

УДК 550.384

СВОЙСТВА ТИТАНОМАГНЕТИТА ПИЛЛОУ-БАЗАЛЬТА КРАСНОГО МОРЯ НА РАЗЛИЧНОМ РАССТОЯНИИ ОТ ЗАКАЛЕННОЙ КОРКИ

© 2023 г. А. Н. Целебровский¹*, В. И. Максимочкин¹**, А. А. Татаринцев¹,
Ю. А. Алехина¹, Р. А. Грачев¹

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва, Россия

*E-mail: tselebr@physics.msu.ru

**E-mail: maxvi@physics.msu.ru

Поступила в редакцию 28.04.2022 г.

После доработки 30.06.2022 г.

Принята к публикации 04.07.2022 г.

Изучены магнитные свойства и минералогия титаномагнетита в пиллоу-базальте Красного моря голоценового возраста на различном расстоянии от поверхности контакта с водой. Выявлено, что состав титаномагнетита в пиллоу-базальте меняется от корки в глубь подушки: содержание титана в титаномагнетите растет, а магния и алюминия — уменьшается. Титаномагнетит в поверхностном слое пиллоу-базальта (0–2 см) однофазно окислен, максимальная степень окисления 0.13, а на расстоянии более 3 см от корки имеет стехиометрический состав. По росту магнитной восприимчивости от 0.2 до 1.8×10^{-2} СИ, намагниченности насыщения от 0.026 до $0.895 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{кг}$ и остаточной намагниченности насыщения от 0.014 до $0.296 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{кг}$, уменьшению коэрцитивности (H_c от 90 до 15 мТл, H_{cr} от 153 до 20 мТл), а также наблюдениями электронной и магнитно-силовой микроскопии показано, что при удалении от корки растет концентрация титаномагнетита в базальте и размер зерен от однодоменного состояния до псевдооднодоменного. Установлено, что магнитная жесткость зерен титаномагнетита коррелирует с максимальной скоростью охлаждения базальта. NRM базальта с удалением от поверхности контакта с водой изменяется немонотонно: до глубины примерно 3 см выявлен ее рост, обусловленный ростом концентрации титаномагнетита, далее уменьшение, обусловленное уменьшением магнитной жесткости зерен. Несмотря на довольно сильную вариацию магнитных свойств в слое 0 – 7 см пиллоу-базальта, эксперименты по методике Телье–Коэ по всем слоям показали близкие величины палеонапряженности геомагнитного поля (62.5 – 66.0 мкТл) при высоком коэффициенте качества (11 – 45). Закономерности в величине палеонапряженности при удалении от поверхности подушки не выявлено.

Ключевые слова: палеомагнетизм, базальты, Красное море, титаномагнетит.

DOI: 10.31857/S0002333723010088, **EDN:** CVCUTY

1. ВВЕДЕНИЕ

Для получения информации о строении магнитоактивного слоя океанской коры и интерпретации линейных магнитных аномалий в океане используются образцы базальтов, добытые со дна океана либо драгированием, либо подводными аппаратами [Шрейдер и др., 1982]. В большинстве случаев это базальты подушечных лав. Поступая в воду, базальтовый расплав сразу облекается стекловатой оболочкой из-за быстрого охлаждения водой, образуя на поверхности потока наросты (подушки). Лава продолжает течь под этой коркой [Богданов и др., 1983]. Подушки вытянуты по направлению течения и в совокупности могут составлять протяженные трубообразные потоки. Скорость охлаждения различных частей в потоке может существенно отличаться. Это оказывает влияние на кристаллизацию титаномагнетита,

ответственного за магнитные свойства и остаточную намагниченность таких базальтов. Из-за большой скорости охлаждения в базальте поверхностной части подушки образуются зерна титаномагнетита малых размеров, близких к однодоменным. Известно [Thellier, Thellier, 1959], что изверженные породы, содержащие однодоменные магнитные зерна, более предпочтительны для определения палеонапряженности геомагнитного поля. Внутренние части подушки остывают медленнее и поэтому будут содержать зерна титаномагнетита больших размеров, чем поверхностные, и, возможно, псевдооднодоменной или даже многодоменной структуры. На таких зернах принципы Телье могут не выполняться [Шашканов, Металлова 1972; Levi, 1977; Большаков, Щербакова, 1979] и палеопредопределения могут да-

вать ложную информацию о древнем геомагнитном поле.

Другим фактором, который может оказывать влияние на надежность определения палеонапряженности геомагнитного поля по океаническим базальтам, является окисление титаномагнетита, носителя остаточной намагниченности [Gee, Kent, 2007; Максимочкин, Целебровский, 2015; Грибов и др., 2018]. Известно [Bleil, Petersen, 1983; Johnson, Pariso, 1993; Gee, Kent, 2007], что в условиях дна океана вследствие однофазного окисления титаномагнетита первичная термоостаточная намагниченность базальтов со временем уменьшается. Логично предположить, что титаномагнетит поверхностных частей подушки может быть подвержен однофазному окислению в большей степени, чем внутренних частей. Однофазное окисление титаномагнетита также может быть причиной получения ложных данных о древнем магнитном поле по естественной остаточной намагниченности океанических базальтов. Можно предположить, что титаномагнетит частей подушки, расположенных ближе к поверхности контакта с водой, будет окисляться более интенсивно, чем внутренних частей, и более предпочтительными объектами для проведения палеомагнитных исследований могут быть последние.

Вопрос использования различных частей пиллоу-базальта для получения более надежных данных о величине и направлении древнего магнитного поля остается открытым.

В связи с этим в данной работе исследованы структура и состав титаномагнетита и магнитные свойства базальта из частей подушечной лавы на различном расстоянии от зоны контакта с водой с целью оценки палеомагнитной информативности естественной остаточной намагниченности.

2. ОБРАЗЦЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследования проведены на куске пиллоу-базальта П70/3, отобранном из рифтовой зоны Красного моря с помощью подводного управляемого аппарата “Пайсис” во время 30-го рейса НИС “Академик Курчатов” в 1980 г. с базальтового ложа голоценового возраста [Богданов и др., 1983], координаты отбора $17^{\circ}56.10'$ с.ш. и $40^{\circ}05.64'$ в.д. Образец $6 \times 6 \times 7$ см, содержащий корку, т.е. зону заалки первичного расплава, был любезно предоставлен нам старшим научным сотрудником ИО РАН А.А. Шрейдером [Шрейдер и др., 1982].

Для решения поставленной задачи кусок пиллоу-базальта был распилен на 7 слоев толщиной 1 см (рис. 1), параллельных границе контакта с водой. Для удобства слоям по мере удаления от

корки присвоены буквенные обозначения на латинице от “А” до “G”. Из каждого слоя изготовлены образцы кубической формы с ребром 1 см. На образцах-дублях из каждого слоя измерялись начальная магнитная восприимчивость каппаметром ИМБО-М и остаточная намагниченность (NRM) на ротационном магнитометре JR-6 фирмы AGICO, а также проводилось размагничивание NRM переменным магнитным полем на приборе LDA-3A той же фирмы. На кубиках с размером ребра 4–5 мм, вырезанных из этих дублей, измерены гистерезисные характеристики на вибрационном магнитометре VSM фирмы LakeShore cryotronics 7407, в полях интенсивностью до 1.6 Тл. Исследование рудных минералов проводилось на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Carl Zeiss Ultra 55, где при помощи полупроводникового детектора отраженных электронов регистрировалось изображение в композиционном контрасте. Перед исследованием в СЭМ аншлиф образца покрывался тонким слоем золота толщиной ~ 10 нм. Наличие такой пленки не оказывает существенного влияния как на первичный пучок электронов, так и на сигнал отраженных электронов, но позволяет эффективно удалять заряд с поверхности.

На этом же СЭМ, оборудованном энергодисперсионным спектрометром рентгеновского излучения Oxford Instrument INCA X-act, проведен количественный рентгеновский микроанализ рудных минералов. Энергия первичного пучка выбиралась так, чтобы возбуждать характеристические линии необходимых элементов, но при этом, чтобы область взаимодействия электронного пучка не выходила существенно за исследуемое зерно.

Магнитная структура зерен титаномагнетита изучена с помощью магнитосилового микроскопа SOLVER PRO (NT-MDT) с максимальной областью сканирования до 80 мкм. При этом использовались кантиливеры MFM01. Магнитосиловая микроскопия проводилась на подготовленных аншлифах базальта. Сканируемые площадки аншлифов размерами 5×10 мм были ориентированы перпендикулярно плоскости слоев.

Термомагнитный анализ проведен по температурной зависимости магнитного момента в поле $B = 0.24$ Тл, полученной при нагревах образца в среде воздуха на вибрационном магнитометре и по температурной зависимости восприимчивости при нагревах в среде аргона и воздуха, полученной с помощью MFK1-A фирмы AGICO. Температура Кюри определена по линейной аппроксимации зависимости $M^2 = f(T)$ по методике Белова–Аррота [Белов, 1958] и по минимуму производной магнитной восприимчивости от температуры.



