

УДК 550.382.3

## ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА ТЕМПЕРАТУРНУЮ ПАМЯТЬ НАВЕДЕННОЙ МАГНИТНОЙ АНИЗОТРОПИИ ГОРНЫХ ПОРОД

© 2004 г. В. С. Вечфинский, Д. С. Великанов, С. В. Гагаркин

*Рыбинская государственная авиационная технологическая академия*

Поступила в редакцию 21.04.2003 г.

В работе приводятся результаты исследований влияния давления на температурную память наведенной магнитной анизотропии (НМА) магнетитсодержащих пород. Показано, что давление, в присутствии которого в магнитных минералах создавалась НМА, затрудняет последующее определение температуры, до которой проходил нагрев породы.

Магнитная текстура ферромагнитных минералов, содержащихся в горных породах, чутко реагирует на воздействие на нее магнитного поля Земли, температуры и давления, которое испытывает порода в условиях глубинного залегания. Известно, что в содержащихся в породах ферромагнитных минералах при их нагреве и охлаждении в геомагнитном поле возможно возникновение наведенной магнитной анизотропии (НМА) [Шашканов, 1985; Большаков, 1986; Вечфинский, 1987; Вечфинский, 1992].

Одним из проявлений НМА является возникновение перетяжек на частных петлях гистерезиса намагниченности. Собственно, перетянутые петли гистерезиса впервые были получены на технических ферромагнетиках еще в 20-х годах прошлого века. Объяснение возникновению подобных перетяжек было дано давно в работах Ямомото, Танигучи и многих других [Крупичка, 1976]. Оно заключается в том, что в результате совместного воздействия на породу магнитного поля и высокой температуры в многодоменных ферромагнитных частицах происходит диффузионная стабилизация доменных границ. Естественно, что при этом температура нагрева ферромагнетика не должна превышать температуры Кюри ( $T_c$ ). Если ферромагнетик нагревается выше  $T_c$ , то стабилизация доменных границ происходит при его охлаждении ниже  $T_c$ . В результате подобной стабилизации доменные границы попадают в потенциальные энергетические ямы или, иначе говоря, на их пути возникают "гигантские" потенциальные барьеры, которые и обуславливают возникновение перетяжки на петле гистерезиса.

Исследования показали, что в результате охлаждения образцов пород, содержащих многодоменные магнитные минералы (магнетит, титаномагнетиты, пирротин) в постоянном магнитном поле  $H_m = 0.5-50$  Э от температур  $T_x < T_c$  в них может возникать особый вид наведенной магнитной анизотропии. Эта анизотропия проявляется, в ча-

стности, в возникновении на петлях гистерезиса намагниченности перетяжек при значениях намагничивающих полей, близких напряженности  $H_m$ . НМА сохраняет информацию о напряженности постоянного магнитного поля и температуре, при которой она была создана [Вечфинский, 1987].

Из экспериментов также следует, что если возникновение НМА происходило при воздействии на образец давления, то величина эффектов, связанных с НМА, существенно изменяется [Ершов, 1999]. Исследования показывают, что НМА несет информацию не только о магнитном поле и температуре, при которых была создана, но и о давлении, действовавшем на породу. Однако до сих пор во многом остается неясной связь температурной памяти НМА с величиной давления, действовавшего при ее создании.

Прежде чем перейти анализу результатов исследования влияния давления на температурную память НМА, требуется пояснить вкратце сам эффект температурной памяти.

Если нагреть образец породы, содержащий многодоменные частицы ферромагнитных минералов, до некоторой температуры  $T_x$  и охладить его в постоянном магнитном поле  $H_m$ , то, как уже сказано, на его частных петлях гистерезиса возможно возникновение перетяжки при напряженностях намагничивающего поля, близких и равных напряженности  $H_m$ . При последующем нагреве перетяжка на петле гистерезиса сохраняется до температуры  $T_x$  (если  $T_x < T_c$ ) и исчезает при более высоких температурах.

Схематически (реальная перетяжка в 50-100 раз меньше) подобная перетянутая петля гистерезиса показана на рис. 1а.

