

СТАТЬЯ

УДК 528:552

**ОСОБЕННОСТИ ЧАСТИЧНОЙ ТЕРМОСТАТОЧНОЙ  
НАМАГНИЧЕННОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД  
КАРАЧАЕВО-ЧЕРКЕССИИ (СЕВЕРНЫЙ КАВКАЗ)**

**Урусова Б.И., Болатчиева М.С.-Х., Узденов Ш.Х.**

*ФГБОУ ВО «Карачаево-Черкесский государственный университет имени У.Д. Алиева»,  
Карачаевск, e-mail: urusova50@mail.ru*

Впервые экспериментально исследованы особенности частичной термоостаточной намагниченности (габбро-базальт и базальт) горных пород Карачаево-Черкесии (Северный Кавказ) при комнатной температуре и небольших магнитных полях. Экспериментальные исследования показали, что частичная термоостаточная намагниченность не меняется: 1) при изменении размагничивающего переменного магнитного поля; 2) к обратным магнитным полям, которые разрушают горные породы габбро-базальт и базальт. Показано, что в процессе охлаждения частичная термоостаточная намагниченность проходит через блокирующую температуру  $-T_b$ . Получено, что при количественном сравнении кривых габбро-базальт и базальт частичная термоостаточная намагниченность подчиняется закону аддитивности. Показано, что, если охлаждать в магнитном поле образцы габбро-базальта и базальта: а) направление частичной термоостаточной намагниченности совпадает с направлением магнитного поля; б) превышает по величине насыщенную и индуцированную намагниченность; в) в магнитном поле до 1 Э, при температуре  $\Delta T = T_1 - T_2$ , не зависит от намагниченности и при комнатной температуре не изменяется в течение длительного времени. В горных породах габбро-базальт и базальт каждый домен имеет свою блокирующую температуру  $-T_b$ , которая находится ниже температуры Кюри и зависит от: а) константы анизотропии; б) магнитострикции; в) напряжения; г) формы и размера. Показано, что частичная температурная намагниченность не обратима по отношению к температуре в отсутствие внешнего поля до тех пор, пока  $T_2 > T_1$ , и изменяется необратимо при  $T > T_2$ , исчезает при  $T = T_2$  – происходит терморазмагничивание. Полученные результаты и предложенная методика измерения магнитных свойств горных пород использованы и успешно внедрены Управлением по недропользованию Карачаево-Черкесской Республики, что зафиксировано Актом о внедрении.

**Ключевые слова:** горные породы габбро-базальт и базальт, частичная термоостаточная намагниченность, блокирующая температура, остаточная и индуцированная намагниченность, магнитное поле, температура Кюри

**FEATURES OF PARTIAL HEAT-SUFFICIENT MAGNETIZATION  
OF ROCKS OF KARACHAY-CHEKKESSIA (NORTH CAUCASUS)**

**Urusova B.I., Bolatchieva M.S.-Kh., Uzdenov Sh.Kh.**

*Karachay-Cherkess State University named after U.D. Aliev, Karachayevsk, e-mail: urusova50@mail.ru*

For the first time, the features of partial heat-sufficient magnetization (gabbro-basalt and basalt) of rocks of Karachay-Cherkessia (North Caucasus) at room temperature and small magnetic fields were experimentally investigated. Experimental studies have shown that partial heat-sufficient magnetization does not change: 1) when the demagnetizing alternating magnetic field changes; 2) to reverse magnetic fields that destroy gabbro-basalt and basalt rocks. It is shown that during the cooling process, the partial heat-sufficient magnetization passes through the blocking temperature  $-T_b$ . It is found that when the gabbro-basalt and basalt curves are quantitatively compared, the partial heat-sufficient magnetization obeys the law of additivity. It is shown that if samples of gabbro-basalt and basalt are cooled in a magnetic field: а) the direction of partial heat-sufficient magnetization coincides with the direction of the magnetic field; б) exceeds the saturated and induced magnetization in magnitude; в) in a magnetic field up to 1 E, at a temperature of  $\Delta T = T_1 - T_2$ , does not depend on the magnetization and at room temperature, it does not change for a long time. In gabbro-basalt and basalt rocks, each domain has its own blocking temperature  $-T_b$ , which is below the Curie temperature, and depends on: а) anisotropy constant; б) magnetostriction; в) stress; г) shape and size. It is shown that partial temperature magnetization is not reversible with respect to temperature in the absence of an external field as long as  $T_2 > T_1$  and changes irreversibly at  $T > T_2$  disappears at  $T = T_2$  – thermal magnetization occurs. The obtained results and the proposed method of measuring the magnetic properties of rocks were used and successfully implemented by the Department of Subsoil Use of the Karachay – Cherkess Republic, which is fixed by the Act of Implementation.