Рис. 1. Общий вид и предварительно распиленный на 7 слоев кусок пиллоу-базальта П70-3.

Палеонапряженность геомагнитного поля определялась по методике Телье в модификации Коэ [Сое, 1978]. Двойные нагревы проводились в сконструированной нами двухкамерной немагнитной печи, позволяющей исследовать одновременно 4 кубических образца с размером ребра 1 см [Максимочкин и др., 2020]. Для исключения окисления титаномагнетита в экспериментах по методике Телье–Коэ [Щербаков, 2020] нагревы проводились в среде аргона.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

3.1. NRM и магнитная восприимчивость

Установлено, что магнитная восприимчивость (k) базальта монотонно растет с 0.250×10^{-2} до 1.185×10^{-2} ед. СИ с удалением от корки во всем исследованном интервале 5–65 мм (рис. 2а). При этом величина естественной остаточной намагниченности меняется немонотонно: на расстоянии 20–30 мм наблюдается ее максимум (рис. 2б). Параметр Кенигсбергера (Q_n) [Koenigsberger, 1938] уменьшается с 260 для слоя А до 60 в слое G (рис. 2в). Было обнаружено, что по мере удаления от корки изменяется направление NRM: уменьшается угол между NRM и плоскостью контакта с водой (рис. 2г). К сожалению, исследованный нами кусок пиллоу-базальта не был ориентирован, поэтому направление NRM относительно географической системы координат не определялось. Для ориентированных образцов в экваториальных широтах ошибка в определении направления NRM в полученные нами 12° может дать разброс в положении палеополюса в тысячи километров.

Также выявлено, что стабильность NRM к воздействию температуры и переменного магнитного поля растет с приближением к поверхности подушки (рис. 3а, 3б). Поле половинного размагничивания увеличивается с 13 мТл для слоя G до

36 мТл для слоя В (рис. 3а). При этом для слоя А (0–1 см от поверхности) значение поля половинного размагничивания оказалось больше 100 мТл, т.е. выше максимального поля размагничивающей установки LDA. Температура половинного размагничивания естественной намагниченности в циклах Телье растет с 225 до 340°C (рис. 3б). По результатам размагничивания переменным магнитным полем NRM всех слоев однокомпонентна (рис. 3в, 3г).

3.2. Гистерезисные характеристики

Гистерезисные характеристики представлены на рис. 4а, 4б и в табл. 1. Выявлено, что намагниченность насыщения (M_s) и остаточная намагниченность насыщения (M_{rs}) базальта растут с удалением от поверхности вглубь подушки (рис. 4а). Основные изменения наблюдаются до глубины 2 см, далее M_{rs} практически не изменяется, а M_s продолжает медленно расти. Коэрцитивная (H_c) и остаточно-коэрцитивная (H_{cr}) силы уменьшаются с удалением от корки по закону, близкому к гиперболическому (рис. 4б). По критерию Дея–Данлопа [Day et al., 1977; Dunlop, 2002] ферромагнитные зерна базальта на расстоянии менее 2 см от поверхности находятся в однодоменном состоянии (рис. 4в). Для слоя А соотношения гистерезисных характеристик базальта сильно отклоняются от критерия Дея. Это можно объяснить вкладом в магнитные свойства базальта суперпарамагнитных зерен. Завышенное значение отношения $M_{rs}/M_s > 0.5$ для слоев 5–15 мм может быть связано с тем, что в поле 1.6 Тл не достигается магнитное насыщение [Fabian, 2006]. На расстоянии более 20–25 мм от поверхности вклад в магнитные свойства базальта вносят псевдооднодоменные зерна.

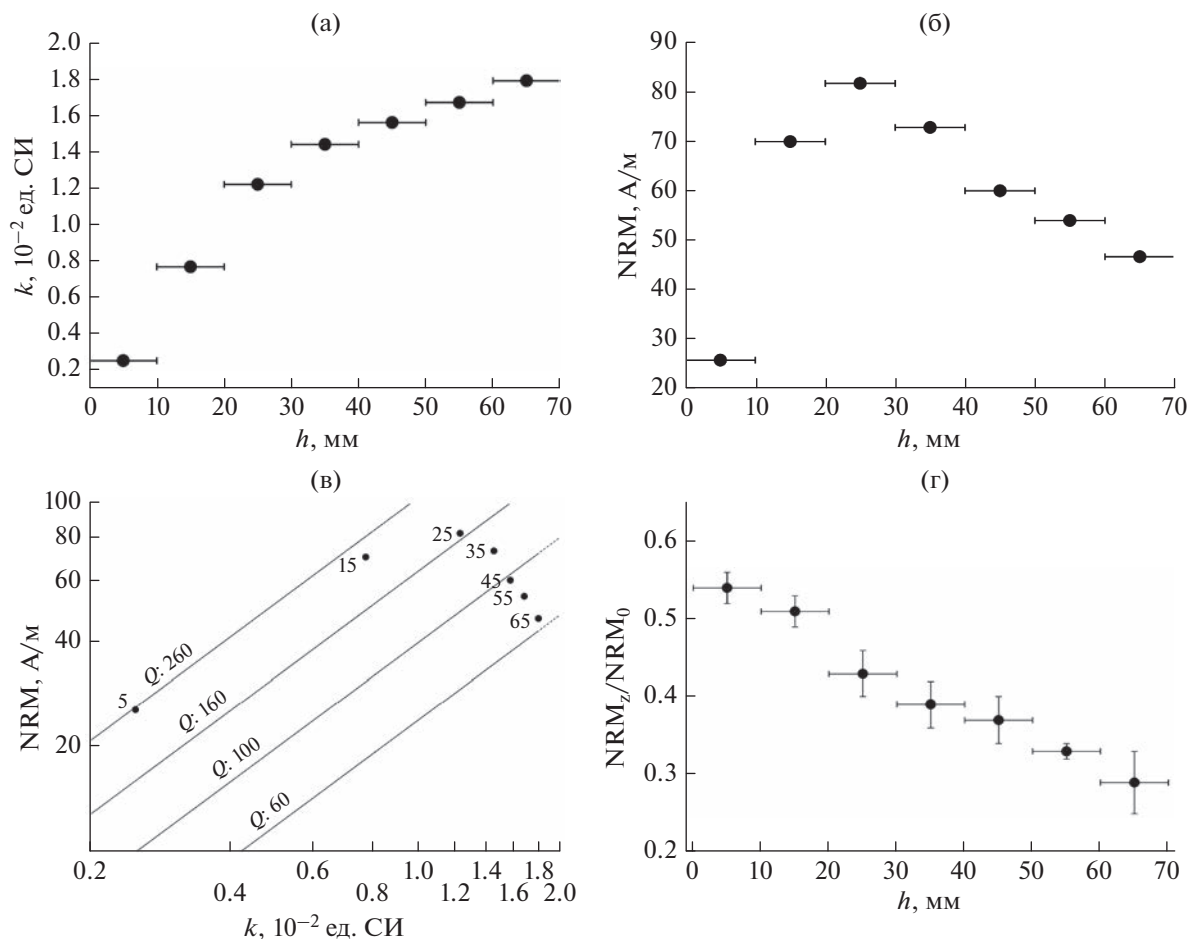


Рис. 2. Естественные магнитные характеристики базальта на различном расстоянии (h) от поверхности контакта с водой в подушечной лаве: (а) — магнитная восприимчивость; (б) — естественная остаточная намагниченность; (в) — параметр Кенигсбергера $Q_n = NRM/(kH_f)$, где $H_f = 40$ А/м; цифры около точек — расстояние центра образца от поверхности контакта с водой в мм; (г) — тангенс наклона NRM в системе координат образца. NRM_0 — параллельная плоскости контакта с водой составляющая намагниченности; NRM_z — перпендикулярная составляющая.

Гистерезисные характеристики, полученные нами, находятся в согласии с данными, полученными в работе [Zhou et al., 2000] на молодом пиллоу-базальте, отобранном с хребта Хуан-де-Фука (западное побережье США).

3.3. Терромагнитный анализ

Результаты терромагнитного анализа показаны на рис. 5 и табл. 2. Значения температуры Кюри (T_c), определенные по магнитной восприимчивости (рис. 5а) и по намагниченности в поле 0.24 Тл (рис. 5б), оказались довольно близки друг к другу. Установлено, что при удалении от поверхности контакта с водой на 4–5 см температура Кюри базальта в подушке уменьшается с 320 до 220°C, и далее до 6–7 см практически не изменяется (рис. 5г).

