиоморфными лейстами плагиоклаза и пироксеном в интерстициях, почти всегда присутствует оливин, иногда биотит и амфибол (см. рис. 3).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Надежность палеомагнитных результатов обеспечивалась массовым площадным полевым отбором образцов, применением современных методик исследований и современного аппаратного уровня. Полевые и лабораторные исследования, обработка результатов выполнялись по стандартным методикам [1, 7, 13, 48].

Отбор образцов

Для палеомагнитного анализа из каждого отдельного магматического тела отбиралось от 10 до 30 ориентированных образцов:

- 10 образцов отбиралось из даек мощностью до 10 м;
- 12–15 образцов из даек мощностью 15–30 м;
- по 30 образцов из 3–4 сайтов из двух самых мощных даек 125 и 85 м.

Медиана мощностей всех отобранных даек составляет 10 м. Образцы отбирались исключительно из коренных обнажений, преимущественно из краевых частей даек. Образцы выбуривались портативной электрической буровой установкой (мощным шуруповертом с алмазной коронкой Ø1") с водяным охлаждением; в отличие от бензиновых электрические буровые мини установки совершенно не загрязняют окружающую среду. Керны выбуривались размером в среднем 6–7 см с расчетом на проведение не только палеомагнитных, но также дополнительных петрографических и петромагнитных исследований. Применение минидрилла позволило отобрать образцы из практически гладких (сливных) обнажений плотных долеритов, углубляясь ниже зоны гипергенных изменений пород. Ориентировка выполнялась горным компасом с помощью специального ориентирующего устройства, периодически для контроля измерений применялся также солнечный компас. Перед замером осуществлялся контроль влияния пород на компас. Привязка сайтов осуществлялась с помощью приемника GPS Garmin62s с точностью определения горизонтальных координат до 5–10 м. Поправка на магнитное склонение (-94° по модели IGRF 12th [58]) вносилась на стадии лабораторных измерений. Для проведения теста контакта было дополнительно отобрано 37 образцов метагабброидов комплекса Паз-Коув из трех различных сайтов — в экзотактовой зоне мощной дайки габбро-долеритов и на удалении от контакта.

Лабораторные исследования

Для лабораторных испытаний керны были распилены на отдельные образцы для измерений — шайбы диаметром 25 мм и высотой 22 мм, для измерений выбирались образцы у забоя. Перед началом магнитных чисток измерялась величина начальной объемной магнитной восприимчивости (k) и ее анизотропия (АМВ) на каппа-мосте МФК-1 (AGICO, Чехия) в лаборатории палеомагнетизма ГИН РАН (г. Москва, Россия). Для получения палеомагнитной записи естественной остаточной намагниченности (ЕОН) 278 образцов были полностью размагничены нагреванием в лаборатории палеомагнетизма ГИН РАН (г. Москва, Россия), а 35 образцов размагничены

переменным полем в лаборатории главного геомагнитного поля и петромагнетизма ИФЗ РАН (г. Москва, Россия). Ступенчатая температурная чистка проводилась до полного размагничивания образцов (до $580-590^\circ\text{C}$) с шагом от 10 до 50 градусов (всего 16–18 шагов) в экранированной печи TD48 (ASC Scientific, США) с измерением величины и направления после каждого нагрева на спин-магнетометре JR-6 (AGICO, Чехия), помещенном в кольца Гельмгольца. Размагничивание переменным полем проводилось в полях от 0 до 130 мТл с шагом от 2.5 до 20 мТл (число шагов составляло 13) на автоматической системе, совмещенной с криогенным магнитометром 2G Enterprises (США), в немагнитной комнате ИФЗ РАН (г. Москва, Россия). Результаты размагничивания образцов разными методами совпадают.

Обработка и интерпретация измерений

Обработка и интерпретация измерений анизотропии магнитной восприимчивости проводилась при помощи программы Anisoft 4.2 (AGICO, Чехия) [60]. Разделение компонент намагниченности выполнялось при помощи компонентного анализа, при этом применялся пакет компьютерных программ Р. Энкина [18], использующих стандартные алгоритмы [23, 27, 57]. В дальнейшем анализу подвергалась, в основном, характеристическая компонента, выделяющаяся на заключительных этапах чистки (высокотемпературная) и спадающая в начало координат. При компонентном анализе анализировались не только направления, но и круги перемагничивания, при расчете среднего направления, согласно [33], они использовались совместно. Селекция выделенных направлений проводилась вручную или с помощью пакета программ "Select" С.В. Шипунова [8]. Для анализа биполярного распределения векторов ЕОН использовался тест обращения [32]. Для оценки значимости угловых расстояний между палеомагнитными полюсами использовался тест обращения [32] и метод [17], реализованный в пакете программ [18]. Для сравнения палеомагнитных полюсов на сфере применялась программа GMAP [49], для поиска и анализа палеомагнитных определений по докембрию Восточной Антарктиды использовалась мировая палеомагнитная база данных Magnetics Information Consortium [60].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Петромагнетизм

Образцы по величине остаточной намагниченности достаточно сильные, медиана составляет 1.02 А/м. Медиана значений начальной магнитной восприимчивости образцов составляет 6.4×10^{-2} ед. СИ. По начальным значениям вели-

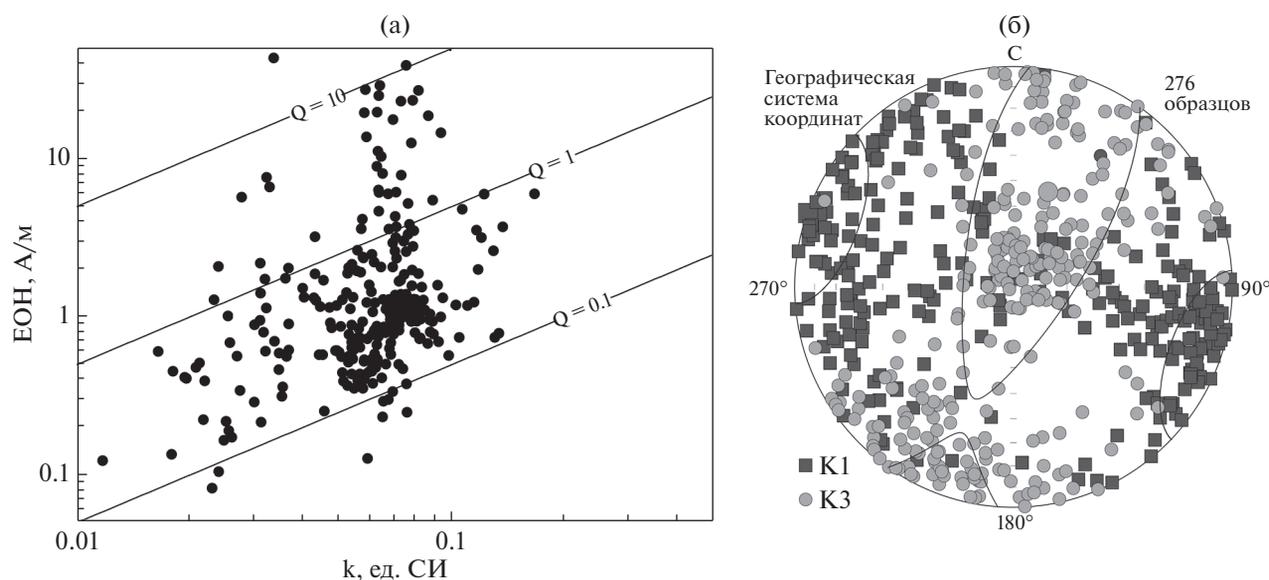


Рис. 4. Петромагнитные свойства образцов дайковых габбро-долеритов.

(а) — отношение Кенигсбергера: начальная магнитная восприимчивость (горизонтальная ось), начальная остаточная намагниченность (вертикальная ось), масштаб логарифмический;

(б) — стереограмма распределения максимальной и минимальной осей анизотропии начальной магнитной восприимчивости, их средние направления и доверительные интервалы.

чин остаточной намагниченности и магнитной восприимчивости рассчитан фактор Q (отношение Кенигсбергера), медиана его равна 0.33 (рис. 4, а).

