

УДК 550.382.3

О НАДЕЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАЛЕОНАПРЯЖЕННОСТИ ПО ИЗВЕРЖЕННЫМ ПОРОДАМ, НЕСУЩИМ ТЕРМОХИМИЧЕСКУЮ ОСТАТОЧНУЮ НАМАГНИЧЕННОСТЬ

© 2020 г. В. П. Щербаков¹, Н. К. Сычева^{1,*}, Н. А. Афиногенова¹

Представил академик РАН А.О. Глико 28.09.2020 г.

Поступило 29.09.2020 г.

После доработки 01.10.2020 г.

Принято к публикации 02.10.2020 г.

Окислительный распад титаномагнетитовых зерен на магнетит-ильменитовую решетку при формировании изверженной горной породы может привести к образованию термохимической остаточной намагниченности (TCRM). Выполнены компьютерное моделирование образования TCRM в системе однодоменных взаимодействующих частиц и численная симуляция экспериментов Телье по определению палеонапряженности. Показано, что применение методики Телье к таким образцам дает очень близкую к истинной величину вычисленного поля относительно интенсивности приложенного при образовании TCRM внешнего магнитного поля. Таким образом, вопреки имеющимся опасениям, что определения палеонапряженности, полученные на образцах, несущих TCRM, дают неверные результаты, в совокупности с недавно опубликованными данными лабораторных экспериментов эти расчеты указывают на хорошую перспективу получения надежных данных на образцах, несущих TCRM, и расширяют класс пород, пригодных для определения палеонапряженности.

Ключевые слова: палеомагнетизм, химическая остаточная намагниченность, палеонапряженность, метод Телье, диаграмма Арай-Нагата

DOI: 10.31857/S2686739720120105

Палеомагнитные данные позволяют получить обоснованные оценки о развитии основных этапов эволюции Земли как планеты. Однако, поскольку задачи палеомагнетизма решаются путем расшифровки информации о характеристиках геомагнитного поля, записанных в древних горных породах, то степень сохранности и стабильность естественной остаточной намагниченности (NRM) образцов исследуемых горных пород имеют решающее значение при оценке надежности полученных результатов. В вулканических породах первичность и сохранность NRM обеспечиваются в тех случаях, когда NRM представлена термоостаточной намагниченностью (TRM), и вопрос ее идентификации является необходимым условием достоверности получаемых результатов. Наибольшую опасность в этом отношении представляет нередко возникающая ситуация, когда NRM на самом деле представлена химической остаточной намагниченностью, возникаю-

щей вследствие магнетоминералогических изменений при охлаждении породы во время ее образования. Возможны два физических механизма ее возникновения: 1) в результате роста размера ферромагнитных суперпарамагнитных зерен, когда в присутствии внешнего поля \mathbf{B} их объем v вырастает до блокирующего объема v_b [1], назовем ее CRM; 2) в результате роста температуры Кюри T_c вследствие окисления титаномагнетитовых (ТМ) зерен [2]. Намагниченность, приобретенная вторым способом, называется термохимической (TCRM). Лабораторные эксперименты и компьютерное моделирование показали, что “палеонапряженность” B_{anc} , определенная методом Телье на образцах, несущих CRM, оказывается в 2–3 раза заниженной по сравнению с истинным полем ее создания B_{lab} [3]. Полученный вывод дал возможное объяснение существованию в мировой базе данных по палеонапряженности аномально большого числа слабых B_{anc} в эпохе Брюнеса (последние 780 тыс. лет) [4].

Однако на практике намного большую опасность представляет TCRM. Действительно, при достаточно медленном остывании пород от высоких температур в окислительных условиях зерна титаномагнетита (ТМ) всегда испытывают распад

¹ Геофизическая обсерватория “Борок” – филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Борок, Россия