Для проб с глубины менее 3 см обнаружено небольшое уменьшение температуры Кюри после

нагрева образцов до 600°C в среде аргона. Наибольшая разница $\Delta T_c = 30^\circ\text{C}$ наблюдалась для слоя А. Как было показано в работах [Максимочкин и др., 2020; Максимочкин, Целебровский, 2019; Maksimochkin, Tselebrovskiy, 2017], уменьшение T_c обусловлено гомогенизацией окисленного *in situ* титаномагнетита. Дополнительные эксперименты, проведенные на исследованной коллекции, подтвердили вывод, сделанный в отмеченных выше работах. Показано, что однократные нагревы в воздухе до 400°C приводят к росту температуры Кюри с сохранением однофазного состояния (рис. 5в, кривые 1, 2). Например, для слоя В T_c выросла с 280 до 307°C, слоя F — с 225 до 241°C (рис. 5б). Последующая выдержка в аргоне при температуре 600°C в течение 40 минут приводит к почти полному восстановлению окисленного в лаборатории титаномагнетита (рис. 5в, кривые 3, 4). Так, T_c слоя В пони-

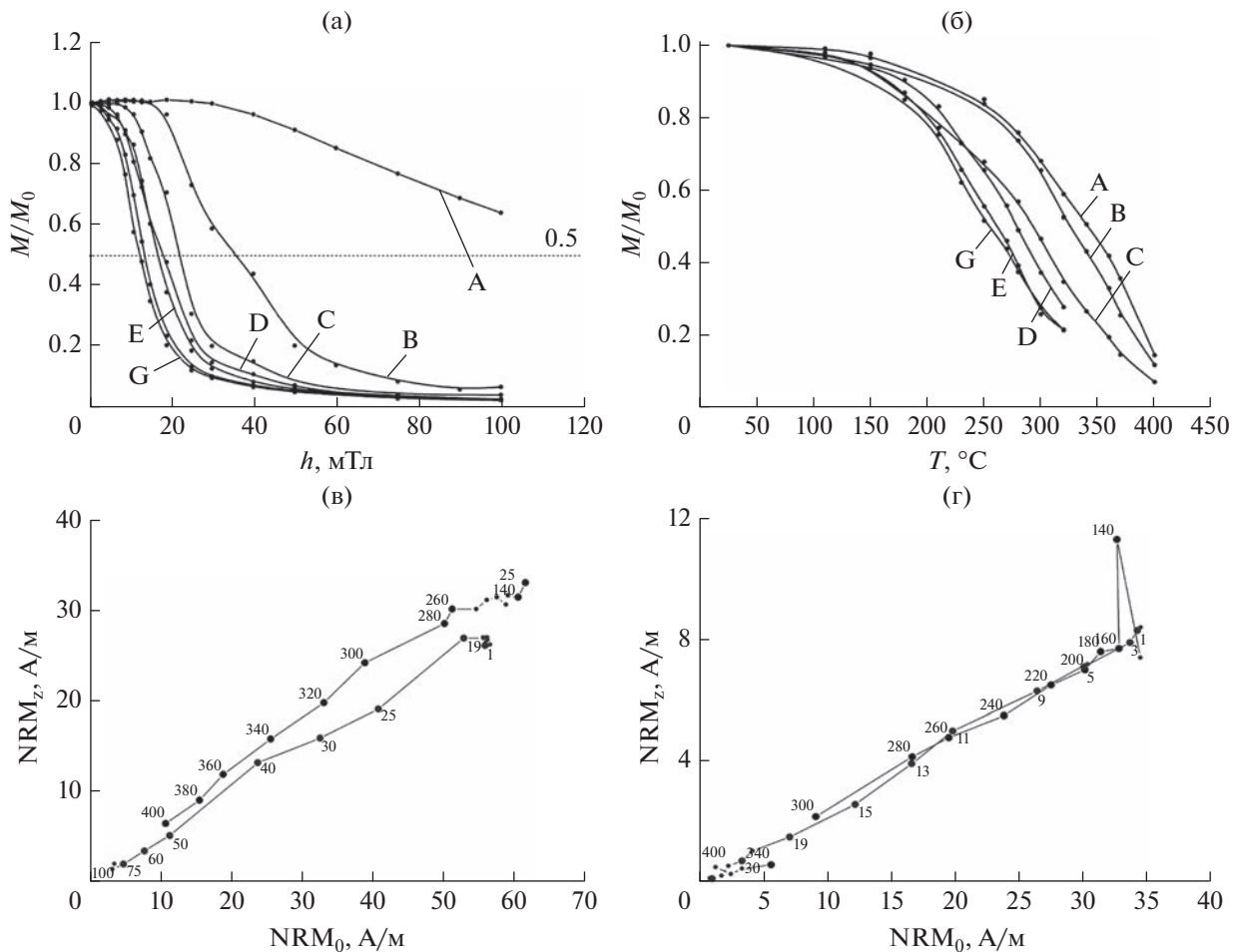


Рис. 3. Результаты размагничивания переменным магнитным полем (а) и температурой (б) NRM различных слоев подушки; (в) и (г) — диаграммы Зийдервиляда по результатам магнитной и термочистки для слоев В и G соответственно. Красные точки — магнитная чистка, а черные — термочистка. NRM_0 — параллельная плоскости контакта с водой составляющая намагниченности, NRM_z — перпендикулярная составляющая.

лась до 269°C , т.е. практически до исходного состояния (рис. 5в).

T_c базальта слоев Е–Г при нагреве образцов в среде аргона не изменяется. Можно заключить, что титаномагнетит базальта на расстоянии более 4 см от поверхности контакта с водой не окислен и находится в стехиометрическом состоянии.

Из рис. 5г также видно, что даже после гомогенизации T_c поверхностных слоев остается выше, чем T_c слоев, удаленных на расстояния более 4 см от поверхности контакта. Это свидетельствует о том, что состав титаномагнетита базальта изменяется с удалением от зоны контакта.

3.4. Электронная и магнитосиловая микроскопия

Электронно-зондовый анализ показал, что магнитные свойства исследованного пиллоу-базальта П70/3 обусловлены титаномагнетитом. Выявлено увеличение содержания ульвошпинели

в титаномагнетите при удалении от границы контакта с водой (табл. 3, рис. 6). При расчете миналов ульвошпинели и магнетита учитывались другие шпинельные соединения (MgAl_2O_4 , MgFe_2O_4 , Mg_2TiO_4 , FeAl_2O_4). В поле сканирования кристаллов титаномагнетита в отдельных точках также фиксировались С, Na, К, Mn, Si, S, Ca, Cu, Cl, V. Так как размер зерен, на которых определялся элементный состав, достаточно мал (несколько микрон), результаты расчета концентрации миналов помимо прямой погрешности могут иметь искажения, связанные с содержащимся в матрице железом. Однако определение элементного состава матрицы показало, что ее влиянием на определение состава титаномагнетита можно пренебречь, так как содержание титана и железа в ней не превышало 2%.

Температура Кюри, рассчитанная по концентрации элементов в титаномагнетите по Латтард [Lattard et al., 2006] и по Ричардсу [Richards et al.,