Медиана величины анизотропии начальной магнитной восприимчивости (АМВ) составляет 5.7%, форма эллипсоида представлена примерно пополам как уплощенным, так и удлиненным типом. Ориентировка главных осей эллипсоида магнитной восприимчивости (рис. 4, б) примечательна. Считается нормальным, по [44], что для субпластовых интрузивных тел (даек и силлов) длинная $K1$ и средняя $K2$ оси должны находиться в плоскости тела, а короткая ось $K3$ должна быть перпендикулярна контакту, направление $K1$ при этом принято интерпретировать как направление движения магмы. Для наших субвертикальных даек с северо-западным простиранием нормальная ориентировка — длинная ось $K1$ вытянута согласно простиранию интрузива (на стереограмме — это северо-запад и юго-восток), средняя $K2$ — вертикальная, при этом короткая $K3$ — горизонтальная и располагается на северо-востоке и юго-западе. Изученные нами дайки по распределению осей анизотропии начальной магнитной восприимчивости делятся на три равные группы, которые сопоставляются с типами I, II и IV, по [36] (Приложение 1, ч. 2):

— первая группа (тип I) — дайки с нормальной ориентировкой осей (8 даек);

— вторая группа (тип II) — дайки с ориентировкой $K1$ и $K3$ в плоскости дайки ($K1$ — по прости-

ранию, $K3$ — субвертикальная), $K2$ перпендикулярна контакту (8 даек);

— третья группа (близка к типу IV) — здесь есть дайки как с ориентировкой осей анизотропии начальной магнитной восприимчивости, близкой к хаотичной, так и промежуточные к типам I и II, с наклонной ориентировкой осей (всего 8 даек).

Дайки с ориентировкой $K1$ и $K3$ по плоскости тела (тип II) встречаются часто, можно найти много примеров подобного распределения осей анизотропии начальной магнитной восприимчивости, например в мезопротерозойских диабазовых дайках Канадского щита [36], где все тела характеризуются таким распределением, или в мезозойском дайковом роде Понта-Гросса в бассейне Парана в Бразилии [39], где количество даек типа I и II сопоставимо. Подобное поведение объясняется стрессовым вертикальным давлением после внедрения (вертикальным сокращением в условиях горизонтального растяжения) [36, 39].

Зависимость петромагнитных параметров от мощности даек и вмещающих пород нами не обнаружена.

Компонентный анализ

На диаграммах Зийдервельда выделяются одна или две компоненты (рис. 5, а–г). Первая компонента низкотемпературная (низкокоэрцитивная), зачастую большая по величине, счищается до 220–260°C, среднее направление близко к направлению современного геомагнитного поля.

Таблица 1. Направления высокотемпературных компонент естественной остаточной намагниченности (ЕОН) и рассчитанные виртуальные геомагнитные полюсы мезопротерозойских габбро-долеритов оазиса Бангера Восточной Антарктиды.

Дайка	n/N	Широта °S точки отбора	Долгота °E точки отбора	Направление ЕОН					Виртуальный геомагнитный полюс			
				D, °	I, °	k	α95, °	выборка	Plat, °	Plong, °	d _p , °	d _m , °
A-05	10/12	66.2831	100.7608	156.6	-0.1	24.8	9.9	9d + 1c	-21.6	255.4	5.0	9.9
A-07	8/10	66.2841	100.7572	154.5	8.7	104.5	5.5	7d + 1c	-25.6	252.3	2.8	5.5
BHD4	21/22	66.2911	100.7837	149.7	18.5	26.5	6.3	19d + 2c	-29.6	245.9	3.4	6.6
A-09	7/12	66.3001	100.8140	356.9	29.1	39.9	9.8	6d + 1c	-8.1	277.8	6.0	10.8
A-11	7/10	66.2951	100.7981	347.7	18.9	41.1	9.8	5d + 2c	-13.5	268.3	5.3	10.2
A-13	8/10	66.2906	100.7634	354.0	36.0	23.3	11.7	8d	-3.6	275.1	7.9	13.6
A-16	8/10	66.2625	100.6666	192.9	-10.3	31.8	10.6	3d + 5c	-17.9	294.2	5.4	10.7
A-17	4/10	66.2647	100.6811	161.0	18.7	47.6	18.3	1d + 3c	-31.9	258.5	9.9	19.0
A-18	7/10	66.2638	100.7022	5.1	-37.6	20.5	14.5	3d + 4c	-44.7	287.4	10.1	17.1
A-19	10/10	66.2575	100.7264	168.5	-19.3	40.3	7.9	5d + 5c	-13.3	269.1	4.3	8.2
A-20	8/10	66.2661	100.7198	170.0	-8.6	12.2	17.1	4d + 4c	-19.0	270.2	8.7	17.2
A-21	7/10	66.2714	100.7324	172.9	-16.2	31.7	10.9	7d	-15.3	273.4	5.8	11.2
A-22	9/10	66.2666	100.8075	172.1	20.8	33.5	9.4	4d + 5c	-34.2	271.4	5.2	9.9
A-24	4/12	66.2192	100.8479	173.6	-19.1	28.9	20.1	2d + 2c	-13.8	274.4	10.9	21.0
A-25	11/12	66.2305	100.8471	148.1	11.7	28.1	8.9	8d + 3c	-25.8	245.1	4.6	9.0
A-26	12/12	66.2936	100.8895	354.5	22.4	72.7	5.1	12d	-12.0	275.4	2.9	5.4
A-28	10/10	66.2889	100.8885	358.8	11.8	88.0	5.2	10d	-17.7	279.6	2.7	5.3
A-29	8/10	66.2733	100.7266	163.6	-17.7	31.5	10.2	6d + 2c	-13.7	264.0	5.5	10.6
A-30	12/12	66.2496	101.0159	169.6	15.0	78.6	5.0	7d + 5c	-30.9	269.0	2.6	5.1
A-31	15/15	66.2645	100.9879	359.7	37.2	99.1	3.9	15d	-3.0	280.7	2.7	4.6
A-36	10/12	66.2523	100.8012	164.8	-13.2	20.7	11.0	8d + 2c	-16.2	265.1	5.7	11.2
A-37	10/12	66.2666	100.8280	158.0	11.9	40.2	7.8	7d + 3c	-27.8	255.9	4.0	7.9
A-41	6/11	66.2281	100.6769	355.1	-36.3	14.7	20.0	2d + 4c	-43.8	274.3	13.6	23.3
A-43	6/12	66.2379	100.6903	169.1	4.6	43.4	12.2	1d + 5c	-25.6	268.6	6.1	12.2
Среднее	24/24	66.3	100.8	168.7	-3.4	11.9	8.9		-21.6	268.9	A95 = 5.8° φ_m = -2°	

Примечание. n/N – количество образцов или сайтов, использованных в статистике/изученных; D и I – палеомагнитное склонение и наклонение; k – кучность; α95 и A95 – радиус круга доверия вокруг среднего с 95% вероятностью; d – единичное направление; c – большой круг перемещения; Plat и Plong – широта и долгота палеомагнитного полюса; d_p/d_m – полуоси овала доверия вокруг полюса; φ_m – палеоширота.

В большинстве образцов в среднетемпературном интервале (от 170–220 до 500–520°C) выделяются четкие круги перемещения (см. рис. 5, б), причем их пересечение чаще всего будет более кучным, чем среднее направление выделенных высокотемпературных компонент. Эти круги помогли локализовать среднее направление при большом разбросе выделенных высокотемпературных компонент (табл. 1). Высокотемпературные (высококоэрцитивные) компоненты в трети случаев не идут в начало координат, остальные две трети образцов обладают характеристически-

ми компонентами, зачастую выделяющимися на узких температурных интервалах от 520 до 580–590°C. Есть дайки (см. табл. 1), где практически у всех образцов такие характеристические компоненты. Для расчета среднего направления по дайке, согласно [33], круги и компоненты использовались совместно (см. табл. 1, Приложение 1, ч. 3). Средние направления по дайкам на стереограмме (рис. 6, б) образуют два антиподальных кластера, тест обращения положительный: $\gamma/\gamma_c = 16.1/18.7$ (класс С, по [32]).

