

НАУЧНЫЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 550.382.3

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА НАВЕДЕННУЮ МАГНИТНУЮ АНИЗОТРОПИЮ ГОРНЫХ ПОРОД

© 1999 г. А. Н. Ершов, В. С. Вечфинский, Д. А. Ларионов,
А. А. Бубнов, В. А. Цельмович

*Рыбинская государственная авиационная технологическая академия
Геофизическая обсерватория "Борок" ОИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва*

Поступила в редакцию 13.01.97 г.

Исследуется влияние одноосного статического механического давления на параметры перетяжки, возникающей на частных петлях гистерезиса намагниченности горных пород, при создании в них наведенной магнитной анизотропии (НМА). НМА создается в образцах пород под давлением как при комнатной температуре, так и в результате их охлаждения от температур ниже температуры Кюри магнитных минералов, содержащихся в породе.

В 1928 г. Эльмин впервые наблюдал перетянутые частные петли магнитного гистерезиса на сплавах никеля и кобальта. Сплавы предварительно охлаждались от температур $T < T_c$ (T_c - температура Кюри) в нулевом магнитном поле. Перетяжка на петлях гистерезиса была вызвана тем, что магнитная восприимчивость не зависела или зависела слабо от напряженности магнитного поля (H) при значениях H , близких нулю (так называемый перминвар-эффект [Крупичка, 1977]). Теоретическое объяснение перминвар-эффекта было дано в 50-х годах Неелем, Танигучи и другими. Перетяжка на петлях гистерезиса вызывается диффузионной стабилизацией доменных границ (ДГ). Эта стабилизация позволяет сохранить определенное упорядочение, созданное при некоторой температуре, что проявляется в возникновении дополнительной анизотропии, которая была названа индуцированной или наведенной магнитной анизотропией (НМА) [Крупичка, 1977]. На горных породах перетянутые петли гистерезиса намагниченности впервые наблюдал Радхакришнамурти при исследовании базальтовых лав [Paleogeophysics ... 1970].

Последующие эксперименты показали, что после охлаждения образцов пород, содержащих магнитные минералы, от температур $T_x < T_c$ в постоянном магнитном поле H_x на их частных петлях гистерезиса намагниченности могут наблюдаться перетяжки при значениях магнитных полей, близких по напряженности полю H_x . Эти перетяжки очень малы. Схематически (с сильным увеличением данного эффекта) перетянутая в районе поля H_x частная петля гистерезиса показана на рис. 1а. Реальный эффект примерно в 50—100 раз меньше и не заметен на частных петлях гистерезиса, измеряемых обычными методами [Вечфинский, 1984]. Причем подобные перетяжки наблюдаются только при измерении петель гистерезиса об-

разца в направлении, параллельном создавшему их полю J_x , и не обнаруживаются в перпендикулярном направлении. Таким образом, в ферромагнитных минералах, содержащихся в породах, возможно возникновение НМА, которая несет информацию о напряженности магнитного поля, в котором происходило охлаждение породы. Следует заметить, что в магнетизме горных пород в настоящее время вместо термина "наведенная магнитная анизотропия" чаще применяется термин "магнитная текстура" [Шашканов, 1985]. Однако понятие магнитной текстуры значительно шире и охватывает больший круг эффектов, чем это рассматривается в данной статье. Поэтому здесь мы ограничились старым понятием.

Нагрев пород в условиях глубинного залегания происходит под давлением окружающих толщ. Поскольку многие петрофизические свойства пород зависят от величины и характера этого давления (P_x), естественно предположить, что и эффекты магнитной памяти НМА также могут зависеть от P_x .

Цель данной работы состояла в исследовании влияния P_x на способность НМА пород фиксировать информацию о напряженности магнитного поля, в котором она создавалась.