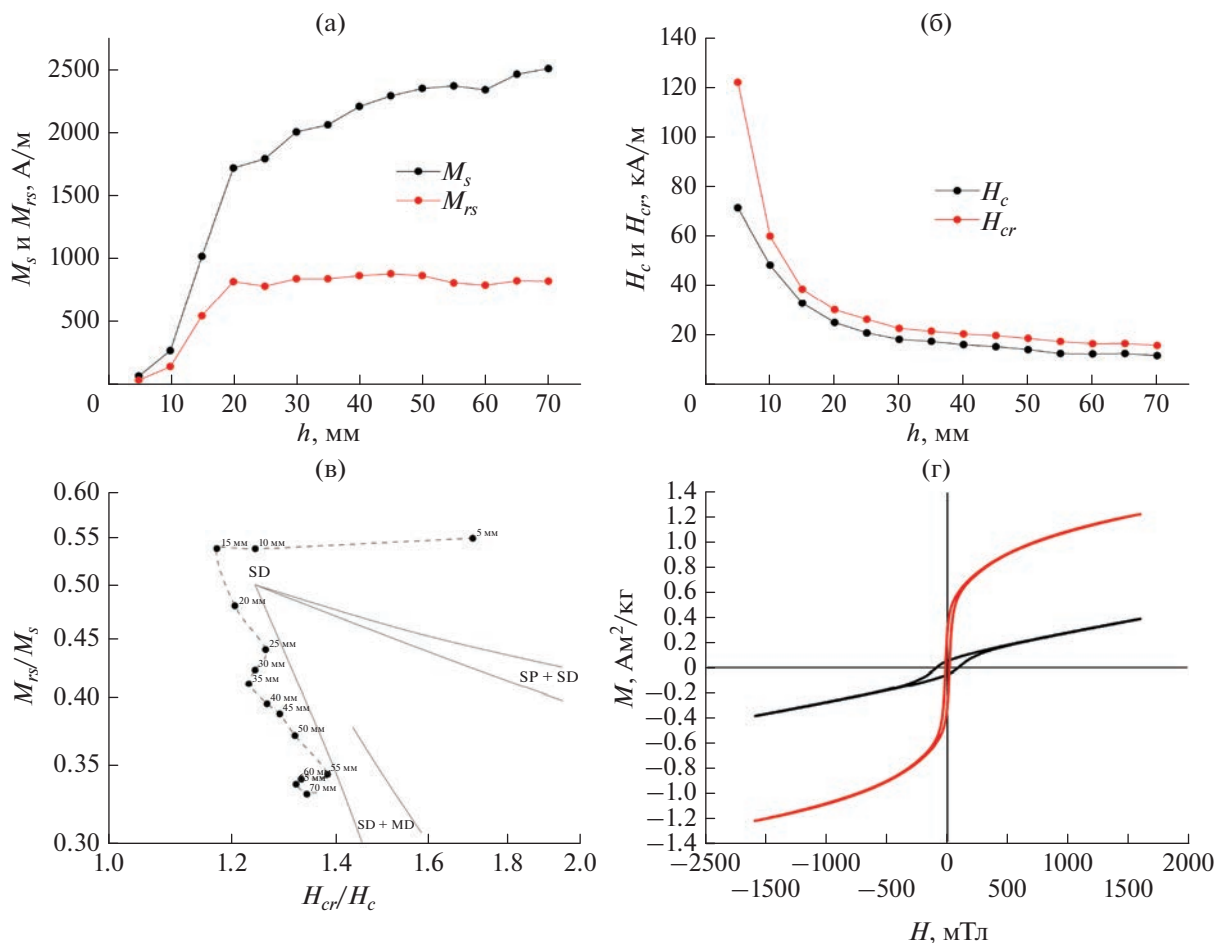


Рис. 4. Гистерезисные характеристики образца П70/3 базальта подушечной лавы на различном расстоянии от поверхности (h): (а) — намагниченность насыщения (M_s) и остаточная намагниченность насыщения (M_{rs}); (б) — коэрцитивная (H_c) и остаточно-коэрцитивная (H_{cr}) силы; (в) — диаграмма Дея–Данлопа (цифры около точек — расстояние от корки до нижней границы слоя); (г) — пример петли гистерезиса для слоя 5–10 мм (черная линия) и 60–65 мм (красная линия).

1973], для исследованных слоев пиллоу-базальта П70/3 представлена на рис. 7.

В большинстве случаев измеренная температура Кюри находится между значениями, рассчитанными по двум методам. Только для слоя А измеренная T_c базальта оказалась близка к расчетной по Ричардсу, т.е. при учете примесей магния и алюминия.

Разброс расчетной температуры Кюри, оцененной двумя методами, можно объяснить малой статистикой определения элементного состава кристаллов титаномагнетита.

Атомносиловая и магнитосиловая микроскопии показали, что при приближении к корке размер и видимая концентрация магнитных частиц уменьшаются (рис. 8, рис. 9).

На расстоянии 0–1 см от корки (слой А) титаномагнетит представлен в виде однодоменных частиц, в том числе, образующих цепочки. Для

слоя В (1–2 см) магнитосиловая микроскопия показывает наличие магнитных частиц размерами не более 2–3 мкм. Для слоев глубже 2 см видимые магнитные частицы образуют крестообразные и дендритные структуры (рис. 9) довольно больших размеров, вплоть до 15–20 мкм в длину; во внешнем поле порядка 70 мТл отдельные части дендрита ведут себя как одно-, двух- или трехдоменные образования.

3.5. Палеонапряженность геомагнитного поля по различным частям подушечной лавы

На образцах, вырезанных из разных слоев, проведено определение палеонапряженности геомагнитного поля методом Телье–Коэ. Хотя температура Кюри исследованных образцов, определенная по $k(T)$ и $M(T)$, не превышала 320°C, размагничивание NRM показало, что намагниченность в основном разрушается при на-

Таблица 1. Гистерезисные характеристики базальта 70/3

h , см	M_s , $A \cdot m^2/kg$	M_{rs} , $A \cdot$ m^2/kg	H_c , мТл	H_{cr} , мТл
0.0–0.5	0.026	0.014	90	153
0.5–1.0	0.098	0.053	61	76
1.0–1.5	0.366	0.197	42	49
1.5–2.0	0.614	0.295	32	38
2.0–2.5	0.640	0.282	27	34
2.5–3.0	0.716	0.303	23	29
3.0–3.5	0.736	0.303	22	27
3.5–4.0	0.788	0.312	21	26
4.0–4.5	0.818	0.317	20	25
4.5–5.0	0.839	0.312	18	24
5.0–5.5	0.846	0.291	16	22
5.5–6.0	0.835	0.285	16	21
6.0–6.5	0.879	0.297	16	21
6.5–7.0	0.895	0.296	15	20

греве до 400–450°C. Термомагнитный анализ показал, что нагревы образцов в воздухе до 400°C приводят к однофазному окислению титаномagnetита независимо от степени его окисления *in situ*. Для минимизации минералогических изменений в циклах Телье нагревы производились в среде аргона. В работе [Maksimochkin, Tselebrovskiy, 2017] на подводных базальтах было показано, что проведение экспериментов Телье в среде аргона позволяет получать более качественные результаты.

Терморазмагничивание NRM, образование парциальной термоостаточной намагниченности и диаграммы Арай–Нагаты [Nagata et al., 1963], полученные в экспериментах по методике Телье–Коэ, показаны на рис. 10а–10г. Расчетные значения палеонапряженности приведены в табл. 4. По принятым в настоящее время критериям качества [Сое, 1978] результаты всех определений палеонапряженности можно считать надежными, ко-

эффициент качества для всех определений $q > 10$. Из табл. 4 также видно что разброс палеонапряженности, определенной по различным частям подушки на расстояниях 0–7 см от поверхности контакта с водой, не превышает 3%. Какой-либо закономерности по результатам семи определений не выявлено. Среднее значение палеонапряженности, равно 63.9 ± 1.8 мкТл. Эта величина на 60% больше современного магнитного поля в месте отбора исследованного образца пиллоу-базальта П70/3. Высокие значения палеонапряженности были получены нами ранее и на других образцах из рифтовой зоны Красного моря [Максимочкин, Целебровский, 2015; 2019].

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Как отмечено выше, формирование пиллоу-базальта происходит при подводном излиянии лавы. Расплав, контактирующий с водой, охлаждается очень быстро. Скорость охлаждения базальта поверхностных и внутренних частей потока может существенно отличаться.

Исследования пиллоу-базальта Красного моря П70/3 позволили установить закономерности изменения магнитоминералогических свойств титаномagnetита носителя остаточной намагниченности и магнитных характеристик базальта в глубь подушки и получить новые данные о надежности определения направления и величины древнего магнитного поля по пиллоу-базальтам.

Гистерезисные характеристики, электронная и магнитосиловая микроскопии показали, что ближе к корке на расстояниях 0–1.5 см формируются зерна титаномagnetита очень малых размеров, однодоменные и даже суперпарамагнитные ($M_{rs}/M_s = 0.54$, $H_c = 42–90$ мТл). Магнитосиловая микроскопия также показала, что зерна находятся в однодоменном состоянии. При удалении от корки в глубь подушки размеры зерен титаномagnetита увеличиваются, формируется дендритная структура, часть зерен переходят в псевдооднодо-

Таблица 2. Температура Кюри T_c для различных слоев пиллоу-базальта 70/3

h , см	T_c , °C (по $k(T)$ в среде аргона)		T_c , °C (по $M(T)$ в поле 0.24 Тл в воздухе)	
	нагрев	охлаждение	нагрев	охлаждение
0–1 (А)	320	290	316	—
1–2 (В)	290	270	280	307
2–3 (С)	260	250	252	273
3–4 (D)	240	230	234	249
4–5 (Е)	217	215	221	240
5–6 (F)	225	220	225	241
6–7 (G)	212	214	215	231