Тест контакта (обжига). Для проведения теста был найден горячий контакт мощной (30 м) дайки (А-36) габбро-долеритов (1131–1134 млн лет) и вмещающих пород (точка А-35), представленными метагабброидами комплекса Паз-Коув (1170 млн лет) самого крупного интрузивного тела оазиса Бангера. Контакт четкий, метагабброиды комплекса Паз-Коув в экзоконтакте осветлены и кливажированы, в этой зоне на расстоянии не более 20 см от контакта удалось выбурить 10 кернов. Для сравнения палеомагнитной записи были взяты 12 образцов на удалении от контакта — из внутренней части того же крупного тела комплекса Паз-Коув (А-38) на расстоянии 1.8 км от дайки А-36 и не менее чем в сотнях метрах от других мощных даек габбро-долеритов. Вероятнее всего, возраст намагниченности в основной части интрузива Паз-Коув соответствует возрасту метаморфизма этих пород, который находится в интервале 1170–1150 млн лет [44, 52]. Качество палеомагнитной записи в метагабброидах комплекса Паз-Коув в контактовой зоне и на удалении от нее хорошее (см. рис. 5, д, е), причем оно заметно лучше, чем в габбро-долеритах дайки А-36. В метагабброидах выделяются четкие низкотемпературные компоненты, а также высокотемпературные характеристические компоненты на узком интервале от 520–540°C до 580–590°C. В среднетемпературном интервале можно видеть либо круги, либо компоненты намагниченности, причем спектры размагничивания средне- и высокотемпературных компонент при этом не перекрываются — на диаграммах Зийдервельда наблюдается резкий перегиб. Результат теста контакта — высокотемпературные компоненты метагабброидов комплекса Паз-Коув из экзоконтакта (А-35) совпадают в пределах ошибки с высокотемпературными компонентами, выделенными в образцах дайки габбро-долеритов А-36 (см. рис. 6, а). Высокотемпературные компоненты метагабброидов комплекса Паз-Коув на удалении от горячего контакта (А-38) практически антиподальны и близки (если перевести в другую полярность) с компонентами габбро-долеритов А-36, но овалы доверия их средних не перекрываются. Таким образом, тест обжига положительный, несмотря на относительно близкий возраст интрузивных комплексов. На рисунке 6а хорошо видно, что все три средних направления (А-35, А-36 и А-38) идеально ложатся на большой круг, что можно расценить как перемагничивание первичного направления ЕОН комплекса Паз-Коув более поздним долеритовым комплексом.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученное нами среднее направление высокотемпературных компонент ЕОН ($D = 168.7^\circ I = -3.4^\circ k = 11.9 \alpha 95 = 8.9^\circ$) значительно расходится с данными [30] ($D = 71.2^\circ I = 68.5^\circ k = 87.9 \alpha 95 = 13.2^\circ$).

Это расхождение может быть связано с разным объемом опробования в нашей работе и в работе [30], где было изучено всего 36 образцов — по шесть кернов из шести даек, а среднее направление ЕОН получено только по трем телам. Из изученных в работе [30] даек мы исследовали только две (наиболее мощные в оазисе Бангера), но только для одной из них в статье приведено среднее направление ЕОН. Liu Y. et al. [30] получили в этой дайке среднее направление по выборке из пяти кругов и одному вектору с кругом доверия 21.2° , однако мы получили в этой дайке (А-19) другое среднее направление ЕОН по пяти кругам и пяти векторам с кругом доверия 7.9° .

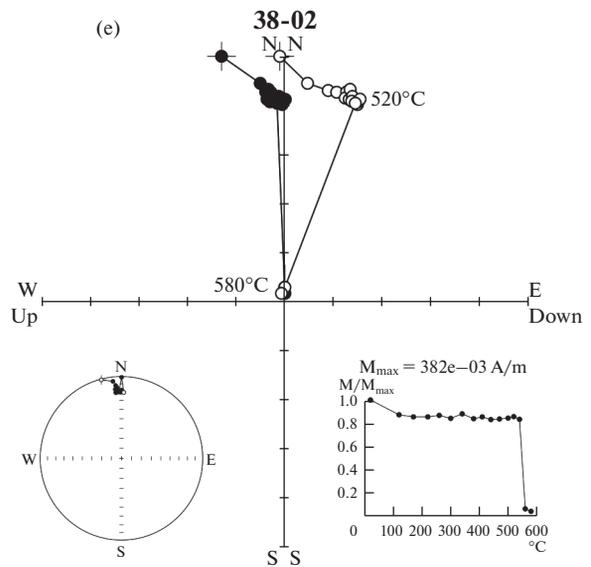
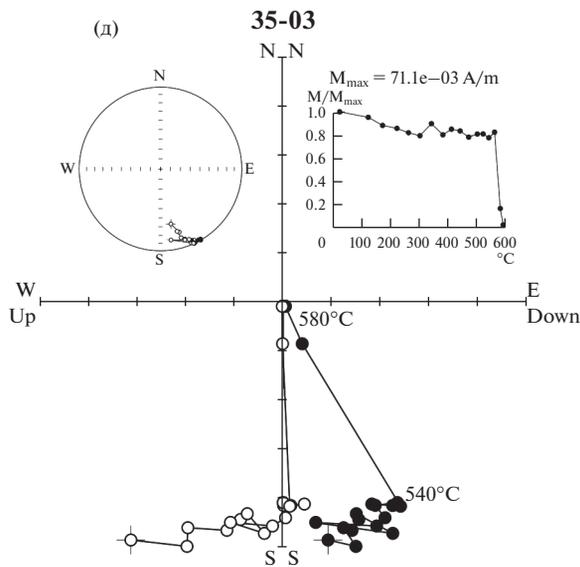
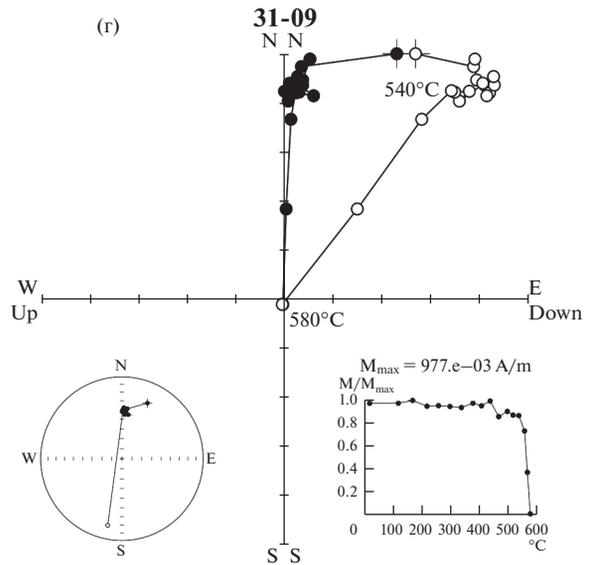
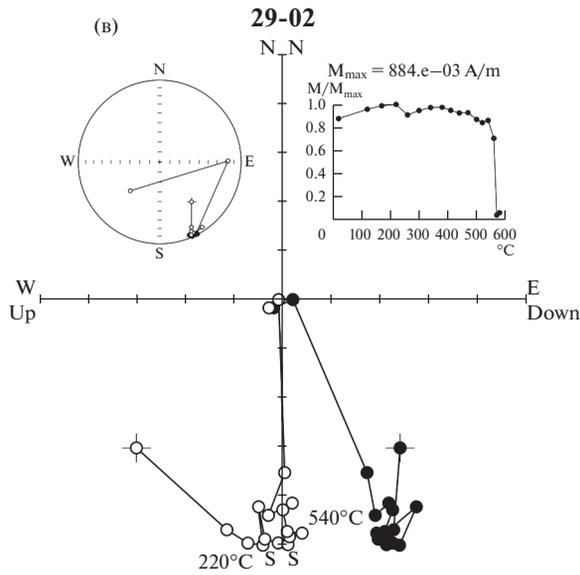
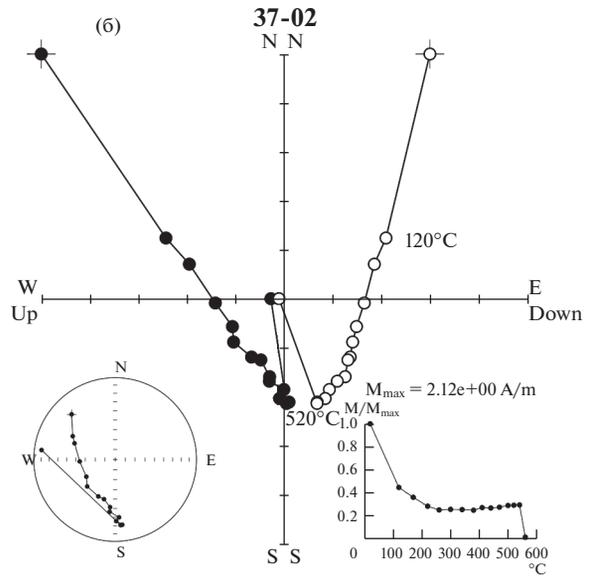
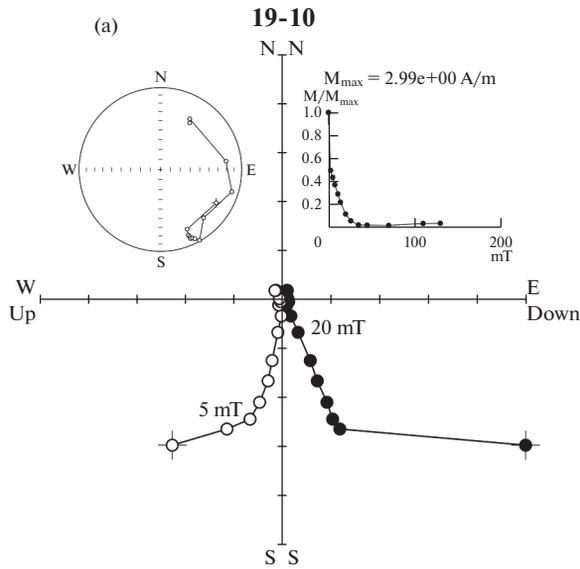
Выделенные направления высокотемпературных компонент ЕОН по нашим данным являются первичными или близкими к первичным, т.к. в результате проведенных нами исследований получены два положительных теста палеомагнитной надежности — обращения и контакта, причем второй тест выполнен на относительно близко-возрастном объекте. Однако в распределении средних направлений по дайкам намечается бимодальность, если перевести это распределение на центр сферы, то можно увидеть, что оно не осесимметричное, сильно вытянутое, здесь можно выделить два пересекающихся кластера (см. рис. 6, в). В наших более ранних результатах [2], полученных на материале 17 даек, это было видно более отчетливо — кластеры не пересекались. Такая картина может свидетельствовать о растянутом во времени внедрении дайкового комплекса габбро-долеритов с двумя главными импульсами магматизма.

