

## Эволюция геомагнитного поля эпох Брюнес–Матуяма по базальтам Срединно–Атлантического хребта

В. И. Максимочкин<sup>1,\*</sup>, А. Н. Целебровский<sup>1,†</sup>, А. А. Шрейдер<sup>2,‡</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, кафедра физики Земли  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

<sup>2</sup>Институт океанологии имени П. П. Ширшова РАН  
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36

(Статья поступила 25.04.2016; Подписана в печать 05.05.2016)

По базальтам разного возраста северного (хребет Рейкьянес) и южного сегментов Срединно–Атлантического хребта (САХ) проведено определение палеонапряженности геомагнитного поля методом Телье–Кое. Величина виртуального дипольного магнитного момента Земли (*VADM*), рассчитанная по базальтам южного сегмента САХ, варьировалась в пределах  $(3.3–8.0) \times 10^{22}$  Ам<sup>2</sup>, по базальтам хребта Рейкьянес — в пределах  $(3.7–8.0) \times 10^{22}$  Ам<sup>2</sup>. Полученные данные *VADM* хорошо согласуются с международным банком данных изменения интенсивности геомагнитного поля за последние 1.2 млн. лет. Возраст пород определялся по модели спрединга из скорости разрастания дна и анализа аномального геомагнитного поля (АГП).

Также сделан вывод о том, что флуктуации намагниченности различных блоков магнитоактивного слоя в области рифтовой зоны САХ и особенности АГП можно объяснить изменением интенсивности геомагнитного поля со временем.

PACS: 91.25.F; 91.25.N; 91.25.nc; 91.25.Ng

УДК: 550.384; 537.624.8

Ключевые слова: палеомагнетизм, магнетизм горных пород, базальты, аномальное геомагнитное поле, метод Телье–Кое.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных источников сведений о геодинамике литосферы океана является комплексная геолого–геофизическая интерпретация данных об аномальном геомагнитном поле в районах океанических рифтовых зон с учетом информации о намагниченности пород, слагающих эти зоны.

В настоящее время геотектонические построения, основанные на геомагнитных данных, базируются на предположении о том, что источником магнитных аномалий, которые характерны для океанских рифтовых зон, являются породы магнитоактивного слоя (МАС), большая часть намагниченности которых является необратимой и сформировалась в древнем магнитном поле. При наличии спрединга и инверсий геомагнитного поля в этом случае формируется инверсионный магнитоактивный слой, который и является источником линейных магнитных аномалий. Такое аномальное поле называется палеомагнитным. Как известно [1–3], магнитное поле Земли меняется со временем вплоть до изменения направления дипольного момента (инверсии геомагнитного поля). Для палеомагнитных аномалий появляется возможность моделирования параметров их источников в коре океана и их геохронологической идентификации.

Моделирование параметров инверсионного магнито-

активного слоя (ИМАС) южного сегмента САХ в предположении, что аномальное поле в районе исследований является палеомагнитным было проведено в работе [4]. Мощность МАС бралась равной 0.5 км. Расчеты показали превышение в 2–6 раз модельной намагниченности над измеренной на образцах драгированных базальтов, что было интерпретировано авторами завышенным значением мощности МАС в модели. Однако такое несоответствие может быть связано не только с неправильной оценкой мощности МАС, но и с тем, что не все аномальное поле является палеомагнитным, т. е. часть естественной намагниченности драгированных базальтов верхней части МАС может быть вторичной. Для базальтов с высокой температурой Кюри эта вторичная намагниченность может иметь химическую природу. Следовательно, для проведения модельных расчетов недостаточно иметь информацию о величине естественной намагниченности базальтов и факторе Кенигсбергера, который в некоторой степени характеризует сохранность первичной намагниченности базальтов и палеомагнитность аномального поля. Необходимо иметь более полную информацию о природе намагниченности океанических базальтов, о вкладе первичной составляющей термоостаточной природы в полную намагниченность и об изменении величины геомагнитного поля со временем.