При исследовании НМА слабомагнитных горных пород измеряют так называемые скомпенсированные дифференциальные петли гистерезиса намагниченности (СДПГ), в которых практически отсутствует (скомпенсирована) первая гармо-

Г  
л  
н  
п

ч  
р  
с  
\*

П  
о  
и  
и

с  
г  
м  
п

Н  
и.  
П  
л:  
ai  
л  
С  
п  
т

л;  
В  
р  
т  
н:  
Т  
Р

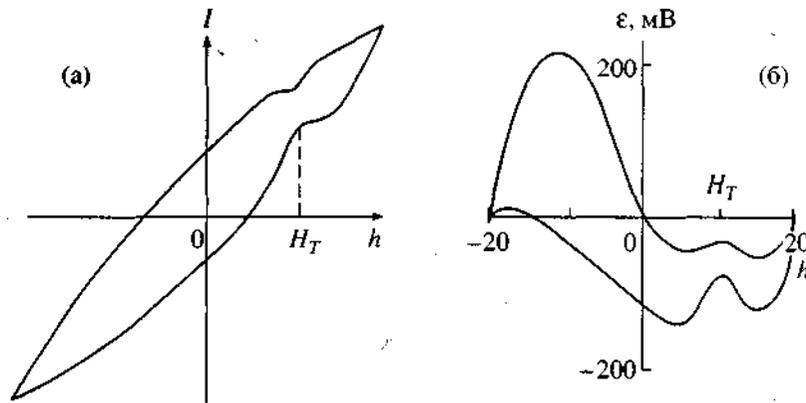


Рис. 1. (а) - схематическое изображение частной петли гистерезиса, перетянутой в поле  $H_m$ , (б) - пример перетянутой СДПГ образца базальтовой лавы Камчатки. Образец был охлажден от температуры  $T_x = 250^\circ\text{C}$  в поле  $H_m = 10$  Э.

ника ЭДС. Принцип измерения СДПГ был изложен относительно давно [Вечфинский, 1984]. Пример перетянутой СДПГ образца базальтовой лавы Камчатки приведен на рис. 16. Образец ранее был охлажден от температуры  $T_x = 250^\circ\text{C}$  в поле  $H_m = 10$  Э.

В то же время определять величину  $T_x$  по исчезновению перетяжки на петле гистерезиса образца породы в процессе его нагрева довольно сложно. Точность подобного определения  $T_x$  также невелика. Для определения этой температуры используется метод высших гармоник (МВГ).

В данном случае общий принцип методов высших гармоник заключается в разложении ЭДС, образующей СДПГ, на составляющие гармоники и анализе зависимостей амплитуд этих гармоник или их соотношений от различных факторов.

В работе [Вечфинский, 1994] на основе способности НМА хранить информацию о температуре, при которой она была создана, предложен магнитный геотермометр для определения температур вторичных нагревов пород.

Температура, при которой была создана НМА, определяется по локальным максимумам или минимумам на зависимостях амплитуд высших гармоник от температуры. То есть  $T_x$  определяется по экстремумам на графиках  $A_n = f(T)$ .  $A_n$  - амплитуда третьей или пятой (может быть и более высокой) гармоники ЭДС, образующей СДПГ.  $T$  - текущая температура нагрева образца породы, в котором ранее была создана НМА при температуре  $T_x$ .

Для исследований мы использовали образцы лав Камчатки, Курильских островов и Дальнего Востока разного возраста и генезиса, взятых из различных геологических коллекций. Согласно термомагнитным анализам, проведенным на микроанализаторе "Самебах" старшим научным сотрудником обсерватории "Борок" ОИФЗ РАН В.А. Цельмовичем, образцы содержали

многодоменные зерна магнетита и титаномагнетитов с температурами Кюри  $200\text{--}570^\circ\text{C}$ . Возраст пород колебался от десятков лет (лавы извержения вулкана Толбачик в 1970-х годах прошлого века) до десятков миллионов лет (миоцен).

При наведении в породе НМА под давлением и при различных температурах образцы пород помещали в кварцевую трубку с нагревательной обмоткой и подвергали одноосному статическому сжатию с помощью двух цилиндрических пуансонов диаметром 1 см, изготовленных из немагнитного материала. Образцы пород имели кубическую форму с ребром в 1 см. Давление на пуансоны регулировалось в пределах от атмосферного до 75 МПа. Постоянное магнитное поле ( $H_m = 0\text{--}30$  Э) создавалось по оси сжатия образца с помощью соленоида, охватывающего кварцевую трубку. Для измерения СДПГ образцов применялось синусоидальное переменное магнитное поле  $h$  частотой 1 кГц.

Для создания НМА в образце при охлаждении от некоторой температуры  $T_x$  ( $T_x < T_c$ ) под действием статического давления образец нагревали от комнатной температуры  $T_k$  до  $T_x$  в присутствии поля  $H_m$  и давления  $P_x$ , определенное время выдерживали при данной температуре в магнитном поле под давлением, а затем охлаждали до  $T_k$  при одновременном действии  $H_m$  и  $P_x$ .