По средним направлениям высокотемпературных компонент ЕОН рассчитаны виртуальные геомагнитные полюсы (ВГП) для каждой дайки, палеомагнитный полюс получен осреднением всех 24-х виртуальных геомагнитных полюсов (см. табл. 1). Распределение виртуальных геомагнитных полюсов на стереограмме становится фишеровским, осесимметричным, что ожидаемо и вытекает из нелинейной зависимости палеошироты от магнитного наклона вектора (см. рис. 6, г). В данном случае мы вычислили полюс путем осреднения виртуальных геомагнитных

Рис. 5. Диаграммы Зийдервельда, стереограммы и кривые размагничивания при магнитной чистке образцов.

(а), (б), (в), (г) — мезопротерозойские габбро-долериты;

(д), (е) — метагабброиды комплекса Паз-Коув: географическая система координат, проекции векторов на нижнюю полусферу/горизонтальную плоскость (черные кружки), на верхнюю полусферу/вертикальную плоскость (белые кружки).



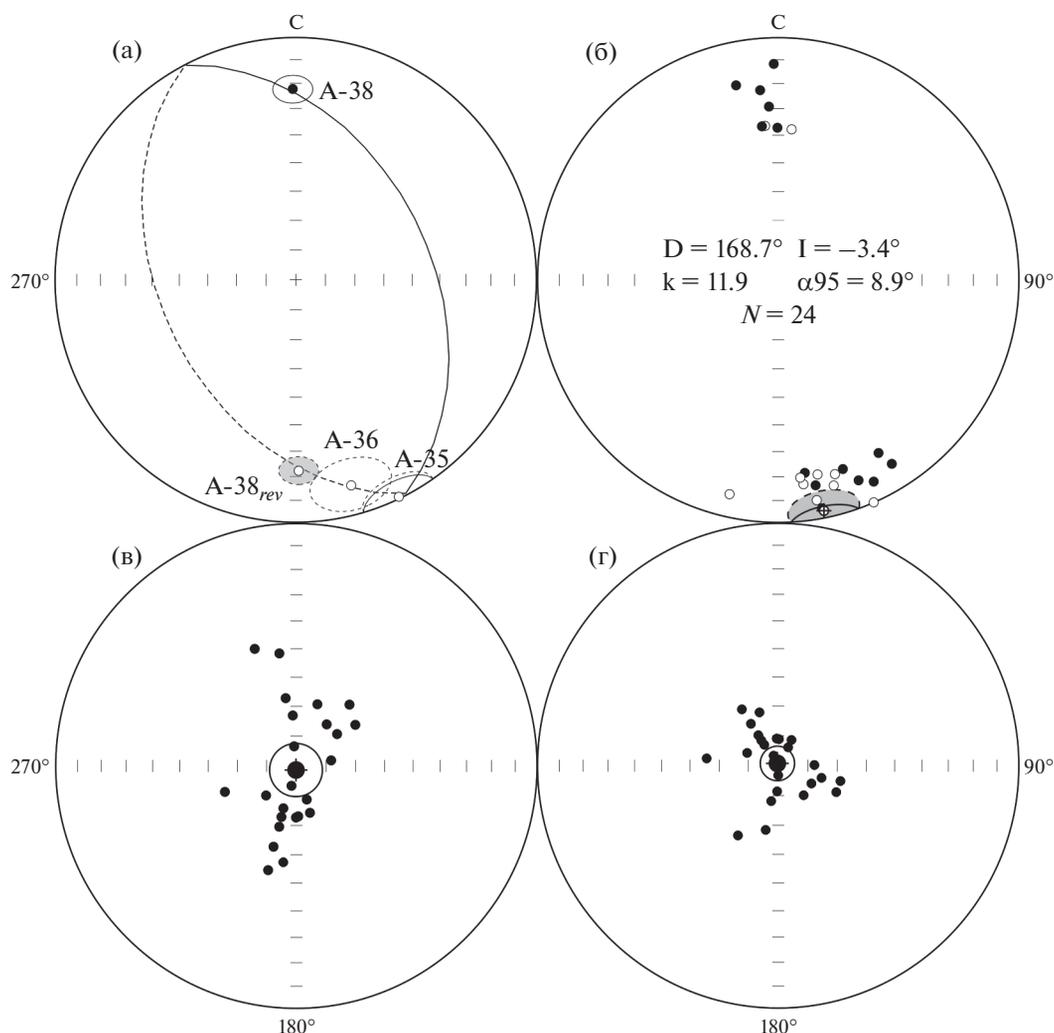


Рис. 6. Стереогаммы (географическая система координат).

Проекция векторов на полусферу: нижнюю (черные кружки), верхнюю (белые кружки).

(а) – тест контакта, средние направления высокотемпературных компонент естественной остаточной намагниченности:

A-36 – дайка габбро-долеритов мощностью 30 м (внедряющаяся в метагабброиды комплекса Паз-Коув),

A-35 – метагабброиды комплекса Паз-Коув из экзоконтакта дайки A-36,

A-38 – метагабброиды комплекса Паз-Коув (отобраны в 1.8 км от дайки A-36),

A-38_{rev} – обращенное направление средней компоненты A-38;

(б) – распределение средних направлений ЕОН всех изученных даек, среднее направление распределения с овалом доверия после обращения обратной полярности;

(в) – средние направления ЕОН всех изученных даек, обращенные в одну полярность и повернутые так, чтобы среднее направление распределения совпало с центром стереогаммы;

(г) – виртуальные геомагнитные полюсы даек, повернутые так, чтобы средний полюс совпал с центром стереогаммы.

полюсов отдельных даек, а не по среднему направлению ЕОН всех даек, по [8]. Можно уверенно утверждать, что полученный полюс является палеомагнитным, т.е. осредненным за палеоэпохные вариации геомагнитного поля:

- полюс получен нами по 24 дайкам, в том числе мощным, остывающим длительное время и распределенным на площади около 120 км²;

- нами получен положительный тест обращения.

Согласно полученным данным, в конце мезопротерозойского времени эта часть кратона Мо-

усон находилась на экваторе. Определение полярности выделенных направлений остается открытым, в нашем исследовании была выбрана опция полярности, также как и Liu Y. et al. [30], в соответствии с которой северный полюс находится в восточной части Тихого океана.