Согласно [1, 5] величина геомагнитного поля даже в пределах одной эпохи может отличаться в 4 раза. Неравномерное распределение естественной остаточной намагниченности ( $I_{rn}$ ) базальтов южного сегмента САХ, выявленное в работе [4] и сильный разброс  $I_{rn}$  базальтов от 10 до 45 А/м в пределах осевой аномалии хребта Рейкьянес [6] (рис. 1), вероятно также обуслов-

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

†E-mail: tselebr@physics.msu.ru

‡E-mail: aschr@ocean.ru

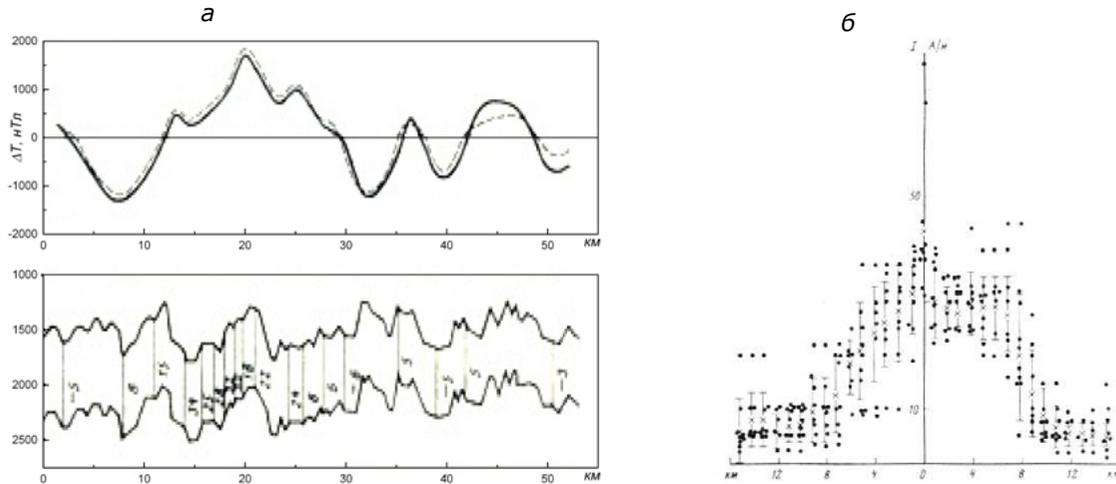


Рис. 1: Модель инверсионного магнитоактивного слоя (а) и распределение намагниченности с удалением от оси хребта Рейкьянес (б) [6]

лен этим фактором. Наличие относительно высоких значений намагниченности пород  $I_{rn} = (25 \div 30)$  А/м на удалении 6–7 км от оси хребта (до возраста коры 0,6–0,7 млн лет) и резкое уменьшение до 5–8 А/м в интервале 2–4 км (0,6–1,1 млн лет) также вероятно можно объяснить изменением величины геомагнитного поля со временем, а также его значительным уменьшением на границе смены полярности геомагнитного поля, так как такую закономерность довольно трудно объяснить развивающимся в условиях дна океана процессом однофазного окисления титаномагнетита.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для решения задачи о вариациях величины геомагнитного поля и решения вопросов формирования магнитоактивного слоя осевой зоны хребта Рейкьянес (северная часть САХ) с позиций спрединга нами была исследована палеоинформативность естественной остаточной намагниченности образцов базальтов, драгированных со дна хребта Рейкьянес в области с координатами  $58^{\circ}10' - 58^{\circ}40'$  с. ш.,  $31^{\circ}00' - 32^{\circ}20'$  з. д. и базальтов юга САХ (тройственная точка Буве), проведено определение палеонапряженности геомагнитного поля методом Телье–Кое по образцам с высокой палеоинформативностью. Палеоинформативность оценивалась по величине параметра Кенигсбергера, гистерезисным характеристикам и результатам фазового термомагнитного анализа. Параметр Кенигсбергера исследованных базальтов варьировался от 8 до 25, т. е. был достаточно высок. Было также установлено, что большая часть образцов базальтов хребта Рейкьянес обладает низкой магнитной вязкостью: выдержка образцов в отсутствие магнитного поля (в трехслойном экране из пермаллоя) в течение 0,5 года приводила к изменению величины  $I_{rn}$  на  $1 \div 8\%$  в 33 образцах, и на  $15 \div 28\%$  в 6 об-

разцах. Эксперименты по лабораторному воздействию одноосного и квазивсестороннего сжатия показали, что литостатическое давление в пределах мощности МАС равной 0,5 км оказывает незначительное влияние на  $I_{rn}$  базальтов:  $I_{rn}$  базальтов термоприроды при учете влияния давления столба воды мощностью 1,5 км и базальтов мощностью 0,5 км, может быть на 5–10% меньше образованной при нормальном давлении.

