

УДК 552.21 (470.22)

Остаточная намагниченность различных генетических пород и руд Кольского региона под воздействием механических колебаний

А. М. Жирова

Геологический институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия;
e-mail: anzhelaz@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8602-661X>

Информация о статье

Поступила в редакцию
29.10.2018;

получена
после доработки
05.02.2019

Ключевые слова:

магнитоупругий эффект,
остаточная намагниченность пород

Реферат

В работе рассматриваются магнитоупругие явления в образцах горных пород. Исследования представляют интерес для решения проблем нелинейной геофизики, а также некоторых вопросов материаловедения. Отобраны магнетитсодержащие породы и руды из различных геологических структур Кольского региона с целью изучения магнитоупругих эффектов. Все образцы подвергнуты воздействию упругих механических колебаний в лабораторных условиях. Эксперимент осуществлялся в условиях изменения параметров воздействия акустических волн. Предварительно изучено влияние амплитуды используемого сигнала на магнитное состояние образцов на основе магнетитсодержащего амфиболита из структуры хребта Серповидный. По результатам эксперимента сделан вывод о целесообразности использования в дальнейшем импульсного сигнала с большой амплитудой. На основе пород с различным содержанием ферромагнетика изучено влияние направления сигнала относительно вектора остаточной намагниченности образцов. Значения естественной остаточной намагниченности используемых образцов варьируют от 100 А/м до 0,5 А/м. В ходе исследования установлено, что для породы с высоким содержанием магнетита наблюдается зависимость пространственного поведения вектора от направления акустического воздействия. В частности, при углах 100 и более градусов между направлением фронта акустической волны и вектором намагниченности образцов пространственное положение вектора существенно меняется. Для слабомагнитных образцов статистически значимые зависимости и закономерности не установлены. На заключительном этапе изучено влияние продолжительности воздействия упругих механических колебаний на магнитное состояние пород. Результаты исследования также указывают на взаимосвязь между влиянием данного параметра акустического воздействия и количеством магнитного вещества в породе. Так, в процессе акустического воздействия на образцы с высоким содержанием ферромагнетика наблюдается значительный отклик магнитного состояния образцов. В целом, сделан вывод о большей перспективности изучения магнитоупругих эффектов на сильномагнитных образцах по сравнению с образцами пород, содержащих меньшее количество ферромагнетика.

Для цитирования

Жирова А. М. Остаточная намагниченность различных генетических пород и руд Кольского региона под воздействием механических колебаний. Вестник МГТУ. 2020. Т. 23, № 1. С. 13–21. DOI: 10.21443/1560-9278-2020-23-1-13-21

Residual magnetization of various genetic rocks and ores of the Kola region under the influence of mechanical oscillations

Anzhela M. Zhirona

Geological Institute KSC RAS, Apatity, Murmansk region, Russia;
e-mail: anzhelaz@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8602-661X>

Article info

Received 29.10.2018;
received in revised
05.02.2019

Key words:

magnetoelastic effect,
residual rock magnetization

Abstract

The paper considers magnetoelastic phenomena in rock samples. Research is of interest for solving problems of nonlinear geophysics, as well as of some issues of materials science. Magnetite-bearing rocks and ores have been sampled in different geological structures of the Kola region in order to study their magnetoelastic properties. All samples have been subject to elastic mechanical oscillations in laboratory conditions. The experiment has been conducted under changing impact parameters of acoustic waves. The effect of signal amplitude on magnetic properties of the samples has been first studied using magnetite-bearing amphibolites from the Serpovidny Ridge structure. According to results of the experiment, it is considered reasonable to use a pulse signal with higher amplitude in the future. An effect of a signal direction regarding a vector of residual magnetization has been studied, using rocks with different ferromagnetic contents. Values of natural residual magnetization of the studied samples vary from 100 A/m to 0.5 A/m. The study has indicated some relation between a spatial behavior of a vector and a direction of the acoustic impact in rocks with high magnetite content. In particular, the spatial location of the vector changes considerably, when the angle between the direction of the acoustic wave front and the magnetization vector of samples is 100 degrees and more. No statistically significant relations or patterns have been identified for low-magnetic samples. At the final stage, the effect of duration of elastic mechanical oscillations impact on magnetic properties of rocks has been studied. Results of the research also indicate an interrelation between an impact of this acoustic effect and an amount of the magnetic matter in the rock. Thus, a significant response of the samples' magnetic state is registered during the acoustic impact on rocks with high ferromagnetic content. In general, it has been concluded that studying electromagnetic effects on high-magnetic samples is more promising compared to rock samples with lower ferromagnetic content.

For citation

Zhirona, A. M. 2020. Residual magnetization of various genetic rocks and ores of the Kola region under the influence of mechanical oscillations. *Vestnik of MSTU*, 23(1), pp. 13–21. (In Russ.) DOI: 10.21443/1560-9278-2020-23-1-13-21

Введение

Магнитоупругий эффект, как известно, связан с изменением магнитного состояния тела при механических напряжениях. При этом происходит изменение доменной структуры, которая определяет намагниченность вещества. Обратный магнитострикционный эффект достаточно хорошо изучен на кристаллах ферромагнетиков, однако не исключен и в таких сложных вещественных ансамблях, как горные породы. Более того, в настоящее время активно развивается направление контроля тектонического состояния горных массивов на основе анализа тектономагнитных аномалий (Тюремнов и др., 2008). Установлено, что намагниченность пород меняется под влиянием техногенных и природных процессов, а также статических нагрузок при высоких давлениях и температурах (Тюремнов, 2002; Исследования..., 1977; Лебедев и др., 1981; Фейман и др., 1977).