**Keywords:** gabbro-basalt rocks, partial heat-sufficient magnetization, blocking temperature, magnetic field, residual and induced magnetization, Curie temperature

В горных породах за намагничивание ответственно смещение доменных границ, а не вращения вектора спонтанной намагниченности  $-I_s$ , по-видимому, и поэтому термоостаточная намагниченность  $-I_{rt}$  тоже происходит за счет смещения доменных границ.

При этом ось трудного намагничивания магнитного момента  $M$  связана с преодо-

лением потенциального барьера высотой  $-E_\delta$ , с учетом последнего можно вычислить время релаксации  $-t_r$  по формуле

$$t_r = \omega_0^{-1} \exp\left(\frac{E_\delta}{kT}\right), \quad (1)$$

где  $\omega_0$  – характерная частота для преодоления потенциального барьера;  
 $k$  – постоянная Больцмана.

Зная, что потенциальный барьер обладает высотой, которую можно вычислить по формуле

$$E_{\delta} = \frac{1}{2} \mu_0 M H_{\delta} = \frac{1}{2} \mu_0 M N_{\delta} I_s, \quad (2)$$

где  $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7}$  Гн / м – магнитная постоянная;

$N_{\delta}$  – размагничивающий фактор;

$I_s$  – намагниченность насыщения.

При повышении температуры высота потенциального барьера и время релаксации –  $t_r$  растут при росте температуры. Это означает, что для каждой области имеется некоторая температура  $T_b$ , при которой  $t_r = t_0$ .

Учитывая этот факт в формуле (1), имеем

$$\kappa T_b = E_{\delta} / 25, \quad (3)$$

где  $T_b$  – блокирующая температура, ниже которой направление магнитного момента «замораживается».

Такое «замораживание» магнитных моментов и есть процесс образования частичной термоостаточной намагниченности –  $J_{\pi}$ .

Цель данной работы – экспериментально исследовать частичную термоостаточную намагниченность горных пород габбро-базальта и базальта при малых внешних магнитных полях и комнатной температуре.

#### Материалы и методы исследования

Ранее нами в работах [1, 2] разработан методика измерения термоостаточной намагниченности горных пород. Зная термоостаточную намагниченность горной породы, можно определить частичную термоостаточную намагниченность при охлаждении от  $T_1$  до  $T_2$  при воздействии внешнего магнитного поля –  $H_{ex}$ , приложенном только в данном интервале температур [3]:

$$J_{T_1}^{T_2}(T), \text{ где } T_1 > T_2. \quad (4)$$

Используя предложенную в работах [1, 2] методику, авторы впервые экспериментально исследовали частичную термоостаточную намагниченность горных пород (габбро-базальта и базальта) Карачаево-Черкесии (Северный Кавказ). Образцы были взяты из Зеленчукского района, водораздел р. Маруха, Карачаево-Черкесии (Северный Кавказ), с номером буровой сква-

жины и возрастом соответственно 7/1051, 17/1942 и  $\nu PR - PZ_1, PZ_1 - KR$  [4, 5].

#### Результаты исследования и их обсуждение

Результаты экспериментальных исследований частичной термоостаточной намагниченности горных пород габбро-базальта и базальта приведены на рис. 1.

Из рисунка видно, что при охлаждении в магнитном поле в интервале ниже  $T_{кр}$  – критической температуры наиболее выгодно для образования частичной термоостаточной намагниченности.

Полученные кривые частичной термоостаточной намагниченности  $J_{T_c, Hex(T_0)}^{T_0}$  – горной породы габбро-базальт в процессе охлаждения более крутые вблизи блокирующей температуры –  $T_b$ . А кривая горной породы базальт (рис. 1) проходит выше кривой габбро-базальта и более крутая. По-видимому, это связано с наличием в горной породе базальт ферромагнитных минералов с различными температурами Кюри. Причем каждый домен имеет свою блокирующую температуру –  $T_b$ , которая ниже температуры Кюри. Блокирующая температура –  $T_b$  зависит от константы анизотропии, магнитострикции, напряжения, формы и размеров горных пород.

