

Магнитные свойства внеземного вещества и земных аналогов и их зависимость от облучений, температуры, ударных воздействий и статических давлений

Н. С. Безаева^{1,2*}

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра физики Земли
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Казанский федеральный университет,
Институт геологии и нефтегазовых технологий
Россия, 420008, ул. Кремлевская, 4/5

(Статья поступила 25.04.2016; Подписана в печать 05.05.2016)

Внеземное вещество в космическом пространстве подвергается воздействию ударов и корпускулярных облучений космическими лучами. В работе приведены результаты экспериментальных исследований зависимости магнитных свойств внеземного вещества — метеоритов и лунного грунта — и земных аналогов от воздействия гидростатических давлений, ударов и корпускулярных облучений (протонами, ионами аргона и ионами свинца). В работе также теоретически обоснована возможность и представлен физический механизм ударно-индуцированного и радиационно-индуцированного самообращения намагниченности ферромагнетиков, представляющих собой основную магнитообразующую фракцию метеоритов и горных пород.

PACS: 91.25.F; 96.30.Za; 96.12.Hg; 96.20.Jz УДК: 550.382.2; 523.6; 523.3; 523.4

Ключевые слова: внеземное вещество, магнитные свойства, удары, корпускулярные облучения

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на интенсивное развитие космических исследований, внеземное вещество — метеориты и лунный грунт [10], доставленный на Землю советскими автоматическими станциями «Луна-16», «Луна-20» и «Луна-24» и американскими пилотируемыми экспедициями «Аполлон» — было и остается единственным источником информации о палеомагнитных полях на разных этапах протопланетной и ранней планетной истории Солнечной системы.

Как известно, внеземное вещество в космическом пространстве подвергается воздействию двух физических процессов: ударов и корпускулярных облучений. Следы ударных (шоковых) воздействий в виде метеоритной бомбардировки поверхности твердых тел Солнечной системы видны на сильно кратеризованных поверхностях Луны, планет земной группы и астероидов. Облучения в космическом пространстве можно разделить на три компонента: большие потоки низкоэнергетичных частиц солнечного ветра (далее SW, от англ. «solar wind»), меньшие потоки высокоэнергетичных галактических космических лучей (далее GCR, от англ. «galactic cosmic rays») и периодические интенсивные потоки частиц солнечных вспышек (далее SEP, от англ. «solar energetic particles») с типичными энергиями порядка 1 кэВ, ≥ 1 ГэВ и ≥ 1 МэВ, соответственно. Влиянием SW можно пренебречь ввиду небольшой проникающей способности в вещество (~ 1 нм). Космические лучи состоят в основном из протонов (p) и ядер гелия (${}^4\text{He}$) с типичными отношениями ${}^4\text{He}/p \sim 0.1$ и ~ 0.02

для GCR и SEP, соответственно, и характеризуются более глубокой проникающей способностью: от ~ 1 мкм до ~ 1 мм для SEP и от ~ 1 см до ~ 1 м для GCR. Поток более тяжелых ионов (с атомным номером $Z \geq 6$) составляет в GCR $\sim 1\%$.

Понимание воздействия вышеперечисленных физических процессов, имеющих место в Солнечной системе, на магнитные свойства внеземного вещества является ключевым для правильной интерпретации палеомагнитного сигнала и других магнитных свойств метеоритов и лунного грунта, а также понимания и корректной интерпретации природы наблюдаемых магнитных аномалий твердых тел Солнечной системы (Луна, Марс...).

В настоящей работе отдельно рассмотрены магнитные свойства внеземного вещества и земных аналогов при воздействии (I) точно калибруемых статических давлений на примере гидростатики, (II) при ударных механических воздействиях и (III) при облучениях протонами и ионами свинца для лабораторного моделирования SEP и GCR, соответственно, а также ионами аргона для сравнения. (IV) В работе также показано, что удары и облучения могут потенциально приводить к такому физическому явлению, как самообращение намагниченности ферромагнетиков, представляющих собой основную магнитообразующую фракцию внеземного вещества и горных пород. Самообращением намагниченности называется явление намагничивания ферромагнитных минералов антипараллельно намагничивающему полю.