*E-mail: sycheva@borok.yar.ru

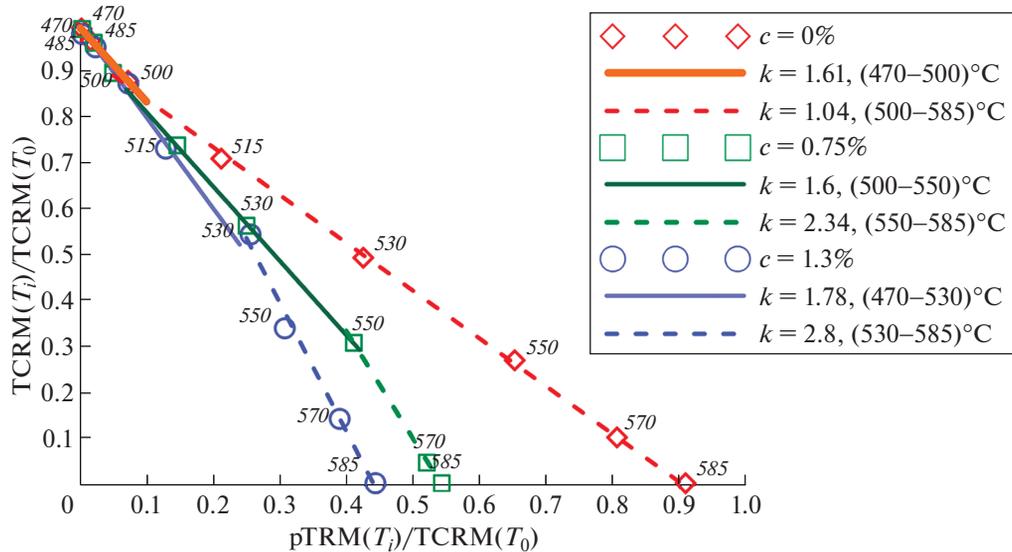


Рис. 1. Диаграммы Арай-Нагата для различных значений c для $T_{\text{TCRM}} = 400^\circ\text{C}$. Образование TCRM по модели роста T_c со скоростью $0.1^\circ/\text{c}$ при постоянной T_{TCRM} . Спектр размеров частиц 44–62 нм.

на гексагональную и шпинельную фазы. Если распад происходит при $T > T_c$, то возникает обычная TRM с хорошей перспективой получения на ней надежных палеомагнитных данных. Но если же распад происходит при $T < T_c$, то он сопровождается ростом T_c ТМ-ячеек за счет взаимной диффузии ионов железа и титана при образовании магнетит-ильменитовой решетки, что и приводит к образованию TCRM. В литературе всегда высказывались опасения, что результаты, полученные на таких образцах, будут приводить к ложным определениям [5]. Однако лабораторный эксперимент по созданию и исследованию свойств TCRM привел к довольно неожиданному результату: оказалось, что применение методики Телье к образцам, несущим TCRM, дает очень близкую к истинной величину вычисленного поля B_{anc} относительно интенсивности реально действовавшего при образовании TCRM внешнего магнитного поля B_{lab} [6].

В данном сообщении мы представляем теоретическое обоснование этого результата путем компьютерного моделирования образования TCRM в системе однодоменных (ОД) взаимодействующих частиц методом Монте-Карло с последующим численным расчетом экспериментов по определению палеонапряженности. Методика моделирования процессов образования TRM, CRM и TCRM, как и непосредственно методики Телье в ансамбле N_p взаимодействующих ОД-зерен этим методом описана в работе [3].

Рассчитывались 2 варианта: 1) при постоянной температуре кристаллизации T_{TCRM} (рис. 1); 2) при непрерывно охлаждающемся образце (рис. 2).

При этом предполагался линейный со временем t рост T до T_c магнетита (585°C) и линейный же спад $T(t)$ от T_{TCRM} до комнатной температуры. Поскольку при расчетах по методу Монте-Карло требуется выполнение большого числа статистических проб, понижающих среднее квадратическое отклонение в получаемом результате, было проведено усреднение по числу экспериментов Монте-Карло от 50 до 100, число частиц в ансамбле $N_p = 50000$ для невзаимодействующих частиц (условно при относительной объемной концентрации ферромагнитных частиц $c = 0\%$), $N_p = 5000$ — при учете взаимодействия, т.е. при $c \neq 0$.

Диаграммы Арай-Нагата, полученные в численных и лабораторных экспериментах по методике Телье, приведены на рис. 1, 2 и 4. Согласно этой методике $B_{\text{anc}} = kB_{\text{lab}}$, где k — коэффициент определения палеонапряженности, равный тангенсу угла наклона диаграммы. Интервал температур, по которому производилось определение B_{anc} , показан на рисунках. Как видно из рис. 1 и 2, для невзаимодействующих частиц $k \cong 1$. Именно такая ситуация наблюдалась в наших экспериментах с TCRM [6], индуцированной в ТМ-зернах при медленном остывании образцов от T_c (рис. 2). Однако с ростом концентрации частиц c (т.е. с ростом величины магнитостатического взаимодействия) характер диаграмм меняется — они приобретают излом при приближении к высоким температурам, при этом чем выше c , тем раньше начинается излом. Одновременно наблюдается рост отношения TCRM/TRM (рис. 3), что приводит к тому, что $k > 1$: по низкотемпературному участку $k \approx 1.6$ – 1.8 , а по высокотемпературному $k \approx 2.3$ – 2.8 . Так как в палеомагнетизме за первич-