Для оценки надежности полученного определения можно применить широко используемые критерии палеомагнитной надежности [54].

Нашему результату может быть присвоен высший балл – 7, поскольку к условиям Liu Y. et al. [30], которые оценили свое определение на 4 (хорошо

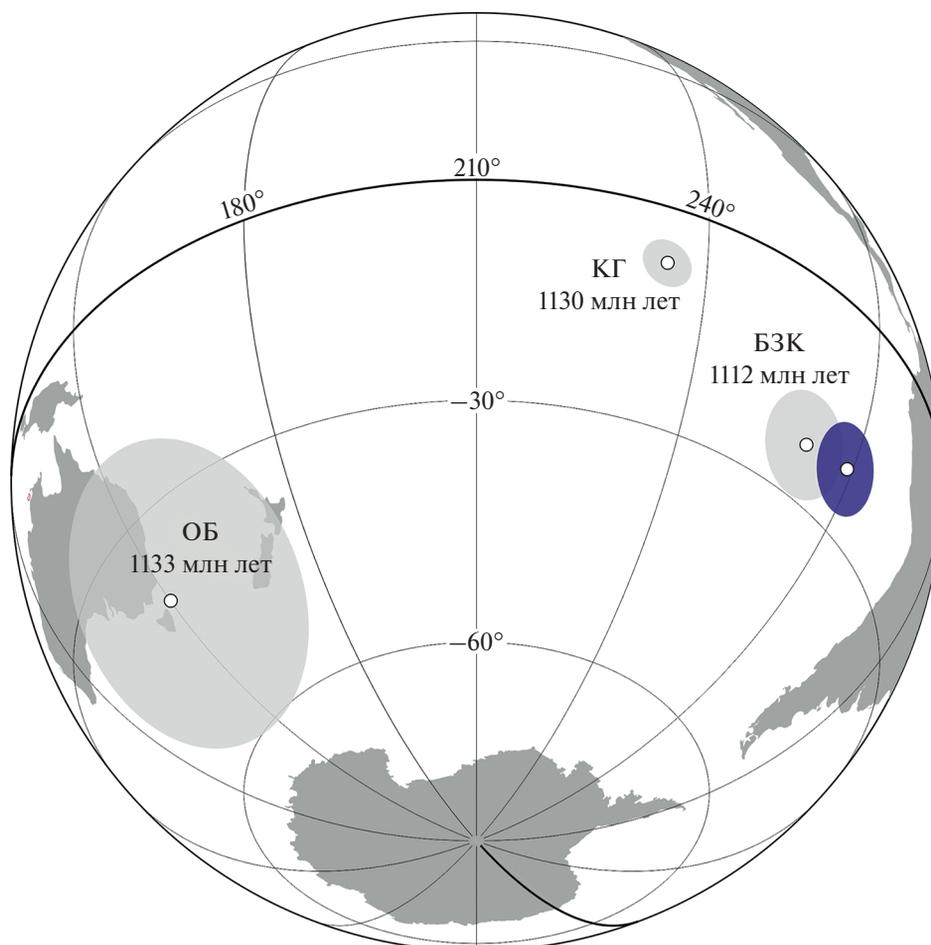


Рис. 7. Сравнение полученного палеомагнитного полюса с имеющимися докембрийскими палеомагнитными определениями Восточной Антарктиды.

Показан (фиолетовый цвет) полученный палеомагнитный полюс.

Сокращения: ОБ – оазис Бангера, по [30], КГ – кратон Грюнехогна, по [26], БЗК – блок Земли Котса, по [20].

определенный возраст пород, качественная магнитная чистка, структурный контроль и отсутствие сходства с более молодыми полюсами), у нас добавляется еще 3 балла – за достаточную статистику, наличие двух полярностей и положительный полевой тест (тест контакта).

Мы имеем возможность сравнить этот полюс с двумя единственно надежными докембрийскими полюсами Восточной Антарктиды (рис. 7), т.к. они получены по примерно одновозрастным породам других тектонических блоков, слагающих фундамент Восточной Антарктиды. В пределах доверительного интервала ($A95 = 5.8^\circ$) наш палеомагнитный полюс совпал с полюсом, полученным по кислым вулканитам Земли Котса (1112 ± 4 млн лет, U–Pb TIMS данные по циркону [20]), если использовать для сравнения другую опцию полярности, как было сделано в [30]. Расхождение между полюсами, согласно тесту [32], – незначимое ($\gamma/\gamma_c = 8.1/12.7$), но с учетом коррекции смещения по модели [17] – значимое ($7.4^\circ \pm 6.4^\circ$). Это расхождение можно объяснить различным

возрастом пород оазиса Бангера и Земли Котса, – породы близковозрастные, но с учетом ошибок определения возраста их может разделять минимум 9 млн лет.

Согласно [3], совпадение одновременных палеомагнитных полюсов двух блоков, которые принадлежат в настоящее время одной литосферной плите, означает, что весь данный интервал, от возраста палеомагнитного полюса по настоящее время, они не двигались относительно друг друга, возможны только незначительные вращения в пределах доверительных интервалов полюсов. Существует также вероятность совпадения полюса вращения двух блоков с палеомагнитным полюсом. Оба блока в таком случае могли разойтись и сойтись в той же конфигурации на сколь угодно большой угол, т.е. можно предположить более поздние процессы раскрытия и закрытия океанов между двумя блоками, но совпадение палеомагнитного полюса с полюсом вращения считается маловероятным событием [3]. Таким образом, начиная с 1112 млн лет назад блок Земли Кот-

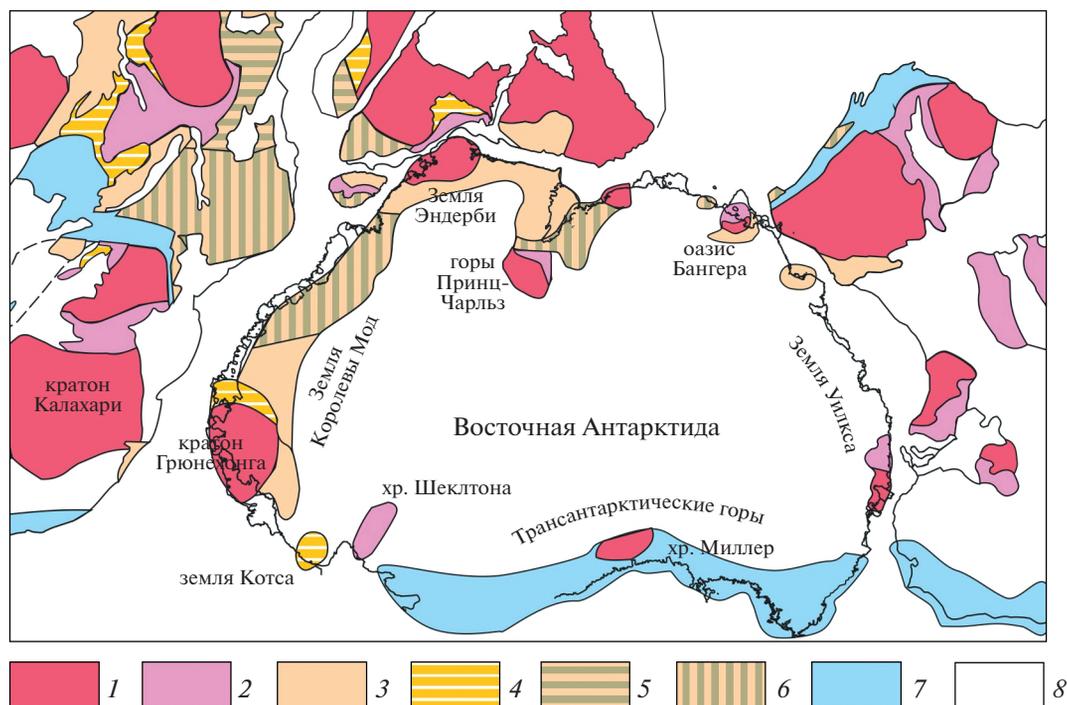


Рис. 8. Тектоническая схема Восточной Антарктиды и сопредельных материков, наложенная на палеореко­н­струкцию Гондваны, с расположением областей неопротерозойского растяжения и неопротерозойско–кембрийского коллизионного метаморфизма (по [5], с изменениями и дополнениями).