Целью работы является изучение характера изменений магнитных свойств горных пород под действием упругих механических колебаний. Зависимость остаточной намагниченности от деформации, детально изученная в магнитных кристаллах, остается недостаточно исследованной в таких сложных гетерогенных комплексах, как горная порода. В отношении этих объектов выполняемые исследования важны с точки зрения рассмотрения возможных механизмов электромагнитных возмущений (Электромагнитные..., 1982; Сурков, 2000). Рядом исследований (Электромагнитные..., 1982; Сурков, 2000; Соболев и др., 2001; Zhirova et al., 2013 и др.) показано, что часть этих эффектов, возможно, несет значение предвестников сильных землетрясений. Поэтому лабораторные наблюдения магнитоупругого эффекта могут быть полезны для определения деформаций в земной коре и диагностики напряженно-деформированного состояния в процессе подготовки землетрясений.

Материалы и методы

В настоящей работе магнито-акустические исследования выполнены на основе магнетитсодержащих пород и руд из следующих геологических структур Кольского региона: Ковдорский массив; структура хребта Серповидный; Оленегорская рудная структура; Ньюсюкская дайка Печенгского района, секущая породы Кольского составного террейна; Панская расслоенная интрузия и структуры Куру-Ваара Беломорского подвижного пояса. В процессе исследований менялись такие параметры ультразвукового прозвучивания (УЗП), как амплитуда колебаний, направление фронта акустической волны и время воздействия.

Исследование начато с изучения влияния амплитуды сигнала на намагниченность породы. Использован образец породы из структуры хребта Серповидный, который представлен магнетитсодержащим амфиболитом, условно обозначенным как СР001. Изучаемая порода (кубики СР001/02, СР001/05, СР001/06, СР001/10, СР001/16) была подвергнута воздействию механических колебаний с различной амплитудой. На первом этапе эксперимент выполнялся с использованием "монокромного сигнала, с относительно небольшой амплитудой, равной 5 В. При этом был задействован аппаратный комплекс, в который входит генератор синусоидального сигнала ГЗ-102. В дальнейшем в ходе эксперимента использовался импульсный сигнал с большей амплитудой в 20 В, воспроизводимый импульсным генератором ГИ-1" (Жирова, 2016, с. 493). Время ультразвукового воздействия обоих сигналов составляло 60 с. Циклическое ультразвуковое прозвучивание образца производилось по всем направлениям и чередовалось с этапами размагничивания (Р). Процедура магнитной чистки образцов является необходимым элементом данного эксперимента. На практике используются различные методы чистки, в том числе термальная (Щербаков и др., 2017; Песков и др., 2014; Кулакова и др., 2017; Голованова и др., 2017; Бахмутов и др., 2014; Гнибиденко и др., 2014) и переменным полем (Главацкий и др., 2016; Матюшкин и др., 2016; Zhirova, 2015). В настоящей работе магнитная чистка заключалась в воздействии на образец переменного по амплитуде синусоидального магнитного поля.

Изучалось влияние на остаточную намагниченность (ОН) не только амплитуды сигнала, но также и направления УЗП относительно вектора намагниченности при циклическом облучении и размагничивании породы (Жирова, 2012). Использовались образцы трех различных генетических типов пород с разным содержанием ферромагнетика. Это образцы: магнетит-кальцитовый породы КВ001 (4 кубика: КВ001/03; КВ001/04; КВ001/06; КВ001/07), магнетитсодержащего амфиболита СР001 (18 кубиков: СР001/01; СР001/02 и т. д.) и железистого кварцита ОЛ001 (10 кубиков: ОЛ001/01; ОЛ001/02 и т. д.). Названия отображают принадлежность к различным геологическим структурам: Ковдорскому массиву, структуре хребта Серповидный и Оленегорской рудной структуре. Изначальная намагниченность сильномагнитного образца КВ001 составляла около 100 А/м. Замеры значений намагниченности Оленегорского образца (ОЛ001) показали значения не более 32 А/м. Второй же образец (СР001) отличается минимальной естественной намагниченностью около 0,5 А/м. Образцы предварительно были подвергнуты процедуре магнитной чистки. Для используемых в исследовании пьезоэлектрических датчиков были построены амплитудно-частотные характеристики. С помощью специальной установки, включающей генератор импульсов, на образцы циклически воздействовали акустическими колебаниями в течение 60 с. При ультразвуковом облучении образцов происходила смена направления генерируемых колебаний относительно направления вектора намагниченности кубиков.