Исследования проводились на изверженных породах из различных палеомагнитных коллекций Камчатки, Курильских островов, Монголии, Дальнего Востока. Исследовались базальтовые лавы, содержащие многодоменные зерна магнетита и титаномагнетитов с различным содержанием титана и температурами Кюри 200-570°C. Состав и структура магнитной фракции пород была исследована методами термомагнитного анализа (по кривым $I_s = f(T)$, $I_{rs} = f(T)$, $I_{tr} = f(T)$). Некоторые образцы были исследованы на электронно-зондовом микроанализаторе "Camebax".

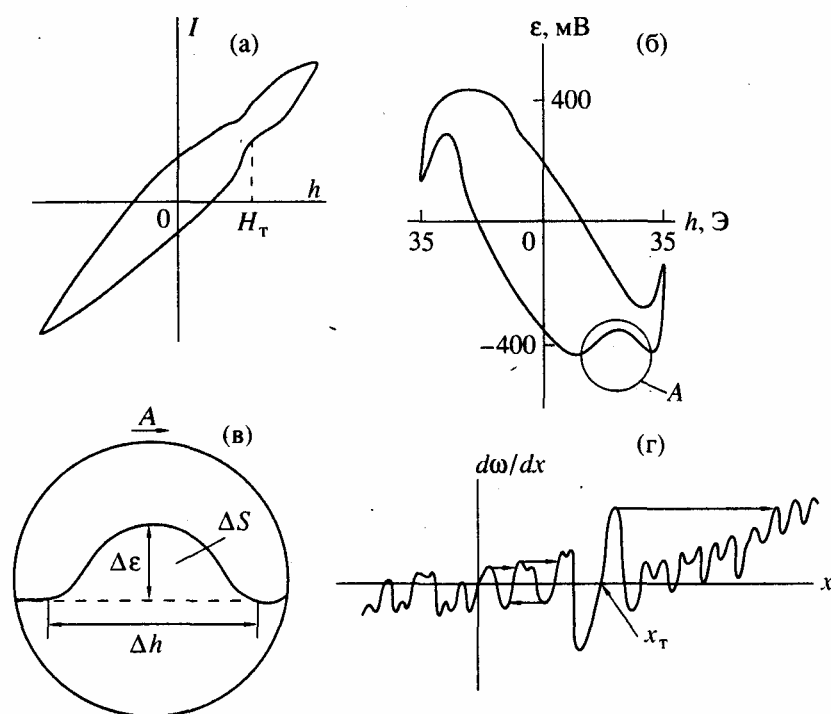


Рис. 1. (а) – схематический вид перетянутой в поле H_T частной петли гистерезиса; (б) – перетянутая скомпенсированная частная петля гистерезиса; (в) – способы отсчета параметров перетяжки; (г) – распределение энергии 180-градусной доменной границы в ферримагнетике, обладающем НМА.

При изучении эффектов магнитной памяти НМА измерялись так называемые скомпенсированные дифференциальные частные петли гистерезиса намагниченности (СДПГ). СДПГ представляют собой э. д. с. (ϵ), возникающую в датчике, измеряющем намагниченность образца породы, находящемся в переменном магнитном поле h . От обычных дифференциальных петель гистерезиса СДПГ отличаются тем, что в них отсутствует (скомпенсирована) первая гармоника э. д. с., которая практически не несет информацию о НМА, а лишь перегружает измерительный канал [Вечфинский, 1984]. Пример осциллограммы перетянутой СДПГ приведен на рис. 1б. При измерениях петель гистерезиса применялось синусоидальное переменное магнитное поле h частотой 1 кГц.

В исследованиях использовались образцы пород кубической формы с ребром в 1 см. Для создания НМА под давлением при различных температурах, образцы помещались в кварцевую трубку с нагревательной обмоткой и подвергались одноосному статическому сжатию с помощью двух цилиндрических пуансонов диаметром 1 см. Давление на пуансоны регулировалось в пределах 0–100 МПа. Постоянное магнитное поле ($H_T = 0\text{--}30 \text{ Э}$) создавалось по оси сжатия образца с помощью соленоида, охватывающего кварцевую трубку. Во всех экспериментах при создании НМА магнитное поле включалось после приложения нагрузки и выключалось до ее снятия. То

есть магнитное поле действовало только на нагруженный образец.