1 – архей; 2 – палеопротерозой; 3–4 – мезопротерозойские комплексы; 3 – метаморфические, 4 – супра­к­ру­стальные; 5 – области неопротерозойского растяжения (630–550 млн лет); 6 – области неопротерозойско–кембрийского коллизионного метаморфизма (580–500 млн лет); 7 – поздний палеозой–ранний мезозой; 8 – поздний мезозой и кайнозой

са и кратон Моусон, вероятнее всего, составляли единый континентальный массив. Определения палеомагнитных полюсов в пределах доверительного интервала допускают только незначительные относительные вращения – раскрытие и закрытие узких неопротерозойских океанов в пределах первых сотен километров. Раскрытие и закрытие более широких океанов, с учетом случайного совпадения палеомагнитного полюса и полюса вращения, является маловероятным событием.

Оба определения – наше определение по оазису Бангера и определение по Земле Котса, по [20], отличаются от полюса [26], полученного по базитам кратона Грюнехогна с возрастом ~1130 млн лет, но достаточно близки к нему. Мы не выявили жесткую тектоническую связь в позднем мезопротерозое между агломератом Моусон–Земля Котса и кратоном Грюнехогна, но, используя подходы [3, 17], можем оценить по разновозрастным палеомагнитным полюсам возможные взаимные вращения, вероятно связанные с раскрытием и закрытием неопротерозойского океанического бассейна между этими тектоническими блоками. Их широтное расхождение не превышало несколько сотен километров ($6.6^\circ \pm 5.0^\circ$), вращение составило 35° ($35.2^\circ \pm 4.9^\circ$).

Наличие всего трех надежных палеомагнитных полюсов, полученных по примерно разновозрастным породам трех различных докембрийских блоков Восточной Антарктиды, позволяет протестировать имеющиеся палеотектонические реконструкции, выполненные на геологической основе.

На рубеже мезопротерозоя и неопротерозоя антарктические блоки, совместно со многими другими континентальными блоками, формировали единый суперконтинент Родиния [29]. В неопротерозое суперконтинент Родиния подвергся рифтогенезу и распался на несколько крупных палеоконтинентов. Предполагается, что в это время между Моусоном и кратоном Грюнехогна был заложен океанический бассейн, размер которого к концу неопротерозоя мог достигать ширины 3000 км, по [35]. В позднем неопротерозое–кембрии произошло закрытие этого палеоокеана, а также других океанических бассейнов, что привело к формированию суперконтинента Гондвана в результате двух главных коллизионно–аккреционных событий [11, 34]) (рис. 8):

- Восточноафриканской орогении (650–550 млн лет);
- Куунгской орогении (580–520 млн лет).

При этом Восточноафриканская орогения отражает коллизию палеоконтинентов Индия и Северная Африка, эти процессы коррелируются с одновозрастной тектономагматической деятельностью на Земле Королевы Мод в Восточной Антарктиде, — эти области объединяются в единый Восточноафрикано-Антарктический ороген, образовавшийся в процессе закрытия Мозамбикского океана [25]. Среди немногочисленных геологических формаций океанической природы, относимых к этому орогену, являются офиолиты хребта Шеклтон [46], обрамляющие блок берега Котса с юга (см. рис. 1). Проявления надсубдукционного магматизма, указывающие на длительное существование активной окраины, здесь не обнаружены, что, вероятно, свидетельствует о незначительной ширине закрывшегося океана. Вместе с тем, принадлежность офиолитов хребта Шеклтон к Мозамбикскому океану, принимаемая многими исследователями как данность [4, 24], не является доказанной.

Однако рассматривается альтернативное предположение формирования Гондваны в результате коллизии на куунгском этапе палеоконтинента Конго—Индия—Эндерби и палеоконтинента Калахари—мезопротерозойский Восточно-Антарктический кратон—Австралия, что отражено геологическими комплексами и структурами, например пояса Замбези в Африке и провинции Хайланд на Шри Ланке [11, 34]. В этом случае офиолиты хребта Шеклтона могут представлять собой дериваты океанического бассейна, закрывшегося в процессе неопротерозойско—кембрийского росско—деламерийского орогенеза на противоположной окраине палеоконтинента Калахари—мезопротерозойский Восточно-Антарктический кратон—Австралия со стороны Протопацифики (см. рис. 8). Полученные нами данные в большей степени соответствуют этой модели становления Гондваны. Очевидно, что раскрытие и закрытие узкого океанического бассейна могли произойти без существенных вращений соседних блоков.

Наше исследование позволяет протестировать гипотетическое распространение поздненеопротерозойско—кембрийских орогенических процессов и соответствующих коллизионных сутур во внутриматериковых подледных пространствах Антарктиды. В частности, по особенностям строения аномального магнитного поля выделяются протяженные линейные зоны магнитных аномалий север—северо-западного простирания в районе Земли Королевы Мэри, которые рассматриваются как доказательство финальной стадии амальгамации Гондваны с закрытием океана в позднем неопротерозое—раннем палеозое [10, 15]. В таком случае предполагалось, что океан разделил внутреннюю часть мезопротерозойского Восточно-Антарктического кратона, но получен-

ные нами данные не согласуются с этим предположением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассчитанный по 24 дайкам палеомагнитный полюс

$$(Plat = -21.6^\circ \text{ Plong} = 268.9^\circ A95 = 5.8^\circ)$$

совпадает в пределах своего доверительного интервала с одним из двух надежных палеомагнитных определений по докембрию Восточной Антарктиды, сделанному по близко возрастным породам Земли Котса, и значимо отличается от второго надежного полюса Антарктиды, полученного по породам кратона Грюнехогна.

Наиболее вероятной интерпретацией имеющихся палеомагнитных данных является наличие жесткой связи между мезопротерозойским Восточно-Антарктическим кратоном и блоком Земли Котса, от 1112 млн лет и до наших дней, раскрытие и закрытие океанического бассейна между ними в неопротерозое—раннем палеозое маловероятно. Отличие палеомагнитных полюсов, полученных в оазисе Бангера и на Земле Котса, от полюса кратона Грюнехогна можно объяснить более поздним временем причленения кратона Грюнехогна к мезопротерозойскому Восточно-Антарктическому кратону.

Полученные результаты представляют новое важное ограничение для интерпретации сборки и распада Родинии с участием Восточной Антарктиды и приводят к необходимости коррекции палеогеодинамических моделей амальгамации Гондваны.

Наше палеомагнитное определение можно рассматривать в качестве ключевого для докембрия Восточной Антарктиды — оно получено по породам с надежно установленным изотопным возрастом, ясной тектонической позицией и подтверждается двумя положительными тестами палеомагнитной надежности. Полученный полюс является третьим надежным палеомагнитным полюсом Восточной Антарктиды.

Благодарности. Авторы выражают благодарность руководству 64-й Российской антарктической экспедиции, особенно М.В. Бугаеву и А.С. Курило, всему дружному полевому отряду Полярной морской геологоразведочной экспедиции (г. Санкт-Петербург, Ломоносов, Россия) во главе с Д.М. Воробьевым и С.Р. Борзенковым, напарникам по маршрутам — И.А. Абдрахманову (СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия) и В.И. Полякову (АНИИ, г. Санкт-Петербург, Россия). Участие автора статьи В.Ю. Водовозова в полевых работах было обеспечено благодаря финансовой поддержке Р. Эрнста (Карлтонский университет, г. Оттава, Канада).