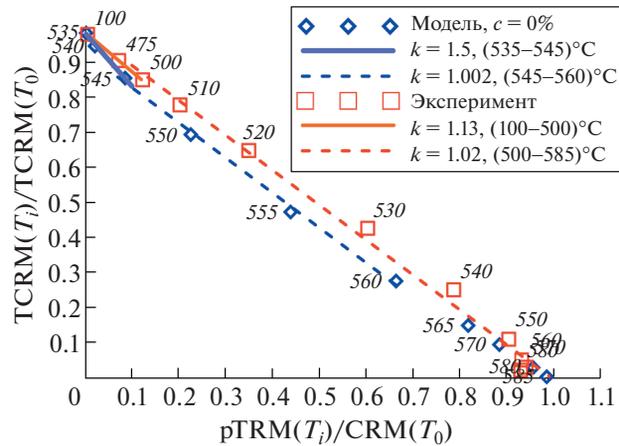


Рис. 2. Диаграмма Араи-Нагата для невзаимодействующих ОД-частиц магнетита, рассчитанная при условии одновременного роста T_c со скоростью $0.1^{\circ}/c$ и охлаждения образца от 500°C со скоростью $0.5^{\circ}/c$ (ромбы). Спектр размеров частиц 55–71 нм. Для сравнения показана диаграмма Араи-Нагата, полученная в лабораторном эксперименте при моделировании TCRM (квадраты). Данные взяты из работы [6].

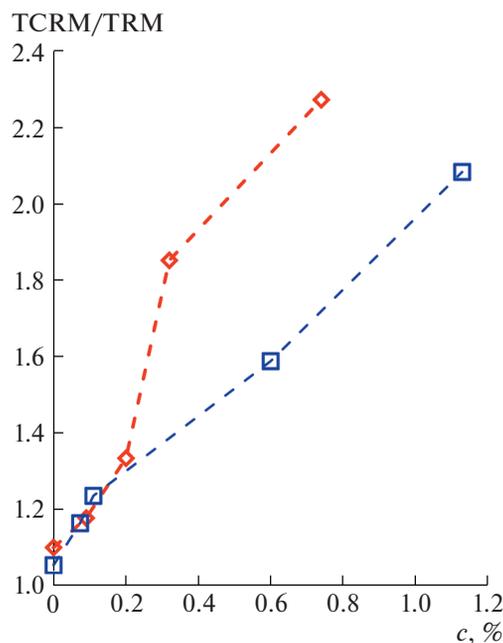


Рис. 3. Отношение TCRM/TRM по результатам компьютерного моделирования образования TCRM для $T_{\text{TCRM}} = 400^{\circ}\text{C}$ (ромбы) и 500°C (квадраты).

ную намагниченность обычно принимается именно высокотемпературная компонента, то полученное на коллекции “палеополе” может быть переоценено в 2 раза, если между зернами магнетита имеется существенное взаимодействие. Причиной роста отношения TCRM/TRM с ростом концентрации является то, что TCRM приобретает на стадии роста T_c , при пониженной величине спонтанной намагниченности M_s , в

то время как TRM приобретает уже на стабильных зернах, т.е. при повышенной M_s и, соответственно, повышенной интенсивности магнито-статического взаимодействия, что снижает эффективность приобретения TRM [7].

Обращает на себя внимание тот факт, что начальный участок диаграмм Араи-Нагата на рис. 1 и 2 даже при отсутствии взаимодействия имеет больший наклон, нежели его основная часть. Та-

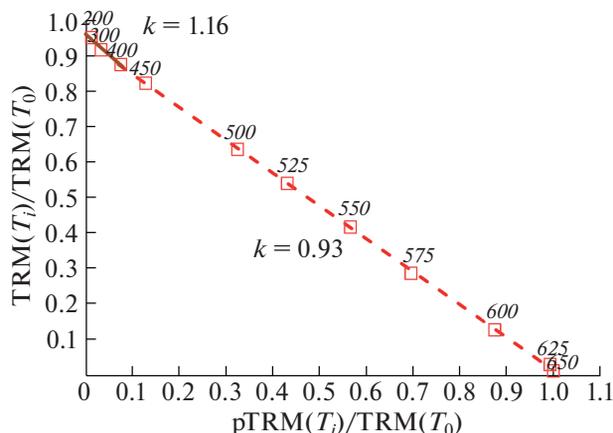


Рис. 4. Диаграмма Араи-Нагата, полученная для TRM, созданной на искусственно приготовленном образце, содержащем ОД-термостабилизированные зёрна маггемита.