На заключительном этапе исследования также было изучено влияние на остаточную намагниченность образцов такого параметра, как время акустического воздействия. С этой целью анализировались образцы из Ковдорского массива, Ньюсюкской дайки Печенгского района, Панской расслоенной интрузии и структуры

Куру-Ваара (Беломорского подвижного пояса) (Жирова, 2015). При этом использовано 3 кубика магнетит-кальцитової породы (КВ01/08, КВ01/09, КВ01/10), 4 – габбро-норитового образца (ПАН01/01, ПАН01/02, ПАН01/03, ПАН01/04), 4 – ультраосновной породы (НЮС01/01, НЮС01/02, НЮС01/03, НЮС01/04) и 4 – метагаббро-норита (КР02/01, КР02/02, КР02/03, КР02/04). Все образцы размагничены переменным магнитным полем и подвергнуты трем циклам ультразвукового облучения. Воздействие на образцы производилось только в направлении максимальной оси намагниченности с нарастающим временем облучения.

Результаты и обсуждение

В ходе изучения влияния амплитуды сигнала на намагниченность породы получены следующие результаты. В начале исследования (с использованием сигнала с амплитудой 5 В) скачкообразные изменения ОН отмечаются только на 1-м этапе, который состоит из измерения естественной намагниченности (ЕН), первого прозвучивания (1 УЗП) и первого размагничивания (1 Р) (рис. 1, зона I). Согласно рис. 1 на графиках после участка с резкими изменениями значений намагниченности следует зона относительной стабильности ОН (рис. 1, зона II). Далее при воздействии на образец импульсного сигнала большой амплитуды (20 В) наблюдается увеличение намагниченности образцов (рис. 1, зона III), в дальнейшем значение модуля стабилизируется (рис. 1, зона IV). Как сообщается в работе (Жирова, 2015), использование сигнала с большей амплитудой позволяет получить более выраженный магнитный отклик образца.

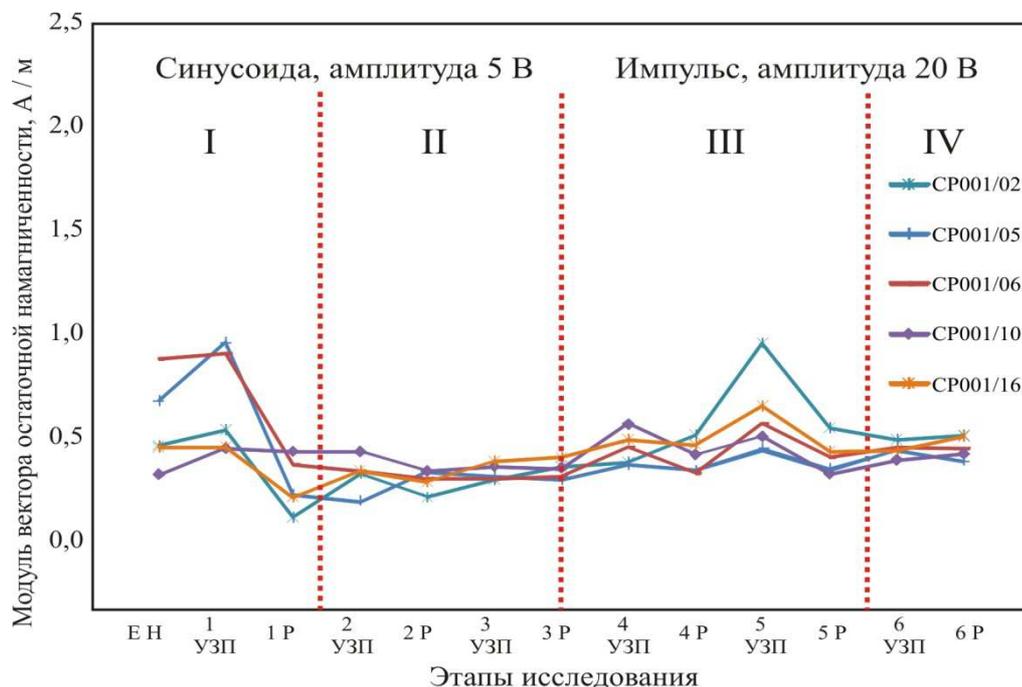


Рис. 1. Графики изменения намагниченности образца амфиболита из структуры хребта Серповидный при использовании монохромного и импульсного сигналов с различными значениями амплитуды

Fig. 1. Graphs of changing the magnetization of amphibolite of the Serpovidny Ridge structure while using the monochrome and pulse signals of the various amplitude values

В результате изучения влияния направления прозвучивания относительно вектора намагниченности при циклическом облучении и размагничивании образцов обнаружено следующее: для сильномагнитного образца КВ001 наблюдается зависимость пространственного поведения вектора от направления УЗП. Так, при больших углах между направлением фронта акустической волны и вектором намагниченности образцов (от перпендикулярного направления прозвучивания до противоположного направления относительно вектора намагниченности кубиков) пространственное положение вектора существенно меняется (рис. 2, б). При малых же углах, т. е. для направлений прозвучивания, близких к направлению самого вектора намагниченности, наблюдается более стабильное пространственное поведение вектора (рис. 2, а). Что касается модуля вектора ОН, то зависимость от направления УЗП не установлена.

При изучении влияния направления УЗП на магнитное состояние слабомагнитного образца СР001 установлено, что для больших углов прозвучивания (свыше 100°) изменение модуля вектора ОН не превосходит $0,5$ А/м (рис. 3, б). При акустическом воздействии с малыми углами прозвучивания (менее 70°) изменение модуля вектора ОН в целом не более $0,2$ А/м (рис. 3, а). Аномальными являются следующие значения модуля вектора на графике (рис. 3, а): $2,9$ А/м (угол УЗП составляет 55°); $0,45$ А/м (угол 60°) и $0,7$ А/м (угол 20°).