Величина частичной термоостаточной намагниченности  $J_{T_i^{i-1}, Hex(T_0)}^T$  связана с температурным интервалом, в течение которого образец остывал в магнитном поле [6], что можно найти по формуле

$$T_i = \frac{T_i + T_{i-1}}{2}. \quad (5)$$

Сравнивая количественно полученные результаты на рис. 1, имеем

$$J_{T, Hex(T_0)-T}^{T_0}, \quad (6)$$

$$J_{T_i, Hex(T_0)-T}^{T_{i-1}}, \quad (7)$$

что частичная термоостаточная намагниченность подчиняется аддитивному закону.

Далее, можно найти сумму этой закономерности, которая равна

$$\sum_{T_{i-1}=T_0}^{T_i=T} J_{T_i, Hex(T_0)}^{T_{i-1}} = J_{T, Hex(T_0)}^{T_0}, \quad (8)$$

где  $T_{i-1} = T_0$ ,  $T_i = T$ .

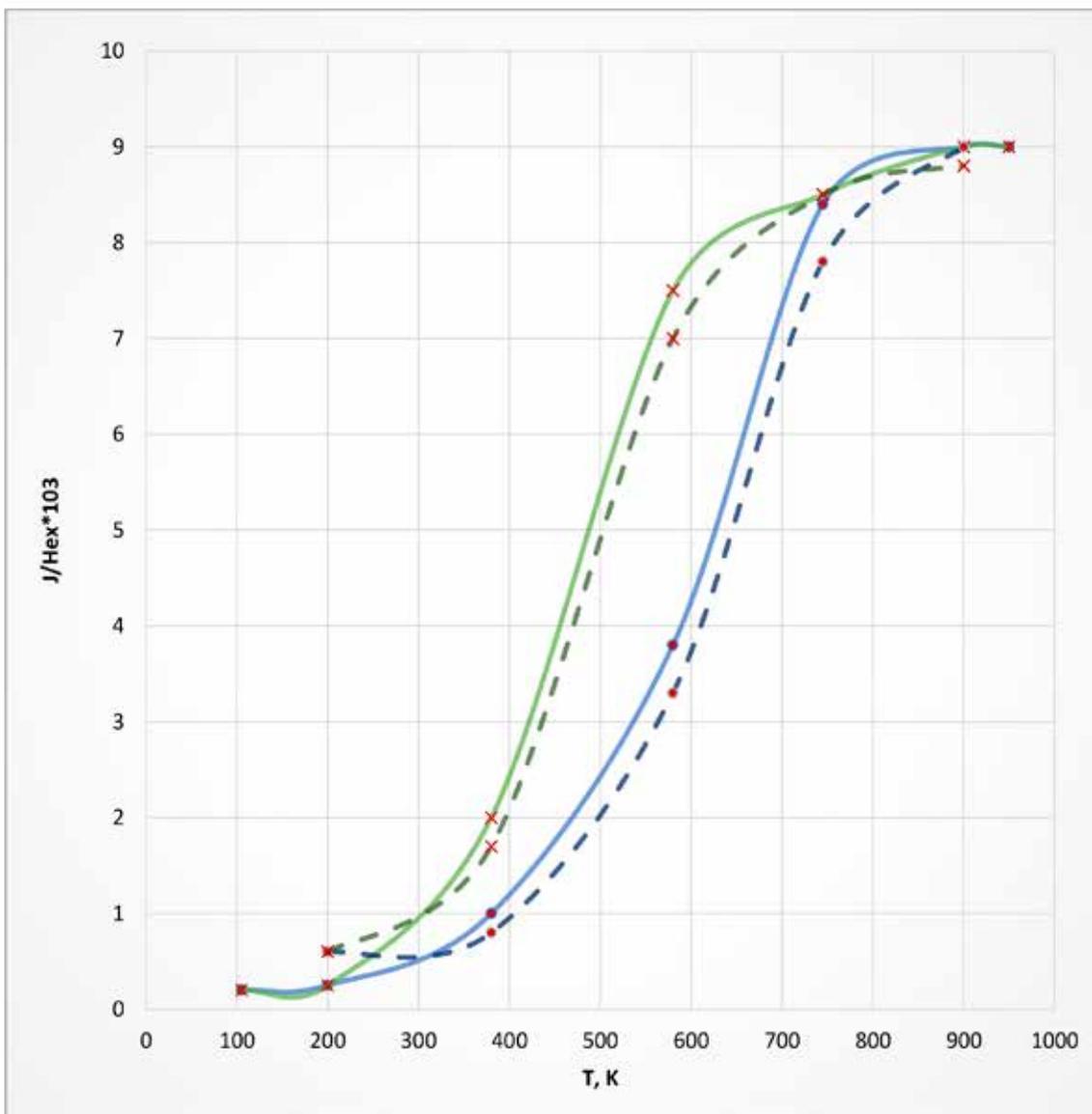


Рис. 1. Частичная термоостаточная намагниченность: (o) – габбро-базальт; (x) – базальт