Было изучено влияние давления на величину перетяжки, создаваемой на СДПГ при комнатной температуре (T_k). Для наведения НМА в этом случае на образец породы при комнатной температуре действовали одновременно магнитное поле H_T и давление P_x в течение определенного времени ($\tau_{\text{выд}}$). Затем при отключенном H_T и снятом давлении измерялась СДПГ образца. Далее, образец снова выдерживался в течение того же $\tau_{\text{выд}}$ в том же H_T , но при большом давлении. Таким образом измерялась зависимость параметров перетяжки от P_x . Перед наведением перетяжки при следующем значении P_x , образец размагничивался переменным магнитным полем $h = 500 \text{ Э}$ для того, чтобы уничтожить предыдущую перетяжку.

В качестве параметров, характеризующих перетяжку были выбраны ее ширина (Δh), глубина ($\Delta \epsilon$) и площадь (ΔS). Способ отсчета этих параметров на перетянутой в районе поля H_T СДПГ показан на рис. 1в. СДПГ измерялись на новой установке, имеющей значительно большую чувствительность, чем устройство, описанное в [Вечфинский, 1984]. При измерении петли гистерезиса ее изображение на экране осциллографа помещалось таким образом, чтобы перетяжка находилась в центре экрана и занимала как можно большую площадь, что достигалось переключением диапазонов чувствительности осциллографа.

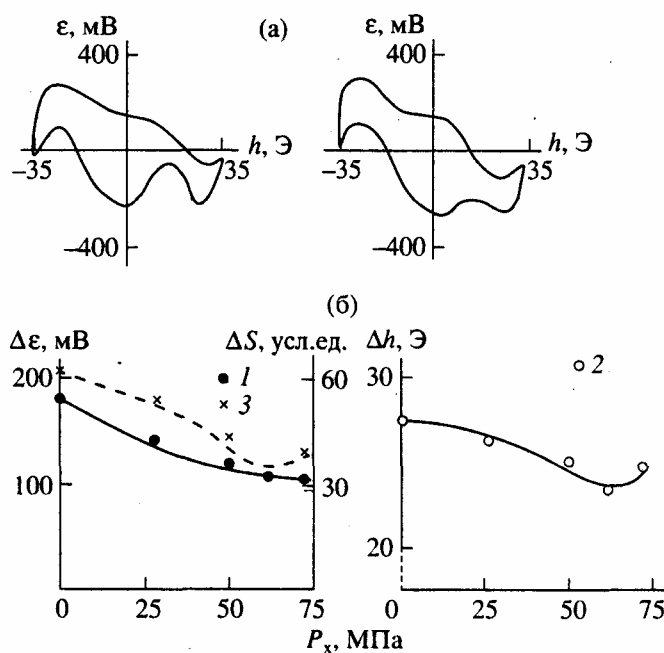


Рис. 2. (а) – примеры перетянутых СДПГ образца лавы Камчатки, после создания в нем НМА при разных P_x при комнатной температуре (слева – $P_x = 0$, справа – $P_x = 70$ МПа, $H_T = 15$ Э, $\tau_{\text{выд}} = 10$ мин); (б) – зависимости $\Delta\epsilon = f(P_x)$ (1), $\Delta h = f(P_x)$ (2) и $\Delta S = f(P_x)$ (3) того же образца.