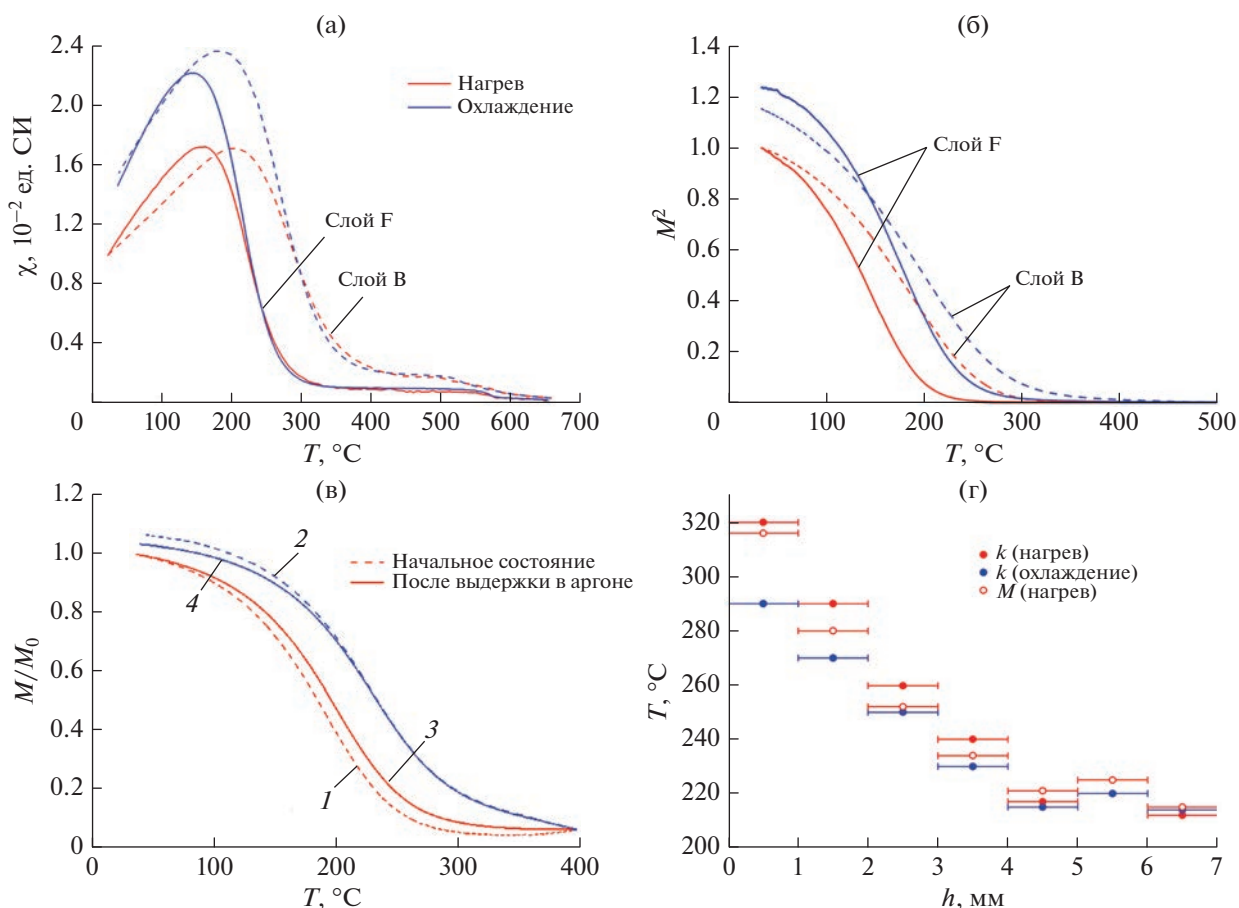


Рис. 5. Примеры терромагнитных кривых восприимчивости (а), намагниченности в поле 0.24 Тл (б), (в) и температура Кюри (г) базальтовых проб, отобранных на различном расстоянии от поверхности. Красные кривые – нагрев, синие – охлаждение.

менное состояние. Отношение M_{rs}/M_s уменьшается до 0.33, а коэрцитивная сила уменьшается до 15–16 мТл. Состав титаномагнетита также изменяется. Для корки характерна низкая концентрация титана (1.2%) и повышенное содержание магния (18%) в титаномагнетите. При удалении от корки на 1.5 см концентрация магния падает практически до 0. Концентрация алюминия на первых 2 см падает с 25 до 5% и далее существенно не меняется, а титана, наоборот, растет с 1.2 до 13%. Этим объясняется уменьшение T_c базальта с 290°C до 215°C при удалении от зоны закалки. В основном, изменение состава титаномагнетита и температуры Кюри происходят в первых 3 см от внешнего края, далее состав (стабилизируется) остается практически неизменным. Усредненная концентрация ульвошпинели глубже 2.5 см составляет 39%, магнетита 46%, магний и алюминий, содержащих шпинельные миналы, – 15%.

Уменьшение коэрцитивной силы при удалении от зоны контакта с водой можно объяснить увеличением размера зерен титаномагнетита, что

подтверждается непосредственным наблюдением зерен титаномагнетита в электронном и магнитосиловом микроскопах. Существенный рост намагниченности насыщения базальта при удалении от корки можно объяснить ростом концентрации титаномагнетита в базальте. Основной рост концентрации титаномагнетита происходит в интервале 0–2 см. Это также подтверждается данными электронной и магнитосиловой микроскопии и ростом остаточной намагниченности насыщения.

Установлено, что титаномагнетит внутренних частей исследованного образца подушечной лавы на расстоянии более 3 см от корки практически не окислен, т.е. находится в стехиометрическом состоянии. Титаномагнетит в пиллоу-базальте на расстоянии 0–3 см от корки имеет небольшую степень однофазного окисления. Максимальная степень окисления (Z), рассчитанная по зависимости $T_c(Z)$ [Nishitani, Kono, 1983], составила 0.13 ± 0.03 . Выше было показано, что палеонапряженность, определенная по различным ча-

Таблица 3. Усредненные значения концентрации миналов титаномagnetита

Глубина, мм	Ульвошпинель, %	Магнетит, %	Примеси, % *
0–5	4.0	42.0	54.5
5–10	23.3	38.5	38.0
10–15	25.5	43.0	24.0
15–20	29.8	33.0	35.0
20–25	35.0	44.5	19.0
25–30	40.3	52.0	9.0
30–35	33.7	49.5	18.0
35–40	45.0	46.5	8.0
40–45	43.7	46.0	10.0
45–50	40.7	50.5	9.0
50–55	44.3	44.0	12.0
55–60	33.8	38.5	27.0
60–65	34.0	41.0	25.0
65–70	42.3	48.5	7.5

Примечания: *Колонка “Примеси” соответствует общему вкладу шпинельных миналов, содержащих магний и алюминий.

стям пиллоу-базальта, отличается не более, чем на 3%.

Это может свидетельствовать о том, что возможно окисление произошло на стадии остывания базальта, либо небольшая степень окисления $Z < 13\%$ оказывает незначительное влияние на па-

леомагнитную информативность NRM пиллоу-базальта.

Из результатов, представленных на рис. 10 видно, что в экспериментах Телье–Коэ значительная часть намагниченности сохранялась при нагреве выше температуры Кюри образцов. Пре-

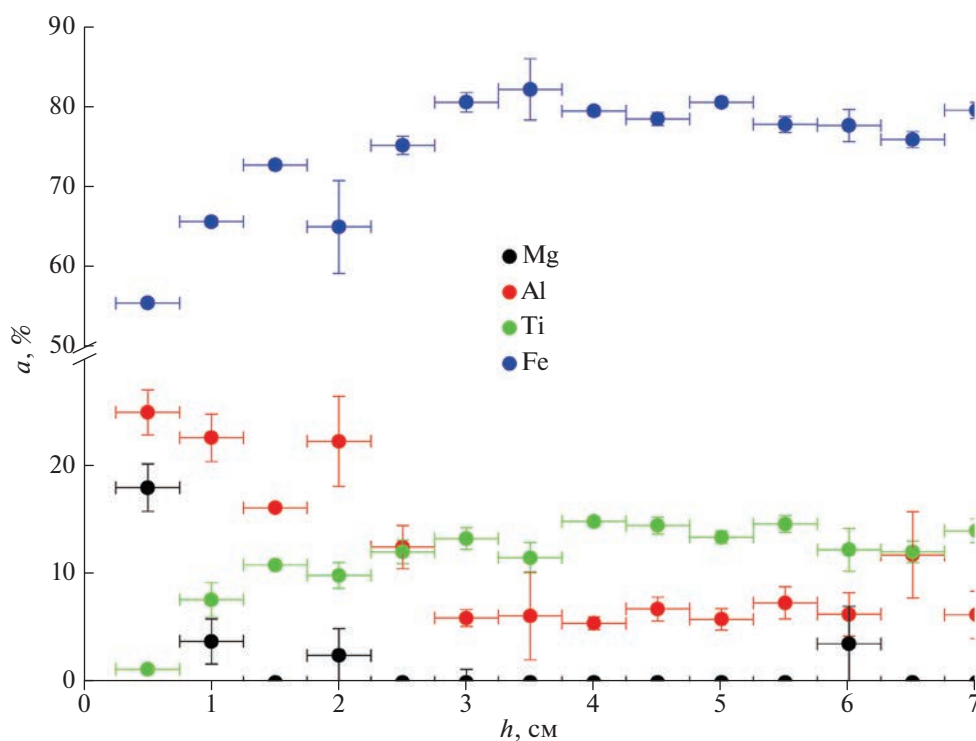


Рис. 6. Результаты элементного анализа (содержания Mg, Al, Ti, Fe) кристаллов титаномagnetита на различном расстоянии от края пиллоу-базальта П70/3.