А пунктирные кривые (рис. 1) изображают следующие кривые:

$$\sum_{T_{i-1}=T_0}^{T_i=T} J_{T_{i,Hex}^{(T_0)}}^{T_{i-1}}, \quad (9)$$

$$J_{T_{i,Hex}^{(T_0)}}^{T_{i-1}} = J_{T_{i,Hex}^{(T_0)}}^T - J_{T_{i-1,Hex}^{(T_0)}}^{T_0}. \quad (10)$$

На основании формул (9) и (10) получаем

$$J_{T_{i,Hex}^{(T_0)}}^{T_0} - J_{T_{i-1,Hex}^{(T_0)}}^{T_0} = J_{T_{i-1,Hex}^{(T_0)}}^{T_{i-1}}. \quad (11)$$

Если  $T_1 > T_2$ , то имеем

$$J_{T_{1,Hex}^{(T_0)}}^{T_2} = Hex \int_{T_2}^{T_1} P(T) \Delta T, \quad (12)$$

где  $P(T) = \frac{1}{Hex} \left( \frac{\partial J_{T,Hex}^{T_0}}{\partial T} \right)$  – характери-

стическая функция частичной термоостаточной намагниченности.

На рис. 2 приведены результаты температурных изменений частичной термооста-

точной намагниченности горных пород габбро-базальта и базальта. Из рисунка видно, что частичная температурная намагниченность –  $J_{T_{1,Hex}(T)}^{T_2}$  не обратима по отношению к температуре в отсутствие внешнего поля до тех пор, пока  $T_2 > T$  и изменяется необратимо при  $T > T_2$ , исчезает при  $T = T_2$  – происходит терморазмагничивание [7].

Учитывая закон аддитивности и термо-размагничивания для частичной термооста-точной намагниченности, имеем

$$J_{T_{c,Hex}(T_0)}^{T_0} - J_{T_{1,Hex}(T_0)}^{T_0} = J_{T_{c,Hex}(T_0)}^{T_1}, \quad (13)$$

где  $T_c > T_1 > T_0$ ,  $T_c$  – комнатная температура.

$$1 - \frac{J_{T_{1,Hex}(T_0)}^{T_0}}{J_{T_{c,Hex}(T_0)}^{T_0}} = \frac{(J_{T_{c,Hex}(T_0)}^{T_1})_{T_1}}{J_{T_{c,Hex}(T_0)}^{T_0}}. \quad (14)$$

Получено, что

$$J_{T_{c,Hex}(T_0)}^{T_1} = (J_{T_{c,Hex}(T_0)}^{T_0})_{T_1}, \quad (15)$$

где  $(J_{T_{c,Hex}(T_0)}^{T_0})_{T_1}$  является остатком  $J_{T_{c,Hex}(T_0)}^{T_0}$  после размагничивания при нагревании до  $T_1$ .

## Заключение

1. Частичная термоостаточная намагниченность горных пород габбро-базальта и базальта при охлаждении от  $T_1$  до  $T_2$  во внешнем магнитном поле –  $Hex$  не зависит от намагниченности, полученной при остывании в поле, приложенном в других температурах.

2. Количественное сравнение кривых частичной термоостаточной намагниченности горных пород габбро-базальта, базальта приводит к закону аддитивности.

3. Частичная термоостаточная намагниченность устойчива по отношению а) к размагничивающему действию переменного магнитного поля; б) обратным магнитным полям, необходимым для ее разрушения в горных породах габбро-базальт, базальт; в) при комнатной температуре не изменяется в течение длительного времени.

4. В области остаточной намагниченности образцов габбро-базальта и базальта каждый домен имеет свою блокирующую температуру –  $T_b$ , которая находится ниже температуры Кюри.