Методология В первой части работы использовался новый физический инструментарий: три специально разработанные компактные немагнитные композитные камеры высокого гидростатического давления (P) типа поршень-цилиндр, которые позволили поднять уро-

*E-mail: bezaeva@physics.msu.ru

вень P последовательно до 1.2 ГПа [1], 1.8 ГПа и 2 ГПа и измерять остаточную намагниченность образцов как при воздействии P , так и после декомпрессии при использовании криогенного (сквид) магнитометра производства *2G Enterprises*. Во второй части работы генерация ударных механических воздействий производилась мощными наносекундными лазерными импульсами [2] или детонационной волной в серии сферических ударных экспериментов. В третьей части работы протонная бомбардировка образцов была проведена с использованием ускорителя ARAMIS — части экспериментально-го комплекса JANNus (Орсэ, Франция) [3].

1. ВЛИЯНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЙ

Изучено поведение изотермической остаточной намагниченности насыщения SIRM марсианских метеоритов SNC (от англ. «Shergottite, Nakhlite, Chassignite» (Шерготтиты, Наклиты, Шассиньиты) — клан метеоритов предположительно с Марса). Обнаружено, что приложение гидростатических давлений до 1.2 ГПа в магнитном поле напряженностью < 5 мкТл при комнатной температуре к материалу марсианской коры приводит к необратимому размагничиванию SIRM образцов марсианских метеоритов на 6–23%. При этом степень размагничивания статическим давлением Δ излившихся на поверхность Fe_{1-x}S - и $(\text{Fe}_3\text{O}_4)_{1-x}(\text{Fe}_2\text{TiO}_4)_x$ -содержащих базальтов — шерготтитов (Δ_1) больше, чем Fe_3O_4 -содержащих глубинных пород — наклитов (Δ_2): $\Delta_1 \in [16; 23]\%$, $\Delta_2 = 6\%$. Размагничивание *in situ* глубоко залегающих пород в коре Марса незначительно и может быть оценено как ≤ 5 –15%. Принимая во внимание степень ударного метаморфизма метеоритов SNC (15–45 ГПа), естественная остаточная намагниченность NRM марсианских метеоритов не является первичной и, вероятно, была перемагничена в результате метеоритной бомбардировки марсианской поверхности. Более подробная информация изложена в [4].

Также изучено поведение остаточной намагниченности широкого спектра магнитных минералов как при воздействии гидростатических давлений, так и после декомпрессии. Приложение гидростатических давлений $P \in [1.2; 2.0]$ ГПа в нулевом магнитном поле (напряженностью < 5 мкТл) при комнатной температуре приводит к необратимому размагничиванию SIRM образцов до 84% в зависимости от доминирующего магнитного минерала (ДММ) и магнитной жесткости образца, количественно выражающейся через остаточную коэрцитивную силу B_{cr} (в мТл). После декомпрессии в зависимости от ДММ наблюдается три типа поведения остаточной намагниченности IRM_p : отсутствие изменений, дальнейшее уменьшение на δ до 7% от SIRM, то есть, $\text{IRM}_p - \delta$ или восстановление на δ до 19% от SIRM, то есть, $\text{IRM}_p + \delta$. В диапазоне $P \in [0; 1.2]$ ГПа обнаружена эмпирическая зависимость IRM_p от B_{cr} типа $\text{IRM}_p/\text{SIRM} = a \ln(B_{cr}) + b$,

причем a и b зависят от типа ДММ; в диапазоне $P \in [0; 1.8]$ ГПа для Fe–Ni-содержащих метеоритов — обыкновенных хондритов — такая зависимость имеет вид $\text{IRM}_p/\text{SIRM} = aB_{cr} + b$.