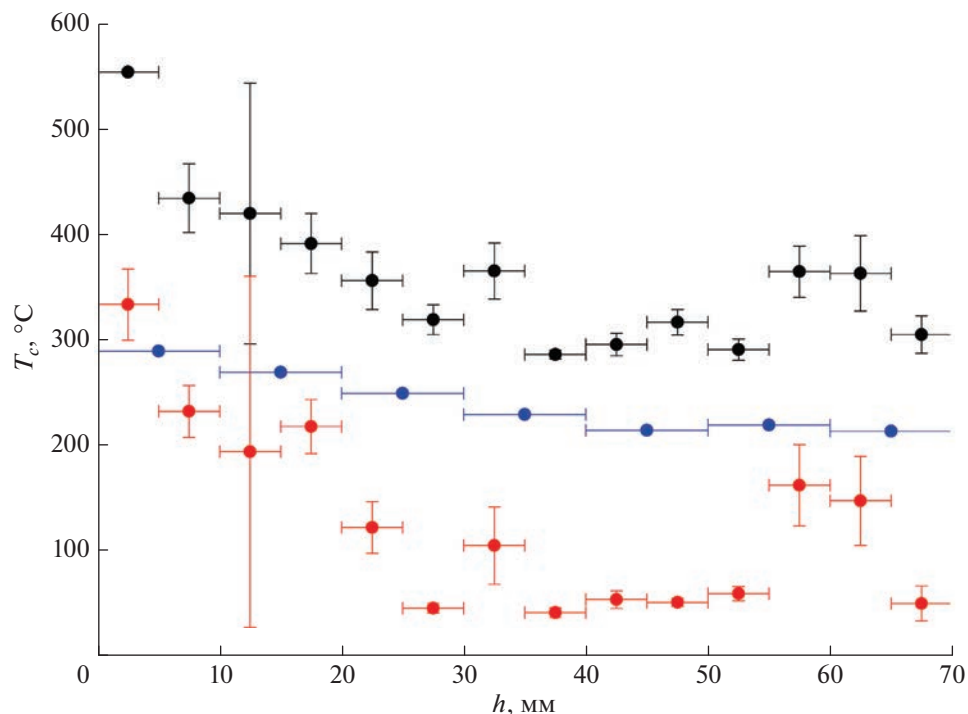


Рис. 7. Температура Кюри образцов, отобранных на различном расстоянии от поверхности в pillow-базальте: синие точки — T_c , определенная экспериментально; черные точки — T_c , рассчитанная по работе [Lattard et al., 2006], красные точки — по работе [Richards et al., 1973].

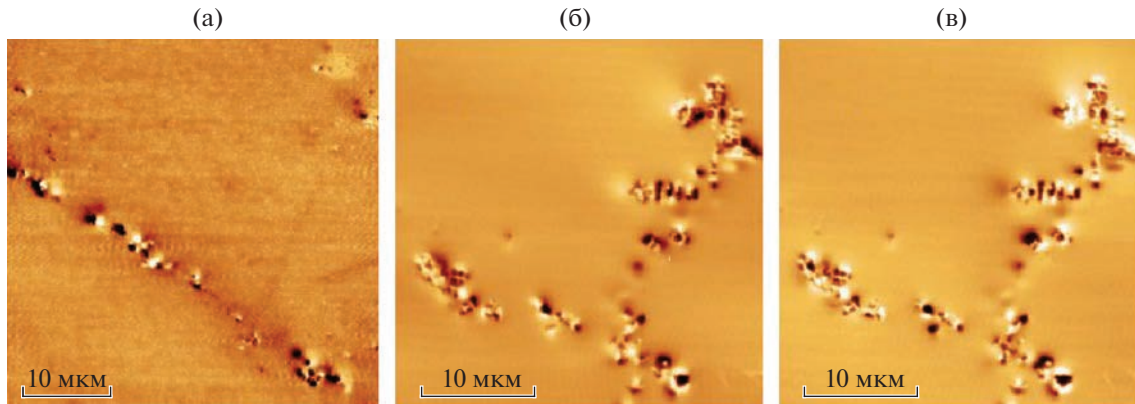


Рис. 8. Магнитосиловое изображение зерен титаномагнетита: (а) — цепочки магнитных частиц на расстоянии 5–7 мм от корки подушки; (б) и (в) — изображения магнитных частиц в базальте на расстоянии 2–3 см от корки в магнитном поле 70 мТл в плоскости сканирования ((б) — поле направлено влево, (в) — вправо)).

вышение деблокирующих температур над T_c можно объяснить следующим образом. T_c фактически есть медианное значение по ансамблю зерен в образце (50% зерен титаномагнетита имеют T_c ниже этого значения, а 50% выше). Кривые температурной зависимости намагниченности в поле 0.24 Тл “пологие”, что косвенно подтверждает факт большой дисперсии T_c по зернам. При этом наибольший вклад в остаточную намагниченность

должны вносить зерна с меньшим содержанием ульвошпинели (соответственно с большей T_c), так как они имеют большую спонтанную намагниченность. Все эти факты могут приводить к тому, что максимальная блокирующая температура окажется выше медианной T_c образца.

Формирование титаномагнетитовых зерен, их размер и состав логично связать со скоростью охлаждения базальта, которая для различных ча-

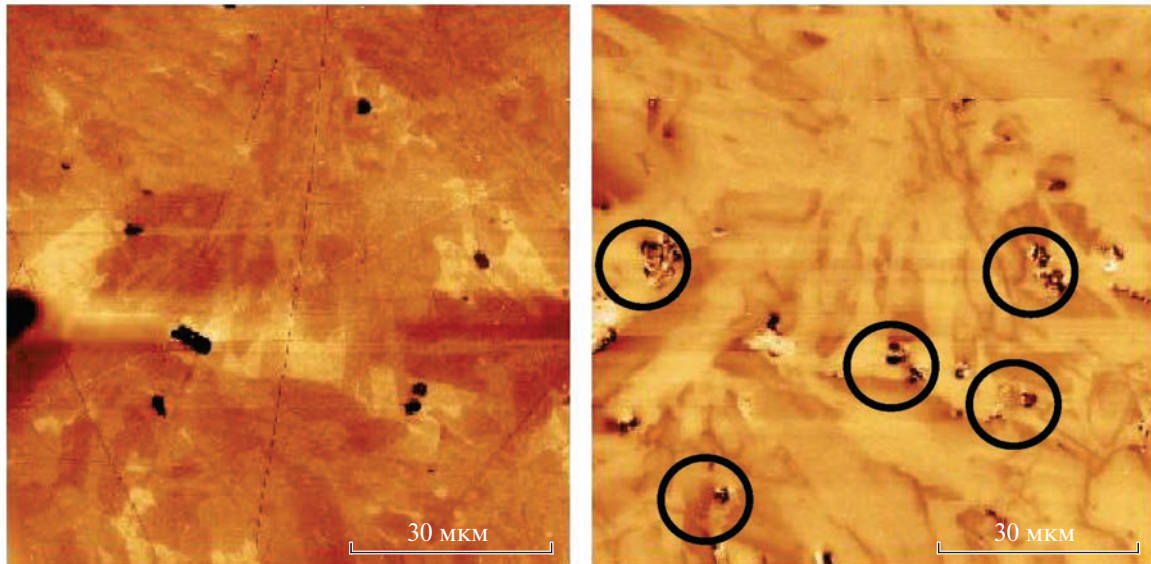


Рис. 9. Атомно-силовое (слева) и магнитно-силовое (справа) изображения аншлифа пробы базальта на расстоянии 4–5 см от корки подушки. Кругами выделены магнитные образования (кристаллы титаномagnetита).