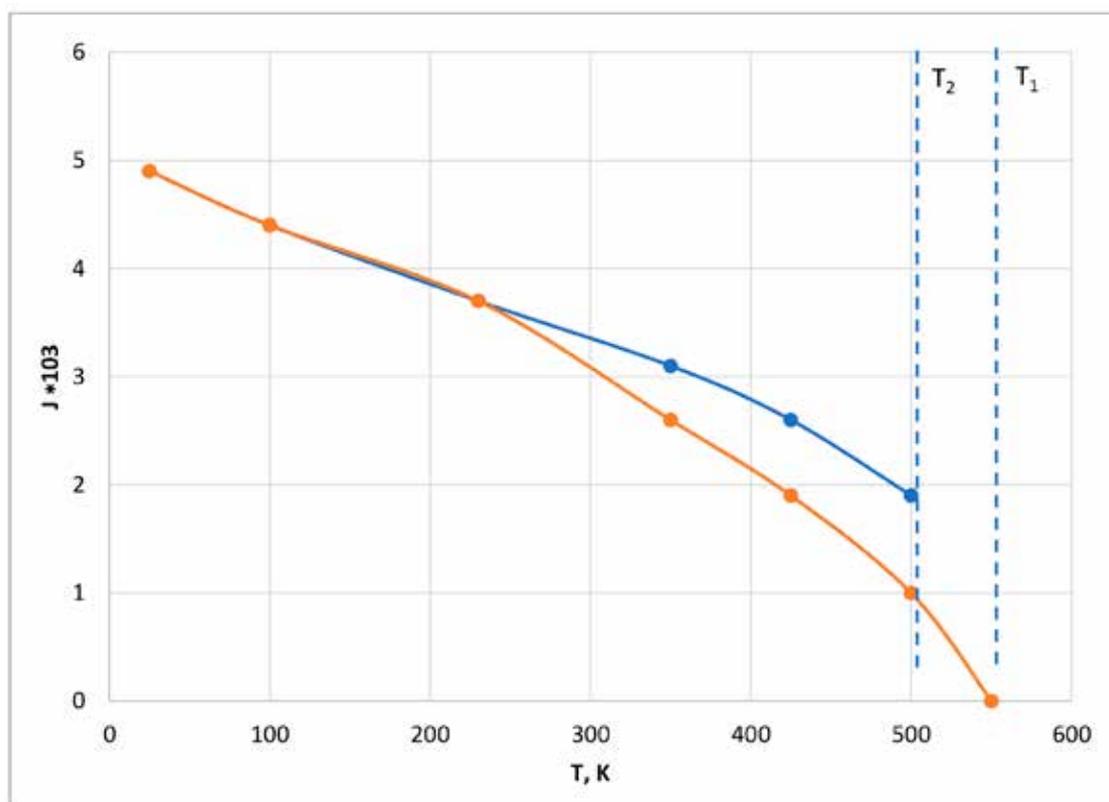


Рис. 2. Температурные изменения  $J_{T_{2,Hex}(T)}^{T_1}$  при  $H = 0$  горной породы базальт (изменение обратно при  $T < T_2$ )

5. Блокирующая температура –  $T_b$  в области частичной термоостаточной намагниченности зависит от константы анизотропии, от магнитострикции, от напряжения, от формы и размера горных пород габбро-базальта и базальта.

6. Полученные результаты и предложенная методика измерения магнитных свойств горных пород использованы и успешно внедрены Управлением по недропользованию Карачаево-Черкесской Республики, что зафиксировано Актом о внедрении.

#### Список литературы

1. Урусова Б.И., Болатчиева М.С.-Х. Механизм обратной намагниченности горных пород Карачаево-Черкесии (Северный Кавказ) // Успехи современного естествознания. 2022. № 2. С. 71–75.
2. Урусова Б.И., Узденова Ф.А., Лайпанов У.М. Термоостаточная намагниченность горных руд. Известия вузов: Северо-Кавказский регион // Успехи современного естествознания. 2008. № 6. С. 55–56.
3. Belokon V.I., Dyachenko O.I. Long and Short-Range Magnetic Order in Titanomagnetite. *Phys. Solid Earth*. 2020. P. 888–891.
4. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. СПб., 2014. 368 с.
5. Гончаров С.А., Пашенков П.Н., Плотников А.В. Физика горных пород: физические явления и эффекты в практике горного производства. М., 2016. 27 с.
6. Carrasco J.P., Osete M.L., Torta J.M., De Santis A. A geomagnetic field model for the Holocene based on archaeomagnetic and lava flow data. *Earth and Planetary Science Letters*. 2014. P. 98–109.
7. Веселовский Р.В., Арзамасцев А.А., Демина Л.И., Травин А.В., Боцон С.Б. Палеомагнетизм, геохронология и магнитная минералогия Кольской девонской магматической провинции // Физика Земли. 2013. № 4. С. 82–104.