Измерения гистерезисных характеристики показали, что магнитные зерна, исследованных базальтов, достаточно мелкие, так как согласно критерию Дея [7] (табл. 1), они находятся, в основном, в псевдооднодоменном состоянии ( $PSD$ ):  $I_{rs}/I_s = (0.1 \div 0.47)$ ,  $H_{cr}/H_c = (1.34 \div 2.01)$ . Это свидетельствует о том, что естественная остаточная намагниченность таких ферримагнитных зерен обладает высокой стабильностью и может нести информацию о древнем магнитном поле. Из такой группы образцов базальтов были отобраны образцы, ферримагнитная фракция которых характеризовалась одной температурой Кюри  $T_c = (100 \div 220)$  °С, а естественная намагниченность вероятнее всего была термоостаточной природы ( $I_{rT}$ ). Также была оценена палеоинформативность  $I_{rn}$  образцов базальтов с наличием двух магнитных фаз с температурами Кюри  $T_{c1} = (105 \div 265)$  °С и  $T_{c2} = (370 \div 475)$  °С. Используя методику, описанную нами в работе [8], удалось установить, что часть  $I_{rn}$  исследованных базальтов, имеет химическую природу, т. е. является вторичной и не несет информацию о древнем магнитном поле эпохи образования базальта. Учёт этой особенности позволил выделить из  $I_{rn}$  первичную компоненту термоостаточной природы, по которой определалась величина палеонапряженности геомагнитного поля ( $H_{pl}$ ). Результаты определения  $H_{pl}$  представлены в табл. 1. На рис. 2 показаны некоторые результаты определения  $H_{pl}$ , когда естественная намагниченность состояла из двух компонент: термоостаточной и химической природы (а, б)