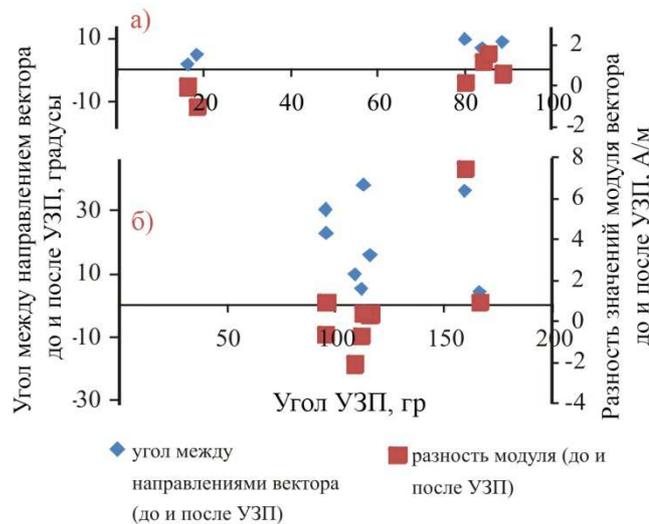


Рис. 2. Зависимость угла между направлениями вектора намагниченности (до УЗП и после) и разности значений модуля вектора (до УЗП и после) от направления прозвучивания для образца из Ковдорского массива: *а* – при малых углах УЗП; *б* – больших углах УЗП
 Fig. 2. The dependence of the angle between the directions of the magnetization vector (before and after the ultrasonic influence (UI)) and the difference of the vector module (before and after the UI) on the direction of ultrasonic influence on the sample of the Kovdor massiv: *a* – at small angles of the UI; *b* – at large angles of the UI

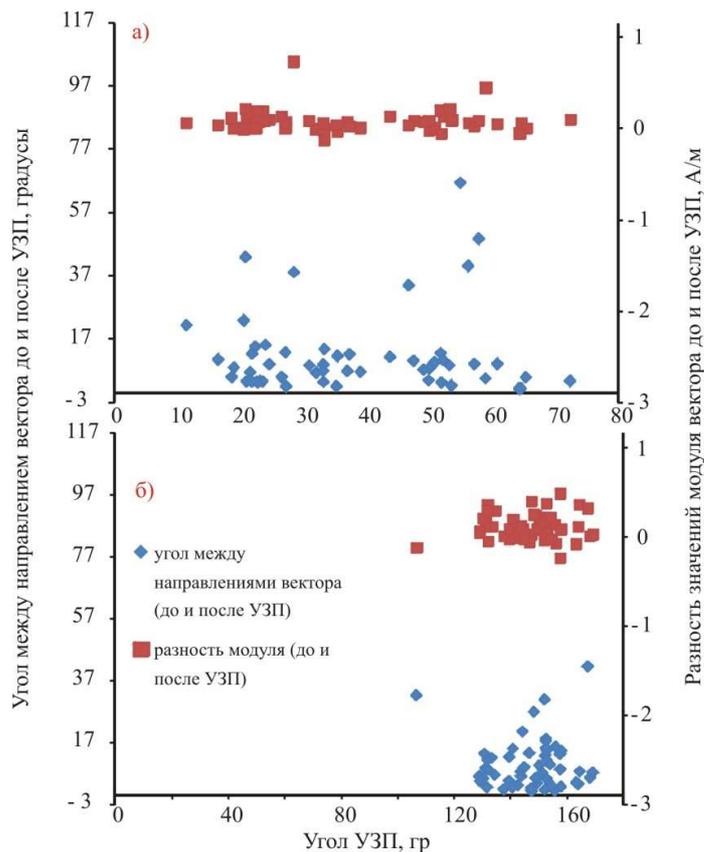


Рис. 3. Зависимость угла между направлениями вектора намагниченности (до УЗП и после) и разности значений модуля вектора (до УЗП и после) от направления прозвучивания для образца из структуры хребта Серповидный: *а* – при малых углах УЗП; *б* – больших углах УЗП
 Fig. 3. The dependence of the angle between the directions of the magnetization vector (before and after the ultrasonic influence (UI)) and the difference of the vector module (before and after the UI) on the direction of ultrasonic influence on the sample of the Serpovidny Ridge structure: *a* – at small angles of the UI; *b* – at large angles of the UI

В характере пространственного поведения вектора намагниченности образца можно отметить, что при малых углах УЗП наблюдается большая дисперсия отклонений вектора намагниченности, чем при углах свыше 120° . В ходе исследования железистого кварцита (образец ОЛ001) зависимости направления вектора намагниченности от направления акустического воздействия не установлено (рис. 4, а, б).