Авторы искренне признательны рецензентам чл.-корр. РАН, д. г.-м. н. А.Н. Диденко (Институт тектоники и геофизики ДВО РАН, г. Хабаровск) и д. г.-м. н. А.А. Щипанскому (Геологический институт РАН, г. Москва) за комментарии, которые позволили улучшить статью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Баженов М.Л.* Палеомагнитно-тектонические исследования и история горизонтальных движений Средней Азии с пермского времени доныне. — Дис. ... д. г.-м. н. М.: ОИФЗ РАН, 2001. С. 325.
2. *Водовозов В.Ю., Лейченко Г.Л., Михальский Е.М., Егоров М.С., Гонжуров Н.А., Воробьев Д.М., Камнев И.А.* Палеомагнетизм мезопротерозойских габбро-долеритов оазиса Бангера Восточной Антарктиды: первые результаты и возможные тектонические интерпретации. — В кн.: *Фундаментальные проблемы тектоники и геодинамики.* — Мат-лы ЛП Тектонического совещания. — М.: ГЕОС, 2020. Т. 1. С. 136–141.
3. *Кокс А., Харт Р.* Тектоника плит. — М.: Мир, 1989. 427 с.
4. *Михальский Е.В.* Неопротерозойские и раннепалеозойские геологические комплексы Восточной Антарктиды: вещественный состав и происхождение // *Вестн. МГУ. Сер. 4: Геология.* 2007. № 5. С. 3–15.
5. *Михальский Е.В.* Рейнериды Восточной Антарктиды: природа и значение для реконструкции суперконтинентов докембрия. — В кн.: *Современное состояние наук о Земле.* — Мат-лы Международной конференции, посвященной памяти Виктора Ефимовича Хаина, г. Москва, 1–4 февраля 2011 г. — М.: МГУ, 2011. С. 1285–1289.
6. *Равич М.Г., Климов Л.В., Соловьев Д.С.* Докембрий Восточной Антарктиды. — М.: Недра, 1965. 469 с.
7. *Храмов А.Н., Гончаров Г.И., Комисарова Р.А. и др.* Палеомагнитология. — А.Н. Храмов (ред.). — Л.: Недра, 1982. 312 с.
8. *Шипунов С.В.* Статистика палеомагнитных данных. — М.: ГЕОС, 2000. 80 с. (Тр. ГИН РАН. Вып. 527).
9. *Шипунов С.В., Шаццло А.В., Орлов С.Ю.* Валидность палеомагнитных полюсов и принципы построения их кривых миграции (на примере Восточно-Европейской платформы) // *Физика Земли.* 2007. № 11. С. 59–65.
10. *Aitken A.R.A., Betts P.G., Young D.A., Blankenship D.D., Roberts J.L., Siegert M.J.* The Australo-Antarctic Columbia to Gondwana transition // *Gondwana Research.* 2016. Vol. 29. № 1. P. 136–152.
11. *Boger S.D.* Antarctica — Before and after Gondwana // *Gondwana Research.* 2011. Vol. 19. № 2. P. 335–371.
12. *Buchan K.L., Mertanen S., Park R.G., Pesonen L.J., Elming S.-Å., Abrahamsen N., Bylund G.* Comparing the drift of Laurentia and Baltica in the Proterozoic: The importance of key palaeomagnetic poles // *Tectonophysics.* 2000. Vol. 319. P. 167–198.
13. *Butler R.F.* Paleomagnetism: magnetic domains to geologic terranes, (Blackwell Sci. Publ., Boston, USA, 1992), 319 p.
14. *Collins A.S., Pisarevsky S.A.* Amalgamating eastern Gondwana: the evolution of the Circum-Indian Orogens // *Earth-Sci. Rev.* 2005. Vol. 71. № 3. P. 229–270.
15. *Daczko N.R., Halpin J.A., Fitzsimons I.C.W., Joanne M., Whittaker J.M.* A cryptic Gondwana-forming orogen located in Antarctica // *Sci. Reports.* 2018. Vol. 8. P. 8371. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26530-1>
16. *Dalziel I.W.D., Mosher S., Gahagan L.M.* Laurentia–Kalahari Collision and the Assembly of Rodinia // *J. Geol.* 2000. Vol. 108. № 5. P. 499–513.
17. *Debiche M.G., Watson G.S.* Confidence limits and bias correction for estimating angles between directions with applications to paleomagnetism // *J. Geophys. Res.* 1995. Vol. 100. № B12. P. 24405–24429.
18. *Enkin R.J.* A computer program package for analysis and presentation of paleomagnetic data // *Pacific Geosci. Centre, Geol. Surv. Canada.* 1994. 16 p.
19. *Fanning C.M., Dally S.J., Bennett V.C., Ménot R.P., Peucat J.J., Oliver G.J.H., Monnier O.* The Mawson Block: Once contiguous Archaean to Proterozoic crust in the East Antarctic Shield and the Gawler Craton. — In: *7th International Symposium on Antarctic Earth Sciences*, Ed. by C.A. Ricci, (Terra Antarctica Publ., Siena, Italy, 1995), Abstr.
20. *Gose W.A., Helper M.A., Connelly J.N., Hutson F., Dalziel I.W.D.* Paleomagnetic data and U–Pb isotopic age determinations from Coats Land, Antarctica: Implications for late Proterozoic plate reconstructions // *Geophys. Res., Ser. B: Solid Earth.* 1997. Vol. 102. P. 7887–7902.
21. *Grantham G.H., Macey P.H., Ingram B.A., Roberts M.P., Armstrong R.A., Hokada T., Shiraishi K., Jackson C., Bisnath A., Manhica V.* Terrane correlation between Antarctica, Mozambique and Sri Lanka; Comparison of geochronology, lithology, structure and metamorphism and possible implications for the geology of southern Africa and Antarctica // *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* 2008. Vol. 308. P. 91–119.
22. *Grikurov G.E., Leitchenkov G.L.* Tectonics of the Antarctic // *Géologues.* 2019. Vol. 201. P. 1–6.
23. *Halls H.C.* A least-square method to find a remanence direction from converging remagnetization circles // *Geophys. J. Royal Astron. Soc.* 1976. Vol. 45. P. 297–304.
24. *Jacobs J.* Neoproterozoic/Lower Paleozoic events in Dronning Maud Land // *Gondwana Research.* 1999. Vol. 2. P. 473–480.
25. *Jacobs J., Thomas R.J.* Himalayan-type indenter-escape tectonics model for the southern part of the Neoproterozoic–early Paleozoic East African–Antarctic orogen // *Geology.* 2004. Vol. 32. P. 721–724.
26. *Jones D.L., Bates M.P., Li Z.X., Corner B., Hodgkinson G.* Palaeomagnetic results from the ca. 1130 Ma Borgmassivet intrusions in the Ahlmannryggen region of Dronning Maud Land, Antarctica, and tectonic implications // *Tectonophysics.* 2003. Vol. 375. P. 247–260.
27. *Kirschvink J.L.* The Least-Square Line and Plane and the Analysis of Paleomagnetic Data // *Geophys. J. Royal Astron. Soc.* 1980. Vol. 62. № 7. P. 699–718.
28. *Leitchenkov G., Antonov A., Luneov P., Lipenkov V.* Geology and environments of subglacial Lake Vostok // *Philosoph. Trans. Royal Soc. Ser.A.* 2016. Vol. 374. Art. ID: 20140302. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0302>