Далее, при снятом давлении измеряли скомпенсированные дифференциальные петли гистерезиса. СДПГ измеряли в переменном магнитном поле амплитудой  $h = 2H_T$ . Перетяжки наиболее четко видны именно при таких амплитудах.

ЭДС, образующую СДПГ, разлагали с помощью фильтров на гармоники, и измеряли амплитуды третьей и пятой гармоник ( $A_3$  и  $A_5$ ). Исследования показали, что наибольшую информацию о НМА в подобных экспериментах содержат именно эти гармоники. Далее образец нагревали и регистрировали изменение амплитуд гармоник в

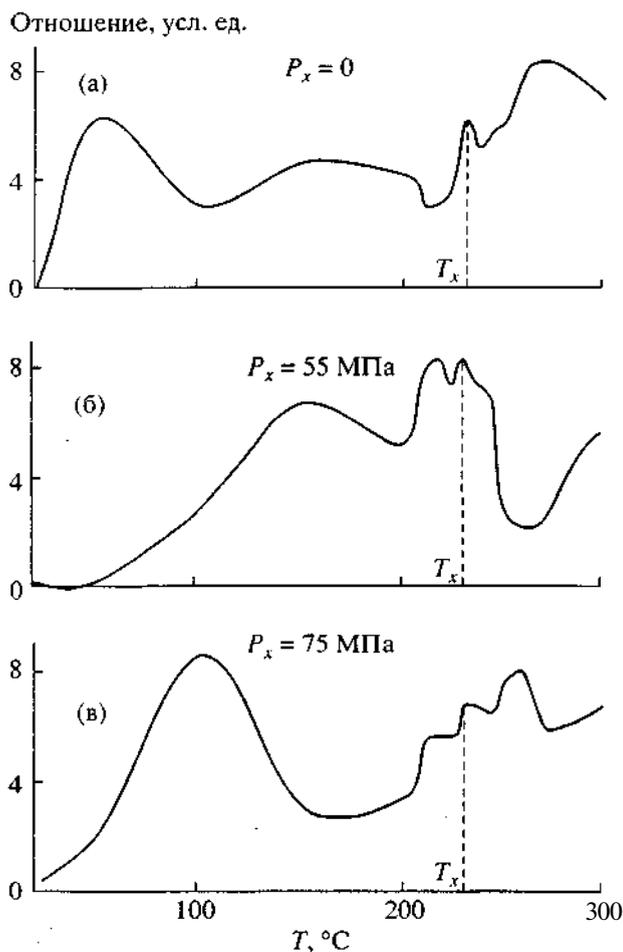


Рис. 2. Примеры графиков  $A_3/A_5 = f(T)$  образца, НМА которого ранее была создана при охлаждении от температуры  $230^\circ\text{C}$  в поле  $H_m = 10$  Э при разных давлениях  $P_x$ .

зависимости от температуры образца, т.е. определялись зависимости  $A_n = f(T)$  ( $n$  - номер выбранной гармоники). Определялись также зависимости отношения амплитуд выбранных гармоник от температуры, т.е. графики  $A_3/A_5 = f(T)$ .

После охлаждения образец размагничивался переменным магнитным полем с амплитудой 500 Э промышленной частоты для разрушения возможных следов перетяжки на петле гистерезиса, и в нем снова создавалась НМА при нагреве-охлаждении от той же температуры  $T_x$  в поле  $Y_1$ , но уже при более высоком давлении.

При создании НМА время выдержки образца в магнитном поле под давлением при температуре  $T_x$  составляло 20-25 минут. Этого времени достаточно, чтобы перетяжка на СДПГ достигла максимальной величины.

Исследования показали, что температуру предыдущего нагрева образца (температуру  $T_x$ ) можно определять не только по экстремумам на гра-

фиках  $A_n = f(T)$ , но и по локальным максимумам на графиках и  $A_3/A_5 = f(T)$ . Использование для определения  $T_x$  отношения гармоник во многих случаях предпочтительнее, чем определение температуры создания НМА по зависимостям  $A_n = f(T)$ . Часто амплитуды третьей и пятой гармоник в данных экспериментах меняются в противофазе. Поэтому их отношение более чутко реагирует на изменение перетяжки. В то же время при нагреве образца может меняться форма его петли гистерезиса. Причем часть этого изменения не связана с НМА. В результате меняется и отношение  $A_3/A_5$ . Но как правило эти изменения более плавные, захватывают большую область температур и резко отличаются от экстремумов на зависимостях  $A_3/A_5 = f(T)$ , обусловленных НМА.