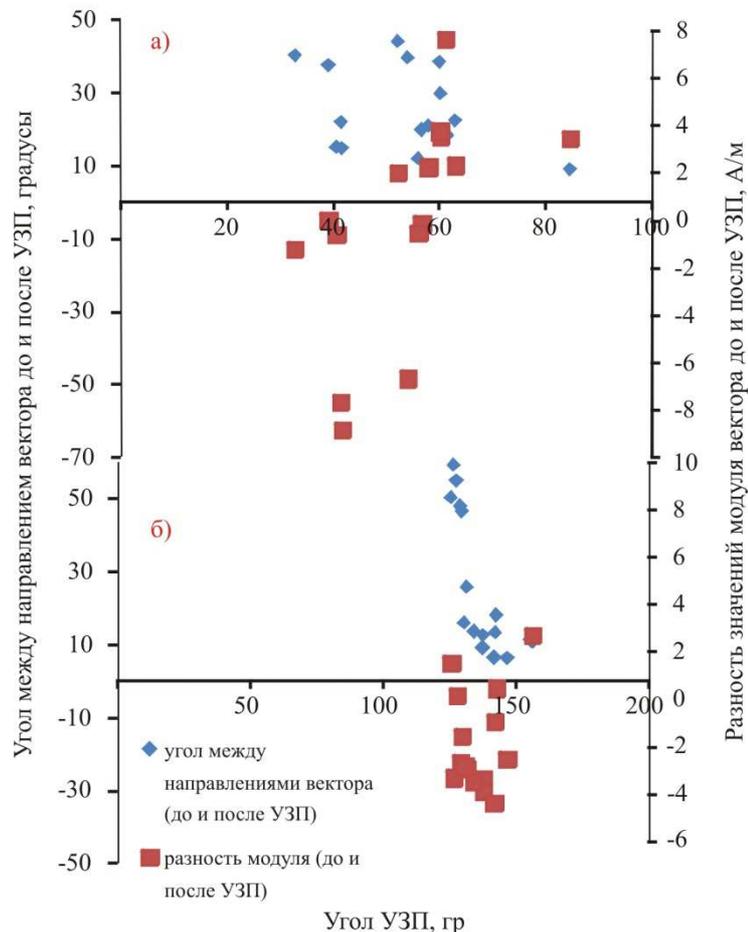


Рис. 4. Зависимость угла между направлениями вектора намагниченности (до УЗП и после) и разности значений модуля вектора (до УЗП и после) от направления прозвучивания для образца из Оленегорской рудной структуры: а – при малых углах УЗП; б – больших углах УЗП
Fig. 4. The dependence of the angle between the directions of the magnetization vector (before and after the ultrasonic influence (UI)) and the difference of the vector module (before and after the UI) on the direction of ultrasonic influence on the sample of the Olenegorsk ore structure: а – at small angles of the UI; б – at large angles of the UI

Таким образом, при изучении влияния направления акустического воздействия на магнитное состояние различных типов пород с разным содержанием магнитного минерала не выявлены статистически значимые зависимости и закономерности. Некоторое различие в характере пространственного поведения вектора ОН магнетит-кальцитовой породы при облучении под разными углами относительно максимальной оси намагниченности говорит о большей перспективности сильномагнитных пород и руд для исследования магнитоупругого эффекта (Жирова, 2015).

Результаты изучения влияния продолжительности прозвучивания на намагниченность пород значительно отличаются в зависимости от содержания в образце ферромагнитного вещества. Так, в процессе акустического воздействия на образцы с высоким содержанием ферромагнетика наблюдается значительный отклик магнитного состояния образцов. В работе (Жирова, 2014а) отмечалось, что зависимость вектора остаточной намагниченности от времени прозвучивания установлена на 1-м цикле облучения, суммарное время воздействия которого составляет 106 с. Градиент изменения значения модуля на этом участке несколько выше, чем на последующих двух циклах. Что касается образцов с небольшим содержанием магнетита, то эта зависимость не выявлена. Заметны слабые изменения модуля вектора ОН при акустическом воздействии на образцы пород (рис. 5).