29. Li Z.X., Bogdanova S.V., Collins A.S., Davidson A., De Waele B., Ernst R.E., Fitzsimons I.C.W., Fuck R.A., Gladkochub D.P., Jacobs J., Karlstrom K.E., Lu S., Natapov L.M., Pease V., Pisarevsky S.A., Thrane K., Vernikovsky V.A. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: a synthesis // *Precambrian Research*. 2008. Vol. 160. № 1. P. 179–210.
30. Liu Y., Li Z.-X., Pisarevsky S.A., Kirscher U., Mitchell R.N., Stark J.C., Clark C., Hand M. First Precambrian palaeomagnetic data from the Mawson Craton (East Antarctica) and tectonic implications // *Sci. Reports*. 2018. Vol. 8. Art. № 16403. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-34748-2>
31. Loewy S.L., Dalziel I.W.D., Pisarevsky S., Connelly J.N., Tait J., Hanson R.E., Bullen D. Coats Land crustal block, East Antarctica: A tectonic tracer for Laurentia? // *Geology*. 2011. Vol. 39. P. 859–862.
32. McFadden P.L., McElhinny M.W. Classification of reversal test in paleomagnetism // *Geophys. J. Int.* 1990. Vol. 103. P. 725–729.
33. McFadden P.L., McElhinny M.W. The combined analysis of remagnetization and direct observation in paleomagnetism // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1988. Vol. 87. P. 161–172.
34. Meert J.G. A synopsis of events related to the assembly of eastern Gondwana // *Tectonophysics*. 2003. Vol. 362. P. 1–40.
35. Merdith A.S., Collins A.S., Williams S.E., Pisarevsky S., Foden J.D., Archibald D.B., Blades M.L., Alessio B.L., Armistead S., Plavsa D., Clark C., Muller R.D. A Full-Plate Global Reconstruction of the Neoproterozoic // *Gondwana Research*. 2017. Vol. 50. P. 84–134.
36. Park J.K., Tanczyk E.I., Desbarats A. Magma fabric and its significance in the 1400 Ma Mealy diabase dykes of Labrador, Canada // *J. Geophys. Res.* 1988. Vol. 93. № B11. P. 13689–13704.
37. Payne J.L., Hand M., Barovich K.M., Reid A., Evans D.A.D., Correlations and reconstruction models for the 2500–1500 Ma evolution of the Mawson Continent // *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* 2009. Vol. 323. P. 319–355.
38. Pisarevsky S.A., Wingate M.T., Powell C.M., Johnson S., Evans D.A. Models of Rodinia assembly and fragmentation // *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* 2003. Vol. 206. № 1. P. 35–55.
39. Raposo M.I.B., Ernesto M. Anisotropy of magnetic susceptibility in the Ponta Grossa dyke swarm (Brazil) and its relationship with magma flow direction // *Phys. Earth and Planet. Interiors*. 1995. Vol. 87. P. 183–196.
40. Rogers J.J.W., Santosh M. Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic Supercontinent // *Gondwana Research*. 2002. Vol. 5. P. 5–22.
41. Ruppel A., Jacobs J., Eagles G., Läufer A., Jokat W. New geophysical data from a key region in East Antarctica: Estimates for the spatial extent of the Tonian Oceanic Arc Super Terrane (TOAST) // *Gondwana Research*. 2018. Vol. 59. P. 97–107.
42. Sheraton J.W., Black L.P., McCulloch M.T., Oliver R.L. Age and origin of a compositionally varied mafic dyke swarm in the Bunger Hills, East Antarctica // *Chem. Geol.* 1990. Vol. 85. P. 215–246.
43. Sheraton J.W., Tingey R.J., Black L.P., Oliver R.L. Geology of the Bunger Hills area, Antarctica: implications for Gondwana correlations // *Antarctic Sci.* 1993. Vol. 5. № 1. P. 85–102.
44. Sheraton J.W., Tingey R.J., Oliver R.L., Black L.P. Geology of the Bunger Hills–Denman Glacier region, East Antarctica / Australian Geol. Surv. Organisation. 1995. BMR Bull. 244.
45. Stark J.C., Wang X.-C., Li Z.-X., Rasmussen B., Shepard S., Zi J.-W., Clark C., Hand M., Li W.-X. In situ U/Pb geochronology and geochemistry of a 1.13 Ga mafic dyke suite at Bunger Hills, East Antarctica: The end of the Albany–Fraser Orogeny // *Precambrian Research*. 2018. Vol. 310. P. 76–92.
46. Talarico F., Kleinschmidt G., Henjes-Kunst F. An ophiolitic complex in the northern Shackleton Range, Antarctica // *Terra Antarctica*. 1999. Vol. 6. P. 293–315.
47. Tarling D.H., Hrouda F. The magnetic anisotropy of rocks, (Chapman & Hall, London, GB, 1993), 217 p.
48. Tauxe L. Essentials of paleomagnetism, (Univ. California Press, Berkeley, USA, 2010), 512 p.
49. Torsvik T.H., Smethurst M.A. Plate Tectonic modeling: Virtual Reality with GMAP // *Comput. Geosci.* 1999. № 25. P. 395–402.
50. Torsvik T.H., Smethurst M.A., Meert J.G., Van der Voo R., McKerrow W.S., Brasier M.D., Sturt B.A., Walderhaug H.J. Continental break-up and collision in the Neoproterozoic and Palaeozoic – a tale of Baltica and Laurentia // *Earth-Sci. Rev.* 1996. Vol. 40. № 3. P. 229–258.
51. Tucker N.M., Payne J.L., Clark C., Hand M., Taylor R.J.M., Kylander-Clark A.R.C., Martin L. Proterozoic reworking of Archean (Yilgarn) basement in the Bunger Hills, East Antarctica // *Precambrian Research*. 2017. Vol. 298. P. 16–38.
52. Tucker N.M., Hand M., Kelsey D.E., Taylor R., Clark C., Payne J.L. A tripartite approach to unearthing the duration of high temperature conditions versus peak metamorphism: An example from the Bunger Hills, East Antarctica // *Precambrian Research*. 2018. Vol. 314. P. 194–220.
53. Tucker N.M., Hand M., Clark C. The Bunger Hills: 60 years of geological and geophysical research // *Antarctic Science*. 2020. Vol. 32. № 2. P. 85–106.
54. Van der Voo R. The reliability of paleomagnetic data // *Tectonophysics*. 1990. Vol. 184. P. 1–9.
55. Veevers J.J. Reconstructions before rifting and drifting reveal the geological connections between Antarctica and its conjugates in Gondwanaland // *Earth-Sci. Rev.* 2012. Vol. 111. P. 249–318.
56. Zhao G.C., Cawood P.A., Wilde S.A., Sun M. Review of global 2.1–1.8 Ga orogens: Implications for a pre-Rodinia supercontinent // *Earth-Sci. Reviews*. 2002. Vol. 59. P. 125–162.
57. Zijdeveld J.D.A. “A.C. demagnetization of rocks: Analysis of results,” In: *Methods in paleomagnetism*, Ed. by D.W. Collinson, K.M. Creer, S. Runkorn, (Amsterdam: Elsevier, 1967), P. 254–286.
58. IGRF 12th, http://geomag.bgs.ac.uk/data_service/models_compass/igrf_calc.html (Accessed date November 24, 2020).
59. Anisoft 4.2, <https://www.agico.com/text/software/anisoft/anisoft.php> (Accessed November 24, 2020).
60. Magnetics Information Consortium, <https://www2.earthref.org/MagIC/search> (Accessed November 24, 2020).

Paleomagnetism of the Mesoproterozoic Gabbro-Dolerite Dykes from the Banger Hills (East Antarctica): The Key Paleomagnetic Pole and Tectonic Implications

V. Yu. Vodovozov^{a, b, *}, G. L. Leitchenkov^{c, d}, M. S. Egorov^e, N. A. Gonzhurov^e, E. V. Mikhalsky^c

^a*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, bld. 1 Leninskiye Gory, 119991 Moscow, Russia*

^b*Geological Institute Russian Academy of Sciences, bld. 7 Pyzhevsky per., 119017 Moscow, Russia*

^c*VNII Okeangeologia, bld. 1 Angliiskii pr., 190121 St. Petersburg, Russia*

^d*Saint-Petersburg State University – Institute of Earth Sciences, bld. 7–9 Universitetskaya Emb., 199034 St. Petersburg, Russia*

^e*Polar Marine Geosurvey Expedition, bld. 24 Pobedy str., 198412 Lomonosov – St. Petersburg, Russia*

*e-mail: vodo7474@yandex.ru

We present paleomagnetic data acquired on 276 samples from 24 the Mesoproterozoic (ca 1132 Ma) post-kinematic gabbro-dolerite dykes in the Banger Hills (Queen Mary Land, East Antarctica). In a stereogramme mean directions of high-temperature components of natural remanent magnetization from the dyke samples plot in two antipodal clusters, reversal test is positive. The primary nature of the obtained components is also confirmed by a positive contact test between dyke and stock-like metagabbro intrusion “Paz Cove” (ca 1170 Ma). The obtained paleomagnetic pole (Plat = -21.6° Plong = 268.9° A95 = 5.8° N = 24) coincides with a pole which has been earlier determined for roughly co-eval volcanic rocks from the Coats Land (ca 1112 Ma) and is close enough to the pole obtained for mafic rocks in the Grunehogna Craton in western Dronning Maud Land (ca 1130 Ma). Our paleomagnetic data argue against a widely accepted notion that the Coats Land block (terrane) and the East Antarctic Craton were separated during the Mesoproterozoic–Neoproterozoic by a vast oceanic basin. Our data enable more reasonable paleotectonic reconstructions of Rodinia and especially the position and behave of its East Antarctic segments by the end of the Mesoproterozoic and also point out to possible corrections of the published Rodinia break-up and Godwana amalgamation models during the Neoproterozoic and early Paleozoic. A paleomagnetic pole obtained in this study is only the third reliable one for the Precambrian of East Antarctica.

Keywords: East Antarctica, Mawson craton, paleomagnetism, key paleomagnetic pole, the Mesoproterozoic, mafic dyke swarm, gabbro-dolerites, paleotectonic reconstructions, supercontinent Rodinia