Вышеописанные физические эффекты изучены на обширном материале — более 60 образцов метеоритов, горных пород и диспергированных в оксидной смоле синтетических порошков разных фракций, характеризующихся широким спектром литологий [11], диапазоном значений $B_{cr} \in [4; >1000]$ мТл, и полным спектром наиболее типичных для внеземного вещества и горных пород магнитных минералов: металлическое железо Fe^0 и никелистое железо Fe–Ni — тэнит, тетратэнит, камасит, магнетит Fe_3O_4 , титаномагнетит $(\text{Fe}_3\text{O}_4)_{1-x}(\text{Fe}_2\text{TiO}_4)_x$, моноклинный пирротин Fe_7S_8 , гематит $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, гётит $\alpha\text{-FeOOH}$ и грейгит Fe_3S_4 . Измерения проведены с точностью 2.0×10^{-11} Ам² по магнитному моменту. Детали работы опубликованы в [5].

Использование аналогичного инструментария позволило изучить влияние гидростатических давлений до 1.61 ГПа на температуру перехода Морина T_M хорошо изученного образца горной породы, содержащей многодоменный гематит $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Изотермическая остаточная намагниченность, образованная под давлением в магнитном поле напряженностью 270 мТл, не восстанавливается после охлаждения образца от комнатной температуры T_0 до -30°C и последующего естественного нагрева от -30°C до T_0 . Зависимость эффекта памяти от давления составляет: $-10\%/ГПа$. T_M , определяемая по кривой нагрева, достигает комнатной температуры при воздействии гидростатических давлений 1.38–1.61 ГПа. Между T_M и P существует прямая линейная зависимость, при этом $dT_M/dP = (25 \pm 2)^\circ\text{C}/ГПа$. Результаты работы опубликованы в [6].

2. ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ УДАРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Изучены магнитные свойства ряда родственных образцов внеземного вещества и аналогов в исходном состоянии и подвергнутых механическому ударному воздействию в серии плоско-волновых и сферически симметричных ударно-взрывных экспериментов с диапазоном пиковых давлений механической ударной волны $P \in [0.1; >100]$ ГПа. Механические ударные воздействия могут приводить как к намагничиванию, так и размагничиванию вещества и/или изменению его магнитной жесткости (остаточной коэрцитивной силы B_{cr}).

Изучены процессы намагничивания вещества лунного грунта при прохождении ударной волны в контролируемом магнитном поле напряженностью $B \in [200; 400]$ мкТл. Ударная волна генерировалась в образцах лунных морских базальтов «Аполлон» (NASA) объемом ~ 1 см³ при облучении лазерными импульсами длительностью 30 нс, полученными в ре-

жиме модуляции добротности твердотельного лазера YAG Nd в диапазоне интенсивности $0.5 \div 4$ ГВт/см² на длине волны 1.064 мкм без разрушения образцов. Показано, что в присутствии магнитного поля напряженностью $B \in [200; 400]$ мкТл лунные морские базальты приобретают шоковую остаточную намагниченность SRM при ударном воздействии с достаточно низкими пиковыми давлениями: $P \in [0.1; 2]$ ГПа. SRM возрастает линейно с возрастанием B и P . Проведено сравнение величины полученной SRM лунных образцов с величиной пьезоостаточной намагниченности PRM тех же образцов, образованной при приложении давлений 0.9 ГПа и 1.8 ГПа в течение 60 с в диапазоне магнитных полей $B \in [800; 1800]$ мкТл, при котором выявлено качественное соответствие SRM своему статическому аналогу PRM. В первом приближении для типичных образцов лунного грунта, содержащих многодоменные зерна Fe-Ni, максимальное значение SRM при низкоинтенсивном ударном воздействии с пиковым $P < 10$ ГПа можно оценить как: $SRM_{\max} [Am^2/kg] = 1.2 \times 10^{-4} \times SIRM [Am^2/kg] \times B [mкТл]$. Таким образом, наблюдаемые коровые магнитные аномалии Луны с большой вероятностью образовались в результате низкоинтенсивной (<5–10 ГПа) метеоритной бомбардировки лунной поверхности [2].