Эксперименты показали, что давление влияет на температурную магнитную память. При создании НМА в отсутствие давления на графике  $A_3/A_5 = f(T)$  имеется ярко выраженный локальный максимум при температуре  $T_x$  (рис. 2а). Если же НМА была создана при охлаждении образца под давлением, то этот максимум начинает "плавать", становится более размытым. Его положение на зависимостях  $A_3/A_5 = f(T)$  смещается. Причем часто это смещение происходит в сторону более низких температур. Но иногда этот максимум смещается и в сторону более высоких температур.

Первые серии экспериментов показали, что с ростом величины давления  $P_x$ , локальные максимумы на графиках  $A_3/A_5 = f(T)$  немного "сползают" в область меньших температур. Однако в дальнейшем выяснилось, что на некоторых образцах наблюдается прямо противоположная тенденция - температура  $T_x$ , определяемая по зависимостям  $A_3/A_5 = f(T)$  имеет тенденцию к росту с увеличением давления. При всем этом не удалось обнаружить корреляцию состава и структуры магнитных зерен, содержащихся в породах, с ростом или понижением температуры  $T_x$ .

На рис. 2 приведены примеры графиков  $A_3/A_5 = f(T)$  образца лавы Курильских островов, НМА которого ранее была создана при охлаждении от температуры  $230^\circ\text{C}$  в поле  $H_m = 10$  Э при разных давлениях. Рост отношения  $A_3/A_5$  при небольших температурах объясняется относительно быстрым изменением формы петли гистерезиса. Как правило, это изменение обусловлено разрушением по-настоящему глубокой "стандартной" перетяжки, возникшей в районе нулевого магнитного поля. Эта "стандартная" перетяжка вызвана дезаккомодацией начальной магнитной восприимчивости [Вонсовский, 1971; Крупичка, 1976; Лесник, 1976] и легко разрушается при небольшом нагреве образца. Фактически участок зависимости  $A_3/A_5 = f(T)$  от 20 до  $100^\circ\text{C}$  является "нерабочим" при определении температуры  $T_x$ . Температура создания НМА  $T_x$  надежно фиксируется породой

в том случае, если она превышает 80-100°C [Вечфинский, 1987].

Из графиков на рис. 2 видно, что локальный максимум  $A_3/A_5 = f(T)$ , отмечавший температуру  $T_x = 230^\circ\text{C}$  при создании НМА при нулевом давлении, распадается на два максимума при  $P_x = 55$  МПа. При еще большем давлении ( $P_x = 75$  МПа) при температурах 210-250°C возникают уже три максимума.

В данном случае все же можно определить  $T_x$  по второму максимуму, возникающему при создании НМА под давлением. Как правило, пику на зависимостях  $A_3/A_5 = f(T)$ , по которым определяется  $T_x$ , предшествует, а затем и следует падение отношения  $A_3/A_5$ . Поэтому в случае расплывания и "расщепления" экстремума графика  $A_3/A_5 = f(T)$  температура создания НМА определяется по среднему максимуму.

Из этого следует, что с ростом давления (подчеркиваем, что именно в данном примере) по локальному максимуму графика  $A_3/A_5 = f(T)$  определяется немного завышенная температура  $T_x$ . В данном случае это превышение составило  $5^\circ\text{C}$ . При давлениях более 80 МПа начиналось разрушение образца (образец "трещал", появлялись трещины и сколы).

На рис. 3 приведены примеры зависимостей  $A_3 = f(T)$  образца базальтовой лавы Камчатки, перетяжка на СДПГ которого наводилась при его охлаждении от температуры  $T_x = 145^\circ\text{C}$  в поле  $H_m = 10$  Э при различных давлениях. Видно, что и здесь с ростом  $P_x$  сначала происходит размытие максимума, по которому определяется  $T_x$ , а затем его расщепление. При этом при больших давлениях этот максимум смещается в область более низких температур. Т.е. в данном случае, при больших  $P_x$  ферромагнитные минералы породы зафиксировали не ту температуру, при которой создавалась НМА, а несколько меньшую.

Эксперименты показали, что смещение максимума, по которому определяется  $T_x$ , не превышает  $\pm 10^\circ\text{C}$ , даже если НМА в этих образцах создавалась при высоких давлениях, близких к давлению, при которых образец разрушается.