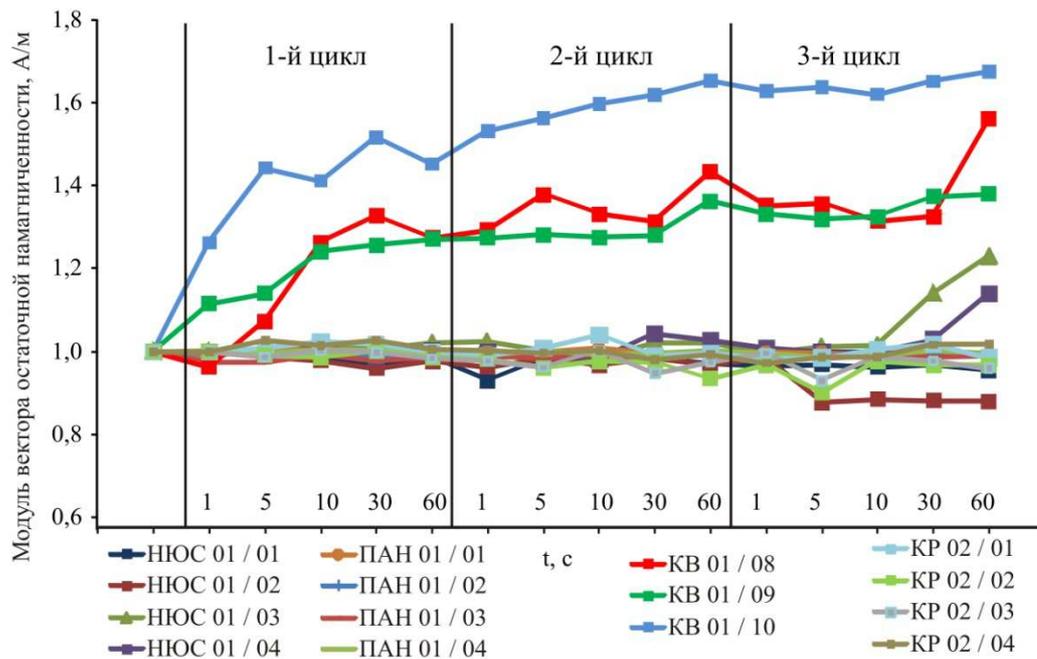


Рис. 5. Модуль намагниченности в зависимости от времени ультразвукового воздействия
 Fig. 5. The module of magnetization as a function of the ultrasonic influence time

Полученные результаты согласуются с результатами ранее проведенных исследований (Жирова, 2015; 2014б).

Заключение

Обобщая результаты эксперимента, связанного с изучением магнитоупругого эффекта в различных генетических типах пород, можно сделать вывод о большей перспективности сильномагнитных образцов по сравнению с образцами пород, содержащих меньшее количество ферромагнетика. Образец магнетит-кальцитовый породы, остаточная намагниченность которого более чувствительна к внешнему воздействию, содержит значительное количество ферромагнитного вещества. Ранее установлено (Пятаков, 2007), что изменение магнитных свойств существенно зависит от размеров магнитных частиц: наиболее стабильны при внешнем воздействии системы мелких частиц размером от 0,5 до 1 мкм. Под воздействием давления изменение намагниченности становится более значительным по мере роста размера частиц. Аналогичные результаты наблюдаются при воздействии упругими механическими колебаниями. Так, изменения магнитного состояния наиболее наглядны на образце породы, отобранной из Ковдорского массива, что объясняется значительными размерами зерен ферромагнетика в образце и структурой его доменов. В то же время породы, содержащие небольшие вкрапления магнетита, продемонстрировали слабую чувствительность магнитных свойств к внешнему ультразвуковому воздействию.

Благодарности

Исследования выполнены в рамках раздела "Инновационные технологии и методы сбора, обработки и анализа геолого-геофизических данных в целях эффективного и безопасного освоения глубоких горизонтов месторождений стратегических полезных ископаемых" по НИР № 0226-2019-0053.

Библиографический список

- Бахмутов В. Г., Поляченко Е. Б. Новые палеомагнитные данные по силурийским и девонским осадочным породам Подолии (Юго-Западная Украина) и кинематика Восточно-Европейской платформы в среднем палеозое // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2014. Т. 5, № 4. С. 1045–1058.
- Главацкий Д. В., Кузина Д. М., Герасименко Н. П., Бахмутов В. Г. Петромагнетизм и палеомагнетизм четвертичных лессово-почвенных отложений разреза Вязовок (Приднепровская низменность) // *Геофизический журнал*. 2016. Т. 38, № 6. С. 186–193. DOI: 10.24028/gzh.0203-3100.v38i6.2016.91903.
- Гнибиденко З. Н., Левичева А. В., Семаков Н. Н. Палеомагнетизм континентальных палеоген-неогеновых отложений Омской впадины (юг западной Сибири) // *Геология и геофизика*. 2014. Т. 55, № 7. С. 1113–1123.
- Голованова И. В., Данукалов К. Н., Кадыров А. Ф., Хидиятов М. М. [и др.]. Палеомагнетизм осадочных толщ и происхождение структур западного склона Южного Урала // *Физика Земли*. 2017. № 2. С. 148–156. DOI: 10.7868/S0002333717010057.