фа. ΔS равнялась площади изображения перетяжки, выраженной в условных единицах. Погрешность измерения параметров определялась толщиной луча осциллографа и в зависимости от глубины перетяжки и магнитной восприимчивости образцов не превышала 5–7%. Как уже говорилось, возникновение перетяжки на СДПГ вызвано диффузионной стабилизацией доменных границ. В результате этой стабилизации на пути ДГ возникают так называемые “гигантские” потенциальные барьеры. На рис. 1г приведена схема распределения градиента энергии 180-градусной границы вдоль направления ее движения (ОХ) [Vetchinsky, 1996]. Расположение “гигантских” барьеров (X_T) определяется напряженностью H_T . Для различных ДГ в многодоменных ферромагнетиках существует дисперсия в координатах X_T и высотах (т.е. энергиях) этих барьеров. Если бы этой дисперсии не было, то перетяжки на СДПГ были бы узкие, примерно одинаковой высоты и ширины. Мы связываем $\Delta\epsilon$ в основном с высотами барьеров, а Δh – с дисперсией X_T . Конечно эта связь не однозначна. На все параметры перетяжки влияют как высота, так и расположение “гигантских” барьеров, но очевидно, что их энергия сильнее влияет на глубину, а дисперсия X_T – на ширину перетяжки. Таким образом параметры Δh и $\Delta\epsilon$ могут качественно характеризовать статистический разброс в положении и энергии потенциальных барьеров. Площадь перетяжки ΔS характеризует общие потери энергии на перемагничивание, возникающие при взаимодействии доменных границ с “гигантскими” барьерами.

Пример перетянутых СДПГ, измеренных на образце лавы Камчатки, после создания в нем НМА при разных P_x при комнатной температуре приведен на рис. 2а. На рис. 2б показаны зависимости $\Delta\epsilon$, Δh , $\Delta S = f(P_x)$ того же образца. Из экспериментов следует, что с ростом давления $\Delta\epsilon$ на всех исследованных образцах уменьшается. Поведение графиков Δh , $\Delta S = f(P_x)$ не столь однозначное. Во всех случаях ширина и площадь перетяжки первоначально резко падает с ростом давления, но при дальнейшем увеличении P_x иногда происходит небольшой рост Δh и ΔS . Но в основном все параметры перетяжки уменьшаются с возрастанием P_x . Таким образом, с ростом P_x величина наводимой при T_k магнитной анизотропии в основном уменьшается. В данное время не удалось выявить корреляцию вида зависимостей $\Delta\epsilon$, Δh , $\Delta S = f(P_x)$ с составом и структурой пород. Максимальная величина P_x выбиралась такой, чтобы не допустить разрушения образца. В тех случаях, когда образец начинал разрушаться (в нем появлялись трещины и сколы) все параметры перетяжки резко уменьшались.

НМА наводилась в породах также в процессе охлаждения их от различных температур $T_x = 100, 150, 200^\circ\text{C}$ при воздействии механического давления разной величины. В этом случае, образец породы нагревался до T_x в присутствии магнитного поля и внешнего давления, выдерживался при T_x определенное время $\tau_{\text{выд}}$ и охлаждался до комнатной температуры. СДПГ образца снимались в отсутствие P_x . Охлаждение от разных T_x велось с одинаковыми скоростями. Таким образом, иссле-