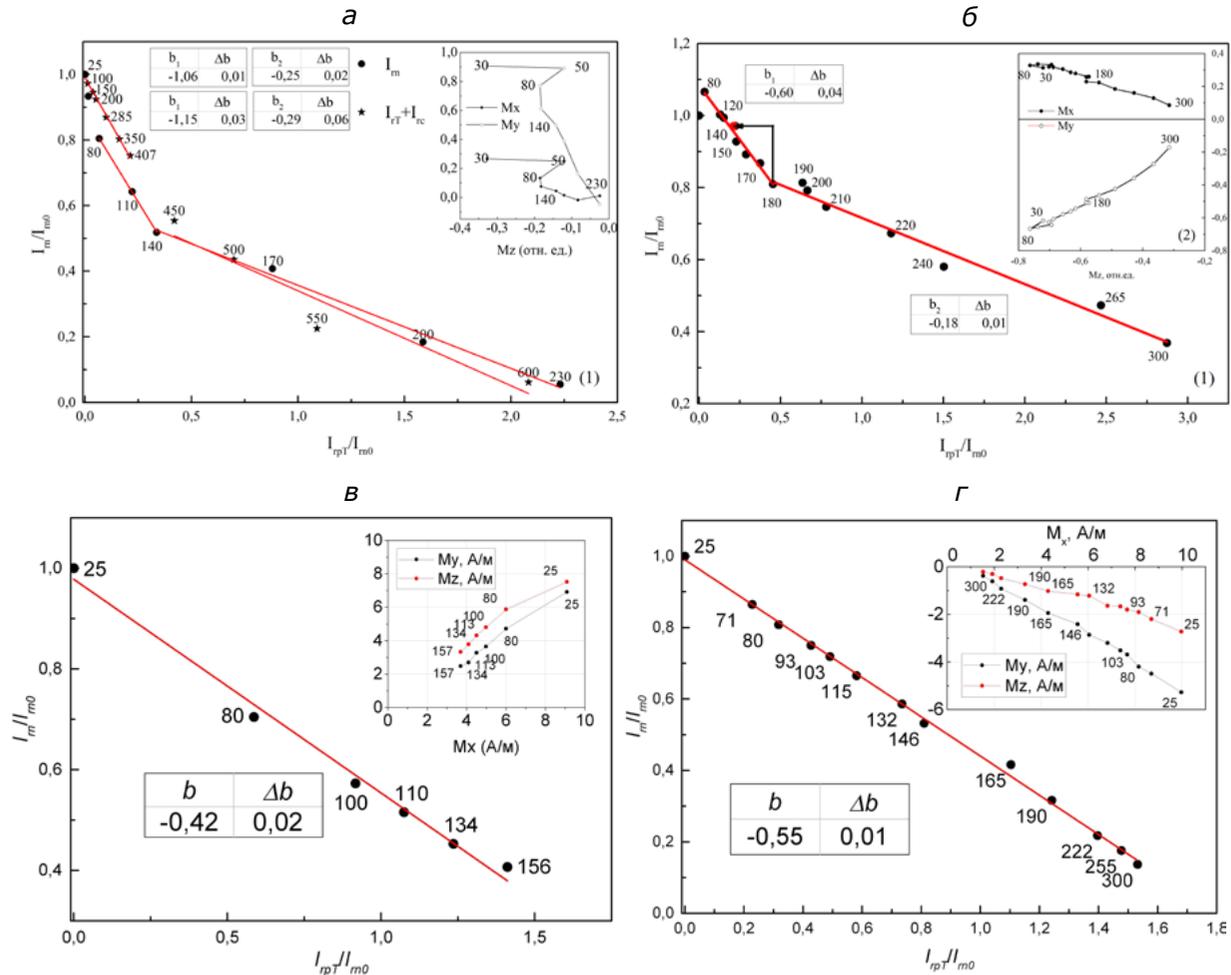


Рис. 2: Диаграммы Арай–Нагата исследования естественной  $I_m$  (а–г) и термохимической  $I_{rT} + I_{rC}$  (а) намагниченностей базальтов с использованием метода Телье–Кое. а – обр. S18-48/33, б – обр. S18-54/19 с юга САХ, в – обр. R321, г – обр. R337 с севера САХ (хребет Рейкьянес)

и из одной компоненты (в, г).

В результате было получено 9 достаточно надежных определений  $H_{pl}$  и виртуального аксиального дипольного магнитного момента Земли: 4 определения по базальтам южного сегмента САХ с известным возрастом 0.1–1 млн лет и 5 определений по базальтам хребта Рейкьянес (табл. 1). Величина интенсивности геомагнитного поля для эпохи Брюнес, определенная по базальтам хребта Рейкьянес, варьировалась в пределах  $H_{pl} = (17.5 \div 42.5) \text{ A/m}$ , по базальтам Южного сегмента САХ в пределах  $H_{pl} = (18.9 \div 52.6) \text{ A/m}$ .

$VADM = (3.3 \div 8.0) \times 10^{22} \text{ Am}^2$ , определенные по базальтам южного сегмента САХ, довольно хорошо согласуются с данными [1] изменения виртуального дипольного магнитного момента Земли за период 0–1 млн лет.  $VADM = (3.4 \div 9.6) \times 10^{22} \text{ Am}^2$ , определенные по базальтам хребта Рейкьянес, также довольно хорошо согласуются с данными [1], если оценить возраст образцов по удалению места их отбора от оси спрединга в модели инверсионного магнитоактивного слоя [6].