- Жирова А. М. Влияние ультразвуковых колебаний на остаточную намагниченность амфиболита хребта Серповидного // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2012. № 9. С. 145–147.
- Жирова А. М. Влияние упругих механических колебаний на магнитное состояние горных пород // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле : 4-я тектонофизическая конф. в ИФЗ РАН : материалы докладов Всерос. конф. с междунар. участием, 3–8 октября 2016 г., Институт физики Земли РАН, г. Москва : в 2 т. М. : ИФЗ, 2016. Т. 2. С. 491–494.
- Жирова А. М. Зависимость вектора остаточной намагниченности от параметров акустического воздействия для образцов различных генетических типов пород и руд Кольского п-ова // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2015. № 12. С. 90–94.
- Жирова А. М. Исследование акустического воздействия на остаточную намагниченность магнетитсодержащих пород из различных геологических структур Кольского полуострова // 15-я Междунар. конф. "Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле", г. Москва, 29 сентября – 1 октября 2014 г.: материалы конференции. М. : ИГЕМ РАН, 2014а. С. 70–73.
- Жирова А. М. Магнитный отклик пород с различным содержанием ферромагнетика на ультразвуковое воздействие // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2014б. № 11. С. 129–132.
- Исследования физических свойств минерального вещества Земли при высоких термодинамических параметрах. Киев : Наукова думка, 1977. 219 с.
- Кулакова Е. П., Веселовский Р. В. Стабильность пьезовязкой намагниченности долеритов в ходе температурной магнитной чистки // Научная конф. молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН, 24–26 апреля 2017 г. : тезисы докладов и программа конференции. М. : ИФЗ РАН, 2017. С. 41.
- Лебедев Т. С., Познанская Н. Ф., Тюремнов В. А. Характеристика магнитных параметров титаномagnetитовых пород глубинных зон земной коры Кольского полуострова // Геофизический журнал. 1981. Т. 3, № 2. С. 70–76.
- Матюшкин А. В., Балаганский В. В. Первые данные по палеомагнетизму палеопротерозойских пород Серповидной структуры (Кольский регион, северо-восток Балтийского щита) // Вестник МГТУ. 2016. Т. 19, № 1/1. С. 20–27. DOI: 10.21443/1560-9278-2016-1/1-20-27.
- Песков А. Ю., Диденко А. Н., Косынкин А. В. Петро- и палеомагнитные исследования кортландитов Кунманьёнского интрузивного комплекса // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2014. № 4(176). С. 32–38.
- Пятаков А. П. Нанокompозиты для магнитной электроники // Бюллетень Российского магнитного общества / гл. ред. А. М. Тишин. 2007. Т. 8, № 1. С. 1–14. URL: <http://www.amtc.ru/mago/>
- Соболев Г. А., Закржевская Н. А., Харин Е. П. О связи сейсмичности с магнитными бурями // Физика Земли. 2001. № 11. С. 9–17.
- Сурков В. В. Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах. М. : Из-во МИФИ, 2000. 447 с.
- Тюремнов В. А. О техногенной природе вторичной намагниченности горных пород // Вопросы теории и практики комплексной геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: тезисы докл. Междунар. школы-семинара. Апатиты, 3–8 октября 2002 г. М. : ИФЗ РАН, 2002. С. 85–87.
- Тюремнов В. А., Глазнев В. Н., Осипенко Л. Г. Магнитоупругие эффекты в хромитсодержащих породах массива Падос-тундра (Кольский полуостров) // Геофизический журнал. 2008. Т. 30, № 6. С. 141–146.
- Фейнман Р., Лейтон Р., Сендс М. Фейнмановские лекции по физике. В 9 т. Т. 7. Физика сплошных сред. М. : Мир, 1977. 228 с.
- Щербаков В. П., Латышев А. В., Веселовский Р. В., Цельмович В. А. Причина возникновения ложных компонент естественной остаточной намагниченности при стандартной пошаговой температурной чистке // Геология и геофизика. 2017. Т. 58, № 9. С. 1407–1421. DOI: <https://doi.org/10.15372/gig20170912>.
- Электромагнитные предвестники землетрясений / отв. ред. М. А. Садовский. М. : Наука, 1982. 88 с.
- Seismicity of the natural-technical systems in mining areas of the Murmansk region (NW Russia) / A. M. Zhirova, A. N. Vinogradov, D. V. Zhiron [et al.] // Vienna Congress on Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vienna, 8–30 August 2013 (VEESD 2013) / eds.: C. Adam, R. Heuer, W. Lenhardt & C. Schranz. Austria, 2013. Paper No. 324. URL: http://geoksc.apatity.ru/images/stories/Print/zhiron/papers/Seismicity%20of%20NTS_paper_324.pdf.
- Zhirova A. M. Magnetoelastic effects in the magnetite-calcite rocks of the Kovdor massif // Alkaline magmatism of the Earth and related strategic metal deposits: proceedings of XXXII International conference, Apatity, 7–14 August 2015. Apatity : [s. n.], 2015. P. 150–152.