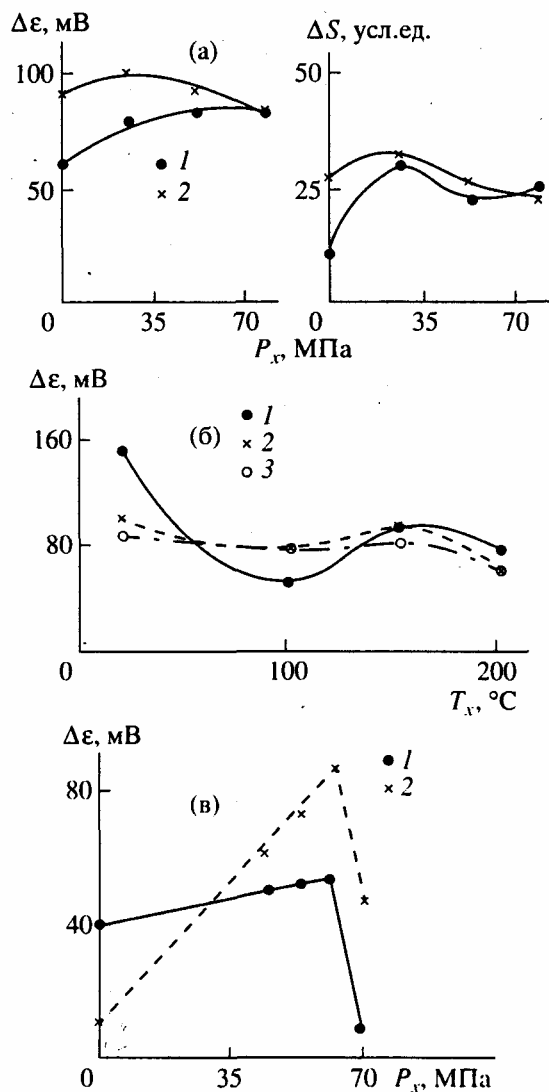


Рис. 3. (а) – примеры зависимостей параметров перетяжки, полученной при охлаждении образца под давлением от температур 100° (1) и 150°C (2) ($H_T = 10$ Э); (б) – зависимости глубины перетяжки, созданной в процессе охлаждения образца под одним и тем же давлением, но от разных температур T_x (1 – $P_x = 0$, 2 – $P_x = 35$ МПа, 3 – $P_x = 60$ МПа); (в) – примеры графиков $\Delta\epsilon = f(P_x)$ ($T_x = 100^\circ\text{C}$), полученных до (1) и после (2) воздействия на образец h .

довались зависимости $\Delta\epsilon$, Δh , $\Delta S = f(P_x, T_x)$. Перед каждым нагревом образец размагничивался переменным магнитным полем $h = 500$ Э.

Эксперименты показали, что параметры перетяжек на СДПГ, полученных в результате охлаждения образца породы от одной и той же температуры T_x в одном и том же поле H_T , сначала возрастают с ростом P_x , а затем начинают уменьшаться. Замечено, что для меньших температур ($T_x < 150^\circ\text{C}$) параметры перетяжек возрастают с увеличением P_x значительно быстрее, чем для $T_x > 150^\circ\text{C}$ (т.е. величины производных $d\Delta\epsilon/dP_x$, dh/dP_x , dS/dP_x больше при $T_x < 150^\circ\text{C}$). На рис. 3а

показаны примеры графиков $\Delta\epsilon$, $\Delta S = f(P_x, T_x)$ для $T_x = 100^\circ\text{C}$ и 150°C , полученные на образце лавы Камчатки.

Исследовались также зависимости величины перетяжек, полученных при одних и тех же значениях P_x и H_T , в результате охлаждения образца от разных температур T_x . Результаты экспериментов показали, что чем больше давление, тем слабее зависимость параметров перетяжки от температуры. На рис. 3б приведены графики $\Delta\epsilon = f(T_x)$ при трех значениях P_x .

Известно, что переменное магнитное поле уничтожает перетяжки на петлях гистерезиса, кроме того обнаружено, что синусоидальное поле небольшой амплитуды ($h < 100$ Э) может само наводить перетяжки на СДПГ [Вечфинский, 1984]. Наши эксперименты выявили еще два эффекта, связанных с действием h на образцы пород, в которых ранее была наведена НМА.