Проведена серия сферических ударных экспериментов на метеоритах «Саратов» (обыкновенный хондрит), «Чинге» (железный метеорит, атаксит) и аналогах (базальт и диабаз Верхнего Озера, Канада, из областей, близких к импактной структуре «Slate Islands»). Пиковые давления механической ударной волны и ударно-индуцированные температуры включают сверхвысокий P - T диапазон и составляют $P \in [10; > 100]$ ГПа и $T \in [300; > 1200]$ °С. Ударно-индуцированные изменения магнитных свойств вещества обусловлены рядом сопряженных с ударным метаморфизмом физических процессов, а именно: механическое разрушение магнитных зерен в виде трещин и микротрещин, наведенные дефекты и дислокации в кристаллической решетке образцов, фазовые превращения в магнитных минералах, а также частичное или полное плавление вещества. В случае сверхвысоких P - T имеет место одновременное воздействие ударно-индуцированного нагрева и динамических давлений механической ударной волны (рис. 1).

При этом до сих пор оставалось неясным, каким образом эти два физических воздействия можно разделить. В настоящей работе предложена и апробирована методика разделения в механических ударных экспериментах последствий ударно-индуцированного нагрева и динамических давлений ударной волны при их одновременном воздействии на магнитные свойства метеоритов и аналогов, заключающаяся в проведении дополнительных экспериментов по нагреву исходного вещества в условиях с максимально возможной контролируемой скоростью нагрева V_n в вакууме от T_0 до T , достигаемых в ударных экспериментах в процес-

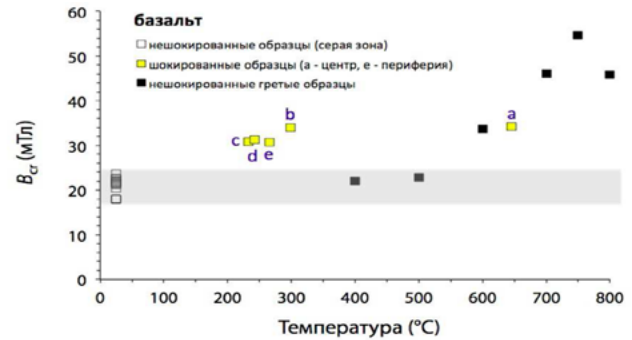


Рис. 1: Зависимость остаточной коэрцитивной силы B_{cr} от температуры для исходных, гретых и подвергнутых ударному воздействию после прохождения сферически сходящейся ударной волны образцов («a» и «e» — образцы из центра сферы и с периферии сферы, претерпевшие максимальные и минимальные P – T , соответственно)

се прохождения ударной волны, а также контролируемой скоростью охлаждения V_0 , сравнимой с V_0 вещества после прохождения ударной волны, и последующем сравнением изменения магнитных характеристик исследуемого вещества, в частности B_{cr} при нагреве и при прохождении ударной волны (рис. 1).

Таким образом была выявлена природа ударно-индуцированного изменения B_{cr} в трех случаях сферически-симметричного ударного-взрывного нагружения метеоритов и аналогов, заключающаяся в преимущественном воздействии механических повреждений ударной волны при увеличении B_{cr} и преимущественном воздействии ударно-индуцированного нагрева при уменьшении B_{cr} (которое может быть связано в том числе и с фазовыми превращениями в магнитных минералах [8]).

3. ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЙ

Гипотеза о возможном образовании остаточной намагниченности в результате протонной бомбардировки образцов была выдвинута и экспериментально проверена в работе [7]. Однако, автор работы получил отрицательный результат: никакой остаточной намагниченности в результате протонной бомбардировки не образовалось. В настоящей работе проведены радиационные эксперименты по облучению протонами с энергиями, приближающимися к нижней границе энергетического спектра протонов SEP, широкого ряда образцов метеоритов и аналогов (горных пород, синтетических порошковых образцов, равномерно диспергированных в эпоксидной смоле). При этом был обнаружен и экспериментально зарегистрирован новый тип остаточной намагниченности — радиационно-индуцированная остаточная намагниченность RIRM («Radiation-Induced Remanent Magnetization»), образовавшаяся в результате протонной бомбардировки метеоритов и аналогов

с энергиями протонов $E_1 = 400$ кэВ и $E_2 = 850$ кэВ и дозами облучения $\phi \in [1.2 \times 10^{14}; 10^{16}]$ p/cm² в магнитном поле напряженностью ~ 146 мкТл. Направление RIRM в большинстве случаев близко к направлению распространения пучка протонов, а величина RIRM составляет 3–12 % от изотермической остаточной намагниченности насыщения SIRM, включая 2–6 % предрадикационной остаточной намагниченности. Перед облучением SIRM образцов была размагничена переменным магнитным полем с амплитудой ~ 120 мТл.

Облучение ряда образцов метеоритов и аналогов протонами (лабораторное моделирование SEP), ионами аргона и ионами свинца (лабораторное моделирование GCR) привело к существенным изменениям ряда объемных магнитных свойств, и в частности магнитной жесткости (остаточной коэрцитивной силы B_{cr}) облученных образцов. При этом, в зависимости от доминирующих магнитных минералов образцов, наблюдался весь спектр изменений. В самом деле, для всех Fe⁰ и FeNi-содержащих образцов, облученных протонами и ионами свинца, наблюдалось значительное снижение магнитной жесткости (до 93 %). Такой эффект, вероятно, связан с радиационно-индуцированной аморфизацией или атомным разупорядочением металлических фаз. Некоторые магнетит-содержащие образцы демонстрировали обратный эффект увеличения магнитной жесткости, что наблюдалось и на образцах метеоритов группы HED в результате их облучения ионами аргона. Протонное и свинцово-ионное облучения не привели к изменению магнитной жесткости пирротин-содержащих образцов. Подобные эффекты следует ожидать вследствие воздействия космических лучей на внеземное вещество в космическом пространстве.

4. О ВОЗМОЖНОСТИ УДАРНО-ИНДУЦИРОВАННОГО И РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННОГО САМООБРАЩЕНИЯ НАМАГНИЧЕННОСТИ

В настоящей работе предложена теоретическая модель явления самообращения намагниченности ферромагнетиков, позволяющая проводить расчеты для однофазных и многофазных ферромагнитных систем (без учета взаимодействия фаз) как при отсутствии, так и с учетом диффузии магнитных ионов между подрешетками двухподрешеточного ферромагнетика. Обосновано, что термодиффузия магнитных ионов между ферромагнитными подрешетками может стать причиной как ударно-индуцированного,

так и радиационно-индуцированного самообращения намагниченности ферромагнетиков горных пород и внеземного вещества. Радиационно-индуцированное самообращение намагниченности может также наблюдаться и без изменения температуры за счет радиационно-индуцированной рекомбинации магнитных ионов и дефектов между подрешетками ферромагнетика, приводящими к изменению обменного взаимодействия внутри и между подрешетками и, как следствие, к самообращению намагниченности. Радиационно-индуцированное самообращение намагниченности наиболее вероятно обнаружить в образцах внеземного вещества, подвергшегося воздействию корпускулярных облучений в космическом пространстве, тогда как ударно-индуцированное самообращение намагниченности — в образцах внеземного вещества и с высокой степенью ударного метаморфизма или же в ударно-метаморфизированных образцах земных горных пород (например, в импактитах). Несмотря на то, что эффект полного самообращения намагниченности на образцах внеземного вещества до сих пор не был зарегистрирован экспериментально, вероятность обнаружения такого эффекта подтверждается ранее открытым эффектом частичного самообращения парциальной термоостаточной намагниченности образцов лунного грунта [9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вышесказанное позволяет сделать вывод о том, что совокупный эффект ударных воздействий и облучений внеземного вещества в космическом пространстве может оказывать существенное влияние на палеомагнитный сигнал и магнитные свойства внеземного вещества, что следует учитывать при интерпретации палеомагнетизма метеоритов и лунного грунта, а также наблюдаемых магнитных аномалий твердых тел Солнечной системы. Образцы внеземного вещества с минимальной степенью ударного метаморфизма являются наиболее пригодными для палеомагнитных определений. При этом внеземное вещество может потенциально обладать свойствами самообращения намагниченности.