Рассчитанный таким образом возраст базальтов хребта Рейкьянес варьировался в пределах от 0 до 1.1 млн лет (см. табл. 1). При этом  $VADM = (8.0 \div 0.1) \times 10^{22} \text{ Am}^2$ , определенный по  $I_{rn}$  самого молодого базальта, отобранного с оси спрединга хребта Рейкьянес, оказался близок к современной величине дипольного магнитного момента Земли.  $VADM = (3.3 \div 4.5) \times 10^{22} \text{ Am}^2$ , рассчитанные по базальтам возрастом 1 млн лет, показывают низкое значение виртуального дипольного магнитного момента Земли на границе эпох смены полярности геомагнитного поля Брюнес–Матуяма.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласие данных определения  $VADM$  для южного и северного сегментов САХ с моделью PISO-1500 [1] свидетельствует о том, что скорость спрединга за последние 1.1 млн лет для этих районов существенно не менялась. Непростая структура АГП и вариация

Таблица I: Фазовые, структурные и палеомагнитные характеристики исследованных базальтов юга САХ и хребта Рейкьянес

Образец	$I_{rs}/I_s$	$H_{cr}/H_c$	$T_c$ , (°C)	Возраст(млн лет)	$b \pm \Delta b$	$q$	$H_{pl} \pm \Delta H$ (А/м)	$VADM \pm 10^{22}$ (Ам <sup>2</sup> )
R 337	0.33	2.01	100	0.00–0.04*	$0.55 \pm 0.01$	122	$44.0 \pm 0.3$	$8.0 \pm 0.1$
R 329	0.09	1.86	238	0.21–0.29*	$0.26 \pm 0.07$	0.3	$20.3 \pm 5.6$	$3.7 \pm 1.0$
R 327	0.21	1.65	210	0.34–0.42*	$0.44 \pm 0.02$	11	$35.0 \pm 1.6$	$6.4 \pm 0.3$
R 336	0.16	1.96	150	0.36–0.44*	$0.27 \pm 0.01$	15	$21.5 \pm 0.8$	$3.9 \pm 0.1$
R 321	0.30	1.34	110	1.04–1.12*	$0.42 \pm 0.02$	19	$35.6 \pm 1.6$	$6.5 \pm 0.2$
S 18-51/26	0.22	1.35	145	0.20	$0.62 \pm 0.03$	10	$24.7 \pm 1.2$	4.5
S 18-48/33	0.22	1.48	185	0.35	$1.06 \pm 0.01$	26	$45.4 \pm 0.4$	8.0
S 18-54/24	0.35	1.39	245	1.00	$0.44 \pm 0.04$	2.1	$17.5 \pm 1.6$	3.3
S 18-54/19	0.47	1.34	265	1.00	$0.61 \pm 0.04$	3.8	$24.5 \pm 1.6$	4.5

\* — возраст определен по линейным магнитным аномалиям

S — базальты юга САХ

R — базальты хребта Рейкьянес

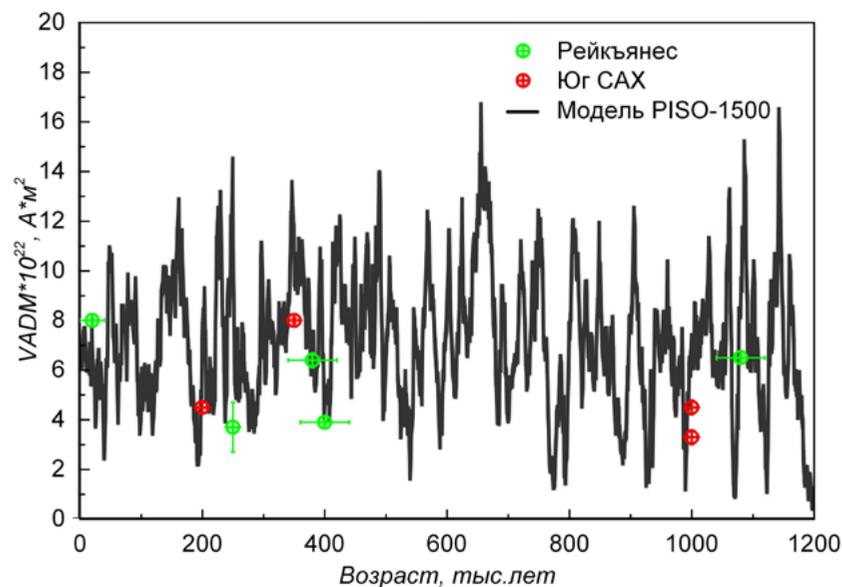


Рис. 3: Данные  $VADM$  полученные нами по образцам САХ (цветные точки) и вариации  $VADM$  по работе [1] (сплошная кривая)

ции намагниченности базальтов МАС в пределах эпох Брюнес–Матуяма в значительной степени могут определяться не только изменением полярности геомагнитного поля, но и изменением его величины. Результаты наших исследований также свидетельствуют о том, что резкое падение намагниченности базальтов возрастом

0,7–1,1. млн лет и уменьшение аномального геомагнитного поля можно объяснить уменьшением интенсивности геомагнитного поля в период инверсии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-05-00144).