Один из них заключается в следующем. В образце наводилась перетянутая СДПГ при его охлаждении от T_x в H_T под давлением. Далее образец размагничивался $h = 500$ Э и частотой 50 Гц. Ранее проведенные эксперименты показали, что поле такой амплитуды достаточно для полного уничтожения перетяжек. Лишь в некоторых случаях могут сохраняться ее слабые следы [Вечфинский, 1987]. Однако, частота h в этих экспериментах была равна 250 Гц (в некоторых случаях – 1 кГц). Наши исследования показали, что на некоторых образцах перетяжка на СДПГ возрастала в 2–3 раза после кратковременного (менее 1 сек) действия h частотой 50 Гц. Эта увеличенная перетяжка быстро исчезала (за первые десятки секунд) при измерении СДПГ в переменном магнитном поле с амплитудой равной 1.5–2 Нт. Перетяжка полностью разрушалась также в случае более длительного действия h или при повторном размагничивании образца. То есть кратковременное включение переменного поля может увеличить на некоторое время НМА образца. На рис. 3в приведен пример сравнения графиков $\Delta\epsilon = f(P_x)$ ($T_x = 100^\circ\text{C}$), образца лавы Камчатки, величина $\Delta\epsilon$ которого измерялась сразу после охлаждения до T_x (график 1) и после кратковременного действия переменного магнитного поля (график 2). Из рисунков видно существенное различие в этих зависимостях.

Если выдержать образец несколько дней в геомагнитном поле, то перетяжка, образованная полем H_T , может исчезнуть. СДПГ становится перетянутой в районе нулевого поля. После кратковременного воздействия на образец низкочастотного (50 Гц) h перетяжка в нулевом поле исчезает и возникает та, которая была наведена ранее в породе H_T .

Второй эффект заключается в том, что величина перетяжки на СДПГ зависит от частоты пе-

ременного магнитного поля, в котором измеряется петля гистерезиса. В этом случае НМА создавалась при охлаждении образца в некотором H_T от T_c . При комнатной температуре СДПГ измерялись в переменном магнитном поле с одинаковой амплитудой, но разной частоты. Эксперименты показали, что с ростом частоты величина перетяжки уменьшается. Различия в величине перетяжки особенно ярко были заметны для h с частотами $f = 1, 10$ кГц. $\Delta\epsilon$ при измерении СДПГ в поле с $f = 10$ кГц намного меньше.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Общеизвестно, что механические нагрузки приводят к перестройке доменной структуры ферро- и ферримагнетиков. Этот факт отмечался еще в работах Киренского, Бозорта, Шура и множества других авторов. Часто, приложение нагрузки приводит к увеличению числа доменов. Например, в ферримагнетиках со стабилизированными сложными доменными границами (ДГ), в которых присутствуют линии Блоха, при приложении нагрузки отдельные участки границ могут служить источниками зарождения новых доменов [Власко-Власов, 1976]. После снятия внешних напряжений доменная структура может возвратиться в исходное состояние.

При наведении перетяжек при комнатной температуре под давлением происходит следующее. В зернах ферримагнитных минералов, содержащихся в образцах пород, под воздействием механического давления происходит перестройка доменной структуры, возникают новые доменные границы и средний размер домена уменьшается. В работах [Власко-Власов, 1976; Paulus, 1971] отмечается, что при "дроблении" доменной структуры и росте числа новых (как правило относительно узких) ДГ, перетяжка на петле гистерезиса либо уменьшается, либо исчезает совсем. В нашем случае магнитное поле действует на образец с "раздробленной" доменной структурой. Перетяжки на петлях гистерезиса вызываются диффузионной стабилизацией ДГ. Предполагается [Крупичка, 1977], что при комнатной температуре стабилизации ДГ способствует перегруппировка в кристаллической решетке ферримагнетика легкоподвижных дефектов. Под воздействием магнитного поля ДГ сдвигаются из начального положения. Магнитная энергия кристаллической структуры изменяется. Измененная доменная структура стремится к состоянию с минимальной энергией. Подвижные дефекты диффундируют под действием магнитного поля и силы, возникающей со стороны ДГ. Происходит стабилизация доменных границ, на пути их движения возникают "гигантские" потенциальные барьеры, которые и вызывают перетяжки на петлях гистерезиса.