кое явление нередко наблюдается и при экспериментах на природных образцах или их искусственных аналогах, но до сих пор оно не нашло однозначного объяснения. Нами специально для данной работы был выполнен эксперимент Телье на искусственно приготовленном образце, несущем лабораторную TRM и содержащим ОД-термостабилизированные зёрна маггемита для исключения влияния много- и псевдо-однодоменных частиц. Как оказалось (рис. 4), эффект завышения наклона в начале диаграммы четко наблюдается не только в теории, но и на эксперименте. По всей вероятности, он связан с тем фактом, что блокирующие температуры частиц не строго определены, а являются случайными величинами, изменяющимися в некотором диапазоне температур.

Полученные данные дают основания утверждать, что TCRM может быть источником надежной палеомагнитной информации при определении палеонапряженности, если TCRM образовалась при остывании породы в результате распада первичного титаномагнетита. При этом следует с осторожностью относиться к результатам, полученным на образцах, где объемная концентрация ферритмагнетика превышает 0.3%, в этих случаях величина рассчитанного палеополя может быть завышена.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 20–05–00215 и задания ИФЗ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хайг Г. Возникновение остаточной намагниченности при химических изменениях / В кн.: Палеомагнетизм / Под ред. Г.Н. Петровой. М.: ИЛ, 1962. С. 67–86.
2. Белоконов В.И., Сонна И.В., Семкин С.В. Образование химической остаточной намагниченности в процессе роста спонтанной намагниченности продуктов реакции // Химическая намагниченность: теория и эксперимент. Владивосток: Изд-во ДВГУ, 1991. С. 3–13.
3. Щербаков В.П., Сычева Н.К. Исследование причин сходства спектров блокирующих температур химической и термоостаточной намагниченностей методом компьютерного моделирования // Физика Земли. 2019. № 5. С. 87–103. <https://doi.org/10.31857/S0002-33372019587-103>
4. Khokhlov A., Shcherbakov V. Palaeointensity and Brunhes Palaeomagnetic Field Models // GJI. 2015. V. 202. № 2. P. 1419–1428. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv236>
5. Smirnov A.V., Tarduno J.A. Thermochemical Remanent Magnetization in Precambria Rocks: Are We Sure the Geomagnetic Field Was Weak? // J. Geophys. Res. 2005. 110. B06103. <https://doi.org/10.1029/2004JB003445>
6. Shcherbakov V.P., Gribov S.K., Lhuillier F., et al. On the Reliability of Absolute Palaeointensity Determinations on Vasaltic Rocks Bearing a Thermochemical Remanence // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2019. 124. <https://doi.org/10.1029/2019JB017873>
7. Щербаков В.П., Щербакова В.В. К расчету термоостаточной и идеальной намагниченностей ансамбля взаимодействующих однодоменных зёрен // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1977. № 6. С. 69–83.

ON THE RELIABILITY OF DETERMINATION OF PALEOINTENSITY ON SAMPLES CARRYING CHEMICAL REMANENT MAGNETIZATION

V. P. Shcherbakov^a, N. K. Sycheva^{a,#}, and N. A. Aphinogenova^a

^a Borok Geophysical Observatory of Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Borok, Russian Federation

[#]E-mail: sycheva@borok.yar.ru

Presented by Academician of the RAS A.O. Gliko September 29, 2020

At the formation of igneous rock during its slow cooling, decomposition of titanomagnetite grains can lead to the formation of thermochemical remanent magnetization (TCRM). The Monte Carlo method was applied to computer simulation of the formation of TCRM in a system of single-domain interacting particles following by numerical modeling of Thellier paleointensity experiments. Contrary to the concerns, it occurred that in reality the application of the Thellier technique to samples carrying TCRM gives the result which is very close to the true value of external magnetic field applied to the sample during the formation of the TCRM. Together with the recently published laboratory experimental data, these calculations indicate a good perspective for obtaining reliable paleomagnetic data on samples bearing TCRM and expand the class of rocks suitable for determinations of the paleointensity.

Keywords: paleomagnetism, chemical remanent magnetization, paleointensity, Thellier method, Arai-Nagata diagram