[1] Channell J.E.T., Xuan C., Hodell D.A. Earth and Planetary Science Letters. **283**. P. 14. (2009).  
 [2] Харленд У.Б., Кокс А.В., Ллевеллин П.Г., Пиктон К.А.Г., Смит А.Г., Уолтерс Р. Шкала геологического времени. (М.: Мир, 1985).

[3] Короновский Н.В. Соросовский Образовательный Журнал. **6**. С. 56. (1996).  
 [4] Трухин В.И., Жилева В.А., Шрейдер А.А. Физика Земли. **8**. С. 6. (2002).  
 [5] Yamamoto Y., Tsunakawa H. Geophysical Journal

- International. **162**. P.79. (2005).
- [6] Шрейдер А.А., Беляев И.И., Попов Э.А., Пальшин Н.А., Трухин В.И., Кашинская И.В. Геомагнитные исследования в рифтовой зоне хребта Рейкьянес. В книге «Рифтовая зона хребта Рейкьянес», (М.: Наука, 1990). С.62.
- [7] Day R., Fuller M., Schmidt V.A. Physics of the Earth and Planetary Interiors. **13**. P.260. (1977).
- [8] Максимочкин В.И., Целебровский А.Н. Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. №6. С.134. (2015). (*Mosc. Univ. Phys. Bull.* 2015. **70**, N6. P.566).

## The Brunhes–Matuyama epoch magnetic field evolution from the Mid–Atlantic Ridge basalts

V. I. Maksimochkin<sup>1,a</sup>, A. N. Tselebrovskiy<sup>1,b</sup>, A. A. Shreider<sup>2,c</sup>

<sup>1</sup>*Earth Physics Department, Faculty of Physics,*

*M.V.Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

<sup>2</sup>*P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Moscow 117997, Russia*

*E-mail: <sup>a</sup>maxvi@physics.msu.ru, <sup>b</sup>tselebr@physics.msu.ru, <sup>c</sup>aschr@ocean.ru*

The study of geomagnetic field paleointensity has been conducted from northern (Reykjanes Ridge) and the southern Mid-Atlantic Ridge segment (MAR) basalts with different ages by Tellier–Coe method. The Earth virtual axial magnetic dipole moment (*VADM*) value was calculated and ranged between:  $3.3\text{--}8.0 \times 10^{22}$  Am<sup>2</sup> for the MAR basalts and  $3.7\text{--}8.0 \times 10^{22}$  Am<sup>2</sup> for basalts of the Reykjanes Ridge. The *VADM* values were complied with an international data bank of the geomagnetic field intensity changes over the last 1.2 myr. The age of the rocks was determined by the spreading rate of ocean crust and the analysis of the geomagnetic anomaly. It is concluded that the magnetization fluctuations of the various blocks of the magnetically active layers in the MAR rift and AGF zone features can be explained by the changes in geomagnetic field intensity with time.

PACS: 91.25.F; 91.25.N; 91.25.nc; 91.25.Ng

Keywords: paleomagnetism, rock magnetism, basalts, geomagnetic field anomaly, Thellie–Coe.

Received 25.04.2016.

### Сведения об авторах

1. Максимочкин Валерий Иванович — докт. физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939–48–81, e-mail: maxvi@physics.msu.ru.
2. Целебровский Алексей Николаевич — мл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939–48–81, e-mail: tselebr@physics.msu.ru.
3. Шрейдер Анатолий Александрович — докт. геол.-минерал. наук, профессор; тел.: (495) 124–59–63, e-mail: aschr@ocean.ru.