При температурах, близких к комнатной большую роль играет наличие ионов Fe^{2+} . Это связано

с тем, что в случае корреляции электронного обмена $Fe^{2+} \rightleftharpoons Fe^{3+}$ с миграцией вакансий благодаря действию электростатических сил возможно понижение энергетического барьера, преодолеваемого ионом при перескоке в соседнюю позицию [Крупичка, 1977].

В случае появления под воздействием давления новых ДГ они могут быть по крайней мере двух видов: 90-градусные, как бы замыкающие границы их породившие, и 180-градусные. Предыдущие исследования указывают на то, что перетяжки на СДПГ, несущие информацию о H_T и T_c , вызываются стабилизацией 180-градусных ДГ. В том случае, когда возникают дополнительные тонкие и легкоподвижные 180-градусные ДГ, увеличение их числа с ростом P_x затрудняет стабилизацию. Увеличивается число скачков Баркгаузена при воздействии на образец переменного магнитного поля, но одновременно уменьшается их амплитуда. Уменьшается также амплитуда "гигантских" скачков Баркгаузена, обусловленных "гигантскими" потенциальными барьерами, и, как следствие, уменьшаются перетяжки на СДПГ (уменьшается $\Delta\epsilon$). Начиная с некоторых величин P_x может увеличиться число этих скачков вследствие "дробления" ДГ и распада "гигантских" барьеров, что может привести к росту ширины перетяжки. Кроме того, с ростом P_x увеличиваются внутренние напряжения в кристаллической структуре ферримагнетика, которые препятствуют передвижению легкоподвижных дефектов, что также влечет падение $\Delta\epsilon$, и увеличению Δh .

Увеличение перетяжки с ростом P_x в случае создания НМА при охлаждении породы от T_c объяснить значительно сложнее. Однако и в этом случае можно сделать определенные предположения. С ростом температуры T_c уменьшается величина потенциальных барьеров на пути движения ДГ и дефектов решетки и одновременно увеличивается коэффициент диффузии. Т.е. диффузия дефектов идет интенсивнее. Это обеспечивает лучшие возможности для стабилизации ДГ. При охлаждении потенциальные барьеры (в том числе и "гигантские") возрастают. Это вызывает рост перетяжки и увеличивает ее стабильность по отношению к воздействию внешних факторов. Например, увеличивает ее стабильность по отношению к разрушающему действию переменного магнитного поля. Кроме того, при повышении температуры уменьшаются константы кристаллографической анизотропии и падают внутренние напряжения. Внешнее давление недостаточно для компенсации усиливающихся диффузионных процессов и уменьшения констант кристаллографической анизотропии. В то же время с ростом P_x возрастает энергия каждого диффундирующего дефекта [Крупичка, 1977] и, следовательно, возрастает энергия "гигантских" стабилизированных барьеров.

Что касается увеличения $\Delta\epsilon$ после кратковременного действия на образец породы переменного магнитного поля, то здесь ситуация значительно проще. В результате охлаждения от T_x происходит перестройка доменной структуры, возникают легкоподвижные ДГ, положение которых не коррелирует с "гигантскими" потенциальными барьерами. Это вызывает видимое уменьшение перетяжки на СДПГ [8]. Под воздействием h доменная структура как бы "очищается" от легкоподвижных границ, они поглощаются стабилизированными при охлаждении от T_x границами. Поле h разрушает также и стабилизированную доменную структуру, вызывающую появление перетяжек, но этот процесс более длительный. Поэтому, перетяжки на СДПГ, измеренной сразу после кратковременного действия h низкой частоты, ярче. Затем стабилизированная доменная структура, равновесное состояние которой нарушено переменным полем, разрушается, и перетяжка исчезает.