Однако давление не только негативно влияет на эффекты НМА. Величина перетяжки на СДПГ сильно зависит от температуры, при которой происходило охлаждение образца. Причем эта зависимость может сильно меняться не только для разных пород, но и для образцов, взятых из коллекции однотипных пород. Это связано с тем, что величина НМА определяется коэффициентами диффузии различных примесей, входящих в состав ферромагнитных минералов, а набор этих примесей может сильно различаться от образца к образцу. В то же время эксперименты показали, что чем выше давление  $P_x$ , тем слабее зависимость параметров перетяжки от температуры

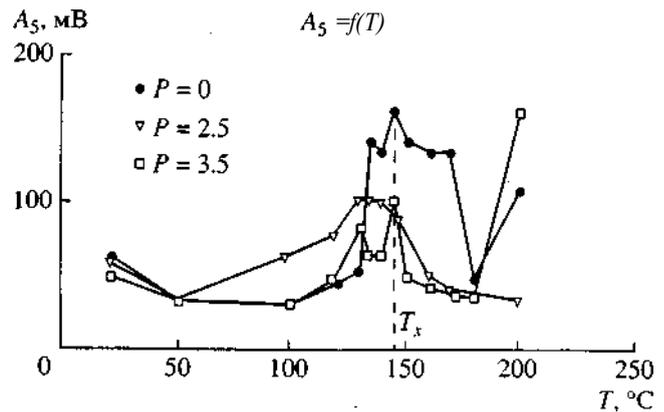


Рис. 3. Примеры зависимостей  $A_3 = f(T)$  образца базальтовой лавы Камчатки, перетяжка на СДПГ которого наводилась при его охлаждении от температуры  $T_x = 145^\circ\text{C}$  в поле  $H_m = 10$  Э при различных давлениях: 1- $P_x = 0$ ; 2- $P_x = 55$  МПа; 3- $P_x = 15$  МПа.

[Ершов, 1999]. Таким образом, НМА, наводимая в природных условиях в глубинных породах, практически не должна зависеть от температуры. Причем интересно, что для некоторых температур при больших давлениях величина перетяжки может даже увеличиться.

## ВЫВОДЫ

Из сказанного следует, что присутствие давления при создании в породе НМА затрудняет определение  $T_x$ , т.е. давление влияет на температурную память. Это выражается не только в возникновении новых локальных экстремумов на зависимостях  $A_3/A_5 = f(T)$ , но и в том, что искажения этих зависимостей, связанных с НМА, растягиваются на больший интервал температур. Кроме того, при создании НМА под давлением величина перетяжки тем в основном меньше, чем выше  $P_x$ , при этом естественно становятся меньше амплитуды гармоник, связанных с эффектами НМА.

Однако при всем при этом температура создания НМА, определяемая по экстремумам на графиках  $A_3/A_5 = f(T)$ , мало отличается от истинной  $T_x$  даже в том случае, когда НМА наводится при давлении, близком к давлению, при котором происходит разрушение образца.

Таким образом, даже при глубинном залегании породы, по-видимому, фиксируют температуру, очень близкую к температуре своего прогрева, но определять ее значительно сложнее, чем для пород, лежащих близко к поверхности.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта, предоставленного Московской государственной геологоразведочной академией (грант №Е02-9.0-138).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Большаков А.С., Виноградов Ю.К.* Обратимая магнитная восприимчивость термонамагниченного магнетита // Докл. АН СССР. 1986. Т. 296. № 4. С. 74-86.
- Вечфинский В.С., Виноградов Ю.К., Мострюков А.О.* Использование перминвар-эффекта термонамагниченных пород при определении палеонапряженности // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1984. № 3. С. 63-69.
- Вечфинский В.С., Филлин С.И.* Термостабилизация наведенной магнитной анизотропии и магнитная память многодоменных титаномагнетитов // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1987. № 10. С. 65-70.
- Вечфинский В.С., Цельмович В.А.* Температурная память наведенной магнитной анизотропии и структура титаномагнетитовых зерен горных пород // Физика Земли. 1992. № 5. С. 111-120.
- Вечфинский В.С.* Магнитный геотермометр // Физика Земли. 1994. № 1. С. 75-78.
- Вонсовский С.В.* Магнетизм. М.: Наука. 1971. 1032 с.
- Ершов А.Н., Вечфинский В.С., Ларионов Д.А., Бубнов А.А., Цельмович В.А.* Влияние давления на наведенную магнитную анизотропию горных пород // Физика Земли. 1999. № 4. С. 75-80.
- Крупичка С.* Физика ферритов и родственных им магнитных окислов. М.: Мир. 1976. Т. 2. 504 с.
- Лесник А.Г.* Наведенная магнитная анизотропия. Киев. 1976. 163 с.
- Шашканов В.А.* Магнитная текстура горных пород и их палеомагнитная информативность. Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Л. 1985. 26 с.