References

- Bakmutov, V. G., Polyachenko, E. B. 2014. New paleomagnetic data on Silurian and Devonian sedimentary rocks from Podolia, SW Ukraine, and kinematics of East European platform in middle Paleozoic. *Geodynamics & Tectonophysics*, 5(4), pp. 1045–1058. (In Russ.)
- Glavatsky, D. V., Kuzina, D. M., Gerasimenko, N. P., Bakmutov, V. G. 2016. Petromagnetism and palaeomagnetism of Quaternary loess-soil sediments of Vyazivok section (Dnieper Lowland). *Geophysical Journal*, 38(6), pp. 186–193. DOI: 10.24028/gzh.0203-3100.v38i6.2016.91903. (In Russ.)
- Gnibidenko, Z. N., Levicheva, A. V., Semakov, N. N. 2014. Paleomagnetism of Paleogene-Neogene continental sediments of Omsk hollow (southern of West Siberia). *Russian Geology and Geophysics*, 55(7), pp. 1113–1123. (In Russ.)
- Golovanova, I. V., Danukalov, K. N., Kadyrov, A. F., Khidiyatov, M. M. et al. 2017. Paleomagnetism of sedimentary strata and origin of structures in western slope of South Urals. *Physics of Solid Earth*, 2, pp. 148–156. DOI: 10.7868/S0002333717010057. (In Russ.)
- Zhirova, A. M. 2012. Effect of ultrasonic vibrations on the residual magnetization of amphibolite of Serpovidny Ridge. *Proceedings of the Fersman Scientific Session of Geological Institute of KSC RAS*. Apatity, GI KSC RAS, 9, pp. 145–147. (In Russ.)
- Zhirova, A. M. 2016. Effect of elastic mechanical vibrations on the magnetic state of rocks. *Proceedings of the All-Russian Conference with International participation*, Moscow, pp. 491–494. (In Russ.)
- Zhirova, A. M. 2015. Dependence of the residual magnetization vector on parameters of acoustic influence for various genetic types of rocks and ores of the Kola Peninsula. *Proceedings of the Fersman Scientific Session of Geological Institute of Kola Scientific Centre of RAS*. Apatity, GI KSC RAS, 12, pp. 90–94. (In Russ.)
- Zhirova, A. M. 2014a. Research of the acoustic influence on residual magnetization of rocks containing magnetite from the various geological structures of the Kola Peninsula. *Proceedings of the International conference "Physical-chemical and petrophysical researches in the Earth's sciences"*, Moscow, Sept. 29–Oct. 1, 2014, pp. 70–73. (In Russ.)
- Zhirova, A. M. 2014b. Magnetic response of rocks with the different content of ferromagnet to ultrasonic influence. *Proceedings of the Fersman Scientific Session of Geological Institute of Kola Scientific Centre of RAS*. Apatity, GI KSC RAS, 11, pp. 129–132. (In Russ.)
- High pressure and temperature studies of properties of rocks and minerals. Kiev, Naukova Dumka, 1977. (In Russ.)
- Kulakova, E. P., Veselovsky, R. V. 2017. Stability of piezo-viscous magnetization of dolerites during magnetic thermal treatment. *Abstracts and Conference program "Scientific conference of young scientists and postgraduates of IPE RAS"*, Moscow, IFZ RAN, p. 41. (In Russ.)
- Lebedev, T. S., Poznanskaya, N. F., Tyuremnov, V. A. 1981. Characteristics of magnetic parameters of titanomagnetite rocks in deep crustal zones of the Kola Peninsula. *Geophysical Journal*, 3(2), pp. 70–76. (In Russ.)
- Matyushkin, A. V., Balagansky, V. V. 2016. First data on paleomagnetism of Palaeoproterozoic rocks of Serpovidny structure (Kola region, northeastern Baltic Shield). *Vestnik of MSTU*, 19(1/1), pp. 20–27. DOI: 10.21443/1560-9278-2016-1/1-20-27. (In Russ.)
- Peskov, A. Yu., Didenko, A. N., Kosynkin, A. V. 2014. Petro- and paleomagnetic studies of cortlandites of Kunmanyie igneous complex. *Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*, 4(176), pp. 32–38. (In Russ.)
- Pyatakov, A. P. 2007. Nanocomposites for magnetic electronics. *Bulletin of the Russian Magnetic Society*, 8(1), pp. 1–14. URL: <http://www.amtc.ru/mago/> (In Russ.)
- Sobolev, G. A., Zakrzhevskaya, N. A., Harin, E. P. 2001. On connection of seismicity with magnetic storms. *Fizika Zemli*, 1, pp. 9–17. (In Russ.)
- Surkov, V. V. 2000. Electromagnetic effects caused by earthquakes and explosions. Moscow. (In Russ.)
- Tyuremnov, V. A. 2002. About technogenic nature of secondary magnetization of rocks. *Abstracts of International school-seminar "Problems of theory and practice of complex geological interpretation of gravitational, magnetic and electric fields"*. Moscow, IFZ RAN, pp. 85–87. (In Russ.)
- Tyuremnov, V. A., Glaznev, V. N., Osipenko, L. G. 2008. Magnetoelastic effects in chromite-containing rocks of the Pados-tundra massif (Kola Peninsula). *Geophysical Journal*, 30(6), pp. 141–146. (In Russ.)
- Feiman, R., Leiton, R., Sends, M. 1977. Feiman lectures on physics. Moscow. (In Russ.)
- Shcherbakov, V. P., Latyshev, A. V., Veselovsky, R. V., Tselmovich, V. A. 2017. Origin of false components of NRM during conventional stepwise thermal demagnetization. *Russian Geology and Geophysics*, 58(9), pp. 1407–1421. DOI: <https://doi.org/10.15372/gig20170912>. (In Russ.)
- Electromagnetic precursors of earthquakes. 1982. Ed. M. A. Sadovsky. Moscow. (In Russ.)

Zhirova, A. M. 2015. Magnetoelastic effects in the magnetite-calcite rocks of the Kovdor massif. *Proceedings of XXXII International conference "Alkaline magmatism of the Earth and related strategic metal deposits"*, Apatity, 7–14 August 2015. Apatity, [s. n.], pp. 150–152.

Seismicity of the natural-technical systems in mining areas of the Murmansk region (NW Russia). 2013. *Proceeding of "Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2013 (VEESD 2013)"*, Vienna, 8–30 August 2013 (VEESD 2013) / eds.: C. Adam, R. Heuer, W. Lenhardt & C. Schranz. Austria, 2013. Paper No. 324. URL: http://geoksc.apatity.ru/images/stories/Print/zhirov/papers/Seismicity%20of%20NTS_paper_324.pdf.

Сведения об авторе

Жирова Анжела Максимовна – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209;
Геологический институт КНЦ РАН, канд. техн. наук, науч. сотрудник;
e-mail: anzhelaz@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8602-661X>

Anzhela M. Zhirova – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209;
Geological Institute KSC RAS, Cand. of Sci. (Engineering), Scientific Researcher;
e-mail: anzhelaz@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8602-661X>