В том случае, когда образец выдерживался несколько дней в геомагнитном поле, также происходит перестройка доменной структуры, возникает перетяжка в районе нулевого магнитного поля. Действие h также возвращает эту структуру на короткое время в состояние, близкое тому, которое возникло после охлаждения породы от T_x в поле H_T .

Эксперименты показывают, что $\Delta\epsilon$ перетяжки, созданной при комнатной температуре во всех исследованных случаях уменьшается сравнительно монотонно с ростом P_x . В то же время графики Δh , $\Delta S = f(P_x)$ могут носить немонотонный характер. Это указывает на то, что с ростом давления при T_k уменьшается энергия "гигантских" потенциальных барьеров, но может возрастать их число или дисперсия X_T .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Главное, что показывают эксперименты, заключается в том, что внешнее механическое давление в сильной степени влияет на эффекты магнитной памяти НМА пород.

1. Эффекты НМА, создаваемой при комнатной температуре, уменьшаются с ростом давления.

2. Если НМА наводится в результате охлаждения породы от некоторой температуры T_x , то ее величина может возрастать с ростом P_x (в определенном интервале значений P_x , зависящим от T_x и структуры пород).

3. Ранее проведенные исследования показали, что эффекты НМА, создаваемой при охлаждении породы от некоторой температуры без внеш-

него давления, в сильной степени зависят от T_x . Результаты, представленные здесь, указывают на то, что НМА, наводимая при охлаждении породы от разных T_x , но при одном и том же P_x , тем меньше зависит от T_x , чем больше давление.

4. Действие переменного магнитного поля на эффекты памяти НМА намного сложнее, чем это предполагалось раньше. Переменное поле не только разрушает, но и создает свои перетяжки, а также может увеличивать их величину. В то же время с ростом частоты h эффекты НМА проявляются хуже.

В целом, эксперименты показывают, что НМА горных пород, созданная под давлением P_x , может нести в неявном виде информацию о его величине. Возможно, что дальнейшие исследования позволят найти функциональную связь P_x с параметрами перетяжки и позволят разработать метод определения палеодавления. Связь сжимающего давления с памятью НМА может оказаться полезной при решении некоторых задач геофизики.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта по фундаментальным исследованиям в области геофизики, предоставленным Санкт-Петербургским государственным университетом и Московской государственной геологоразведочной академией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вечфинский В.С., Виноградов Ю.К., Мострюков А.О. Использование пермивар-эффекта термонамагничен-ных пород при определении палеонапряженности // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1984. № 3. С. 63-69.
- Вечфинский В.С., Филин С.И. Термостабилизация наведенной магнитной анизотропии и магнитная память многодоменных титаномагнетитов // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1987. № 10. С. 65-70.
- Власко-Власов В.К., Дедух Л.М., Никитенко В.И. Доменная структура монокристаллов иттриевого ферро-граната // ЖЭТФ. 1976. Т. 71. Вып. 6(12). С. 2291-2303.
- Крупинка С. Физика ферритов и родственных им магнитных окислов. М.: Мир, 1977. Т. 2. 504 с.
- Шашканов В.А. Магнитная текстура горных пород и их палеомагнитная информативность. Автореф. дис. на соиск. уч. ст. д. ф.-м. н. Л.: ЛГУ, 1985. 26 с.
- Paleogeophysics*. Edited by Runcorn. London and New York: Academic Press, 1970. P. 223-234.
- Paulus M., Simonet W. Effect of the Formation of Stabilized and Movable Walls on the Shape of Hysteresis Loops // Phys. Stat. sol. (a). 1971. № 7. P. 459-468.
- Vetchfinsky, Ershov A.N., Larionov D.A. The method of high harmonics for determining reheating palaeotemperatures // Academy of Sciences of the Czech Republic. Stadia geoph. and geod. Prague. 1996. V. 40. P. 413^20.

Статья рекомендована к печати членом редколлегии доктором геол.-мин. наук А.Ф. Грачевым.