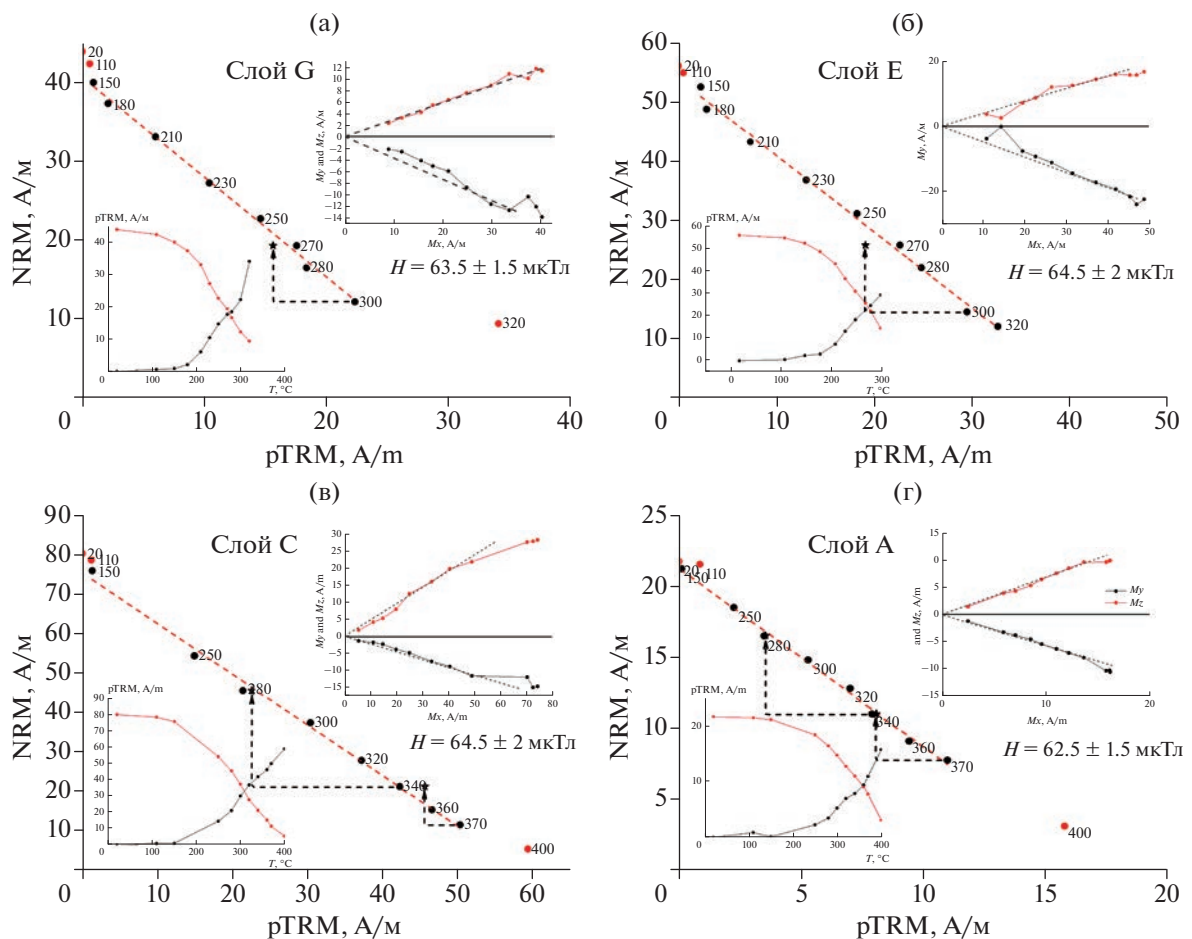


Рис. 10. Диаграммы Арай–Нагаты по результатам проведения процедур Телле–Коэ на образцах, вырезанных из куска подушечной лавы П70/3 на различном расстоянии от поверхности: (а) – (0–1) см; (б) – (2–3) см; (в) – (4–5) см; (г) – (6–7) см. На каждом рисунке также изображены кривые терморазрушения NRM и образования pTRM в циклах Телле (в левом нижнем углу), а также диаграммы Зийдервильда [Zijderveld, 1967] (в правом верхнем углу).

Таблица 4. Палеонапряженность геомагнитного поля, определенная по различным частям пиллоу-базальта П70/3

h , см	$T_1 - T_2$	g	f	b	σ	q	H , мкТл
0–1 (А)	150–370	0.85	0.62	1.25	0.03	21	62.5 ± 1.5
1–2 (В)	20–370	0.86	0.74	1.25	0.02	45	62.5 ± 1.0
2–3 (С)	150–370	0.81	0.80	1.29	0.04	23	64.5 ± 2.0
3–4 (D)	180–320	0.85	0.62	1.32	0.02	37	66.0 ± 1.0
4–5 (Е)	150–320	0.86	0.72	1.29	0.04	22	64.5 ± 2.0
5–6 (F)	150–320	0.86	0.55	1.27	0.05	11	63.5 ± 2.5
6–7 (G)	150–300	0.85	0.63	1.27	0.03	22	63.5 ± 1.5

Примечания: h – расстояние от корки; $T_1 - T_2$ – температурный интервал, по которому рассчитана палеонапряженность; g – фактор равномерности точек на диаграмме Араи–Нагаты; f – доля намагниченности, по которой рассчитана палеонапряженность; b – тангенс угла наклона линейного участка диаграммы Араи–Нагаты; σ – среднеквадратичное отклонение точек от прямой; q – обобщенный коэффициент качества [Сое, 1978].

стей подушки может существенно отличаться. По оценкам [Zhou et al., 2000], стеклянная корка охлаждается со скоростью порядка 1000 К/сек. Вероятно, эта величина соответствует максимальной скорости охлаждения. Внутренняя часть остывает со скоростью менее 0.1 К/сек. Для оценки изменения скорости охлаждения с удалением от поверхности контакта с водой нами проведена упрощенная симуляция процесса охлаждения подушечной лавы. На полупространстве задавалась граница вода–базальт. Температура на границе $T = 600$ К равна температуре кипения воды при давлении 20 МПа (давление столба воды на глубине 2 км). В качестве начальных условий температура базальта была принята равной температуре его плавления при нормальном давлении – 1600 К. Для расчета изменения температурного поля от времени использованы: коэффициент теплопроводности $\lambda = 2.5$ Вт/(м · К), удельная теплоемкость $c = 1500$ Дж/(кг · К), плотность $\rho = 2800$ кг/м³, характерные для базальтов [Roman, Arndt, 2020;

Yoder, 1976]. Использовано решение уравнения теплопроводности в виде:

$$\Delta T \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right), \quad a = \lambda/(c\rho).$$

Расчеты показали, что скорость охлаждения со временем изменяется немонотонно, поэтому для количественной оценки было взято максимальное значение скорости охлаждения каждого слоя.

Пиковые значения скорости охлаждения и времена охлаждения до температуры фазового перехода магнетита ($T_c = 850$ К) для первых 10 см от границы раздела сред показаны в табл. 5.

Согласно представленной модели, скорость охлаждения базальта на расстоянии 1 см от контакта с водой достигает 22 К/с, а время охлаждения до температуры Кюри магнетита составляет 206 с. На расстоянии 7–8 см максимальная скорость охлаждения оказалась равна значению 0.1 К/с, приведенному в статье [Zhou et al., 2000], а время охлаждения до 850 К – более 10 ч.

Высокая корреляция между модельной скоростью охлаждения и параметрами H_c и H_{cr} (табл. 6) подтверждает наше предположение, что магнитная жесткость титаномагнетита определяется величиной максимальной скорости охлаждения для данного слоя, т.е. чем выше скорость охлаждения, тем мельче зерно.

Между M_s и $V_{\max}$ также получился высокий коэффициент корреляции, но отрицательный (табл. 6). Это свидетельствует о том, что концентрация титаномагнетита в базальте обратно пропорциональна скорости охлаждения его охлаждения в интервале 0–7 см от поверхности контакта с водой.

Несмотря на довольно существенный разброс гистерезисных характеристик базальта различных частей подушки и размеров зерен титаномагнетита, а также наличие однофазного окисления, метод Телье дал достаточно близкие значения палеонапряженности, отличающиеся не более чем на 3%. Таким образом, можно констатировать, что на базальтах, содержащих однофазно окис-

Таблица 5. Максимальная скорость охлаждения базальта ($V_{\max}$) и время достижения породой температуры 850 К (t_{850}) для различных расстояний (h) от поверхности контакта с водой по результатам моделирования

h , см	t (850 К), с	$V_{\max}$, К/с
0.5	206	22.0
1.5	1854	2.45
2.5	5150	0.88
3.5	10095	0.45
4.5	16685	0.27
5.5	24924	0.18
6.5	34811	0.13
7.5	46346	0.10
8.5	59529	0.08
9.5	74359	0.06

Таблица 6. Коэффициенты корреляции между максимальной скоростью охлаждения (расчитанной по модели) и гистерезисными характеристиками

	M_s	M_{rs}	H_c	H_{cr}
$V_{\max}$	–0.93	–0.99	0.97	0.99

ленный в пределах 0–0.13 титаномagnetит в виде однодоменных зерен, а также титаномagnetит стехиометрического состава в виде псевдо-однодоменных зерен с магнитными характеристиками $M_{rs}/M_s = 0.33–0.41$ и $H_{cr}/H_c = 1.23–1.34$ можно получить надежные определения палеонапряженности методом Телье–Коэ.

Выше было показано, что направление NRM поверхностных частей пиллоу-базальта не совпадает с NRM внутренних частей. При удалении от поверхности угол между NRM и поверхностью контакта с водой увеличивается, максимальная разница составила 12° . Возможно, это связано с напряжениями, возникающими в пиллоу-базальте из-за быстрой скорости и неравномерности охлаждения. Однако этот вопрос требует дополнительных исследований. Можно лишь предположить, что более надежную информацию о направлении древнего магнитного поля несут более глубокие части пиллоу-базальта, находящиеся на расстоянии более 3–4 см от зоны закалки.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследования пиллоу-базальта подушечной лавы можно сделать следующие выводы.

1. Магнитные свойства базальта подушки определяются титаномagnetитом. Содержание титана в титаномagnetите растет с удалением от поверхности контакта с водой, а магния и алюминия – уменьшается. Титаномagnetит в поверхностном слое 0–2 см базальта П70/3 голоценового возраста подвержен однофазному окислению, на расстоянии более 3–4 см от зоны контакта с водой титаномagnetит имеет стехиометрический состав.

2. При приближении к поверхности в пиллоу-базальте уменьшается концентрация и размер зерен титаномagnetита. Размер зерен уменьшается с псевдооднодоменного состояния до однодоменного и суперпарамагнитного: магнитные свойства базальта на расстоянии более 3 см от поверхности подушки определяются псевдооднодоменными зернами титаномagnetита, в слое 10–15 мм зерна находятся в однодоменном состоянии, в зоне контакта с водой (расстояние до 5 мм) вклад в магнитные свойства вносят зерна титаномagnetита в суперпарамагнитном состоянии.