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров

- [1] Sadykov R. A., Bezaeva N. S., Kharkovskiy A. I. et al. Review of Scientific Instruments. **79**. 115102. (2008).
[2] Gattacceca J., Boustie M., Hood L. et al. Earth and Planetary Science Letters. **299**(1–2), P. 42. (2010).

- [3] Bezaeva H. C., Гамтаччека Ж., Рошетт П. и др. Физика Земли. **51** (3). P. 18. (2015).
[4] Bezaeva N. S., Rochette P., Gattacceca J. et al. Geophysical Research Letters. **34**. L23202. (2007).

- [5] *Bezaeva N.S., Gattacceca J., Rochette P.* et al. Physics of the Earth and Planetary Interiors. **179**(1–2). P.7. (2010).
- [6] *Bezaeva N.S., Demory F., Rochette P.* et al. Geophysical Research Letters. **42** (23). P.10188. (2015).
- [7] *Rowe M. W.* Geochemical Journal. **12**. P.195. (1978).
- [8] *Bezaeva N.S., Badjukov D.D., Rochette P.* et al. Meteoritics and Planetary Science. **45** (6). P.1007. (2010).
- [9] *Pearce G.W., Hoyer G.S., Strangway D.W.* et al. Geochimica et Cosmochimica Acta. **40** (7). P.3171. (1976).
- [10] Помимо метеоритов и лунного грунта, внеземное вещество, доступное для прямого изучения в лаборатории, также включает микрометеориты, грунт астероида Итакава, возвращенный на землю в 2010г. японской миссией «Хаябуса», и кометное вещество, доставленное миссией «Стардаст».
- [11] Метеориты: обыкновенные хондриты, SNC (предположительно с Марса), румуртит или R-хондрит, железные метеориты. Земные горные породы: базальты, андезиты, игнимбриты, риолиты, радиоляриты, граниты, микродиорит, аспидный сланец, яшма, обсидианы, монокристаллы, осадочные породы. Диспергированные в эпоксидной смоле синтетические порошки Fe_3O_4 , Fe_7S_8 , $\alpha-Fe$, $\alpha-Fe_2O_3$.

Magnetic properties of extraterrestrial materials and their terrestrial analogues and their dependence on irradiation, temperature, shocks and static pressure

N. S. Bezaeva^{1,2}

¹*Earth Physics Department, Faculty of Physics,*

M.V.Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia

²*Institute of Geology and Petroleum Technologies, Kazan Federal University, 4/5 Kremlyovskaya Str., 420008, Kazan, Russia*
E-mail: bezaeva@physics.msu.ru

Extraterrestrial materials in space are subjected to shocks and particle radiation by cosmic rays. We present here the results of experimental investigations of hydrostatic pressure, shock and particle irradiation (by protons, argon and lead ions) effects on the magnetic properties of extraterrestrial materials — meteorites and lunar samples — and their terrestrial analogs. We also justify via numerical modeling a possibility and present a physical mechanism of shock-induced and irradiation-induced self-reversal of magnetization of ferrimagnets, which represent the major carrier of rock and meteorite magnetic properties.

PACS: 91.25.F; 96.30.Za; 96.12.Hg; 96.20.Jz

Keywords: extraterrestrial materials, magnetic properties, shocks, particle radiations.

Received 25.04.2016.

Сведения об авторе

Бецаева Наталья Сергеевна — канд. физ.-мат. наук, докторант; тел.: (495) 939–12–80, email: bezaeva@physics.msu.ru.