3. Магнитная жесткость титаномagnetита и его концентрация в пиллоу-базальте коррелируют с пиковой скоростью охлаждения для данного

слоя: магнитная жесткость прямо пропорциональна этой скорости, концентрация титаномagnetита – обратно пропорциональна.

4. Несмотря на довольно большую вариацию естественных (NRM, k) и гистерезисных (H_c , H_{cr} , M_{rs}/M_s) магнитных параметров базальта в подушечной лаве, величину древнего магнитного поля можно определять по различным частям подушки. Отличие значений палеонапряженности, определенных методом Телье–Коэ по частям подушки, расположенным на расстояниях 1–7 см от поверхности контакта с водой, составляет не более 3%.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 20-05-00573.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белов К.П. Ферромагнетики и антиферромагнетики вблизи точки Кюри // Успехи физических наук. 1958. Т. 65. № 2. С. 207–231.
- Богданов Ю.А. и др. Атлас подводных фотографий Красноморского рифта / А.С. Монин, В.С. Ястребов (ред.). М.: Наука. 1983. 139 с.
- Большаков А.С., Щербакова В.В. Термомангнитный критерий определения доменной структуры ферримангнетиков // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1979. № 2. С. 38–47.
- Грибов С.К., Долотов А.В., Щербаков В.П. Экспериментальное моделирование химической остаточной намагниченности и методики Телье на титаномagnetит-содержащих базальтах // Физика Земли. 2018. № 2. С. 109–128.
- Максимочкин В.И., Грачев Р.А., Целебровский А.Н. Определение поля формирования искусственной CRM и рTRM методом Телье на различных стадиях окисления природного титаномagnetита // Физика Земли. 2020. № 3. С. 134–146.
- Максимочкин В.И., Целебровский А.Н. Влияние химической намагниченности океанических базальтов на определение палеонапряженности геомагнитного поля методом Телье // Вестник Московского университета. 2015. Т. 6. С. 136–143.
- Максимочкин В.И., Целебровский А.Н. Палеонапряженность геомагнитного поля по базальтам Красного моря // Палеомагнетизм и магнетизм горных пород. Материалы XXV юбилейной Всероссийской школы-семинара по проблемам палеомагнетизма и магнетизма горных пород. Ярославль: Филигрань. 2019. С. 156–163.
- Шашканов В.А., Металлова В.В. Нарушение закона Телье для парциальных термоостаточных намагниченностей // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1972. № 3. С. 80–86.
- Шрейдер А.А. и др. Детальные геомагнитные исследования рифтовой зоны на юге Красного моря // Океанология. 1982. Т. 22. № 3. С. 439–445.
- Щербаков В.П., Грибов С.К., Афиногенова Н.А., Цельмович В.А. Однофазное окисление ферримангнитных зерен как причина L-образной формы диаграмм Араи–Нагата // Физика Земли. 2020. № 5. С. 70–80.

- Bleil U., Petersen N.* Variations in magnetization and low-temperature titanomagnetite oxidation of ocean floor basalts // *Nature*. 1983. V. 301. P. 384–388.
- Coe R.S.* Geomagnetic Paleointensities From Radiocarbon-Dated Lava Flows on Hawaii and the Question of the Pacific Nondipole Low // *J. Geophys. Res.* 1978. V. 83. № B4. P. 1740–1756.
- Day R., Fuller M., Schmidt V.A.* Hysteresis properties of titanomagnetites: grain-size and compositional dependence // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1977. V. 13. P. 260–267.
- Dunlop D.J.* Theory and application of the Day plot (M_{rs}/M_s versus H_{cr}/H_c) 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data // *J. Geophysical Research*. 2002. V. 107. № B3. P. EPM 4-1-EPM 4-22.
- Fabian K.* Approach to saturation analysis of hysteresis measurements in rock magnetism and evidence for stress dominated magnetic anisotropy in young mid-ocean ridge basalt // *Phys. Earth Planet. Inter.* 2006. V. 154. № 3–4. P. 299–307.
- Gee J.S., Kent D.V.* Source of Oceanic Magnetic Anomalies and the Geomagnetic Polarity Timescale // *Treatise on Geophysics*. 2007. V. 5. P. 455–507.
- Johnson H.P., Pariso J.E.* Variations in oceanic crustal magnetization: systematic changes in the last 160 million years // *J. Geophysical Research*. 1993. V. 98. № B1.
- Koenigsberger J.G.* Natural residual magnetism of eruptive rocks (part 1) // *Terr. Magn. Atmos. Electr.* 1938. V. 43. № 2. P. 119–130.
- Lattard D. et al.* Curie temperatures of synthetic titanomagnetites in the Fe–Ti–O system: Effects of composition, crystal chemistry, and thermomagnetic methods // *J. Geophysical Research: Solid Earth*. 2006. V. 111. № 12.
- Levi S.* The effect of magnetite particle size on paleointensity determinations of the geomagnetic field // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1977. V. 13. P. 245–259.
- Maksimochkin V.I., Tselebrovskiy A.N.* Chemical magnetization when determining Thellier paleointensity experiments in oceanic basalts. *Geophysical Research Abstracts*. 2017. V. 19. EGU2017-10613.
- Nagata T., Arai Y., Momose K.* Secular variation of the geomagnetic total force during the last 5000 years // *J. Geophys. Res.* 1963. V. 68. № 18. P. 5277–5281.
- Nishitani T., Kono M.* Curie temperature and lattice constant of oxidized titanomagnetite // *Geophysical J. Royal Astronomical Society*. 1983. V. 74. № 2. P. 585–600.
- Richards J.C.W., O'Donovan J.B., Hauptman Z., O'Reilly W., Creer K.M.* A magnetic study of titanomagnetite substituted by magnesium and aluminium // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1973. V. 7. № 4. P. 437–444.
- Roman A., Arndt N.* Differentiated Archean oceanic crust: Its thermal structure, mechanical stability and a test of the sagduction hypothesis // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2020. V. 278. P. 65–77.
- Thellier E., Thellier O.* Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique // *Ann. Géophysique*. 1959. V. 15. № 8.
- Yoder H.S.* Generation of Basaltic Magma. Washington, DC: The National Academies Press. 1976.
- Zhou W., Voo R.V., Peacor D.R., Zhang Y.* Variable Ti-content and grain size of titanomagnetite as a function of cooling rate in very young MORB // *Earth and Planetary Science Letters*. 2000. V. 179. № 1. P. 9–20.
- Zijderveld J.D.A.* A.C. demagnetization of rocks: analysis of results. *Methods in paleomagnetism* / Collinson D.W., Creer K.M., Runkorn S. (eds.). Elsevier, Amsterdam. 1967. P. 254–286.

Properties of Red Sea Pillow-Basalt Titanomagnetite at Different Distances from the Crust

A. N. Tselebrovskiy^{a, *}, V. I. Maksimochkin^{a, **}, A. A. Tatarintsev^a, Yu. A. Alekhina^a, and R. A. Grachev^a

^a*Lomonosov Moscow State University, faculty of physics, Leninskie gory 1/2, Moscow, 119991 Russia*

^{*}*e-mail: tselebr@physics.msu.ru*

^{**}*e-mail: maxvi@physics.msu.ru*

The magnetic properties and mineralogy of titanomagnetite in the Red Sea pillow-basalt at different distances from the contact surface with water were studied. It was revealed that the composition of titanomagnetite in the pillow basalt changes from the crust deep into the pillow: the titanium content in titanomagnetite increases, while the magnesium and aluminum content decreases. Titanomagnetite in the surface layer of pillow basalt (0–2 cm) is single-phase oxidized, with a maximum oxidation degree of 0.13, and at more than 3 cm from the crust has stoichiometric composition. According to the increase in magnetic susceptibility from 0.2 up to 1.8×10^{-2} SI, saturation magnetization from 0.026 to 0.895 A m²/kg and residual saturation magnetization from 0.014 to 0.296 A m²/kg, decrease in coercivity (H_c from 90 to 15 mT, H_{cr} from 153 to 20 mT), as well as by observations of electron and magnetic force microscopy, it is shown that the concentration of titanomagnetite in basalt and the grain size from single-domain state to pseudo-single-domain state increase with distance from the crust. The magnetic hardness of titanomagnetite grains was found to correlate with the maximum cooling rate of basalt. The NRM of basalt varies non-monotonically with distance from the pillow surface: up to a depth of about 3 cm its growth caused by the growth of titanomagnetite concentration was revealed, then a decrease caused by a decrease in the magnetic hardness of the grains. In spite of a rather strong variation of the magnetic properties in the 0–7 cm layer of pillow basalt, the experiments by the Thellier-Coe method for all layers showed close values of the geomagnetic field paleointensity (62.5–66.0 μT) with a high value of quality coefficient q (11–45). No regularity in the value of paleointensity with distance from the cushion surface was detected.

Keywords: paleomagnetism, basalts, Red Sea, titanomagnetite